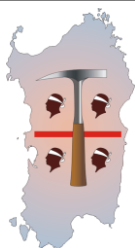


Polar srl

RICERCA DI GIACIMENTI DI BENTONITE PER LA CONCESSIONE MINERARIA DENOMINATA "RIO PALMAS"



Studio di Geologia Tecnica e Ambientale

Dott. Geol. Giancarlo Carboni

Via Nazionale 277

09039 Villacidro (VS)

Tel. 070 2332144 cell. 329 4177709

e-mail: info@geosardegna.it

www.geosardegna.it

IL GEOLOGO INCARICATO
Dott. Geol. Giancarlo CARBONI

IL COMMITTENTE:

POLAR SLR

STRADA STATALE 293 KM 63,2
09010 PISCINAS (SU)

OGGETTO:

STUDIO GEOFISICO MEDIANTE L'ESECUZIONE DI TOMOGRAFIE GEOELETTRICHE PER L'INDIVIDUAZIONE DI DEPOSITI BENTONITICI NELL'AMBITO DELLA CONCESSIONE MINERARIA DENOMINATA "CASA S'ALIDERRU"

Villacidro, li 04/11/2020

INDICE

1	Premessa	1
2	Finalità del lavoro	1
3	Generalità sull'Indagine Geofisica.....	1
3.1	Misura di resistività del sottosuolo	2
3.2	La resistività elettrica	3
4	Inquadramento geologico	4
4.1	Il giacimento di bentonite	5
5	Indagine geoelettrica: aspetti generali.....	5
5.1	Resistività apparente.....	7
5.1.1	Dispositivi elettrodi.....	7
5.1.1.1	Indagine geoelettrica con configurazione dipolare.....	8
5.1.1.2	Indagine geoelettrica con configurazione quadripolare	9
5.2	Modelli di resistività 2D.....	10
5.3	Strumentazione utilizzata	11
5.4	Operazioni di campagna.....	13
5.5	Posizionamento dei rilievi geoelettrici.....	14
6	Repertorio fotografico dei rilievi geoelettrici	16
7	Analisi delle pseudosezioni.....	17
7.1	Profilo TG1.....	19
7.2	Profilo TG2.....	19
8	Conclusioni	20



1 PREMESSA

Su incarico conferito nel mese di settembre 2020 dalla Società Polar Srl con sede presso S.S. 293 km 63,2 in agro di Piscinas (SU) allo scrivente, Dott. Geol. Giancarlo Carboni, C.F. CRBGCR67M30L924H, con Studio Tecnico in Villacidro, via Nazionale n° 277, iscritto all'Ordine dei Geologi della Sardegna con il n° 497 è stata realizzata una indagine geofisica con metodi della tomografia geoelettrica, allo scopo di determinare l'assetto stratigrafico di un giacimento di bentonite all'interno della Concessione Mineraria denominata "Rio Palmas" in agro del Comune di Giba.

2 FINALITÀ DEL LAVORO

Il presente lavoro ha l'obiettivo di valutare la geometria del giacimento e determinare, almeno in prima approssimazione i settori più promettenti al fine di una pianificazione di una campagna di ricerca mineraria mediante sondaggi geognostici.

A tale scopo sono stati eseguiti 2 rilievi geoelettrici eseguiti tra il 23 settembre 2020 e il 09 ottobre 2020, disposti in modo tale da coprire l'area interessata dalla ricerca per una profondità compresa tra i 50 e i 60 m. Tutte le indagini geoelettriche sono state supportate da rilievi GPS utilizzando come riferimenti i punti essenziali di ogni stendimento.

Nella presente relazione, dopo una presentazione dei metodi geoelettrici utilizzati, viene inquadrato l'assetto stratigrafico dell'area dedicando particolare attenzione ai settori caratterizzati da valori di resistività tipici delle argille bentonitiche. I rilievi sono stati posizionati su una base cartografica georeferenziata secondo il sistema WGS84 e su ortofoto aerea per una localizzazione di dettaglio dei profili geoelettrici. I modelli di resistività sono stati riportati assieme ai loro dettagli tecnici ed interpretati in chiave geologica.

Si segnala che la resistività è una proprietà fisica dei materiali che non è in grado di identificare in modo univoco la natura del materiale stesso; la resistività dei suoli e delle rocce dipende fortemente dal loro contenuto idrico, dalla presenza di minerali nonché dalla loro permeabilità. Per questa ragione la stessa tipologia di roccia può avere variazioni dei valori di resistività molto ampi, motivo per cui la lettura delle tomografie non può prescindere pertanto dalla conoscenza del contesto geologico, morfologico e geografico dell'area.

3 GENERALITÀ SULL'INDAGINE GEOFISICA

La caratterizzazione stratigrafica dei terreni può risultare alquanto complessa, soprattutto se le aree da investigare sono piuttosto estese e difficilmente praticabili con i tradizionali mezzi di indagine geognostica. Infatti, l'eterogeneità e la complessità dell'assetto stratigrafico locale comporterebbe spesso



l'esecuzione di un elevato numero di rilievi geognostici, dal momento che l'informazione che essi forniscono è del tutto puntuale. La delimitazione delle aree su cui concentrare rilievi specifici rappresenta, quindi, un passaggio necessario per l'ottimizzazione della ricerca. I metodi geofisici sono in grado di fornire una rappresentazione globale dei volumi sepolti in termini di distribuzione verticale e laterale dei parametri fisici che caratterizzano le aree da investigare. In tal modo il numero delle indagini può essere notevolmente ridotto e concentrato in aree indicate dall'indagine geofisica o laddove è necessario acquisire informazioni di maggior dettaglio.

3.1 Misura di resistività del sottosuolo

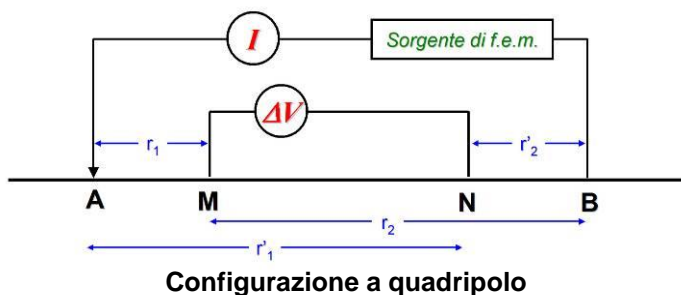
Il metodo della resistività si basa sull'immissione artificiale nel terreno di una determinata quantità di corrente continua attraverso 2 elettrodi in contatto con il terreno e collegati ad un generatore. Misurando la differenza di potenziale ai capi di un'altra coppia di elettrodi è possibile conoscere la resistività apparente del mezzo.

L'andamento del flusso di corrente viene determinato misurando le differenze di potenziale in diversi punti sulla superficie del terreno. Per un mezzo omogeneo ed isotropo, nota la corrente I (misurata in Ampere) e misurata la differenza di potenziale ΔV (misurata in Volt), attraverso la Legge di Ohm è possibile ricavare i valori di resistività apparente, utilizzando la relazione:

$$\Delta V = \rho \frac{1}{k} I$$

dove con ρ si indica la resistività ($\Omega \text{ m}$) e con k il fattore geometrico (m), che dipende dalla posizione reciproca degli elettrodi. Poiché il terreno non è un mezzo omogeneo ed isotropo ciò che viene ricavata è detta resistività apparente.

Per le misure di resistività elettrica si utilizza uno strumento multielettrodico, il georesistivimetro, in grado di energizzare il terreno attraverso due elettrodi di corrente A e B e misurare la differenza di potenziale ai capi di altri due elettrodi M e N: questa configurazione è detta quadripolo.

