

IL RUOLO DELLE TECNICHE D'INDAGINE NON INVASIVE NELLA CARATTERIZZAZIONE DEI SITI CONTAMINATI E NELLA DEFINIZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE: APPLICAZIONI E RISULTATI

M. D'Angelo*, G. Coco* & M. Corrao*

* NovAmbiente S.r.l., Via Livorno n. 1, 95127 Catania, Italy, novambiente@tiscali.it.

RIASSUNTO

La caratterizzazione ambientale è la fase propedeutica di ogni intervento di bonifica di un sito inquinato. Con i suoi obiettivi mira a definire il Modello Concettuale del sito che dovrebbe permettere di capire le varie fenomenologie di migrazione e propagazione della contaminazione nelle varie matrici ambientali e, conseguentemente, di definire, con cognizione di causa, le varie linee di azione da intraprendere durante la caratterizzazione e nelle fasi successive. A supporto delle classiche tecniche d'indagine di tipo invasivo, i metodi non invasivi di tipo geofisico, effettuabili dalla superficie, permettono di ottenere, accoppiati ai primi, un'estensione realistica delle informazioni puntuali in un sistema di riferimento bi-tridimensionale. Le tre tecniche d'indagine qui considerate, la geoelettrica la polarizzazione indotta e la sismica a rifrazione, grazie ai numerosi progressi apportati negli ultimi decenni dall'applicazione delle tecnologie elettroniche e informatiche, si sono modificate e sostanzialmente potenziate a tal punto da ottenere risultati bi-tridimensionali (tomografie). I risultati ottenuti hanno supportato egregiamente le indagini invasive, ponendo queste tecniche come strumenti immediati e talora insostituibili nella comprensione della fenomenologia della contaminazione e soprattutto nella definizione del modello concettuale del sito.

KEYWORDS

Caratterizzazione; modello concettuale; geofisica; tomografia.

INTRODUZIONE

Nell'ambito delle azioni previste dal Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999, n. 471, necessarie alla bonifica dei siti contaminati, la caratterizzazione ambientale del sito assume una importanza primaria, essendo la fase propedeutica di ogni intervento di bonifica, tramite l'attuazione del **Piano della Caratterizzazione**. Tra gli obiettivi di questa fase rientrano la verifica dell'esistenza, il grado e l'estensione volumetrica dell'inquinamento nelle varie matrici ambientali, l'individuazione delle vie di propagazione degli inquinanti, la localizzazione dei soggetti potenzialmente esposti e le vie di esposizione, la caratterizzazione delle matrici ambientali interessate dalla presenza delle sorgenti contaminanti e dai fenomeni di migrazione. È, insomma, il mezzo per ottenere la diagnosi ambientale necessaria a porre in essere le giuste cure da adottare (bonifiche).

Grande importanza assume anche la corretta formulazione del **Modello Concettuale** che, soprattutto, dovrebbe permettere di capire le varie fenomenologie di migrazione e propagazione della contaminazione nelle varie matrici ambientali e, conseguentemente, di definire, con cognizione di causa, le varie linee di azione da intraprendere durante la caratterizzazione e nelle fasi successive. Il Modello

Concettuale viene definito in fase preliminare, antecedentemente alle attività investigative del Piano della Caratterizzazione, sulla base delle informazioni pregresse e disponibili ed è indispensabile alla scelta della metodologia d'indagine. A seguito dei risultati della caratterizzazione si procede alla formulazione definitiva del modello concettuale, utile alla corretta applicazione delle tecnologie di bonifica scelte per il sito. Generalmente ci si affida solo a metodologie di indagine di tipo diretto e invasivo (sondaggi geognostici) che, essendo basate su campionamenti puntuali, hanno un limite dato dall'estensione delle informazioni e dalle ricostruzioni teoriche derivanti, supportate spesso da dati insufficienti. Infatti la complessità dei sistemi naturali e il comportamento e la mobilitazione nel sottosuolo delle sostanze percolanti o idroveicolate non sono facilmente intelligibili, tramite le informazioni derivanti dai soli sondaggi geognostici.

Gli scriventi avendo formazioni professionali differenti ma complementari, coniugando la notevole esperienza in campi più tradizionali, quali quelli della idrogeologia, della geotecnica e della meccanica delle rocce, e in campi relativamente recenti, quale quello ambientale, hanno condotto numerosi studi e applicazioni con varie tecniche non invasive di tipo geofisico nel settore delle indagini nei siti inquinati.

DESCRIZIONE DI ALCUNE TECNICHE D'INDAGINE NON INVASIVA

A supporto delle indagini di tipo diretto i metodi non invasivi di tipo geofisico, effettuabili dalla superficie, permettono di ottenere, accoppiati ai primi, un'estensione realistica delle informazioni puntuali in un sistema di riferimento bi-tridimensionale. Le applicazioni delle varie metodologie d'indagine geofisica sia di tipo sismico sia di tipo elettrico ed elettromagnetico, sono in continua espansione nel campo della caratterizzazione: i numerosi progressi apportati negli ultimi decenni dall'applicazione delle tecnologie microelettroniche e informatiche, hanno modificato e sostanzialmente potenziato i sistemi di misura, di acquisizione ed elaborazione dei dati ottenuti tramite tali metodi e, contemporaneamente, hanno permesso lo sviluppo di nuove tecniche d'indagine.

