

Mus. Civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	5 dicembre 2008		
--------------------	--------------------------------	-----------------	--	--

MARIO NALDI & FABRIZIO FANTINI (\*)

## APPROCCIO GEOFISICO MULTIDISCIPLINARE PER LA VERIFICA DI DISCARICHE

**Riassunto** - MARIO NALDI & FABRIZIO FANTINI - Approccio geofisico multidisciplinare per la verifica delle discariche.

La crescente sensibilità ambientale - unita ad un uso razionale del territorio - pone come priorità la caratterizzazione delle aree potenzialmente "a rischio". In tale contesto, assumono particolare rilevanza ambientale le aree di discarica di rifiuti, sia che si tratti di discariche abusive (pertanto prive di ogni sistema di protezione e/o prevenzione dell'inquinamento) che note (discariche esaurite, di vecchia concezione) con problemi di perdita di percolato e conseguente inquinamento di falda. Le indagini geofisiche consentono di eseguire in modo speditivo e non invasivo delle analisi in aree di vaste dimensioni e di localizzare le zone in cui i parametri fisici che meglio contraddistinguono le aree di discarica rispetto al terreno naturale (comportamento elettrico ed elettromagnetico del mezzo attraversato) presentano delle anomalie rispetto ai normali valori di fondo (terreno naturale). Nello specifico si presentano alcuni esempi di indagini geofisiche per lo studio di corpi di discarica, realizzate utilizzando le metodologie geoelettrica multielettrodo (ERT) ed elettromagnetica (EM).

**Parole chiave:** Discariche, Geoelettrica, Elettromagnetismo

**Abstract** - MARIO NALDI & FABRIZIO FANTINI – Multi-disciplinary geophysical approach to the verification of landfills.

The increased environmental sensibility – added to a rational use of the land – places as a priority the environmental characterization of the "risk" areas. In such a context, landfill analyses is getting more and more important, both in the case of abusive landfills (without any kind of protection systems and/or pollution prevention) and in the case of known landfills (exhausted, realized with old conceptions) with pollution problems of groundwater and soil. The geophysical methods allow the detection of the subsoil in wide areas, in a short time and in an indirect way; landfill effects (waste disposal or pollution effects of the soil and the groundwater) show strong differences in the electrical and electromagnetical parameters that can be detected as "anomalous" zones compared with the background values of the natural soil. This article introduces some examples about geophysical surveys related to the study of landfills, realized with Electrical Resistivity Tomography (ERT) and electromagnetic (EM) methods.

**Key words:** Landfill, Multielectrodes geoelectrical methods, Electromagnetic methods.

---

(\*) Techgea Servizi Sas, Via Modigliani 26/a , 10137 Torino, info@techgea.eu

## 1. INTRODUZIONE

Per garantire la protezione delle risorse naturali e per una corretta pianificazione territoriale, risulta sempre più rilevante l'utilizzo di metodologie di indagine che consentano l'individuazione e la caratterizzazione di aree potenzialmente fonti di rischio. In tale contesto le tipologie di problematiche a cui si può andare incontro possono essere suddivise in due categorie fondamentali:

- ✓ Discariche note (tuttora attive o esaurite) di vecchia concezione con potenziali problemi di perdita del percolato ed inquinamento della falda;
- ✓ Discariche abusive e, pertanto, prive di sistemi di protezione e/o prevenzione dell'inquinamento, che possono essere causa di danni alle persone ed alle infrastrutture esistenti, nonché interferire con la progettazione e la realizzazione di nuove opere.

Per la caratterizzazione ambientale di siti di discarica si pongono tre diversi obiettivi di indagine, tra loro consequenziali:

- a) la localizzazione della sorgente di contaminazione, ovvero l'individuazione del sito di discarica su un'area priva di riferimenti visibili o noti (specialmente nel caso di discariche abusive);
- b) la caratterizzazione geometrica della sorgente di contaminazione, in termini di estensione laterale, approfondimento, presenza di fuoriuscita di sostanze contaminanti ("pennacchi" di contaminazione);
- c) la caratterizzazione del tipo di rifiuto, con riconoscimento di rifiuti con forte componente metallica (scorie di altoforno), fluidi ipersalini (sacche di percolato), macerie a comportamento resistivo, ecc..

In relazione agli obiettivi appena illustrati, l'utilizzo di metodologie di indagine dirette ed universalmente note, quali sondaggi geognostici, pozzetti esplorativi, ecc., non risulta sempre applicabile. Questo è dovuto essenzialmente alle possibili complicazioni che possono presentarsi durante le fasi di esecuzione, in termini di danni ai teli impermeabili a protezione del nucleo di discarica o di dispersione di sostanze nocive allo stato liquido o gassoso. Al tempo stesso la realizzazione di indagini dirette comporta costi elevati e tempistiche non sempre compatibili con le problematiche in esame. Appare quindi chiaro come l'applicazione di metodologie geofisiche indirette possa costituire una valida alternativa agli interventi "classici", grazie a costi e tempi di esecuzione ridotti, assenza di rischi connessi ad ulteriori danni alle strutture esistenti (tutte le tipologie di indagine vengono realizzate dalla superficie) e possibilità di ottenere modelli tridimensionale dell'andamento del corpo della discarica (non solamente informazioni puntuali).

La presenza di rifiuti o - in generale - di corpi estranei nel sottosuolo determina delle importanti variazioni di alcuni parametri chimico-fisici rilevabili con metodologie geofisiche, tra cui i più rilevanti sono:

- 1) la conducibilità elettrica dei terreni definisce la capacità di un materiale di permettere il passaggio di una corrente elettrica; spesso si è soliti utilizzare il parametro di resistività elettrica (inverso della conducibilità elettrica ed espresso in ohm·m);
- 2) la "caricabilità" elettrica (la polarizzazione indotta dal passaggio di corrente elettrica nel sottosuolo, particolarmente sensibile per materiali polarizzabili quali fluidi ipersalini o materiali metallici);
- 3) la suscettività magnetica determina la capacità di un materiale di magnetizzarsi in presenza di un campo magnetico esterno.

Al fine di soddisfare le diverse necessità in precedenza descritte, risulta di fondamentale importanza un approccio geofisico "multidisciplinare", in quanto consente di ottenere risultati apprezzabili in termini di geometria del corpo della discarica e delle caratteristiche dei materiali che costituiscono la stessa. Più in dettaglio, occorre considerare:

- ✓ un tipo di indagine "areale" preliminare, in grado di localizzare in modo speditivo su aree di vaste dimensioni le zone "anomale" correlabili a possibili interramenti di rifiuto. La metodologia geofisica che meglio risponde a tale requisito è il metodo elettromagnetico *Slingram*, con acquisizione dei dati di campo elettromagnetico secondario con strumentazione spalleggiabile su una griglia a maglia regolare. La capacità di "creare" campi EM secondari è legata alla presenza di corpi conduttori, che caratterizzano generalmente le discariche (frammenti metallici, soluzioni ipersaline legate a percolato, ecc.). L'elaborazione dei dati acquisiti fornisce una mappa di distribuzione della

conducibilità elettrica apparente, in grado di evidenziare aree anomale rispetto ai valori di fondo del terreno naturale;

- ✓ una seconda fase di indagine “di dettaglio” consiste nella realizzazione di tomografie di resistività elettrica in corrispondenza delle zone anomale individuate con la metodologia elettromagnetica. La tomografia geoelettrica (con la misura combinata di resistività elettrica e polarizzazione indotta) è in grado di discriminare tra terreno naturale e rifiuto e, all’interno di quest’ultimo, identificare zone polarizzabili o “caricabili” legate ad accumuli di sostanze metalliche o percolato. Il metodo di indagine, largamente diffuso, prevede la stesa di linee multielettrodo con acquisizione dei dati mediante georesistivimetro.