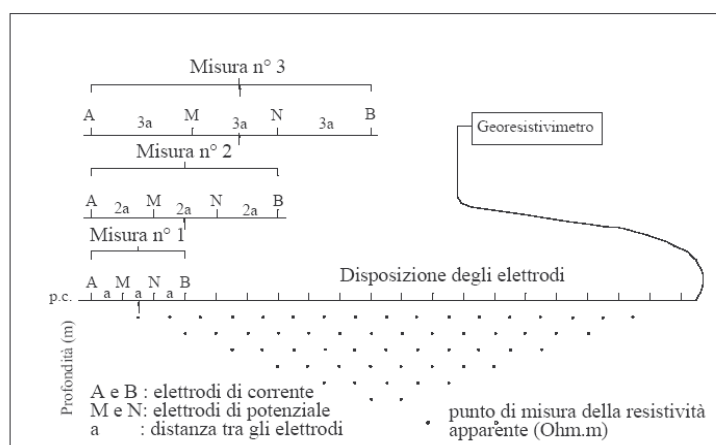


Con questa configurazione, nel caso di mezzo omogeneo ed isotropo il fattore k è:



$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r'_1} + \frac{1}{r'_2}\right)}$$

Variando la posizione delle coppie di elettrodi di corrente e di potenziale si realizza un'indagine che permette di caratterizzare le proprietà elettriche del sottosuolo a diverse profondità e con differenti risoluzioni spaziali. Per evitare continui riposizionamenti degli elettrodi, i moderni strumenti, come quello utilizzato durante il rilievo in questione, consentono di gestire l'energizzazione e l'acquisizione mediante stendimenti multielettrodo.



Stendimento multielettrodo

La profondità di investigazione dipende dalla lunghezza complessiva dello stendimento, mentre la risoluzione spaziale orizzontale dipende dalla distanza relativa degli elettrodi. Stendimenti più lunghi sono spesso legati a distanze tra gli elettrodi più ampie: la profondità cresce, ma la risoluzione dell'indagine diminuisce.

3.2 La resistività elettrica

Come visto nel paragrafo precedente l'obiettivo dell'indagine è la ricostruzione di modelli di resistività del sottosuolo partendo da misure di resistività apparente. Oltre alle inevitabili anisotropie e disomogeneità del terreno, che impediscono una ricostruzione univoca del modello geometrico, è necessario ricordare che la resistività dipende da diversi fattori quali porosità, presenza di fluidi, composizione mineralogica, grado di fratturazione, grado di saturazione nonché presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, etc.). In particolare, la resistività delle rocce è sempre maggiore a quella dell'acqua nei pori, è minima in corrispondenza del grado di saturazione massimo ed è tanto minore quanto maggiore è la porosità. Tutti questi elementi contribuiscono ad una grande variabilità di valori anche per singole classi di rocce o terreni.



Tabella 12.1 Resistività di alcune rocce minerali

Rocce, minerali, minerali metallici	Resistività (ohm·m)
Sedimentarie	
calcare chalk	50-150*
argilla	1-100
ghiaia	100-5000
calcare	50-10 ⁷
marna	1-100
quarzite	10-10 ⁸
argilla (shale)	10-1000
sabbia	500-5000
arenaria	1-10 ⁵
Ignee e metamorfiche	
basalto	10-10 ⁷
gabbro	1000-10 ⁶
granito	100-10 ⁶
marmo	100-10 ⁸
scisto	10-10 ⁴
ardesia	100-10 ⁷
Minerali e minerali metallici	
argento	1,6 × 10 ⁻⁸
grafite (giacimento massivo)	10-4-10 ⁻³
galena (Pbs)	10 ⁻³ -10 ²
magnetite di giacimento	1-10 ⁵
sfalerite (ZnS)	10 ³ -10 ⁶
pirite	1 × 100
calcopirite	1 × 10 ⁻⁵ -0,3
quarzo	10 ¹⁰ -2 × 10 ¹⁴
salgemma	10-10 ¹³
Acque ed effetto del contenuto in sale	
acqua pura	1 × 10 ⁶
acque naturali	1-10 ³
acqua di mare	0,2
sale 20%	5 × 10 ⁻²
granito, 0% di acqua	10 ¹⁰
granito, 0,19% di acqua	1 × 10 ⁶
granito, 0,31% di acqua	4 × 10 ³

* I valori e gli intervalli, che sono tratti da varie fonti, sono soltanto approssimativi.

Resistività di rocce e terreni. Campi di variazione indicativi (A.E. Musset, M. A. Khan, Esplorazione del Sottosuolo: una introduzione alla geofisica applicata, 2003, Ed. Zanichelli).

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La bentonite oggetto del presente studio si rinviene in agro del comune di Piscinas (CI) in concessione alla Società Polar S.r.l., in un settore della Sardegna sud occidentale a nord del citato centro abitato del comune di Piscinas e a nord est di quello di Giba.

Il giacimento si inserisce in un contesto geologico caratterizzato dalla diffusa presenza di vulcaniti basaltico-andesitiche di natura piroclastica e lavica nel graben terziario di Carbonia-Narcao, avente dimensioni di 15 km di lunghezza per una larghezza di 10 km. Le rocce paleozoiche costituiscono il pilastro tettonico settentrionale, mentre il pilastro tettonico meridionale è costituito sempre da rocce paleozoiche oltre che da rocce carbonatiche mesozoiche e da sedimenti terrigeni della formazione del Cixerri.

Il graben è stato colmato da prodotti miocenici vulcanici e, successivamente, dai materiali derivanti dal loro parziale smantellamento.



Il vulcanismo terziario è costituito dal basso verso l'alto da una successione di basalti andesitici e andesiti e superiormente da una sequenza ignimbratica di circa 500 metri, con chimismo variabile da dacitico a riolitico sino a comenditico (Assorgia 1990).

Nella zona di Monte Perda Morta, sempre dall'alto verso il basso, si evidenziano:

- ignimbriti riolitiche saldate con accentuata porfiricità;
- ignimbriti riolitiche in potenti bancate e in più unità di flusso, porfiriche, che affiorano anche nella piana circostante;
- banco di bentonite;
- depositi continentali conglomeratici a clasti prevalentemente di rocce carbonatiche mesozoiche e rari di andesiti.

Nella zona rivolta a sud, alla base dell'alto morfologico, si ha una copertura formata da depositi alluvionali attuali di natura sabbioso-argillosa- conglomeratica.

4.1 Il giacimento di bentonite

La mineralizzazione ha interessato le cineriti oligo-mioceniche delle coltri ignimbratiche, le quali hanno generalmente colmato, depressioni e concavità di varia origine, presenti nel substrato.

I tufi intercalati sono in genere cineritici, di colore biancastro, localmente verdastro per la presenza di glauconite e celadonite.

Dal punto di vista mineralogico le bentoniti del giacimento in studio sono costituite da montmorillonite per circa il 60 %, oltre al calcio, possono essere presenti, in quantità variabili, anche il sodio, il magnesio, il manganese e il titanio.

Le impurità sono generalmente rappresentate da ossidi di ferro e dal carbonato di calcio, oltre che dalla presenza di piccoli residui micacei e quantità variabili di sabbia.

5 INDAGINE GEOELETTRICA: ASPETTI GENERALI

La geoelettrica si basa sul principio che le rocce e i terreni sono conduttrici di elettricità, e tale capacità di condurre corrente varia a seconda del tipo di roccia e terreno, delle sue condizioni (alterazione, fessurazione, porosità, ecc.), del suo contenuto d'acqua, del contenuto di minerali come solfuri e ossidi, dal grado di salinità dell'acqua contenuta nei pori.

Perché l'indagine geoelettrica permette di ricostruire un modello interpretativo del sottosuolo, si può avere attraverso un utilizzo mirato della stessa una stima della stratigrafia a piccola, media e grande profondità e per la ricerca di accumuli idrici o di altri liquidi sotterranei.