Nel seguito vengono descritte tre tecniche direttamente sperimentate, che si sono rivelate più idonee alle situazioni riscontrate rispetto ad altre, ottenendo risultati apprezzabili e spendibili praticamente. Di queste tecniche due sono di tipo geoelettrico, la tomografia elettrica e una sua variante, la polarizzazione indotta, e si basano sulla lettura e interpretazione della risposta dei terreni alla energizzazione di correnti elettriche indotte, mentre la terza è di tipo sismico, la sismica a rifrazione tomografica, e si basa sulla lettura e interpretazione della risposta dei terreni alle sollecitazioni di onde sismiche.

Tomografia elettrica

La "Tomografia Elettrica", consiste nella determinazione di profili di resistività dei terreni indagati attraverso la disposizione sul suolo di un numero elevato d'elettrodi (Barker, 1981), che progressivamente vengono spostati lungo una data direzione variandone la distanza inter-elettrodica al fine di aumentare la profondità d'investigazione. Il set di dati così ottenuto consente la costruzione di una matrice di valori di resistività la cui inversione, mediante algoritmi matematici, restituisce la definizione del mezzo investigato in "immagini" di elettro-resistività di tipo tomografico (cfr. Fig. 3).

Strumentazione ed acquisizione dati. La strumentazione utilizzata consiste in un georesistivimetro multielettrodico digitale (16 bit) con risoluzione fino a 100 microvolts, dotato di una gestione automatica degli elettrodi, in grado cioè, di commutare gli elettrodi disposti lungo la sezione da investigare in elettrodi d'immissione (punti di energizzazione del terreno) ed in elettrodi di misura con tutte le possibili combinazioni quadripolari degli elettrodi (Fig. 1). L'acquisizione dei dati consiste nel misurare la differenza di potenziale che si genera nei picchetti di misura M-N, secondo delle geometrie prefissate. La restituzione dei dati avviene in forma matriciale consentendone l'immediata elaborazione.

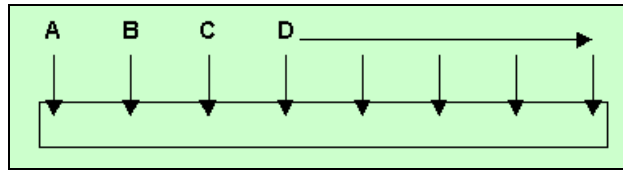


Figura 1. Misura multielettrodica tipo dipolo-dipolo.

Geometria d'acquisizione. Da quanto detto, risulta che la scelta della geometria da adottare è uno degli aspetti più importanti nell'esecuzione della tomografia elettrica, spesso dettata dalle condizioni logistiche in cui si opera. Esistono diverse configurazioni geometriche ciascuna delle quali ha una sua peculiarità. Solitamente si adotta la geometria dipolo-dipolo. La prospezione geoelettrica dipolo-dipolo consiste nel disporre due elettrodi d'immissione (coppia dipolare A-B) e due elettrodi di misura (coppia dipolare M-N). La distanza tra ciascuna coppia d'elettrodi è uguale ad a ($A \leftarrow a \rightarrow B$; $M \leftarrow a \rightarrow N$), mentre la distanza tra le coppie A-B e M-N (separazione dipolare $n = l/b$) è un multiplo di a (cfr. Fig. 2). Tale configurazione geometrica consente di indagare un punto del mezzo, dato dall'intersezione di due semirette, con pendenza di 45° , partenti dai centri dei due dipoli e, rispettivamente, di energizzazione e di misura.

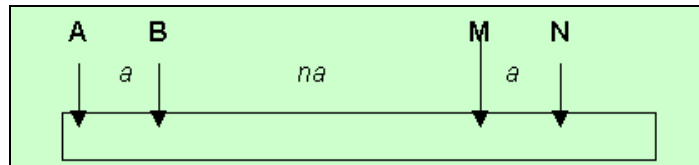


Figura 2. Disposizione geometrica degli elettrodi di energizzazione (A e B) e di misura (M e N).