La conoscenza preventiva delle aree anomale (individuate con il metodo *Slingram*) consente un ottimale tracciamento delle linee geoelettriche, con notevole incremento del grado di efficienza del metodo ed evidente risparmio economico. L’uso combinato di diverse metodologie di indagine indiretta riduce, inoltre, l’ambiguità interpretativa propria delle indagini geofisiche. Nel presente articolo verranno presentati differenti casi reali di verifica di discariche con approccio multidisciplinare in differenti contesti, con analisi delle problematiche di acquisizione, elaborazione ed interpretazione dei dati.

A titolo riassuntivo, in tabella 1 si riportano le diverse problematiche che si devono affrontare qualora si desideri realizzare una corretta caratterizzazione di un corpo di discarica e le principali metodologie geofisiche che possono essere utilizzate a tale scopo.

<b>Applicazione</b>	<b>Problematiche</b>	<b>Metodi di indagine geofisica</b>
Individuazione di discariche non note	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinazione dell'estensione laterale e dello spessore del corpo dei rifiuti</li> <li>- Individuazione di fusti metallici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Magnetismo</li> <li>- Elettromagnetismo</li> <li>- Tomografia elettrica</li> </ul>
Studio di discariche controllate	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Individuazione di zone di accumulo di percolato all'interno del corpo della discarica</li> <li>- Analisi delle perdite di percolato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Magnetismo</li> <li>- Elettromagnetismo</li> <li>- Tomografia elettrica</li> <li>- Polarizzazione indotta</li> <li>- Potenziale spontaneo</li> </ul>

Tab. 1 - Principali problematiche connesse alla caratterizzazione delle discariche e metodologie geofisiche utilizzate.

## 2. LA METODOLOGIA DI INDAGINE ELETTROMAGNETICA

Le indagini elettromagnetiche in dominio di frequenza (FEM) consentono di ottenere, in modo speditivo, profili e mappe dei valori della variazione di fase e dell’intensità del campo elettromagnetico secondario rispetto ai valori del campo primario. Il metodo di prospezione EM consiste nel passaggio di corrente alternata in una bobina trasmittente dando origine ad un campo magnetico (campo EM primario) variabile nel tempo; il flusso di tale campo magnetico genera in tutti i conduttori sui quali esso agisce (suoli, rocce) delle correnti indotte (correnti di *Foucault*) che, a loro volta, danno luogo ad un campo EM secondario. Tale campo elettromagnetico secondario, insieme a quello primario, si propaga direttamente attraverso l’aria provocando il passaggio di corrente alternata in una bobina ricevente (fig. 1). L’ampiezza delle correnti indotte in un corpo conduttore nel sottosuolo dipende principalmente da dimensione, forma, profondità dal p.c. e proprietà elettriche del conduttore stesso, nonché dalla frequenza del campo primario generato. La conduttività elettrica dei suoli e delle rocce dipende inoltre dal grado di saturazione in acqua, dalla salinità dell’acqua contenuta nei pori della roccia, dalla composizione mineralogica e dalla presenza di metalli o contaminati organici (benzina, gasolio, nafta ecc.). L’indagine elettromagnetica prevede quindi l’analisi della variazione in termini di ampiezza e fase che un segnale (onda sinusoidale) subisce nell’attraversare mezzi a diversa conduttività.

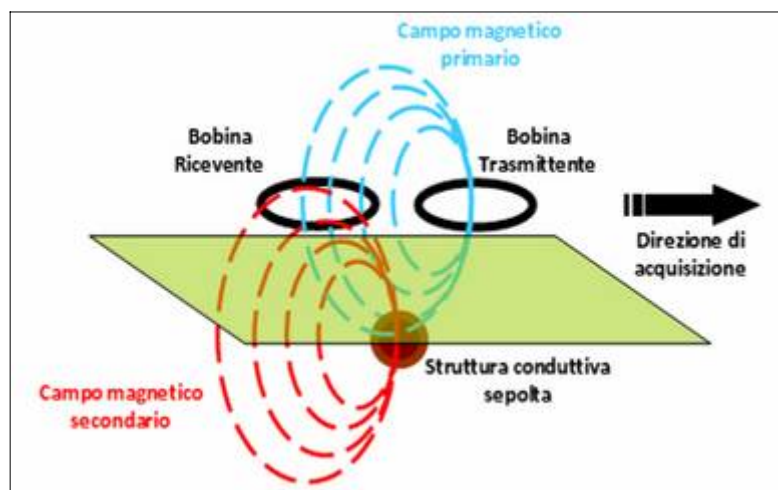


Fig. 1 – Schema generale del principio di funzionamento del metodo EM.

## 2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E METODOLOGIA DI ACQUISIZIONE

L'acquisizione dei dati avviene trasportando l'elettromagnetometro lungo linee equispaziate e disposte secondo una maglia quanto più possibile regolare, compatibilmente alla morfologia del sito in esame ed alla presenza di eventuali ingombri in superficie. E' evidente che la presenza di campi elettromagnetici nella zona del rilievo possono essere fonte di disturbo. La misura elettromagnetica, in particolare, risulta fortemente disturbata dalla presenza di strutture interrate e non (fabbricati, solette in cemento armato, ecc.), tubazioni (elettrodotti, gasdotti, ecc.), motori elettrici di grosse dimensioni ed accumuli di rottami metallici.

La procedura di acquisizione dati può essere suddivisa in quattro fasi fondamentali:

- 1) tracciamento dell'area di acquisizione che, opportunamente referenziata rispetto ad un sistema di coordinate note, viene suddivisa in subaree (possibilmente rettangolare) costituite da serie regolari di linee di misura con interasse costante pari a 1÷4 m, in funzione del dettaglio richiesto (fig. 2);
- 2) impostazione, da parte dell'operatore, dei parametri di acquisizione;
- 3) posizionamento sul primo punto di acquisizione (con coordinate  $x = 0$ ,  $y = 0$ ): l'operatore, attivato lo strumento, cammina con passo quanto più possibile regolare lungo la prima linea di misura;
- 4) dopo aver registrato i dati acquisiti lungo la prima linea, l'operatore passa alla successiva e ripete le procedure di cui al punto 3) fino a coprire l'intera area in esame.

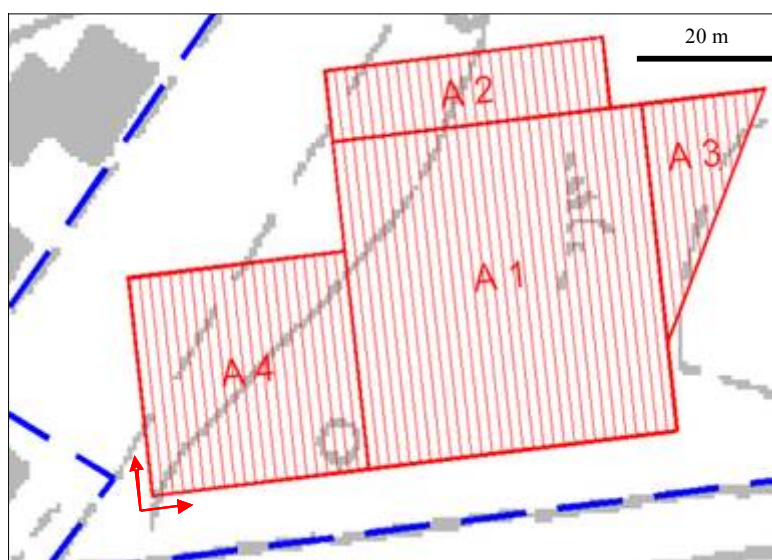


Fig. 2 – Suddivisione dell'area di indagine EM in subaree di forma regolare e linee equispaziate.