Nell'ambito delle metodologie geofisiche correntemente utilizzate per l'esplorazione del sottosuolo, un notevole contributo è dato dalle prospezioni di tipo geoelettrico. La prospezione geoelettrica consiste nella determinazione sperimentale del parametro della resistività apparente, attraverso misure congiunte di intensità di corrente elettrica inviata nel sottosuolo mediante una coppia di elettrodi infissi nel terreno, e di tensione ai capi di una seconda coppia di elettrodi, anch'essi in contatto diretto col suolo.

L'analisi del comportamento della resistività apparente, al mutare della dimensione e posizione del dispositivo elettrodico di misura, permette di evidenziare efficacemente i contrasti di resistività esistenti nel sottosuolo, nell'ambito dei volumi investigati, fornendo così informazioni sulla presenza di discontinuità strutturali (faglie, superfici di scorrimento, etc.), sulla presenza ed andamento nel sottosuolo delle falde acquifere e sull'individuazione di fenomeni di inquinamento delle falde e dei suoli.

Il metodo geoelettrico risulta, infatti, tra i più idonei per l'individuazione e la definizione di falde, in quanto le caratteristiche elettriche del sottosuolo sono fortemente influenzate dalla presenza di acqua nei pori del terreno.

In questo lavoro si presenta una tipologia d'approccio utilizzata per l'analisi dei dati ottenuti con il metodo geoelettrico. Di fatto esso rappresenta una metodologia di ricognizione capace di individuare la distribuzione più probabile di anomalie di resistività, visualizzando la geometria dei corpi sepolti all'interno del volume del sottosuolo esplorato.

Tale approccio si differenzia da quelli adottati nei metodi classici d'inversione, i quali, basandosi sul procedimento della deconvoluzione dei minimi quadrati, operano un confronto tra il modello del sottosuolo ottenuto sperimentalmente ed un modello teorico, attraverso test di bontà del confronto. Ciò implica, però, l'assegnazione a priori di alcuni parametri da parte dello sperimentatore, per interpretare il problema geofisico.

Il metodo d'inversione tomografica qui utilizzato si svincola da questa procedura, utilizzando un algoritmo che è completamente indipendente dai parametri introdotti a priori.

Il lavoro di ricerca realizzato in questo lavoro si sviluppa nel seguente modo:

1. *Pianificazione delle operazioni di campagna, definendo le tecniche di acquisizione dei dati di resistività apparente lungo il profilo scelto, e le tecniche utilizzate per l'abbattimento del rumore sul segnale utile.*
2. *Presentazione del risultato dell'analisi dei dati sottoposti ad una valutazione comparativa attraverso il tracciamento di una famiglia di isolinee di resistività apparente. Tale rappresentazione di fatto viene definita come una pseudosezione di resistività del sottosuolo lungo il profilo scelto.*
3. *Il metodo d'interpretazione sopra citato, viene applicato ai dati ottenuti con l'intento di individuare e definire la stratigrafia locale.*



5.1 Resistività apparente

Definiamo ora un concetto d'importanza fondamentale nella prospezione elettrica del sottosuolo, ovvero il concetto di “resistività apparente”.

Nel caso di un semispazio omogeneo ed isotropo di resistività ρ , abbiamo precedentemente visto come, mediante misure di intensità di corrente fluente nel sottosuolo dall'elettrodo A a quello B, e misure di differenza di potenziale ai capi degli elettrodi M e N, è possibile determinare la resistività del sottosuolo con la seguente formula:

$$\rho = K_g \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

essendo K_g il fattore geometrico del dispositivo utilizzato.

La possibilità di operare su un semispazio omogeneo è piuttosto rara. Nella realtà il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di superfici di discontinuità lungo le quali si hanno brusche variazioni della resistività.

Se effettuiamo misure di distanze fra gli elettrodi, di corrente I e di differenze di potenziale allo stesso modo in cui le effettuiamo nel caso del sottosuolo omogeneo, il risultato che otterremo sarà un valore di “resistività fittizia” definita anche “pseudoresistività”.

In generale tale valore dipenderà dalle resistività reali appena citate, e dalle distanze interelettrodiche. Il valore di resistività fittizia che si ottiene non deve essere considerato né una media aritmetica, né ponderata delle tre resistività vere presenti nel sottosuolo, dato che può accadere che essa assuma un valore addirittura maggiore o minore di tutte e tre le resistività reali.

La resistività fittizia ρ_a , ottenuta applicando ad un sottosuolo eterogeneo l'espressione corrispondente al semispazio omogeneo, è detta “resistività apparente”. Essa è usualmente definita, per un semispazio disomogeneo, come la resistività di un ipotetico sottosuolo omogeneo ed isotropo sulla cui superficie, a parità di dispositivo elettrodico e d'intensità di corrente, si misura una differenza di potenziale uguale a quella del mezzo disomogeneo.

Quindi la resistività apparente è la variabile sperimentale che si ottiene dalle misure effettuate con il metodo geoelettrico, e che si utilizza nel processo di interpretazione.

5.1.1 Dispositivi elettrodici

Esistono diversi tipi di dispositivi elettrodici, ognuno caratterizzato da una diversa disposizione degli elettrodi sul terreno, di seguito si dà una sintetica descrizione della disposizione utilizzata.

5.1.1.1 Indagine geoelettrica con configurazione dipolare

I dispositivi elettrodi *dipolari* costituiscono una famiglia di dispositivi molto importante, caratterizzata dal fatto che in essi gli elettrodi di corrente A e B, sono fra loro molto ravvicinati rispetto alla distanza alla quale si valutano i loro effetti, tanto da potersi considerare come un dipolo. La valutazione degli effetti del dipolo di corrente AB viene effettuata tramite un secondo dipolo MN, detto di tensione.

In particolare, il dispositivo dipolare che è stato utilizzato per l'indagine geoelettrica oggetto della presente indagine è il *dipolo-dipolo* detto anche *dipolare assiale*.

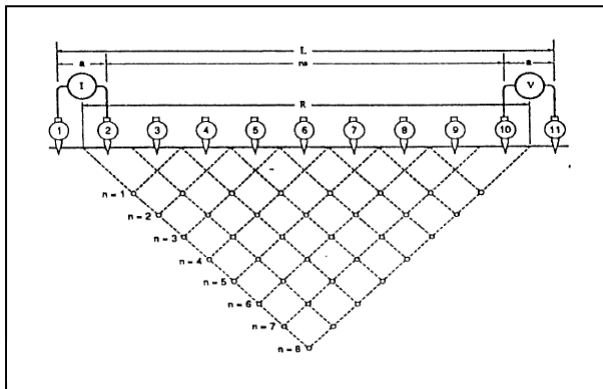
In questo tipo di dispositivo i due dipoli, di corrente e di misura, giacciono entrambi sulla retta congiungente i loro centri.

La tecnica della geoelettrica *dipolare di superficie*, consiste nella realizzazione di un'immagine 2D di estremo dettaglio del comportamento areale della resistività elettrica lungo il piano della sezione verticale passante per i profili scelti per la prospezione.

La notevole risoluzione fornita da tale tecnica permette di discriminare molto più efficacemente i contrasti di resistività esistenti nel sottosuolo. In particolar modo, il metodo geoelettrico risulta tra i più idonei per l'individuazione e la definizione delle acque eventualmente presenti nei suoli e nelle falde, in quanto le caratteristiche elettriche del sottosuolo sono fortemente influenzate dalla sua presenza.

Il procedimento di campagna per la realizzazione d'una pseudo-sezione con la tecnica dipolare as-

siale è mostrato schematicamente nella figura:



Attraverso i due elettrodi di corrente contigui A e B, posti ad una distanza "a" l'uno dall'altro, si immette una corrente elettrica di intensità nota nel sottosuolo. La misura di tensione, creata dal flusso di corrente, è effettuata mediante il dipolo di tensione, in linea con il precedente, anch'esso caratterizzato da due elettrodi contigui, M e N, distanziati di nuovo

"a" l'uno dall'altro. La distanza tra gli elettrodi di corrente e di potenziale più vicini tra loro, precisamente B ed M, è regolata in maniera tale da risultare un numero intero n di volte la distanza dipolare "a".