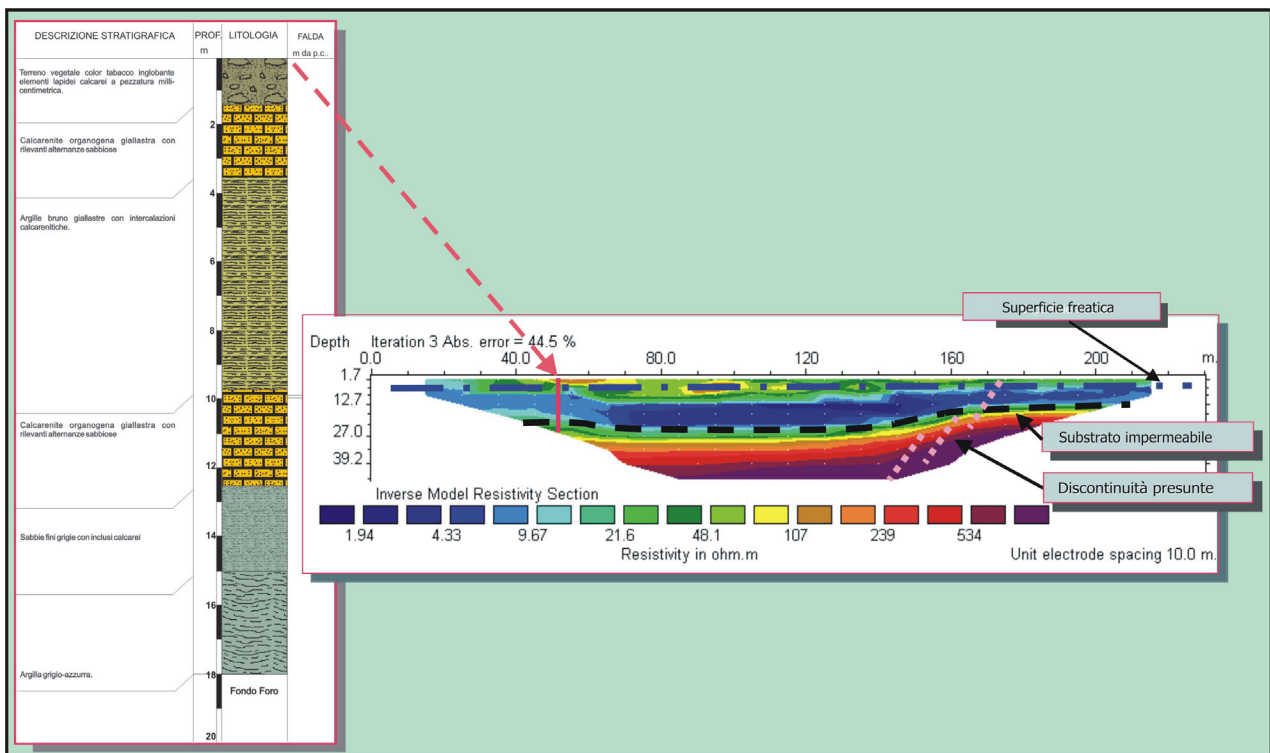


Figura 3. **Profilo di resistività** di tipo tomografico a media definizione, con profondità di investigazione di circa 40 m; la presenza di orizzonti a bassa resistività (blu), a 12÷13 m di prof. c.a., nel caso specifico, indica la falda; si osservi la correlazione con la colonna stratigrafica posta in adiacenza, derivante dal sondaggio indicato.

Polarizzazione indotta

La tecnica, appartenente, come la precedente, alla famiglia dei metodi geoelettrici, si basa sul principio che un corpo naturale energizzato tramite corrente elettrica indotta, al cessare di tale energizzazione ha un potenziale V_e che non cade a zero istantaneamente, ma si scarica in un certo tempo (che può durare

da qualche secondo a parecchi minuti), avvicinandosi asintoticamente allo zero. Si riconosce così, sperimentalmente, l'esistenza nel sottosuolo del fenomeno della polarizzazione indotta o provocata (indicata nel seguito con P.I.). Il tutto avviene come se nel sottosuolo ci fossero tanti piccoli condensatori che si caricano all'immissione di corrente e si scaricano alla sua interruzione. Per spiegare l'origine della P.I., fenomeno molto complesso, si considerano due tipi di polarizzazione, quella di membrana e quella di elettrodo.

Polarizzazione di elettrodo. Tale tipo di polarizzazione, detta anche metallica o elettronica, ha luogo quando nella roccia sono presenti particelle metalliche o minerali conduttivi, non in forma massiva ma disseminati nella matrice. Nel caso della particella conduttiva si ha un doppio strato elettrico (all'interfaccia tra conduttore e soluzione) che costituisce l'equivalente di un effettivo dipolo elettrico. Al passaggio della corrente, che è in parte elettrolitica e in parte elettronica, gli ioni si accumulano all'interfaccia del granulo conduttore e ne ostacolano il flusso: si ha una polarizzazione addizionale, detta anche sovratensione (overvoltage) o, appunto, polarizzazione di elettrodo. All'interruzione della corrente gli ioni bloccati si diffondono, ripristinando la situazione originaria di equilibrio dopo un tempo ben misurabile. Il fenomeno della polarizzazione d'elettrodo si ha in presenza di tutti i minerali metallici, la maggior parte dei solfuri, alcuni ossidi (come la magnetite, l'ilmenite, la cassiterite) e la grafite.

Polarizzazione di membrana. La polarizzazione di membrana, detta anche elettrolitica o non metallica, ha luogo quando nella roccia non sono presenti particelle metalliche o metalloidi a conducibilità elettronica. La conducibilità, in tal caso, è elettrolitica ed è favorita dalla presenza di fluido nei pori della roccia. La polarizzazione di membrana è molto cospicua in rocce con dispersione di particelle d'argilla in bassa concentrazione ($\approx 10\%$) e quando bassa è pure la salinità nel fluido dei pori. Si è visto, inoltre, che il fenomeno si manifesta, in maniera ottimale, in presenza di fluidi quali percolati di discarica, i cui valori di conducibilità tendono all'infinito, mentre è ancora in fase sperimentale la risposta in presenza di idrocarburi.