Al termine dell'acquisizione il data-logger genera un file output costituito da una serie di punti a cui vengono attribuite le coordinate rispetto al sistema di riferimento locale, le componenti in quadratura e fase del segnale elettromagnetico, la conducibilità elettrica (funzione della quadratura) e la suscettività magnetica (funzione della componente in fase) per ogni frequenza impostata. La componente in fase risulta sensibile ad oggetti metallici (fusti sepolti, tubazioni interrate ecc., mentre la componente in quadratura di fase è proporzionale alla conducibilità del mezzo indagato. Tutti i parametri che vengono ottenuti sono definiti apparenti, in quanto risultanti dalla media delle proprietà dei materiali che costituiscono l'intero spessore di terreno investigato (generalmente 3÷6 m di profondità). L'utilizzo di più frequenze contemporaneamente consente di individuare anomalie diverse prodotte da target di diversa natura. La profondità d'indagine è funzione della frequenza, della conducibilità del mezzo e della geometria e disposizione dell'anomalia da indagare.

Per le indagini presentate in questo articolo si è utilizzata la strumentazione elettromagnetica *PROFILER EMP-400* prodotta dalla *GSSI (USA)*. Si tratta di un conducivimetro multifrequenza che rientra nella categoria delle strumentazioni elettromagnetiche in dominio di frequenza di tipo GCM. Il *Profiler* può utilizzare simultaneamente fino a 3 frequenze definite dall'utente, in un range compreso tra 1 e 16 kHz, registrando le componenti in fase ed in quadratura del campo magnetico secondario, normalizzate rispetto al campo magnetico primario. Il sensore dello strumento è costituito da una bobina trasmittente e da una ricevente, poste ad una distanza pari a 1.219 m (fig. 3). Tale geometria, chiamata configurazione bistatica, contiene anche una terza bobina accoppiata *bucking coil* che rimuove (avendo polarità opposta) il campo magnetico primario registrato alla bobina ricevente, di intensità molto superiore a quello indotto. Il data-logger è un palmare dotato di sistema GPS integrato e collegato al conducivimetro via *blue-tooth* (fig. 4).



Fig. 3 – Strumentazione *PROFILER EMP-4000*.



Fig. 4 – Acquisizione dipolo verticale (dettaglio bobina trasmittente).

I dati così ottenuti vengono inizialmente ubicati e trattati mediante un apposito software (*MAGMAP2000, Geometrics Inc. - USA*) e quindi interpolati al fine di generare mappe cromatiche di distribuzione dei diversi parametri, in grado di evidenziare eventuali aree anomale rispetto ai valori di fondo del terreno naturale.

## 2.2 LOCALIZZAZIONE DI DISCARICHE ABUSIVE CON METODO EM – CASO STUDIO N. 1

Il primo caso studio che viene proposto fa riferimento ad una indagine realizzata con metodologia elettromagnetica nella pianura alluvionale di Cuneo. Scopo dell'intervento è stata l'individuazione di interramenti abusivi di cascami di lavorazione di pneumatici, all'interno di un campo ad uso pascolo delle dimensioni di circa 2.5 ettari. Il terreno naturale in posto (che determina i valori di fondo) è costituito da ghiaie e sabbie con trovanti.

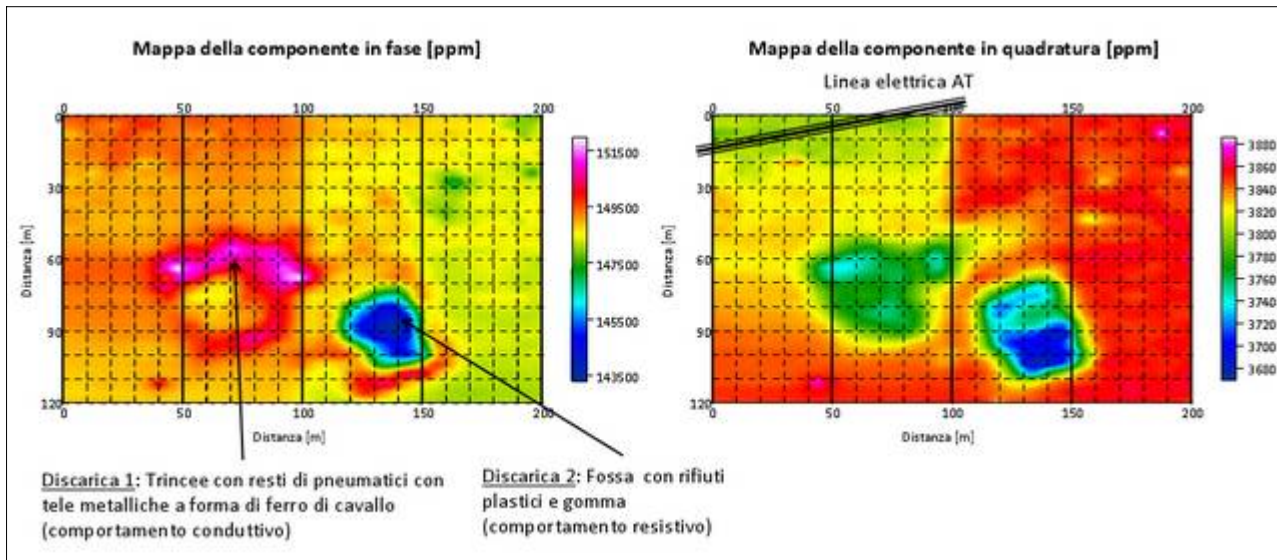


Fig. 5 – Risultati di un'indagine elettromagnetica su una discarica abusiva (CN): mappe delle componenti in fase e quadratura.

I risultati ottenuti, in termini di mappe delle componenti in fase e quadratura del segnale elettromagnetico vengono riportati schematicamente in figura 5. Si può osservare come siano molto evidenti due zone anomale con caratteristiche elettromagnetiche differenti, che ben si distinguono dal terreno naturale circostante. La prima area (indicata come discarica 1) presenta una forma a ferro di cavallo ed è caratterizzata da elevati valori della componente in fase (comportamento conduttivo, tonalità di colore magenta) e valori medio-bassi di quadratura (tonalità di colore verde). Tali proprietà elettromagnetiche consentono di affermare che si tratta di trincee contenenti resti di pneumatici con tele metalliche. Al contrario la seconda anomalia (indicata in figura come discarica 2) ha una forma più regolare e presenta bassi valori sia per quanto concerne la componente in quadratura sia in fase (tonalità di colore blu): un simile comportamento resistivo è sintomo della presenza di un interrimento di rifiuti contenenti materiali plastici e/o gomma.

### 2.3 LOCALIZZAZIONE DI DISCARICHE ABUSIVE CON METODO EM – CASO STUDIO N. 2

Questo secondo esempio propone i risultati di un'indagine elettromagnetica realizzata in un campo ad uso agricolo sito nella pianura alluvionale del nord Italia. Anche in questo caso lo scopo dell'indagine ha riguardato la localizzazione di interramenti abusivi di rifiuti industriali di varia natura.

