

APAT
Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici

Stage

UTILIZZO DELLE METODOLOGIE GEOFISICHE PER LA
CARATTERIZZAZIONE E BONIFICA DEI SITI
CONTAMINATI

Studio realizzato dal Dott. Geol. Domenico Ferretti
Tutor: Ing. Giuseppe Marella

Servizio per la Promozione della Formazione Ambientale

Febbraio 2004

PREFAZIONE

La tutela ambientale è un settore in continua evoluzione che ha comportato, negli ultimi anni, una forte presa di coscienza del legame che unisce uomo e ambiente. Nel quadro complessivo delle priorità ambientali in Italia, particolare rilievo assume la bonifica dei siti contaminati, date le forti correlazioni tra degrado ambientale e qualità della vita. L'utilizzo sistematico del nostro territorio come "contenitore" di tutto ciò che non ci è più utile ha portato alla contaminazione di vaste aree nell'illusione che ciò che nascondiamo nel sottosuolo, lontano da una visione diretta, non rappresenti più un pericolo. In realtà il nostro rapporto con il mondo che ci circonda e ci ospita è molto più stretto di quanto possiamo supporre. Tutto ciò che di negativo l'azione umana esercita sull'ambiente prima o poi finisce col danneggiarci direttamente od indirettamente. Allo scopo di porre rimedio ad anni di insensato sfruttamento del nostro patrimonio naturale si sta cercando di sviluppare nuove metodologie di studio o di perfezionare quelle già esistenti. Queste metodologie sfruttano la "lettura" di alcuni dei parametri vitali del nostro pianeta, la cui conoscenza è migliorata notevolmente nel tempo. Con questo stage si è quindi cercato di dare un quadro di quelli che sono gli strumenti a nostra disposizione per caratterizzare e bonificare tutto ciò che negli anni abbiamo contaminato.

RIASSUNTO

Negli ultimi anni la crescente sensibilizzazione dell'opinione pubblica verso le tematiche legate all'inquinamento del nostro territorio e la presa di coscienza dell'importanza di preservare il più possibile l'ambiente che ci ospita, ha portato alla necessità di sviluppare tecniche di indagine sempre più mirate alla risoluzione di tematiche di tipo ambientale.

La caratterizzazione dei siti contaminati può essere eseguita tramite indagini geofisiche non invasive che permettono di avere un quadro esauriente delle diverse situazioni locali e di programmare una serie di interventi di bonifica.

Questa tipologia di indagine ha il vantaggio di poter essere condotta con costi relativamente contenuti e in tempi relativamente brevi.

Le tipologie di indagine vanno scelte in base alla problematiche che si presentano caso per caso. E' quindi necessario avere un quadro ben definito della loro potenzialità e degli ambiti settoriali a cui possono essere applicate. Le diverse metodologie di indagine geofisica permettono di analizzare aspetti diversi di un sito contaminato. Spesso è quindi necessario applicarle in maniera sinergica per ottenere un quadro completo ed esauriente della situazione che ci si appresta ad affrontare.

La strumentazione utilizzata in campo geofisico e i software di rielaborazione dei dati di campagna hanno avuto negli ultimi anni un notevole sviluppo tecnologico che ha permesso di pervenire a risultati sempre più dettagliati ed affidabili.

Fondamentale nell'attuazione della geofisica ambientale è l'esperienza nel settore poiché molte sono le variabili che possono influire sui risultati finali che il tecnico si appresta ad interpretare. Risultano quindi fondamentali la preparazione e soprattutto l'esperienza maturata "sul

campo” che spesso risultano essere la discriminante principale per l’ottenimento di risultati importanti e corretti.

ABSTRACT

In the last years, the public opinion sensibility for territory pollution and the consciousness of the importance of environment safeguard increased. This caused the development of investigation techniques aimed to environmental problems solution.

Non-pervasive geophysical methods are increasingly used in investigation of contaminate sites, permitting to understand different local situations and to plan land reclamation. This methods request relatively low cost and execution time.

Geophysical methods are selected on the basis of the kind of problem to resolve. It is necessary a good knowledge of potentiality and applicability of different investigation methods.

Often to have an exhaustive comprehension of the problem to resolve, it is necessary to apply simultaneously different methods.