La procedura tomografica di campagna consiste nell'eseguire vari transetti lungo il tracciato, ciascuno dei quali corrisponde ad un'assegnata posizione di uno dei due dipoli lungo il profilo, che viene mantenuto fisso, mentre l'altro dipolo si allontana progressivamente da questo lungo il medesimo profilo, assegnando valori crescenti ad n (1, 2,N).

La rappresentazione più adeguata dell'insieme di tutti i risultati conseguiti consiste nell'attribuire ciascun valore di resistività apparente al punto di intersezione tra due linee oblique, convergenti verso il basso, spiccate con un'angolazione di 45° dai centri dei due dipoli, ubicati nelle posizioni cui competono



le misure di corrente e di tensione dalle quali nasce il valore di resistività apparente in considerazione. Risulta evidente che all'incrementare di n , aumenta la distanza R tra i centri dei due dipoli e, di conseguenza, la profondità a cui si riferisce la misura.

Le resistività apparenti, distribuite nei punti della griglia che si viene a formare come conseguenza delle diverse disposizioni mutue dei due dipoli, vengono successivamente sottoposte ad una valutazione comparativa, che si concretizza nel tracciamento di una famiglia di isolinee di resistività apparente. Il quadro d'insieme che ne deriva, ulteriormente rifinito con l'uso di una scala di colori o di grigi o con altri mezzi di contrasto tra settori contigui, rappresenta di fatto una *pseudo-sezione* del sottosuolo lungo il profilo scelto.

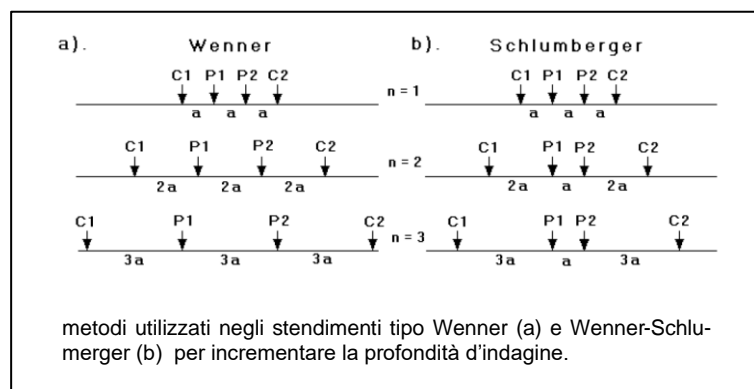
La massima profondità di indagine che si raggiunge con l'uso di questa tecnica è teoricamente pari alla metà della massima distanza raggiunta tra i due dipoli lungo il profilo scelto. In realtà, questo discorso risulta valido solo se il sottosuolo nell'area di indagine è elettricamente omogeneo in modo da supporre regolare e semisferica la distribuzione delle linee di corrente. Poiché in generale il sottosuolo è tutt'altro che omogeneo (presentando eterogeneità sia verticali che laterali di ρ la reale profondità di investigazione raggiunta risulterà essere diversa da quella teorica; da cui i termini di pseudo-sezione, pseudo-profondità e pseudo-resistività (o resistività apparente).

5.1.1.2 Indagine geoelettrica con configurazione quadripolare

In aree con spazi aperti limitati per l'esecuzione di lunghe linee di sedimento, la disposizione convenzionale di Wenner ha lo svantaggio di comportare una forte riduzione della copertura laterale quando la spaziatura degli elettrodi viene incrementata per aumentare la profondità d'indagine. Per esempio, per raddoppiare la profondità di indagine, la spaziatura a degli elettrodi deve essere portata a $2a$ (vedi figura sotto). In questo caso, la lunghezza totale dello stendimento viene incrementata da $3a$ a $6a$. Contemporaneamente, la larghezza della pseudosezione diminuisce di $3a$ per ogni livello di misura. Al confronto, la larghezza della pseudosezione diminuisce di $2a$ per lo stendimento Wenner-Schlumberger.

La resistività apparente per la disposizione elettrodica Wenner-Schlumberger è data da

$$\rho = \pi i \cdot n(n+1) \cdot a \cdot R$$

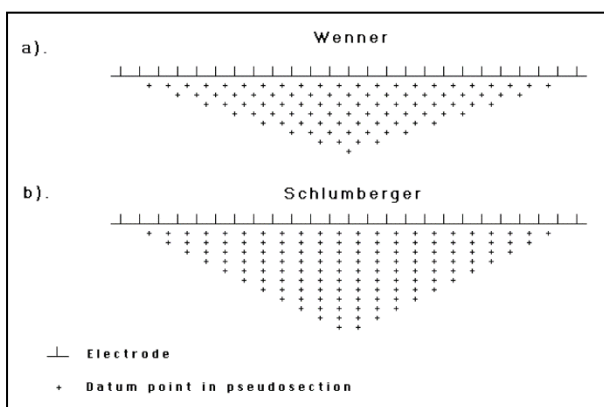


dove R è la resistività misurata, a è la spaziatura tra gli elettrodi P1 e P2 ed n è il rapporto della distanza tra gli elettrodi C1-P1 e P1-P2. Questa disposizione diventa effettivamente di tipo Schlumberger quando il fattore n è maggiore di 2. Perciò è al momento una combinazione della disposizione Wenner e Schlumberger adattato per l'uso con una disposizione con una linea di elettrodi con spaziatura costante (come viene normalmente utilizzata nella tomografia elettrica). Inoltre questo stendimento presenta una migliore copertura orizzontale e una profondità di penetrazione maggiore del 15% rispetto allo stendimento Wenner.

In pratica, dal momento che il potenziale tra gli elettrodi P1 e P2 decresce all'incremento del fattore n , il massimo valore di n usato nelle ricerche sul campo è circa 8. Per incrementare la profondità di inve-

stigazione, la spaziatura tra gli elettrodi P1-P2 viene incrementata di $2a$ e le misurazioni sono ripetute per n pari a 1, 2, 3, 4, 5, e 6. In seguito, la spaziatura tra P1-P2 viene incrementata di $3a$, e si esegue la stessa sequenza di misure.

Un vantaggio dello stendimento Wenner normale è il suo elevato rapporto segnale-disturbo rispetto alle altre tradizionali disposizioni elettroniche.



Tale disposizione è da preferire in quelle aree caratterizzate da un segnale elettrico con un disturbo piuttosto elevato.

5.2 Modelli di resistività 2D

Un sondaggio elettrico 2D è un'indagine bidimensionale che permette lo studio delle variazioni di resistività sia lungo la direzione verticale che lungo una direzione orizzontale. Con le configurazioni dell'array precedentemente descritte è possibile compiere misure di resistività apparente dalle quali, attraverso un processo di inversione, si deduce una sezione di resistività 2D (tomografia elettrica) del sottosuolo.

Oltre a permettere lo studio di strutture geometricamente complesse ed articolate, questo tipo di indagine può essere applicato anche in presenza di irregolari morfologie del terreno; ovviamente l'attendibilità del risultato dipende anche dalla conoscenza dell'andamento topografico della zona indagata.