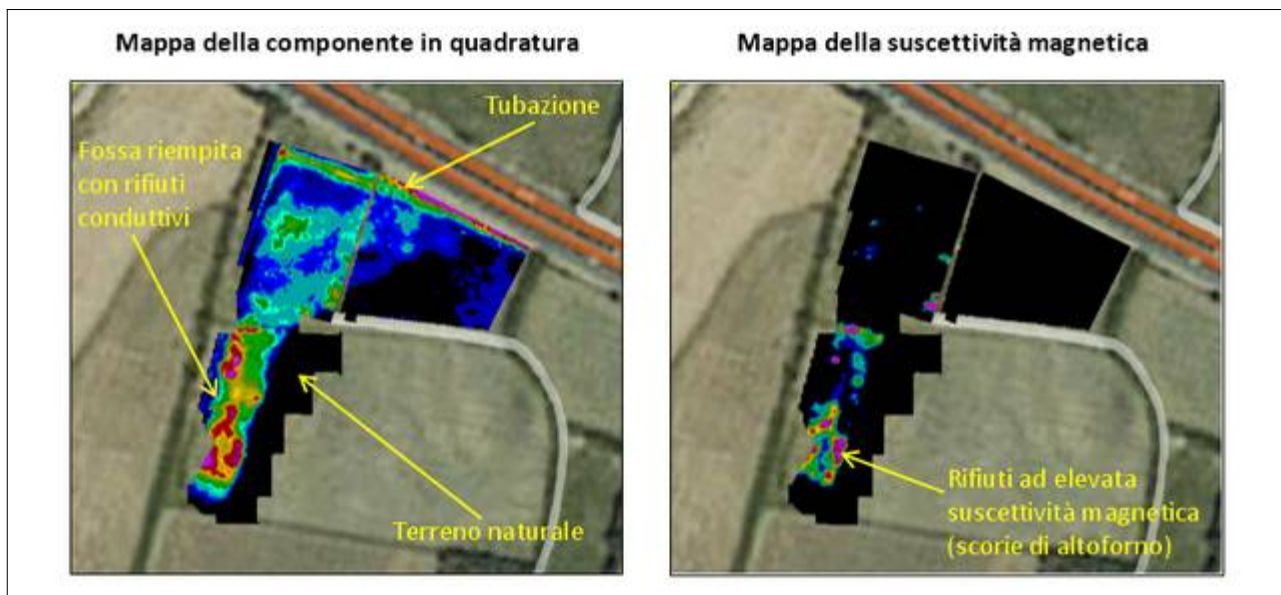


Fig. 6 – Risultati di un'indagine elettromagnetica su discarica abusiva (BR): mappe di quadratura e suscettività magnetica.

L'area di indagine ha un'estensione planimetrica di oltre 3 ettari: le operazioni di cantiere hanno richiesto 3 giorni di lavoro in sito da parte di 2 operatori. Tali tempistiche si sono rese necessarie a causa dell'estrema irregolarità dell'area in esame e dell'ingombro dovuto alla presenza (a tratti) di una fitta vegetazione arbustiva. In figura 6 si riportano le mappe dell'andamento dei valori di componente in quadratura e di suscettività magnetica. Anche in questo caso è possibile individuare una forte ed estesa anomalia in termini di quadratura (tonalità di colore verde-magenta), riconducibile ad un interrimento di rifiuti e che si discosta chiaramente dal circostante terreno naturale sabbioso-ghiaioso (tonalità di colore nero): gli elevati valori di suscettività magnetica di parte di tali materiali interrati, inoltre, denotano la presenza di scorie di altoforno.

### 3. LA METODOLOGIA DI INDAGINE GEOELETRICA MULTIELETTRODO

La tomografia di resistività elettrica di superficie ha come obiettivo la costruzione di un modello elettrico bidimensionale o tridimensionale del sottosuolo effettuando delle misure di potenziale elettrico in seguito all'immissione di corrente elettrica nel sottosuolo.

Il principio fisico su cui si basano le misure di resistività elettrica è la legge di *Ohm*, che governa il flusso di corrente in un mezzo:

$$J = \sigma E$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica [Siemens/m] del mezzo,  $E$  è l'intensità del campo elettrico applicato [V/m],  $J$  è la densità di corrente [ $A/m^2$ ]. Nelle indagini geoelettriche si è soliti esprimere anziché la conducibilità, la resistività elettrica  $\rho = 1/\sigma$  [ $\Omega \cdot m$ ].

Le misure di campo sono condotte su mezzi non ideali (e quindi eterogenei); la resistività inoltre varia in uno spazio tridimensionale per cui dalla corrente  $I$  e dalla differenza di potenziale  $\Delta V$  si calcola un valore di resistività *apparente*:

$$\rho_{app} = k \frac{\Delta V}{I}$$

$k$  è un fattore geometrico che dipende dalla configurazione degli elettrodi. Tale resistività è un valore per l'appunto *apparente*, ovvero corrisponde alla resistività che un semispazio omogeneo fornirebbe nella stessa configurazione elettrodica. L'esecuzione di misure di resistività ottenute traslando lateralmente il quadripolo consente di ottenere informazioni relative a variazioni laterali di resistività. Se invece si aumenta la spaziatura tra gli elettrodi di corrente e di tensione, aumenta la profondità di indagine e si ottengono informazioni maggiori sulle variazioni verticali. La strumentazione tipica delle tecniche di tomografia elettrica permette di effettuare le due operazioni in modo automatico, e di associare ad ogni linea di misura, una distribuzione bidimensionale di resistività apparente, detta *pseudosezione* (fig. 7).

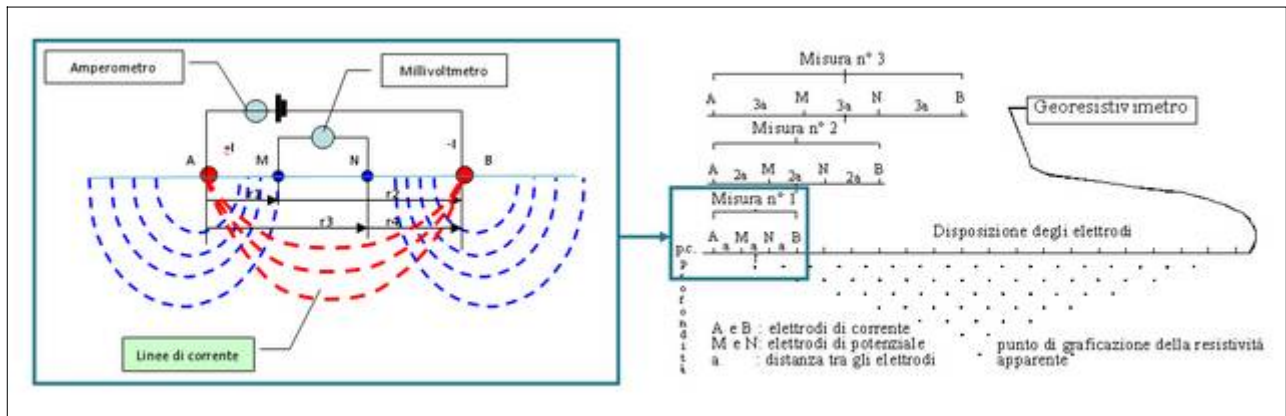


Fig. 7 – Schema di funzionamento di un'indagine geoelettrica: principio fisico e creazione della *pseudosezione*.