Geophysical instrumentation and software for field data analysis had in the last years a remarkable technological development, that increased quality of results obtained.

In Enviromental Geophysic the operator experience is fundamental, because there are many variables that can influence interpretation of final results.

Knowledge of geophysical methods and, particularly, field experience determine the obtained of exact and important results.

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE	7
2. METODOLOGIA	8
3. GEOFISICA AMBIENTALE	9
4. GEOELETRICA	11
4a. Metodo di resistività.....	11
4b. Polarizzazione Indotta (PI).....	13
4c. Potenziale Spontaneo (PS)	15
4d. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione	15
5. TOMOGRAFIA ELETTRICA.....	19
5a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione	19
6. METODO ELETTROMAGNETICO	20
6a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione	21
7. GROUND PROBING RADAR (GEORADAR O GPR)	21
7a Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione	23
8. MICROGRAVIMETRIA	24
9. PROSPEZIONI MAGNETICHE.....	26
9a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione	27
10. PROSPEZIONI SISMICHE	29
10a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione	31
11. ESEMPI APPLICATIVI.....	34

<i>11a. Prospezioni sismiche a rifrazione</i>	34
<i>11b. Prospezioni magnetiche</i>	36
12. CONCLUSIONI	38
BIBLIOGRAFIA	40

1. INTRODUZIONE

In Italia i problemi legati al monitoraggio e alla bonifica dei siti contaminati hanno assunto solo negli ultimi anni sempre maggiore importanza. Questo perché è a partire dal 1998 che sono state messe in atto politiche ambientali innovative ed adeguate che tengono conto della necessità di coniugare lo sviluppo sociale ed economico alla sostenibilità ambientale, ottimizzando l'utilizzo delle risorse del territorio e prevedendo il suo ripristino laddove sia stato modificato negativamente dall'azione umana.

Molto frequenti sono i casi in cui materiali inquinanti sono stati stoccati in depositi senza adeguate misure cautelative che, nel corso del tempo, hanno causato danni più o meno gravi all'uomo e all'ambiente alterando, a volte irreversibilmente, aree più o meno estese del territorio nazionale.

Sempre più diffusi sono i casi di contaminamento delle falde idriche ad opera dei percolati inquinanti rilasciati da depositi di rifiuti costruiti senza le necessarie opere di confinamento ed isolamento o per un normale degrado delle stesse.

Al giorno d'oggi è, quindi, sempre più importante un'analisi dei siti contaminati allo scopo di predisporre le metodologie più idonee al loro ripristino o al loro confinamento.

Nel presente lavoro si è cercato di dare un quadro delle principali metodologie geofisiche utilizzate, fornendo una descrizione del principio geofisico su cui si basano e del loro campo di applicazione.

2. METODOLOGIA

La documentazione relativa all'oggetto dello stage è molto ampia. Si va da esperienze di singoli professionisti che operano nel settore della bonifica dei siti contaminati a direttive di carattere normativo che inquadrano la problematica da un punto di vista burocratico.

Le ricerche sono state svolte tramite la consultazione di testi di Geofisica Applicata e di materiale estratto da siti internet ritenuti altamente affidabili, che vengono riportati in bibliografia. Tutta la documentazione è stata attentamente vagliata e verificata.

Grazie alla consulenza di Studi Geologici operanti nel settore e all'esperienza personale dello scrivente sull'utilizzo di alcune delle metodologie geofisiche descritte, è stato possibile descrivere due esempi applicativi.

3. GEOFISICA AMBIENTALE

La Geofisica è una disciplina che analizza il comportamento fisico del nostro pianeta e che può essere applicata allo studio della parte più superficiale della Terra in ambiti locali e a tematiche di tipo ambientale. E' un tipo di analisi indiretta, che non richiede interventi invasivi, ma permette di individuare la presenza nel sottosuolo di corpi o strutture sepolte o di agenti inquinanti, basandosi sulle alterazioni che questi provocano sui caratteri fisici dell'ambiente in cui si trovano, sia superficialmente che nel sottosuolo.