Strumentazione ed acquisizione dati. L'adozione di tecniche di energizzazione e misura uguali a quelle adottate nella tomografia elettrica, permette di ottenere risultati ad alta definizione di tipo bi e tridimensionale. Questa tecnica generalmente si applica in contemporanea con la tomografia elettrica, sfruttandone l'energizzazione indotta. Conseguentemente si ottengono risultati confrontabili e sovrapponibili. La strumentazione e le geometrie di acquisizione dei dati sono le medesime della tecnica di tomografia elettrica, descritta precedentemente.

Sismica a rifrazione tomografica

La sismica tomografica, rispetto alla tradizionale tecnica sismica a rifrazione, si basa, come nella tomografia elettrica, sull'utilizzo di un più alto numero di punti di energizzazione del terreno (punti di scoppio) e di acquisizione dati (geofoni), oltre, ovviamente, ad adottare modelli di calcolo più complessi e, quindi, adatti alla maggiore mole di dati. Come nel caso delle tomografie elettriche, si ottengono dei profili con una notevole densità di dati che, però, sono relativi alle velocità delle onde sismiche indagate, che nel caso specifico sono sempre le onde di tipo longitudinale, dette "P" (cfr. Fig. 4).

Strumentazione ed acquisizione dati. Per la ricezione delle onde sismiche, gli scriventi utilizzano dei geofoni verticali (P) del tipo "OYO", a cortissimo periodo (> 10 Hz), con interspazio pari a 10 metri. La strumentazione utilizzata è costituita da un registratore multicanale, a memoria incrementale, 16 bit di risoluzione e con opportuni "setup" di misura della stazione in campagna. L'energizzazione viene generalmente eseguita mediante fucile sismico a cartuccia calibro 8 con off-set variabili.

Metodologia di calcolo. Nelle indagini geofisiche di tipo sismico assume notevole importanza la metodologia di calcolo adottata che nel caso specifico è il G.S.A.O. (*Generalized Simulated-Annealing*

Optimization) ossia un modello di calcolo che consente l'ottimizzazione **non lineare** dell'inversione dei tempi di primo arrivo delle fasi dirette e rifratte delle onde sismiche rifratte registrate. Il vantaggio di tale tecnica è nell'assoluta indipendenza dal modello iniziale di velocità.