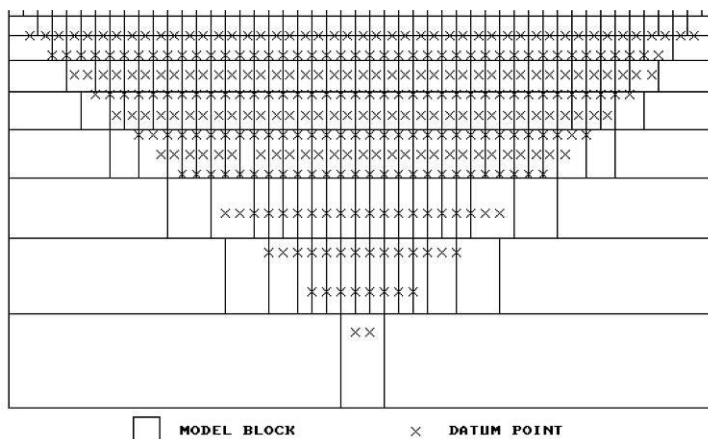
Per l'inversione dei dati geoelettrici acquisiti in campagna è stato utilizzato il software Res2Dinv (Geotomo Software). Il processo di inversione ha la prerogativa di cercare di individuare un modello geometrico del sottosuolo che sia compatibile con le misure raccolte. Il software Res2Dinv utilizza un metodo di inversione basato sui minimi quadrati che permette di determinare un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo (pseudosezione).



Il punto di partenza per il processo di inversione sono i dati acquisiti in campagna ed opportunamente formattati per essere letti dal software (.dat). In base alle condizioni ambientali in cui si è svolta la fase di acquisizione, è possibile un'attenta calibrazione del modello teorico attraverso la configurazione di diversi parametri. Il software attraverso una serie di iterazioni successive mira a ridurre la differenza tra i valori di resistività apparente misurati e quelli calcolati dal modello teorico.

Il modello di riferimento utilizzato dal software è basato su una suddivisione a blocchi in cui la dimensione e la posizione delle celle è fissa. I parametri del modello sono i valori delle celle, mentre i dati sono i valori di resistività misurati. Nell'inversione ad ogni cella viene assegnato un valore di resistività (calcolato) ottenuto invertendo i valori di resistività misurati.

I risultati ottenuti dalle inversioni sono delle tomografie elettriche che rappresentano modelli di resistività del sottosuolo ad alta risoluzione, il cui errore, rispetto alle misure compiute, è segnalato dal parametro RMS (Root Mean Square error).



Suddivisione a blocchi su cui è basato il modello di riferimento utilizzato dal software di inversione Res2Dinv.

5.3 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione delle misure geoelettriche di cui si discute è stato utilizzato un georesistivimetro monocanale realizzato dalla ditta GF Instruments mod. ARES G4, alimentato con batteria al piombo ricaricabile. Questo strumento è stato progettato per effettuare una serie completa di stendimenti geoelettrici: sondaggi elettrici verticali, profili di resistività, misure multi-elettrodo per tomografie elettriche 2D e 3D, misure di polarizzazione indotta e di potenziali spontanei.

Esso è costituito dall'apparato di energizzazione (immette corrente nel terreno attraverso gli elettrodi A e B), e dall'apparato di ricezione (misura la differenza di potenziale tra gli elettrodi di tensione M e N); racchiude, infatti, tre unità principali: *trasmettitore*, *ricevitore* e *microprocessore*.



Il trasmettitore, isolato elettricamente, è costituito da un generatore di tensione in continua, provvisto di commutatore automatico della polarità, per l'invio nel sottosuolo, tramite gli elettrodi del dipolo energizzante, di un flusso di corrente continua la cui intensità può variare fino a raggiungere un'intensità massima di 2.0 A ed un voltaggio compreso tra 10 e 550 V con una potenza massima di 300 W.

L'Ares G4 viene collegato ad un commutatore con cui è possibile programmare la gestione automatica degli elettrodi dello stendimento, ottenendo un elevato numero di combinazioni tra gli elettrodi nonché un notevole risparmio di tempo.

Al cavo multielettrodico del georesistivimetro sono collegati contemporaneamente tutti gli elettrodi attraverso appositi connettori. In base all'array prescelto, l'unità switch (commutatore) seleziona le coppie di elettrodi da energizzare.

La durata della fase di energizzazione, ossia di immissione di corrente nel terreno, è stata determinata nel corso della misura in base al rapporto segnale-rumore caratteristico del sito. *Il ricevitore* è costituito da un millivoltmetro digitale collegato a un *microprocessore*, che memorizza i valori di tensione ai capi degli elettrodi del dipolo di misura con un passo di campionamento regolare e tale da rientrare un numero intero di volte nel ciclo completo di un'onda di corrente. Alla fine di ogni ciclo, inoltre, un software di esercizio fornisce il valore della resistenza (visualizzato su un display digitale in Ohm·m) come rapporto tra la media di tutte le stime della tensione di picco, riferite ai cicli di corrente via via susseguitisi, e l'intensità della corrente preselezionata.

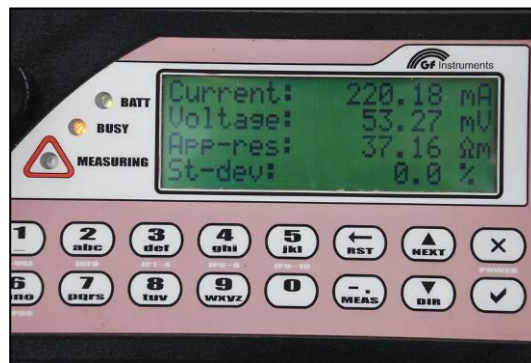
È opportuno qui evidenziare che la procedura computerizzata appena descritta, detta *stacking* mira ad isolare il segnale utile di tensione, ovvero il segnale direttamente collegato alla corrente di energizzazione, mediante il processo di rimozione immediata del fattore di disturbo stazionario (generato da fenomeni di polarizzazione spontanea), e di abbattimento progressivo di quello casuale (provocato da sorgenti naturali e/o artificiali spurie di vario genere).

Il primo obiettivo si raggiunge facilmente grazie all'inversione della polarità del flusso di corrente continua nel sottosuolo, cioè mediante l'invio di onde quadre di corrente.

Il secondo obiettivo, invece, viene raggiunto tramite quella proprietà dei processi stocastici che afferma che la somma di m elementi di un rumore casuale comunque selezionati ne attenua la portata rispetto ad un segnale coerente di un fattore pari alla radice quadrata di m . La scelta del numero di cicli da utilizzare è legata all'entità del disturbo: quanto più esso è forte tanto maggiore deve essere il numero di cicli. Lo strumento utilizzato è dotato di un software interno che regola automaticamente il numero di cicli di misura sulla base delle impostazioni dell'operatore, finché non viene raggiunto un segnale ottimale.



Strumento di misura Ares G4



Particolare del display



Connessione tra cavi multipolari ed elettrodi



Connessione tra le sezioni di cavi multipolari

5.4 Operazioni di campagna

La campagna di misure è stata preceduta da un sopralluogo di dettaglio nell'area di interesse, al fine di definire precisamente l'ubicazione dei profili lungo cui effettuare le tomografie geoelettriche.

Lo scopo principale era quello di individuare la presenza e la distribuzione dei depositi bentonitici, che si rinvenivano anche a diverse decine di metri di profondità. Per tale scopo l'indagine si è basata su uno stendimento di 48 elettrodi utilizzati per l'energizzazione-lettura disposti con un intervallo regolare di 5.5 m, per uno stendimento complessivo di 258.5 m.

Poiché i substrati argillosi tendono ad assorbire e quindi dissipano il segnale elettrico, si è deciso di eseguire i rilievi utilizzando sia la configurazione dipolare dipolo-dipolo che la quadripolare di Schlumberger. La prima infatti ha il vantaggio di un maggior dettaglio, ma è poco sensibile man mano che il segnale elettrico raggiunge elevate profondità, mentre la seconda pur avendo una minore sensibilità orizzontale, riesce a mantenere un adeguato dettaglio d'indagine in verticale. La combinazione di queste due metodologie di acquisizione consente un buon compromesso tra la ricerca del dettaglio orizzontale e verticale.

5.5 Posizionamento dei rilievi geoelettrici

Qui di seguito vengono descritti i metodi, gli strumenti ed i risultati dei rilievi topografici necessari per il corretto posizionamento degli stendimenti geoelettrici sulla base cartografica 1:10000 e del rilievo planoaltimetrico a disposizione.