Le principali metodologie utilizzate nella geofisica ambientale sono (Fig. 1):

- Geoelettrica
- Tomografia elettrica
- Elettromagnetismo
- Ground probing radar (georadar o gpr)
- Microgravimetria
- Prospezioni magnetiche
- Prospezioni sismiche a rifrazione e riflessione

Obiettivo della ricerca	Magnetico	Gravimetrico	Elettrico	Ground Probing Radar	Sismico	Elettromagnetismo
Siti archeologici	•		•	•		
Cavità sotterranee		•	•			•
Argille, torbe e suoli			•	•		•
Bacini carboniferi		•			•	
Siti in costruzione				•	•	•
Sicurezza e perdite di dighe			•	•		
Fessure nelle rocce			•	•		•
Zone di frattura nelle rocce	•	•	•	•	•	•
Mappatura geologica	•	•			•	•
Acque sotterranee			•			
Flussi di acque sotterranee			•			
Olio e gas		•			•	
Minerali in area con rocce dure	•	•	•			
Minerali in forte deterioramento	•					
Inquinamento di suoli ed acque sotterranee			•			•
Invasioni di acqua dolce			•			
Depositi di sabbia				•	•	

Fig.1. Ambiti di applicazione delle metodologie geofisiche. • = metodo con migliore applicabilità

4. GEOELETTRICA

La geoelettrica è una metodologia basata sulla misura della resistività dei corpi, cioè sulla loro attitudine a non essere attraversati da una corrente elettrica (Fig. 2).

La resistività viene determinata mediante dispositivi elettronici in seguito all'immissione di una corrente elettrica artificiale nel sottosuolo. La resistività ρ viene espressa in Ohm·m (ζ .m) ed è ricavabile dalla relazione $V = (I \cdot \rho) / 2\pi r$ dove: V è la differenza di potenziale espressa in mV; I è la corrente elettrica che genera la ddp espressa in mA; $2\pi r$ è un coefficiente che dipende dalla tipologia operativa. In realtà si ricerca la resistività apparente dei corpi indagati ρ_a e che indica la resistività media di un volume di terreno direttamente attraversato dalla corrente.

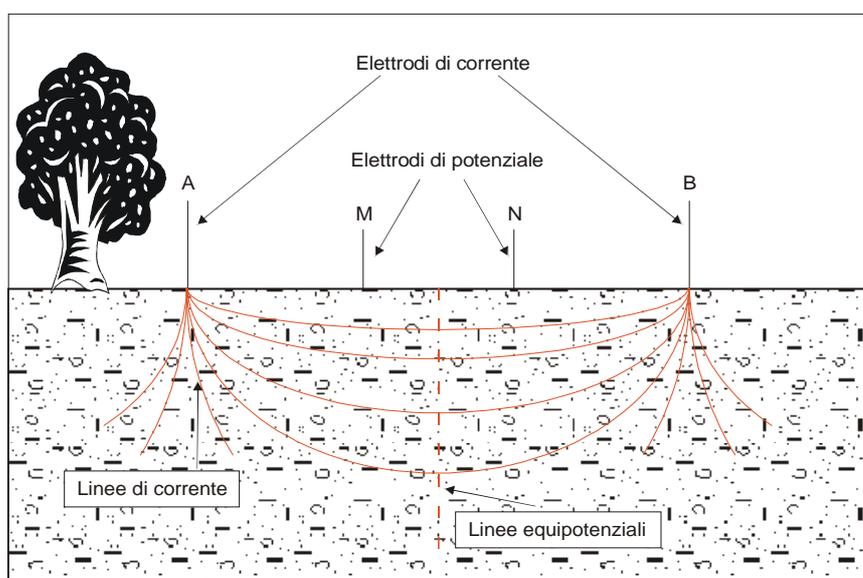


Fig. 2. Schema di propagazione della corrente elettrica in un terreno

4a. Metodo di resistività

La resistività di un terreno è funzione delle sue caratteristiche chimiche e fisiche. I minerali che formano le rocce sono generalmente degli isolanti perfetti e gli conferiscono valori di resistività molto alti. La presenza di cavità, porosità, umidità o fluidi molto conducibili fa sì che i valori di

resistività si abbassino notevolmente inoltre, i fluidi contenuti nel terreno, presentano resistività variabile in funzione della temperatura e della quantità e qualità di sali in essi disciolti (Figg. 3-4).