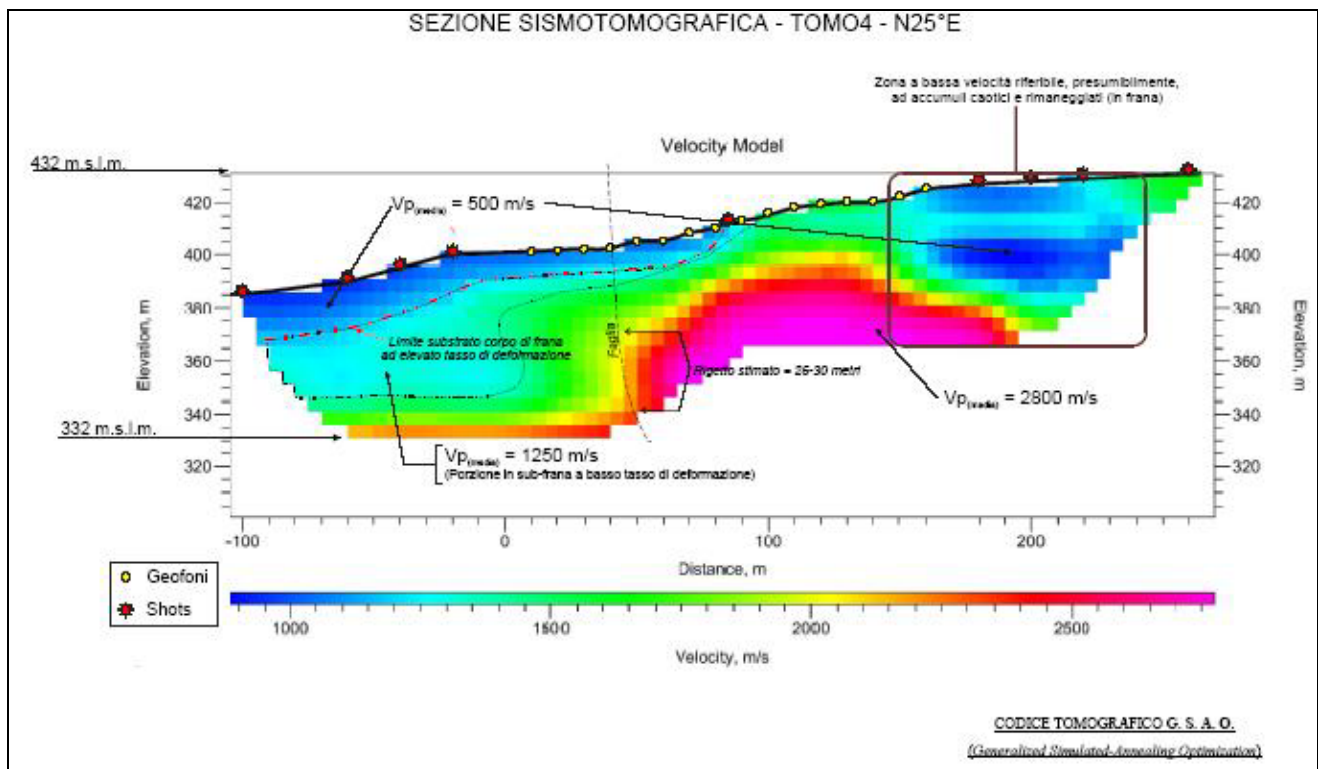


Figura 4. **Profilo sismico tomografico** di un pendio in cui si evidenziano vari corpi di frana (zone a bassa velocità) e una dislocazione tettonica (faglia diretta), di cui si riesce a stimare il rigetto.

APPLICAZIONI E RISULTATI

Applicazione di tecniche geoelettriche

Nei paragrafi seguenti viene esposto un caso di applicazione delle tecniche di tipo geoelettrico, sia tomografia elettrica sia polarizzazione indotta. L'applicazione si è svolta in una discarica di RSU, in cui sono state effettuate tre stese elettriche tomografiche parallele tra di loro e distanziate una decina di metri l'una dall'altra, con distanze interelettrode di 2,5 m, profondità indagate comprese tra i 10 m della Tomo 3 (lunga 65 m) e i 13 m delle Tomo 1 e 2 (lunghe entrambi 80 m). Sulla terza (Tomo 3) è stato applicato anche la tecnica della polarizzazione.

Evidenze. Nel settore di sinistra di tutte e tre le sezioni 2D, si è individuata un'ampia area a bassa resistività (0.27-50.00 ohm×m) che si estende fino a 7.00 m di profondità. Tale area risulta coincidere con l'ammasso di rifiuti ancora ricco di fase liquida. In Tomo 1 e 2 le misure rilevate dagli elettrodi finali dello stendimento individuano una rilevante caduta di resistività in un'area ristretta, ad una profondità compresa tra i 5 e i 10 m (cfr. Fig. 5). Questa seconda zona ad alta conducibilità è da attribuirsi alla presenza del tubo di raccolta del percolato che evidenzia una via preferenziale di drenaggio. Il fondo della vasca posto a circa 11 m di profondità dal p.c., sembra efficiente, da come si desume dall'andamento degli strati ad alta resistività che contengono l'ammasso di rifiuti (colori dal giallo al marrone scuro). Invece nel profilo di resistività della 3^a tomografia (cfr. Fig 6) si evince una caduta di resistività, oltre che nel settore sinistro, in alcune zone in basso, in corrispondenza del fondo. Dal profilo restituito tramite i valori di "caricabilità" del percolato (polarizzazione indotta) si evidenzia proprio una zona con alti valori che sembrerebbe delineare dei vettori di fuga di percolato dal fondo della vasca verso l'esterno. Situazione riscontrata nel seguito delle attività investigative condotte tramite

le indagini invasive, che sono state indirizzate dai risultati ottenuti con le indagini geofisiche.