In virtù delle proprie caratteristiche esecutive e risolutive, la metodologia geoelettrica multielettrodo risulta essere un valido strumento per la caratterizzazione delle discariche ed in particolare consente di:

- ✓ definire i limiti laterali e verticali di discariche, siano esse note o abusive;
- ✓ caratterizzare la tipologia dei materiali interrati (confronto dei dati di resistività elettrica e di polarizzazione indotta);
- ✓ valutare la presenza e l'efficacia del telo basale di impermeabilizzazione;
- ✓ valutare la presenza e la continuità del telo superiore (capping).

Al fine di ottenere le suddette informazioni è necessario ottimizzare l'indagine geoelettrica in termini di disposizione delle linee (lunghezza ed orientazione), di numero di elettrodi e spaziatura tra gli stessi.

Ciò è reso possibile da:

- ✓ conoscenza preliminare dell'ubicazione della discarica (da dati storici, scavi o indagini EM);
- ✓ disposizione delle linee elettriche in modo da tagliare - se possibile - tutto il corpo della discarica;
- ✓ realizzazione di un numero di stendimenti sufficiente a caratterizzare la geometria dell'intero corpo della discarica.

### 3.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E METODOLOGIA DI ACQUISIZIONE

La metodologia di misura geoelettrica multielettrodo consiste nel disporre sul terreno un numero di elettrodi compreso tra 24 e 96 allineati lungo un profilo (con passo dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste). Questi sono collegati con un cavo multipolare al georesistivimetro, che consiste in un'unità di *switching* che può essere esterna o interna, comandata da un microprocessore e che ha la funzione di selezionare, per ogni lettura, gli elettrodi attivi (due di corrente e due di tensione). La sequenza delle misure, così come il tipo di *array*, l'intensità di corrente e la durata delle acquisizioni, sono parametri di input usualmente impostati dall'utente. Il formato di uscita della strumentazione normalmente permette di ottenere per ogni misura, la corrente immessa, la differenza di potenziale, la configurazione elettrodica, la resistività apparente e una stima statistica sulla qualità delle misure. Le configurazioni elettrodiche più



utilizzate nelle indagini geofisiche di resistività sono generalmente: *Wenner*, *Wenner-Schlumberger*, *Polo-Dipolo* e *Dipolo-Dipolo*. Queste differiscono principalmente in relazione a potere risolutivo, profondità di investigazione, copertura orizzontale e stabilità del segnale. Il dispositivo *Wenner-Schlumberger* rappresenta una soluzione ibrida ed è, pertanto, quello maggiormente utilizzato in geofisica ambientale in quanto costituisce il giusto compromesso tra grado di risoluzione (sia orizzontale che verticale) e profondità di indagine. Per una trattazione teorica più completa si rimanda alla letteratura specifica (in bibliografia).

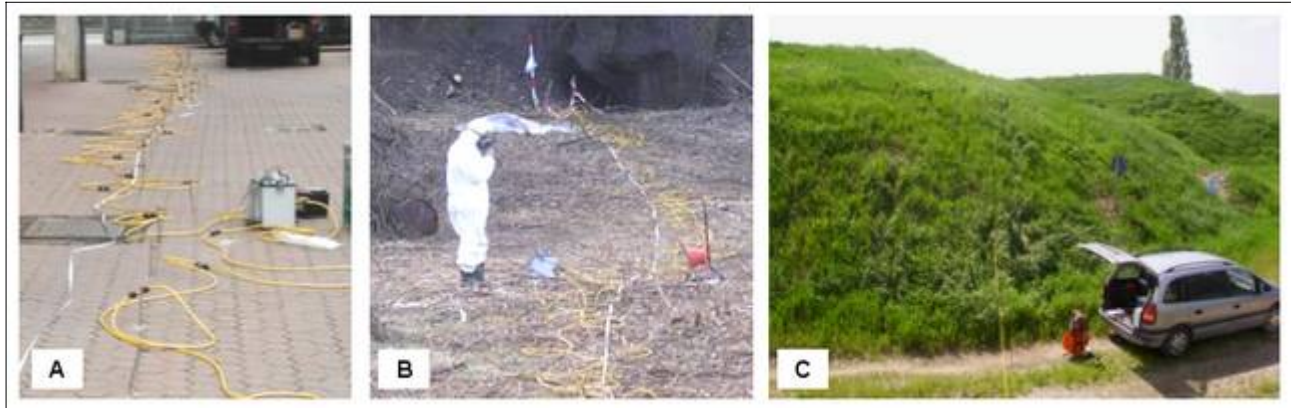


Fig. 8 – Esempi di indagini realizzate con metodologia geoelettrica multielettrodo (ERT):

- A: Rilievo su pavimentazione realizzata sopra rifiuti interrati (TO);
- B: Rilievo su discarica di rifiuti tossico-nocivi (RM);
- C: Rilievo su discarica esaurita di rifiuti solidi urbani (LT).

Per ottenere, a partire dai valori di resistività apparente acquisiti, la distribuzione delle resistività reali nel sottosuolo, è necessario risolvere un “problema inverso”. In molte applicazioni geofisiche, la soluzione del problema inverso consente di determinare i valori di quantità non misurabili direttamente, parametri incogniti, a partire da quantità misurabili, i dati sperimentali, attraverso l'assunzione di un modello, cioè di una legge fisica che li correla. Tale modello è una rappresentazione matematica ed ideale di una porzione di sottosuolo; il modello è caratterizzato dai “parametri del modello” che sono le quantità fisiche che si vuole stimare dai dati misurati. Il software utilizzato per il processo di inversione (*RES2DINV*, © Loke) implementa un modello a celle (o blocchi), i cui parametri sono i valori di resistività delle singole celle in cui il sottosuolo è stato suddiviso; la soluzione agli elementi finiti o alle differenze finite fornisce i valori di resistività reale. Dal modello geofisico così ottenuto, con opportune tarature e/o in base alle conoscenze geologiche del sottosuolo, si elabora un modello geo-litologico. La profondità di indagine raggiunta è mediamente pari a 1/7 della lunghezza dello stendimento (utilizzando l'*array Wenner-Schlumberger*): pertanto, disponendo 48 elettrodi con interasse pari a 3 m si ottiene una estensione di indagine laterale pari a 141 m ed una profondità di circa 20 m dal piano campagna.

Lo strumento utilizzato in tutti gli esempi proposti in seguito è un *SYSCAL Pro Switch 72-96* (*Iris Instruments*, Francia) (fig. 9): si tratta di un georesistivimetro dalle elevate caratteristiche tecniche (massima corrente immessa: 2.5 A, voltaggio: 800 V, potenza: 250W, precisione nella misura della corrente: 0.2%) che consente, in automatico, di immettere corrente secondo sequenze pre-programmate dall'operatore e controllate da un microprocessore integrato. È inoltre dotato di 10 dipoli di ricezione (canali) che consentono l'acquisizione di sequenze di migliaia di quadripoli con tempistiche ragionevoli (con *array Dipolo-Dipolo* e *Polo-Dipolo*).



Fig. 9 – Georesistivimetro SYSCAL Pro Switch 72 con alimentazione esterna (comune batteria da auto da 12V).