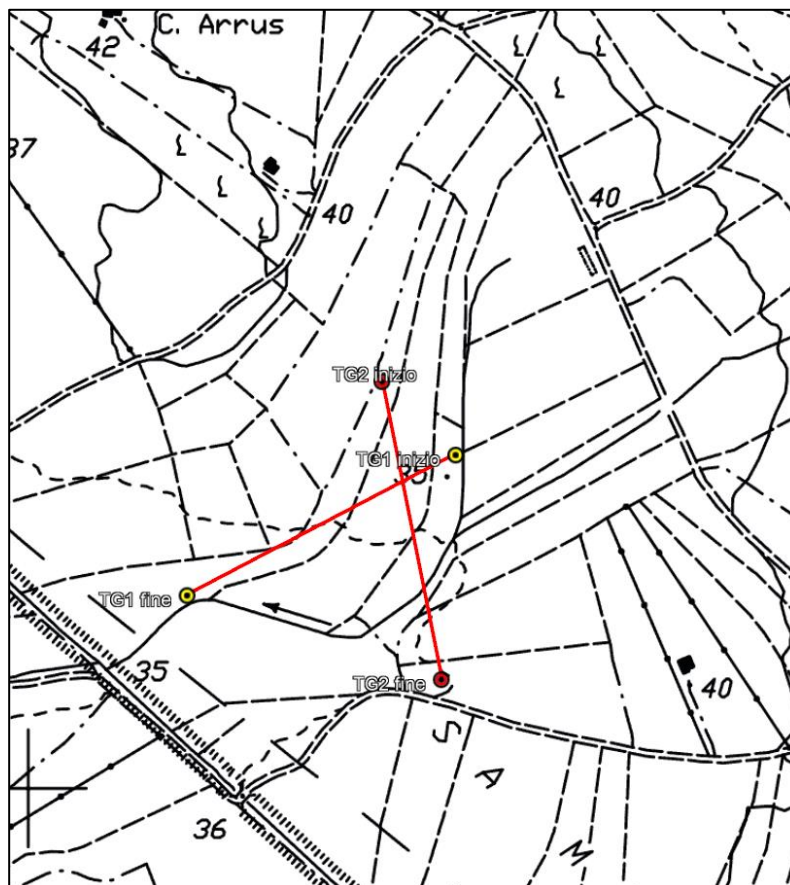
Per ogni profilo geoelettrico sono state acquisite le coordinate relative ai punti del primo elettrodo, del centro dello stendimento e dell'ultimo elettrodo al fine di poter successivamente collocare le indagini sulla base cartografica a nostra disposizione. Potendo contare anche sulla presenza di elementi cartografati l'ubicazione esatta dei rilievi si è basata oltre che attraverso il rilievo GPS anche sulla base delle distanze relative attraverso l'uso di una rotella metrica.

I punti acquisiti con il GPS sono stati posizionati su una carta topografica georeferenziata sulla base del sistema di riferimento Gauss-Boaga.

Lo strumento utilizzato per l'acquisizione delle coordinate dei punti distribuiti lungo gli stendimenti è un GPS palmare Garmin mod. 62s con ricevitore a 12 canali.

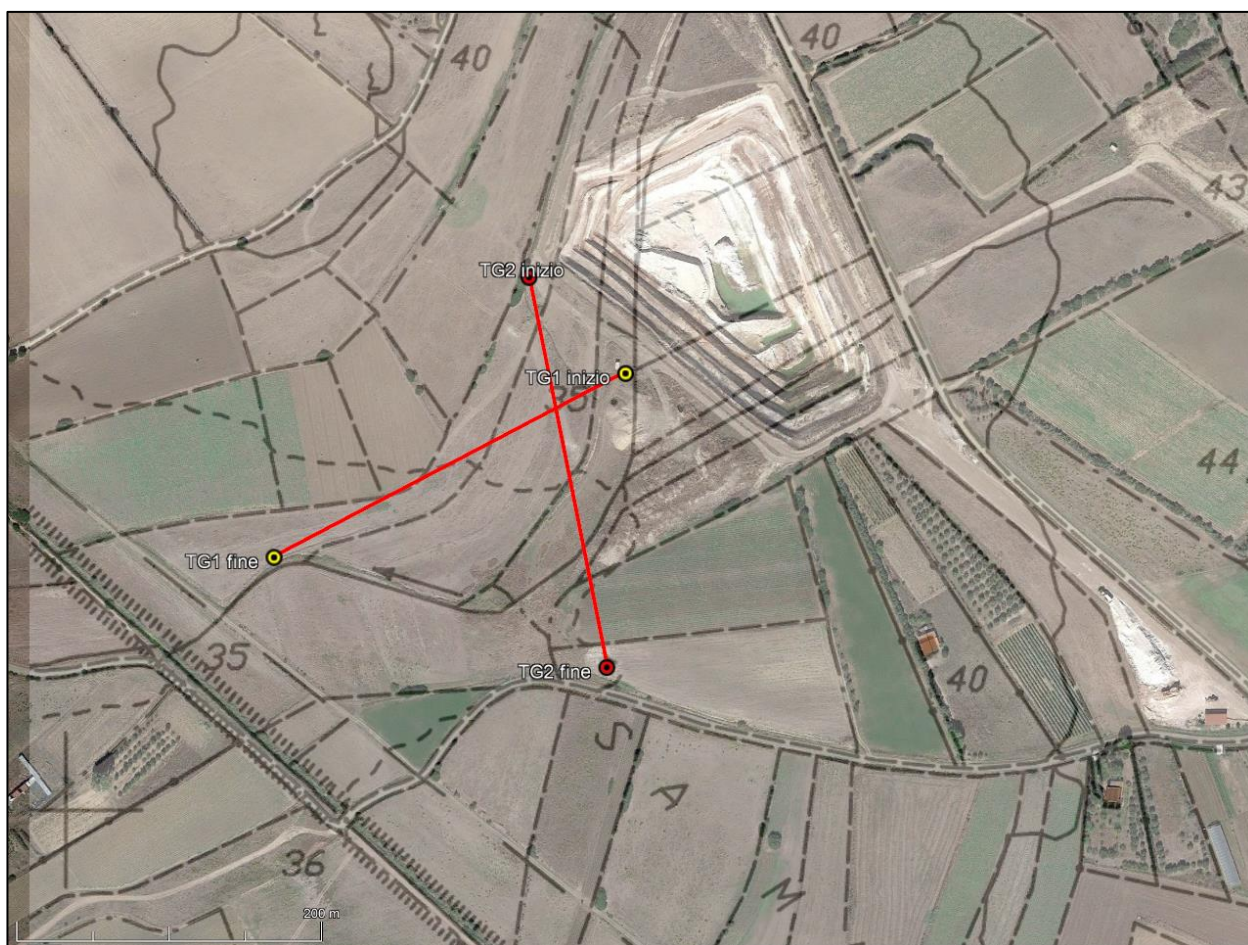
Nella tabella sono raccolte le coordinate geografiche dei punti GPS: l'analisi di questi permette di valutare l'affidabilità delle misure acquisite. Per i nostri scopi possiamo considerare affidabili i posizionamenti dei rilievi geoelettrici.

Disposizione dei profili geoelettrici su CTR scala 1:10.000





Disposizione dei profili geoelettrici su CTR sovrapposta a ortofoto aerea



Coordinate dei vertici dei profili geoelettrici (UTM WGS 84)

Profilo 1 - inizio	466338	4325278
Profilo 1 - fine	466107	4325159
Profilo 2 - inizio	466275	4325341
Profilo 2 - fine	466325	4325086



6 REPERTORIO FOTOGRAFICO DEI RILIEVI GEOELETTRICI



Tomografia geoelettrica n° 1



Tomografia geoelettrica n° 2



Le argille sono in genere caratterizzate da bassi valori di resistività e caricabilità molto bassa o nulla, che variano in funzione del loro grado di alterazione e saturazione, pertanto la scala dei valori utilizzati sono stati ottimizzati ai fini della ricerca, dando maggior dettaglio ai bassi valori di resistività e polarizzabilità, essendo quelli più interessanti per l'individuazione della bentonite, e lasciando intervalli più ampi per quello che costituisce il materiale sterile o comunque meno produttivo che le incassa.