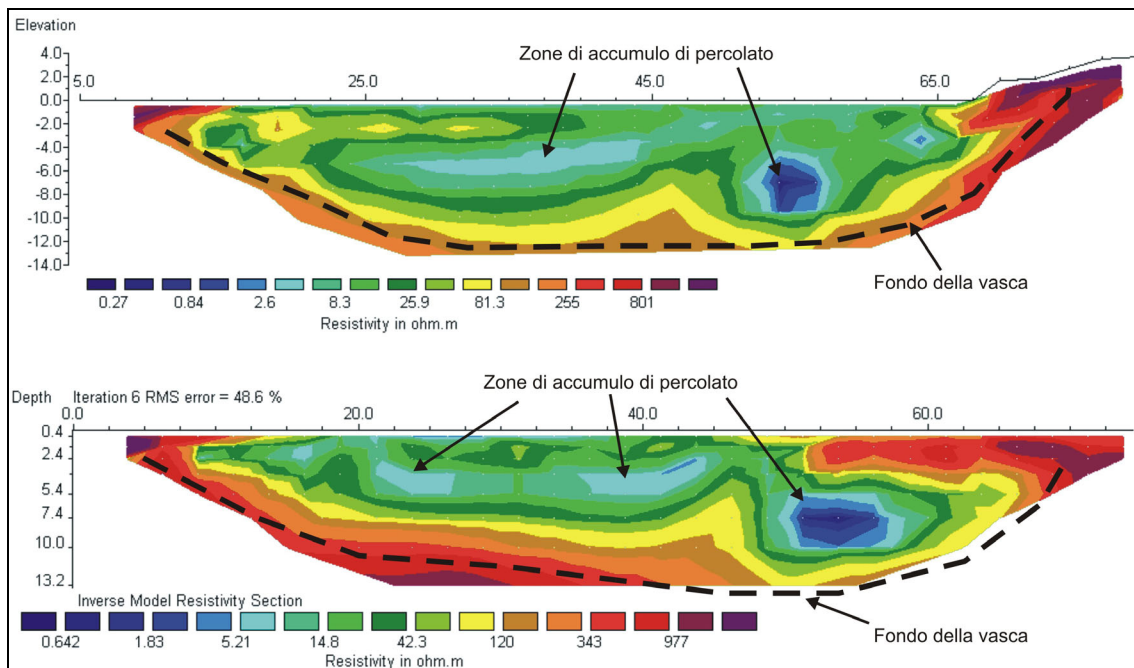


Figura 5. Profili **tomografici elettrici** n° 1 (in alto) e 2 (in basso) con evidenziazione degli elementi riscontrati.

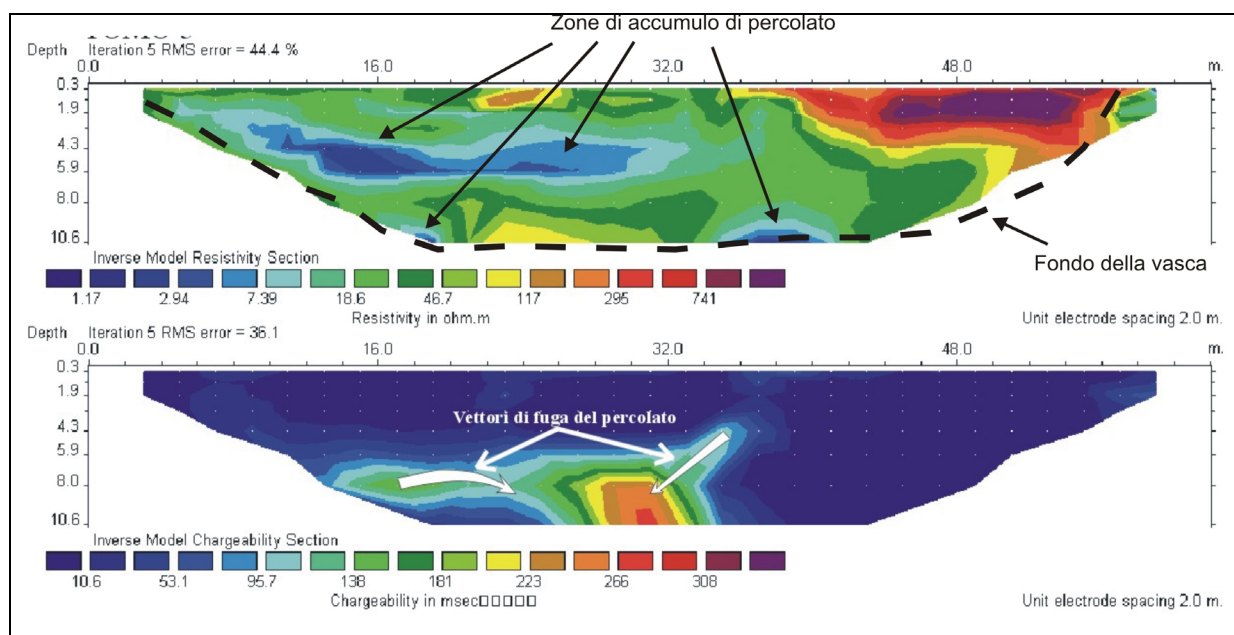


Figura 6. Profili tomografici della stesa n° 3 effettuati con metodo **geoelettrico** (in alto) e di **polarizzazione** (in basso) in cui si osservano i vettori di fuga del percolato (freccie bianche).

Altre applicazioni. Oltre ai profili, con la tomografia elettrica si possono ottenere anche livelli planimetrici o piani sezioni corrispondenti a varie profondità di indagine (piani quotati), tramite l'intersezione e l'interpolazione dei valori ottenuti con i profili di resistività. Nell'esempio riportato in Fig. 7 sono evidenti sacche di prodotto idrocarburico, la cui presenza è stata verificata con indagini dirette (sondaggi geognostici).

Non si deve trascurare anche il notevole apporto che tale tecnica dà nella ricostruzione della stratigrafia dei siti, in cui è necessario capire lo sviluppo e l'andamento delle matrici (acqua e roccia) attraverso cui avviene la veicolazione dei contaminanti, così come riportato ad esempio in Fig. 3.