Materiale	Porosità %	Materiale	Porosità %
Suolo	50-60	Ghiaia e sabbie	20-35
Argilla	45-55	Arenarie	10-20
Silt	40-50	Shale	1-10
Sabbie	30-40	Calcari	1-10
Ghiaia	20-35		

Ioni	
H ⁺	NO ₃ ⁻
OH ⁻	Li ⁺
SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
Na ⁺	
Cl	
K ⁺	

Figg. 3 e 4. Intervalli di porosità delle rocce e principali ioni presenti nei fluidi e nelle rocce

Affinchè il metodo possa risultare valido è necessario che la resistività tra le strutture sepolte indagate ed il terreno incassante sia molto diversa. La resistività delle rocce può inoltre essere influenzata da processi geologici che ne causano una variazione sia in positivo che in negativo (Fig. 5).

Processi Geologici che influenzano la resistività	
Alterazione delle argille ⚡	Agenti meteorici ⚡

Dissoluzione	⇩	Indurimento	⇧
Tettonica	⇩	Precipitazione di carbonato	⇧
Percolazione di acqua salata	⇩	Silicizzazione	⇧
Fatturazione	⇩	Metamorfismo	⇕

Fig. 5. Influenza dei processi geologici sulla resistività delle rocce.

Diminuzione ⇩ Aumento ⇧

4b. Polarizzazione Indotta (PI)

La Polarizzazione Indotta si basa sull'analisi della curva di decadimento di potenziale che si verifica nel momento in cui viene interrotto un flusso di corrente precedentemente indotta nel terreno (Time Domaine Mode). Nel momento in cui un corpo è attraversato da corrente elettrica si verificano essenzialmente due tipi di fenomeni:

- Polarizzazione di membrana: particolarmente importante su terreni che contengono una bassa percentuale di argilla in matrice ed aumenta in maniera significativa in rocce porose in cui i granuli di argilla bloccano parzialmente il passaggio alle soluzioni di ioni. Applicando un potenziale elettrico le cariche positive vengono trasportate attraverso la nube cationica, tipica della superficie di minerali argillosi in un sistema argilla-elettrolita, mentre le negative tendono ad accumularsi. Si ha così un accumulo di ioni positivi e negativi che originano una diminuzione delle cariche mobilitate. Questa diminuzione è tanto maggiore quanto più moderate sono le variazioni di frequenza della corrente. Da ciò si può dedurre che la conducibilità elettrica aumenta con l'aumento della frequenza della corrente.
- Polarizzazione elettrodica: un solido presenta una superficie esterna formata da uno strato di ioni, essenzialmente immobili,

posti su strati molecolari. In vicinanza di questa stratificazione vi è un insieme di ioni più mobile detto strato di diffusione. Le cariche nella stratificazione fissa sono in genere stabili nel movimento mentre le altre sono influenzati da parametri quali la temperatura, concentrazione ionica nell'elettrolita, costante dielettrica del mezzo e valenza elettronica.



Per entrambi i tipi di polarizzazione la maggiore parte delle cariche assorbite all'interfaccia elettrolita-elettrodo ed argilla-elettrolita sono contenute ad una distanza d dalla superficie data dalla seguente relazione:

$$d = \frac{K_e \cdot k \cdot T}{[2ne^2v^2]^{1/2}}$$

k = costante di Boltzman T = temperatura e = carica elementare

K_e = permeabilità dielettrica del fluido v = valenza degli ioni

n = concentrazione ionica dell'elettrolita

Nell'esplorazione ambientale si evidenzia che la distanza d aumenta all'aumentare di K_e e T e diminuisce rispetto ad n e v . In plumes di contaminanti e nella dispersione di agenti chimici, i fluidi, tossici e non, possono influenzare la distanza d con un conseguente aumento della polarizzazione indotta.

In un terreno omogeneo la resistività influisce sulla curva di decadimento di potenziale che presenta caratteri omogenei qualunque coppia di punti venga considerata. Se sono presenti corpi metallici sepolti o contaminanti organici sulla curva di decadimento di potenziale vengono osservate delle anomalie che sono funzione della tipologia del corpo metallico e dei liquidi.