Nelle rappresentazioni grafiche dei profili di resistività sono stati evidenziati i settori che nell'interpretazione delle tre metodologie utilizzate presentavano un valore di resistività $\rho < 10 \Omega m$, cioè la distribuzione più probabili delle bentoniti, evidenziate graficamente in un profilo di sintesi.

I punti più interessanti per la ricerca mineraria sono stati indicati nella sezione con delle ellissi con tratto continuo rosso. L'eventuale basamento roccioso è stato indicato con un tratteggio nero. Sigle e frecce rosse indicano i reciproci punti di intersezione dei profili geoelettrici.

7 ANALISI DELLE PSEUDOSEZIONI

Nel prossimo capitolo verranno presentate le tomografie elettriche elaborate con i relativi dettagli tecnici e l'interpretazione geologica. Per ottenere una chiave interpretativa omogenea e funzionale si ha la necessità di utilizzare una rappresentazione grafica delle tomografie che permetta una immediata comprensione dei livelli di interesse.

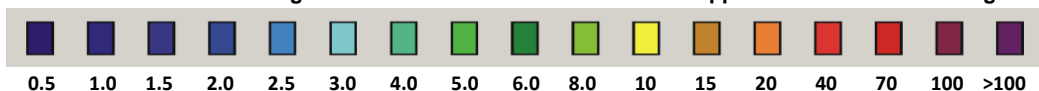
Facendo riferimento alle misure di resistività è importante considerare le proprietà degli spessori investigati determinanti per la risposta geoelettrica. Allo stesso tempo è cruciale valutare i processi geologici che influiscono direttamente sulla resistività propria degli spessori. Questi processi, tranne rare eccezioni, tendono generalmente ad abbassare i valori di resistività.

Il contesto geologico obbliga inoltre ad inserire all'interno del quadro di analisi l'eventuale alterazione delle rocce incassanti che generalmente fa diminuire i valori di resistività di ordini di grandezza. Fenomeni di fratturazione e faglie, unitamente a fenomeni di dissoluzione associati, aumentano la permeabilità e conseguentemente determinano un abbattimento dei valori di resistività. Ci si attende inoltre l'influenza dell'alterazione per idrolisi dei minerali primari che determina una sensibile diminuzione dei valori di resistività. L'insieme di questi fattori è da tenere in considerazione nell'interpretazione dei rilievi e nella precedente scelta della scala di rappresentazione.

Allo scopo di facilitare la lettura dei profili geoelettrici sono stati utilizzati gli stessi intervalli dei valori di resistività e polarizzazione indotta per tutti i profili, consentendo una più agevole interpretazione delle diverse sezioni. Ai diversi intervalli di resistività sono stati assegnati dei colori, secondo lo schema seguente (tutti i valori sono espressi in Ωm).



Tabella dei colori abbinati agli intervalli di resistività utilizzati nelle rappresentazioni elettrostratigrafiche



In particolare le bentoniti oggetto della presente ricerca hanno caratteristiche che pongono la loro resistività mediamente all'estremità inferiore ($\rho < 3 \Omega m$) del range di valori delle argille. In letteratura è noto che una miscela composta dal 75% di bentonite e 25 % di sabbia abbia una resistività di $2.5 \Omega m$, ma per poter avere un valore di raffronto ancora più attendibile si è eseguito (nell'ambito di una precedente campagna di indagini) un rilievo geoelettrico proprio nel piano di coltivazione della bentonite pura, dove è stato misurato un valore di resistività medio di $1.9 \Omega m$.

I suoli superficiali, proprio a causa della loro composizione e della loro posizione, risulteranno facilmente individuabili e saranno caratterizzati da valori di resistività più elevati rispetto ai livelli di argilla pura, variabili in funzione della loro granulometria e tenore di umidità.

Pertanto i settori caratterizzati da questi valori di resistività risultano quelli più interessanti ai fini di una ricerca.

Sono stati indicati con simboli e frecce rosse i punti di intersezione dei profili geoelettrici.

Tutti i profili sono stati eseguiti con una lunghezza di 258.5 m e hanno raggiunto una profondità d'indagine compresa tra i 50 m e i 60 m.

Viene fornita la rappresentazione grafica delle due configurazioni elettroliche utilizzate per ogni profilo geoelettrico. Le sezioni geoelettriche sono state rappresentate graficamente con delle fasce di colore che individuano i valori di resistività, i colori sono distribuiti in modo da poter rappresentare ogni variazione elettrostratigrafica.

La sezione eseguita con la configurazione dipolo-dipolo è quella che ha fornito i maggiori dettagli, ma si ritiene che la rappresentazione della elettrostratigrafica più profonda possa essere affetta da errori dovuti alla minore sensibilità della configurazione, condizionata anche dalla notevole conducibilità dei livelli superiori che indebolivano il campo elettrico più profondo.

Il profilo eseguito con la configurazione di Schlumberger, pur essendo meno dettagliato ha la caratteristica di essere intrinsecamente meno soggetto ad errori di misura, pertanto si ritiene che possa meglio rappresentare la morfologia del basamento, anche se nel complesso conferma quanto si è riscontrato nella sezione dipolo-dipolo.



7.1 Profilo TG1

Il profilo è stato eseguito per una lunghezza complessiva di 258.5 m e ha raggiunto una massima profondità d'indagine di quasi circa 56 m.

L'indagine ha individuato un substrato generalmente caratterizzato da medi valori di resistività con $1 \Omega\text{m} < \rho < 2.5 \Omega\text{m}$, con un unico settore superficiale con $3 \Omega\text{m} < \rho < 8 \Omega\text{m}$ compreso all'incirca tra l'ascissa dei 55 m e dei 100 m, che individua probabilmente un suolo superficiale argilloso con una discreta presenza di sabbie.

I settori caratterizzati con valori di $\rho \leq 10 \Omega\text{m}$, che caratterizzano il giacimento di bentonite si rinvenivano praticamente per tutta l'estensione della sezione e fino ad una profondità di circa 45 m, con alcuni settori particolarmente conduttivi nel settore iniziale del profilo, tra i 0 m e gli 80 m e ad una profondità di circa 10-15 m, che si dimostra particolarmente interessante ai fini della ricerca.

7.2 Profilo TG2

Il profilo è stato eseguito per una lunghezza complessiva di 258.5 m e ha raggiunto una massima profondità d'indagine di quasi circa 56 m.

Com'era lecito aspettarsi l'indagine ha individuato un substrato con caratteri assai simili a quelli riscontrati nella sezione TG1, quindi caratterizzato da medi valori di resistività con $1 \Omega\text{m} < \rho < 2.5 \Omega\text{m}$ praticamente per tutta la sua estensione.

I settori caratterizzati con valori di $\rho \leq 10 \Omega\text{m}$, che caratterizzano il giacimento di bentonite si rinvenivano praticamente per tutta l'estensione della sezione e fino ad una profondità di circa 45 m, con alcuni settori particolarmente conduttivi nel settore centrale del profilo, tra 80 m e 160 m e ad una profondità di circa 5-10 m, che si dimostra particolarmente interessante ai fini della ricerca.



8 CONCLUSIONI

È stata eseguita una campagna di ricerca geofisica finalizzata alla ricerca di bentoniti nell'ambito della concessione mineraria "Rio Palmas", mediante l'esecuzione di 2 tomografie geoelettriche, opportunamente distribuite in modo da investigare l'area interessata dalla ricerca.