### 3.2 CARATTERIZZAZIONE DI DISCARICHE CON TOMOGRAFIA GEOELETTRICA – CASO STUDIO N. 1

L'indagine è stata realizzata all'interno di una piattaforma polifunzionale per il trattamento dei rifiuti, sita in una località della pianura alluvionale del nord Italia. Il rifiuto in esame è costituito da fanghi industriali inertizzati (*Chemfix*) allocati all'interno di vasche derivate dalla passata attività di estrazione di argilla. Scopo dell'intervento è stata la valutazione delle geometrie dei diversi nuclei di discarica, in termini di spessori ed estensione laterale delle singole celle. In particolare l'indagine si è resa necessaria in seguito al verificarsi di fenomeni di cedimento della pavimentazione, che hanno interessato alcuni fabbricati interni al sito. La sezione tomografica, riportata in figura 10, evidenzia la presenza di tre celle di discarica, di cui quella centrale (tra le progressive 60 e 100 m) risulta interessata da un evidente fenomeno deformativo: tale fenomeno è stato la causa di un cedimento della pavimentazione del fabbricato soprastante, nonché di gravi problemi di stabilità dello stesso. Come previsto il rifiuto ha comportamento fortemente conduttivo (resistività elettrica inferiore a  $50 \Omega\cdot\text{m}$ , tonalità di colore blu-viola); al contrario il terreno naturale sottostante, costituito da ghiaie e sabbie presenta valori medio-alti di resistività ( $\rho = 50 \div 100 \Omega\cdot\text{m}$ , tonalità di colore giallo-rosso).

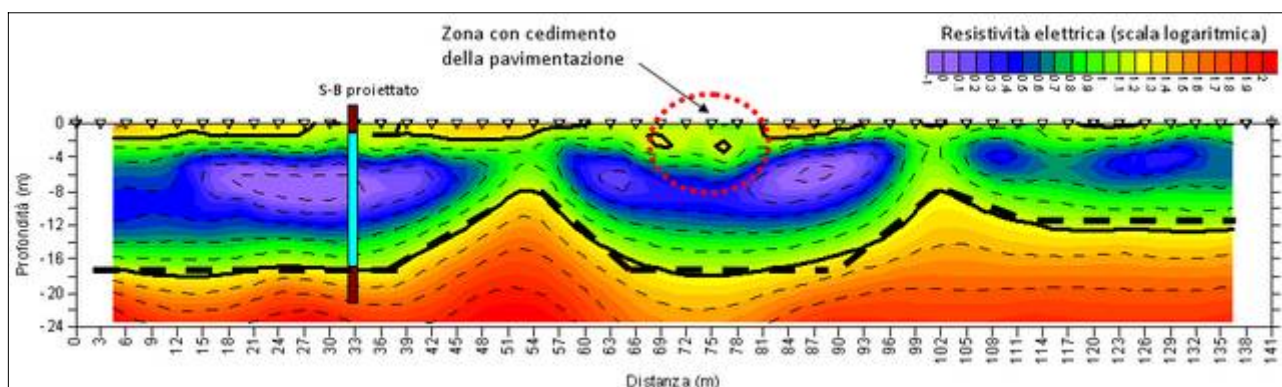


Fig. 10 – Sezione geoelettrica realizzata per la caratterizzazione di tre nuclei di scarica (dispositivo elettrodico: *Dipolo-Dipolo*).

Al fine, inoltre, di avere una ricostruzione dell'ubicazione delle diverse celle di discarica ed una stima dei volumi dei materiali stoccati, è stato realizzato un modello pseudo-tridimensionale dell'intero sito in esame (fig. 11, in dettaglio la ricostruzione 3D di una cella di discarica).

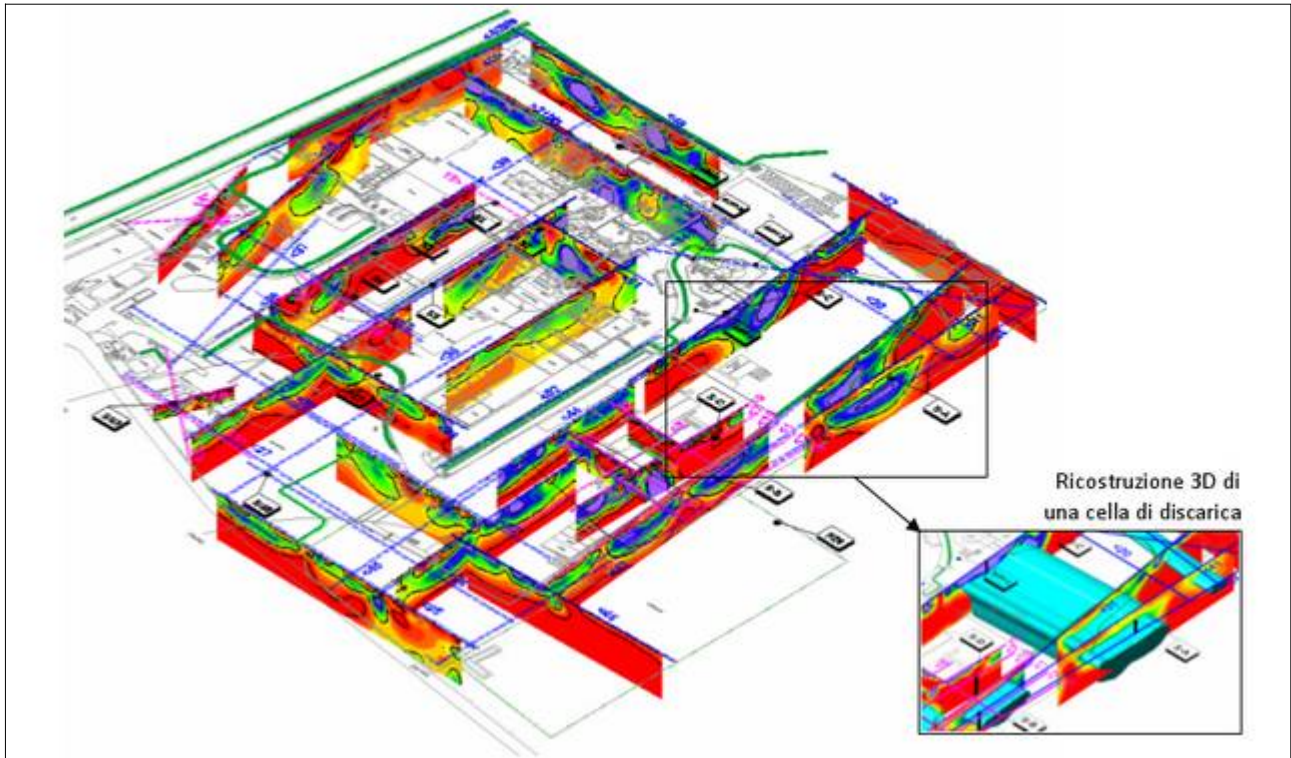


Fig. 11 – Modello 3D: blocco-diagramma ricostruito con le sezioni geoelettriche 2D e dettaglio di una cella di discarica.

### 3.3 CARATTERIZZAZIONE DI DISCARICHE CON TOMOGRAFIA GEOELETTRICA – CASO STUDIO N. 2

Il secondo caso studio si riferisce ad un'indagine realizzata con metodologia geoelettrica in una discarica di rifiuti solidi urbani all'interno di una ex cava di calcare cretaceo nei pressi di Swansea (UK). Obiettivo dell'indagine è stata, oltre alla stima dello spessore della coltre di rifiuti, la valutazione della presenza di perdite di percolato al disotto del telo in HDPE. In figura 12 si riporta una vista assometrica del modello tridimensionale ottenuto dalle diverse linee tomografiche 2D, ed una di tali sezioni (A-A') in cui è particolarmente evidente l'ottimo stato di conservazione del telo basale: l'esistenza di una eventuale discontinuità all'interno di questo, infatti, sarebbe evidenziata dalla presenza di anomalie conduttive al disotto della base della discarica.