4c. Potenziale Spontaneo (PS)

Il metodo del Potenziale Spontaneo si basa sull'analisi in superficie delle differenze di potenziale dovute al campo elettrico naturale caratteristico del sottosuolo, legato alla presenza di soluzioni elettrolitiche in movimento. Analizzando le anomalie del P.S. si possono determinare l'intensità e la posizione delle concentrazioni delle cariche ioniche, dovute sia al movimento delle soluzioni elettrolitiche sia alla capacità di assorbimento ionico da parte della roccia porosa in caso di contatto con minerali metallici o corpi metallici sepolti.

Strutture sepolte nel sottosuolo, in base alla loro tipologia, possono fungere da dreno o da ostacolo alla normale circolazione idrica sotterranea, provocando variazioni al normale deflusso dei fluidi con conseguenti anomalie nel P.S. che possono essere rilevate in superficie.

4d. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione

La strumentazione utilizzata per le indagini geoelettriche è costituita da una sorgente di corrente elettrica (generatore); una apparecchiatura elettronica di misura della resistività, quattro elettrodi e cavi elettrici (Fig. 6)



Fig. 6. Strumentazione per prospezioni elettriche

La corrente elettrica viene immessa nel terreno attraverso due elettrodi, definiti A e B (elettrodi di corrente). Viene così generata una differenza di potenziale che viene misurata da altri due elettrodi definiti M e N (elettrodi di potenziale). Attraverso procedimenti analitici viene calcolata la resistività apparente che è funzione dei valori di corrente immessa, della configurazione geometrica utilizzata per gli elettrodi e dei valori di resistività letti sul terreno.

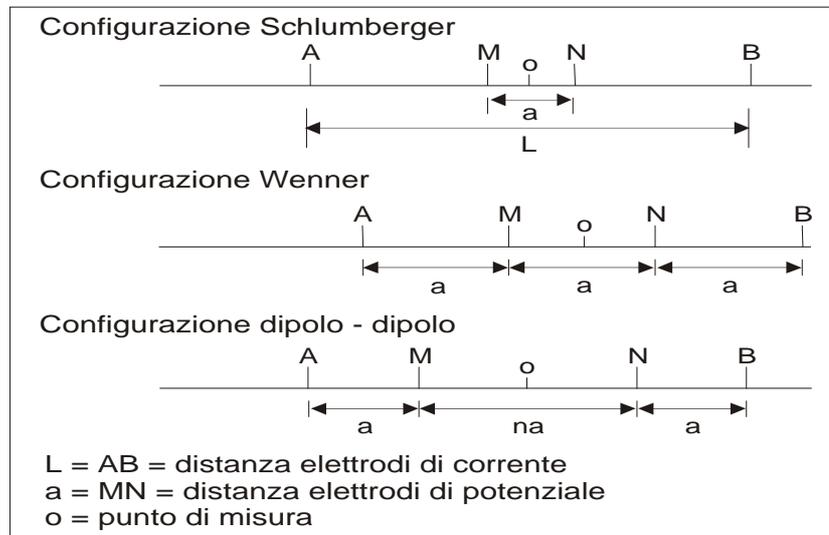
A seconda delle modalità operative possiamo distinguere:

- **Sondaggi Elettrici Verticali (SEV):** si mantiene fisso il centro della configurazione e si spostano lateralmente gli elettrodi. In questo modo è possibile aumentare in maniera progressiva la profondità di esplorazione.
- **Sondaggi Elettrici Orizzontali (SEO):** la configurazione iniziale viene mantenuta fissa e viene spostata lateralmente sul terreno. In questo modo è possibile ottenere le variazioni di resistività orizzontali del terreno.

A volte i due metodi vengono utilizzati assieme, mantenendo intervalli fissi di interdistanza tra gli elettrodi, ottenendo un Profilo Elettrico Verticale, molto utile su terreni con discontinuità sia in profondità che laterali ed in presenza di acqua.

La profondità di indagine risulta essere circa $1/5$ o $1/6$ della lunghezza dello stendimento.