L'esecuzione di una serie di rilievi geoelettrici già eseguiti nei pressi dell'area estrattive attuale ha permesso di determinare le caratteristiche geofisiche della bentonite oggetto della ricerca, misurando una resistività media di $1.9 \Omega\text{m}$, valore che concorda con quelli noti in letteratura.

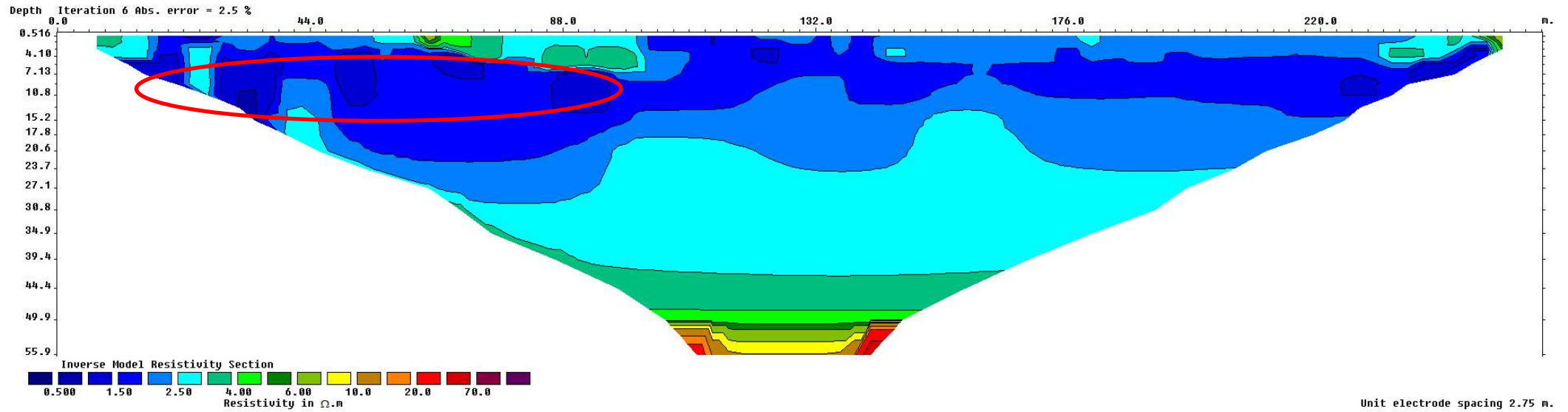
I 2 rilievi geoelettrici sono stati eseguiti utilizzando due differenti configurazioni elettrodiche: quello dipolare dipolo-dipolo e il quadripolare di Schlumberger. Infatti mentre la prima è più sensibile nel discernere particolari in senso orizzontale, la seconda lo è nel distinguere particolari in senso verticale, inoltre ha una maggiore capacità di investigazione del substrato profondo.

La combinazione di queste tre metodologie ha permesso una efficiente discriminazione fino ad una profondità di circa 55 m della presenza di eventuali livelli bentonitici, nonché di individuare il substrato roccioso.

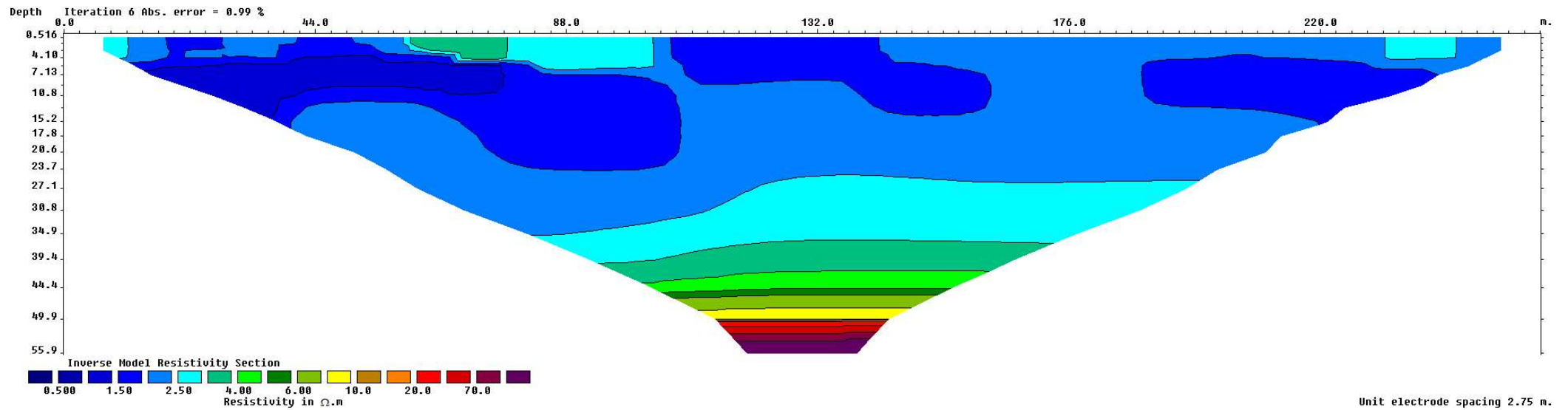
I punti di maggior interesse per la ricerca sono stati evidenziati nelle sezioni elettrostratigrafiche, permettendo così una più efficace pianificazione della campagna d'indagine con sondaggi geognostici, scavi e trincee.

Nel complesso l'area investigata si è mostrata piuttosto promettente, sia dal punto di vista dei volumi individuati che nella qualità delle bentoniti presenti.

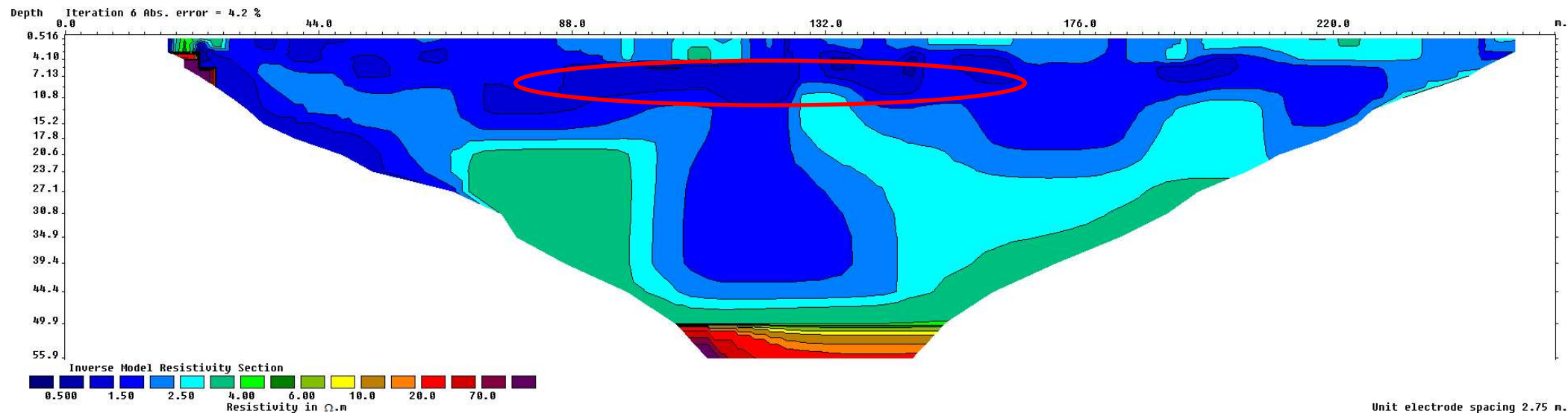
Piscinas (SU) - Polar Srl - Tomografia geoelettrica 1 - dipolo-dipolo



Piscinas (SU) - Polar Srl - Tomografia geoelettrica 1 - Schlumberger



Piscinas (SU) - Polar Sr1 - Tomografia geoelettrica 2 - dipolo-dipolo



Piscinas (SU) - Polar Sr1 - Tomografia geoelettrica 2 - Schlumberger