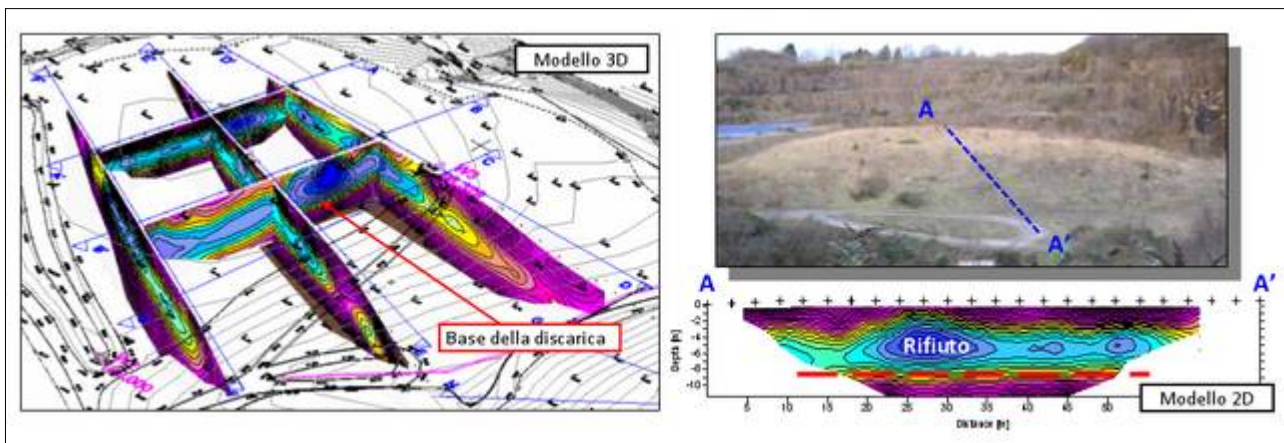


Fig. 12 – Indagine geoelettrica su discarica esaurita: modello 3D e sezione tomografica.

### 3.4 CARATTERIZZAZIONE DI DISCARICHE CON TOMOGRAFIA GEOELETTRICA – CASO STUDIO N. 3

Questo ultimo caso studio descrive i risultati ottenuti da un'indagine realizzata con metodologia geoelettrica all'interno di una discarica esaurita di rifiuti solidi urbani (nord Italia). In questo caso l'intervento era volto all'individuazione di eventuali accumuli di percolato all'interno del corpo della discarica. A tale scopo sono state eseguite contemporaneamente misure di resistività elettrica e di polarizzazione indotta (fig. 13): le prime hanno consentito di ricostruire la geometria del corpo della discarica (estensione e profondità), mentre le seconde hanno evidenziato la presenza di numerose sacche di percolato all'interno del volume di rifiuti. Questo è dovuto al fatto che l'elevata salinità del percolato fa sì che, al passaggio di corrente, esso generi un campo elettromagnetico: il parametro di polarizzazione indotta misura infatti il valore residuo di tale campo dopo un determinato tempo di decadimento.

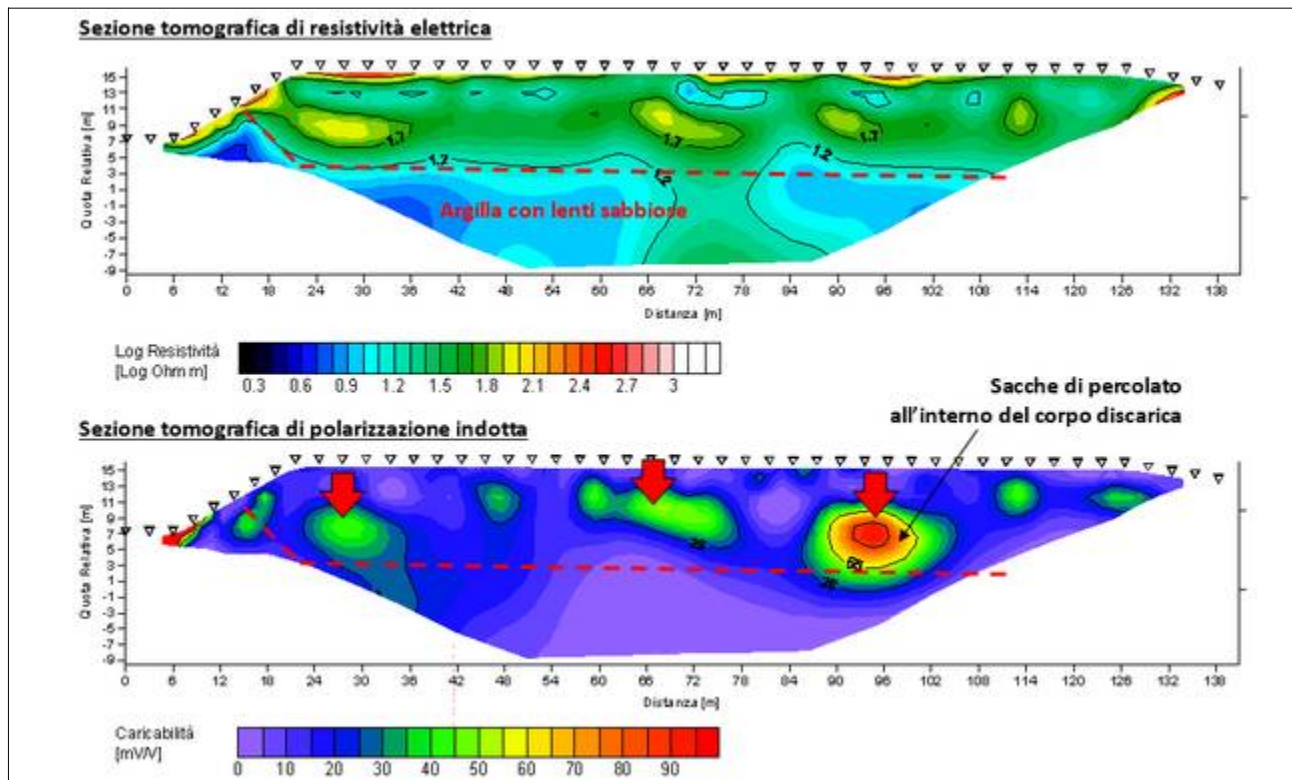


Fig. 13 – Indagine geoelettrica su discarica esaurita: sezioni tomografiche di resistività elettrica e polarizzazione indotta.

Per avere una completa mappatura della disposizione di tali accumuli di percolato sono state realizzate numerose linee tomografiche disposte secondo una maglia per quanto possibile regolare, in modo da investigare l'intero corpo della discarica. Due delle mappe di polarizzazione indotta così ottenute sono riportate in figura 14.