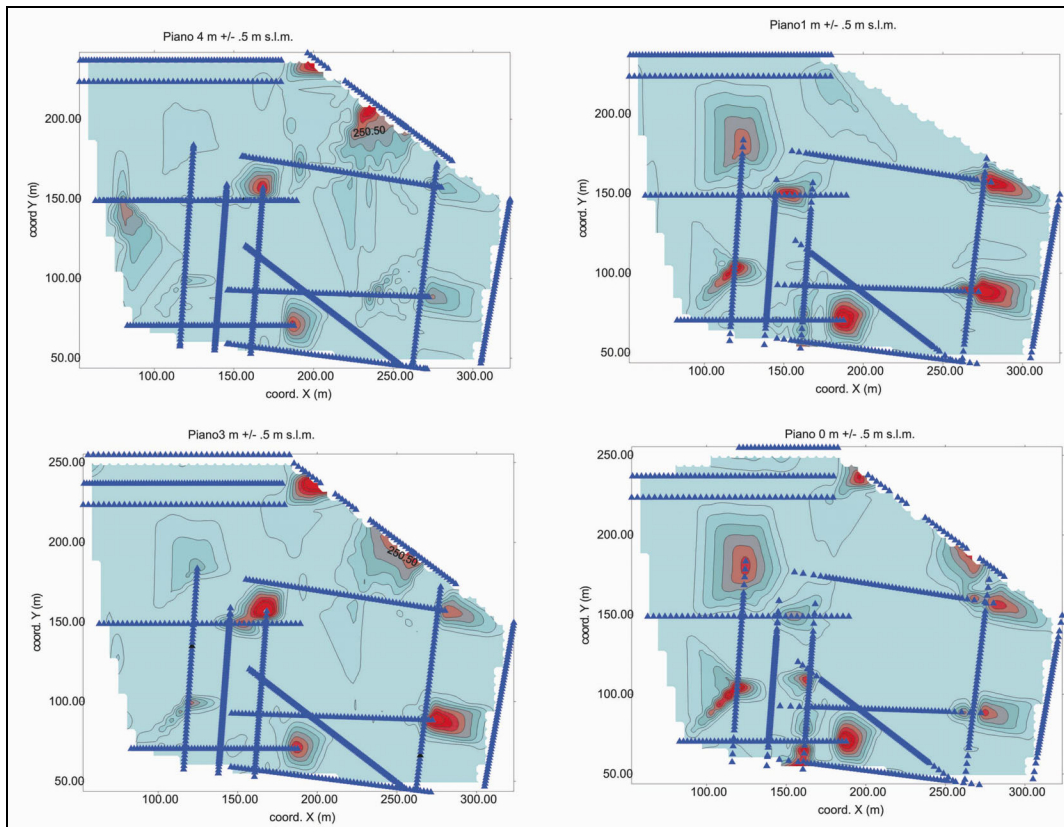


Figura 7. Piani quotati (a 0, 1, 3, 4 m s.l.m.) estrapolati dai **profili di resistività** (tracce in blu) in cui sono evidenti i *plumes* di contaminazione degli idrocarburi (in rosso).

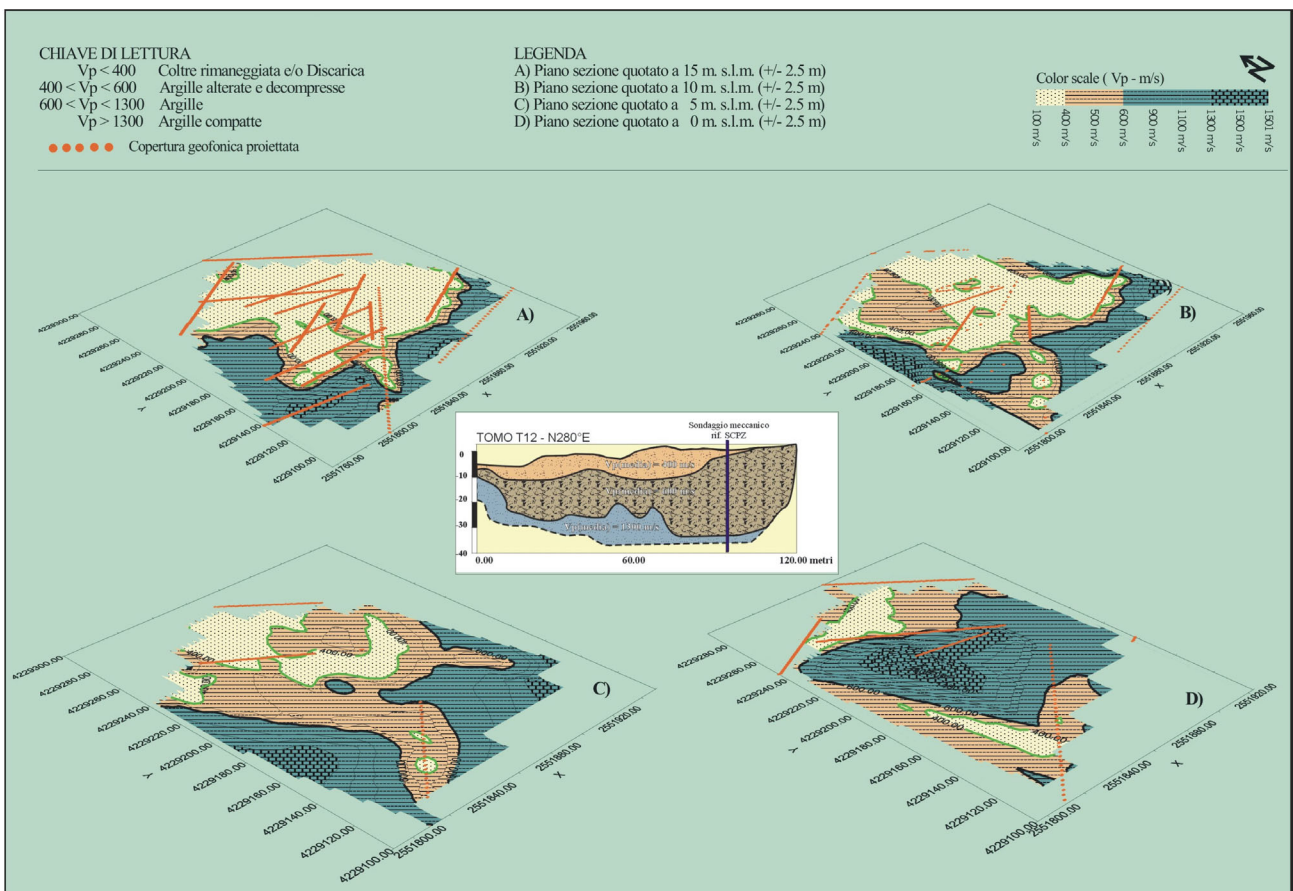


Figura 8. Piani quotati di ricostruzione del sottosuolo di una discarica, ottenuti tramite tecnica di **sismica a rifrazione con applicazione tomografica**; al centro della figura è riportata una sezione stratigrafica ricostruita (giallo = coltre rimaneggiata e/o discarica; marrone = argille alterate e decomprese; azzurro = argille)
Applicazione della tomografia sismica a rifrazione

Anche nel caso della sismica si possono elaborare profili (cfr. Fig. 4), in cui si evidenziano in maniera ottimale le situazioni strutturali, e piani quotati, come quelli riportati nell'esempio di Fig. 8, in cui è stata indagata una discarica dove si riscontravano problemi di dissesto geomorfologico oltre a quelli di propagazione della contaminazione da percolato nelle matrici ambientali circostanti.

Le ricostruzioni ottenute tramite i profili (non riportate in questa sede per motivi di editing) e i piani quotati hanno permesso di avere una chiave di lettura delle fenomenologie in atto, di più facile e immediata comprensione estrapolando così i dati ottenuti dalle indagini invasive di tipo puntuale (sondaggi geognostici). È stato possibile individuare con maggior sicurezza l'andamento delle superfici di scivolamento dei movimenti gravitativi e lo sviluppo nello spazio dell'ammasso di rifiuti; conseguentemente si sono potuti progettare con consapevolezza e sicurezza gli opportuni interventi di messa in sicurezza ambientali e morfologici.

CONCLUSIONI

Le tecniche d'indagine adottate hanno permesso di ottenere risultati altrimenti difficilmente raggiungibili con le classiche tecniche d'indagine invasive, con le quali si ottengono dati affidabili, ma di tipo unidimensionale e passibili di errori interpretativi, quando si cerca di correlarli con quelli ottenuti nei punti d'indagine del medesimo sito. Le ricostruzioni del sottosuolo ottenibili con le tecniche geofisiche considerate sono, con le moderne applicazioni informatiche di elaborazione, fortemente realistiche e la loro interpretazione è difficilmente passibile di errori. Vero è che, comunque, bisogna sempre effettuare correlazioni con i dati ottenuti dalle indagini invasive, al fine di ottenere tarature univoche e affidabili.

Gli esempi riportati, che per ragioni di editing sono stati esposti in maniera sintetica, hanno voluto dimostrare che queste tecniche hanno un ampio spettro di applicazioni e la loro adozione, già sperimentata dagli scriventi in vari campi della geologia ambientale e tecnica (idrogeologia, geomorfologia, geotecnica) può risolvere elegantemente e vantaggiosamente le varie problematiche interpretative e progettuali che si presentano nel campo della giovane disciplina dello studio dei siti contaminati, prima fra tutti la definizione del Modello Concettuale del sito. L'applicazione di indagini non invasive, anche se a prima vista più costose delle invasive, permette, nell'insieme, notevoli risparmi nei tempi e, quindi, anche nei costi di realizzazione dell'attività d'investigazione, ottenendo risultati più apprezzabili rispetto all'adozione dei soli metodi tradizionali.

BIBLIOGRAFIA

- Dahlin, T., Bjelm, L. and Svensson, C. (1996). Extended Abstracts. *Procs. 2nd Meeting Environmental and Engineering Geophysics*, Nantes, 2-5 September 1996, p 109-112. (Link to Lund University)
- Dobrin, M.B. (1976). Introduction to geophysical prospecting. Fourth ed., New York, McGraw-Hill
- Doll, W.E., Gamey, T.J., Watson, D.B. and Jardine, P.M. (2002). Geophysical Profiling In Support Of A Nitrate And Uranium Groundwater Remediation Study, Extended Abstracts. *2002 Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Las Vegas, NV. Feb. 10-14, 2002, 10p
- Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, vol 44, no 1, p 131- 152.
- Pullamannappallil, S.K. and Louie, J.N. (1994). A Generalized Simulated-Annealing Optimization for Inversion of First-Arrival Times. *Seismological Laboratory (174)*, Mackay School of Mines, University of Nevada, Reno. Published in Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 5, pp. 1397-1409