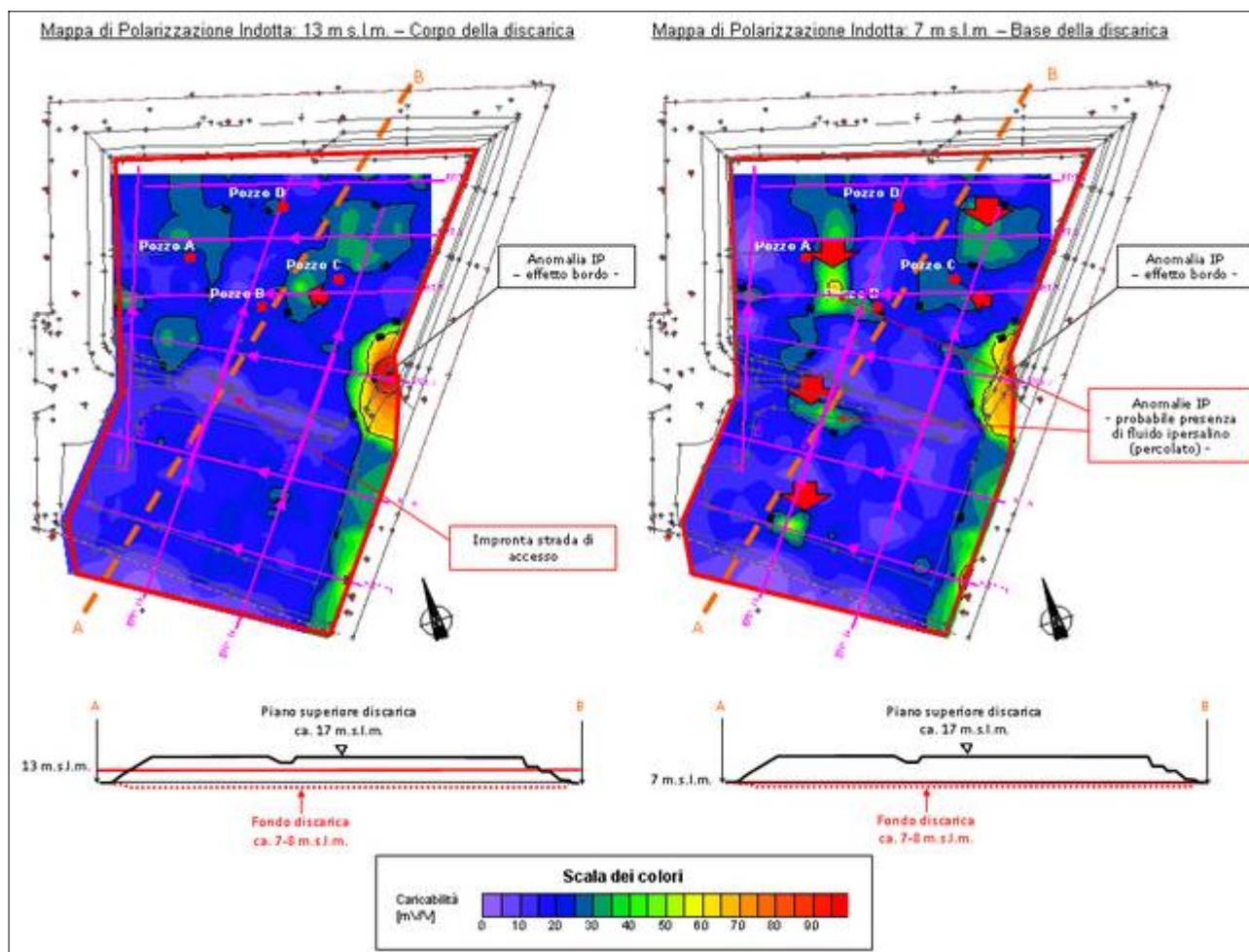


Fig. 14 – Indagini geoelettrica su discarica esaurita: mappe di polarizzazione indotta relative alle quote 13 e 7 m s.l.m..

#### 4. CONCLUSIONI

Al fine di garantire una corretta pianificazione territoriale ed un sostenibile sfruttamento delle risorse naturali, risulta sempre più importante avere una quanto più possibile completa conoscenza delle caratteristiche del sottosuolo; nello specifico, particolare attenzione va posta in relazione alla presenza di discariche (siano queste note – attive o esaurite – o abusive) che rappresentano una delle maggiori cause di interferenza con la realizzazione di infrastrutture, nonché la principale fonte di contaminazione dei terreni e delle falde acquifere sottostanti. A tal proposito le indagini geofisiche costituiscono un valido supporto, in quanto consentono di eseguire, in modo speditivo e non invasivo, delle analisi in aree di vaste dimensioni e di localizzare le zone in cui i parametri fisici presentano delle anomalie rispetto ai normali valori di fondo. Trattandosi di metodologie di indagine indirette, consentono di ottenere informazioni in contesti in cui non sempre la realizzazione di indagini dirette (quali sondaggi geognostici, pozzetti esplorativi, ecc.) risulta applicabile a causa dei rischi connessi all'esecuzione delle stesse (danni ai teli impermeabili a protezione del nucleo di discarica o dispersione di sostanze nocive). Al tempo stesso la realizzazione contestuale di esplorazioni geognostiche, ubicate in punti strategici in relazione ai risultati ottenuti dalla geofisica, rappresenta un fondamentale strumento di taratura per l'interpretazione di questi ultimi, con notevoli vantaggi in termini di tempistiche e di costi.

Per ottenere un'esaustiva e completa caratterizzazione ambientale di un sito di discarica è necessario tenere presente tre obiettivi fondamentali di indagine:

- a) la localizzazione della sorgente di contaminazione;
- b) la caratterizzazione geometrica della sorgente di contaminazione;

c) la caratterizzazione del tipo di rifiuto.

La tipologia di indagine da noi proposta, atta a far fronte a tali problematiche, si articola in due fasi:

- ✓ un' indagine di tipo “areale” con metodologia elettromagnetica, in grado di localizzare in modo speditivo le zone “anomale” correlabili a possibili interramenti di rifiuto all'interno di aree di notevoli dimensioni;
- ✓ una seconda fase di indagine “di dettaglio”, mediante l'esecuzione di tomografie di resistività elettrica in corrispondenza delle zone anomale individuate con la metodologia elettromagnetica.

La realizzazione preliminare dell'indagine elettromagnetica consente una corretta ed efficace ubicazione delle sezioni geoelettriche, garantendo un incremento del grado di efficienza del metodo ed un evidente risparmio economico. Un approccio geofisico “multidisciplinare” di questo tipo, inoltre, riduce significativamente l'ambiguità interpretativa propria delle indagini geofisiche e permette la creazione di modelli bidimensionali e tridimensionali al fine di avere una “visione” d'insieme delle condizioni del sottosuolo.

## BIBLIOGRAFIA

Atenkawa E. A., Sauck W. A., Werkema Jr. D.D., 1998 – Characterization of a complex refinery groundwater contamination plume using multiple geoelectric methods. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, EEGS, Chicago, pp. 427-436.

Barker R. D., 1996 – Electrical imaging and its application in engineering investigations. *Modern Geophysics in Engineering Geology* (ed. D. McCann). Special publication of the Geological Society.

Godio A., Morelli G., 1998 – Mapping of complex hydrocarbons contaminant using geoelectric and electromagnetic methods. *Proceedings of the 4th Meeting of Environmental and Engineering Geophysical Society*, EEGS (European Section), Barcelona, Spain, pp. 19-22.

Godio A., Naldi M., 2002 - Tecnologie geofisiche nella caratterizzazione di siti contaminati. Torino.

Godio A., Naldi M., 2003 - Two-dimensional electrical imaging for detection of hydrocarbon contaminants. *Near Surface Geophysics*, pp. 131-137.

Loke M. H., Barker R.D., 1995 – Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics* 60, pp. 1682-1690.

Kemma A., Dresen L., Raekers E., 1999 – Field application of complex resistivity tomography. *69th SEG meeting, Expanded Abstracts*, Houston, Texas, pp. 331-334.

Mazac O., Benes L., Landa I., Maskova A., 1990 – Determination of the extent of oil contamination by geoelectrical methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics: Environmental and Groundwater 2*, pp. 107-112.

Morelli G., LaBrecque D.J., 1996 – Advances in ERT inverse modeling. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1, pp. 171-186.

Reynolds J. M., 1997 – An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, (ed. Wiley).