Le configurazioni elettrodiche maggiormente utilizzate sono:



La scelta della tipologia di configurazione elettrodica è dettata essenzialmente dal tipo di informazione ricercata e dalle caratteristiche del substrato.

In fase esecutiva le letture strumentali possono essere disturbate da fattori di origine antropica quali: linee elettriche e telefoniche, impianti di trasmissione radar, televisione e radio, linee ferroviarie e tubature.

I sondaggi elettrici vengono utilizzati per individuare strutture artificiali sepolte, perdite di percolati da discariche, tracce di contaminanti in falda, profondità della falda acquifera, profondità del substrato. Permettono inoltre l'analisi del cono di depressione di pozzi e sorgenti in emungimento, individuando la direzione di flusso dell'acqua. Possono essere utilizzati anche su suoli umidi.

Questo tipo di indagine presenta alcuni svantaggi: richiede spazi di esecuzione abbastanza ampi, a seconda della profondità da indagare; l'interpretazione del dato è difficoltosa su terreni particolarmente accidentati; l'infissione degli elettrodi nel terreno può essere problematica su suoli molto ghiaiosi o molto secchi a causa della difficoltà di realizzare la coppia elettrodo - terreno; la presenza di variazioni laterali, naturali od antropiche, nei terreni rende il dato poco attendibile. Se i contaminanti contenuti nel suolo sono poco conduttivi la

loro individuazione risulta difficile. La validità dell'indagine è influenzata dal contrasto di resistività tra corpo sepolto e terreno (Fig. 7).

Roccia / Materiale	Resistività Ohm · m
Argille – Marne, grasse	3 - 30
Argille – Marne, magre	10 - 40
Argille sabbiose	25 - 105
Sabbie con argille	50 - 300
Sabbia – Ghiaia in falda	200 - 400
Sabbia – Ghiaia asciutta	800 - 5000
Calcare – gesso	500 - 3500
Arenaria	300 - 3000
Granito	2000 - 10000
Gneiss	400 - 6000
Rifiuti domestici	12 - 30
Fanghi industriali	40 - 200
Plume contaminato da rifiuti domestici	1 - 10
Olio esausto	150 - 700

Fig. 7. Tabella con valori tipici di resistività

I rifiuti urbani hanno, in genere, resistività inferiore ai 30 Ohm·m.. Per poter essere distinti dal terreno incassante è necessario che questo abbia una resistività molto più alta (ad es. 300 Ohm·m). Quindi sono ben individuabili rifiuti circondati da ghiaie, arenarie, calcari e sabbie, mentre si riscontrano difficoltà se sono presenti argille e marne.

5. TOMOGRAFIA ELETTRICA

La Tomografia Elettrica è un tipo particolare di indagine geoelettrica. Nel terreno viene inviata una corrente continua e in base alla sua misura, alle dimensioni dell'area energizzata e al potenziale elettrico generato è possibile ricavare la resistività del terreno.

5a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione

Il metodo richiede lo stendimento sul terreno di cavi e l'infissione di elettrodi in numero variabile da 12 a 64, lungo linee di lunghezza da decine a centinaia di metri, la profondità di indagine risulta essere circa 1/6 della lunghezza dello stendimento.

La Tomografia Elettrica viene utilizzata per individuare l'andamento e l'estensione volumetrica di strutture artificiali sepolte, perdite di percolati da discariche, presenza di cavità, tracce di contaminanti in falda, profondità della falda acquifera, profondità del substrato e spessore di depositi alluvionali acquiferi, ha un'ottima risoluzione per l'individuazione della stratigrafia sia orizzontale che verticale e permette una discriminazione dei materiali metallici e di sabbie od argille con acqua.

Questo tipo di indagine ha alcuni svantaggi: richiede spazi di esecuzione abbastanza ampi, a seconda della profondità da indagare; l'interpretazione del dato è difficoltosa su terreni particolarmente accidentati; su suoli molto ghiaiosi o molto secchi si possono avere difficoltà nel realizzare la coppia elettrodo – terreno; la presenza di variazioni laterali naturali od antropiche nei terreni rende il dato poco attendibile; si rende necessaria una sua taratura con una stratigrafia di riferimento. Se i contaminanti contenuti nel suolo sono poco conduttivi si hanno difficoltà nella loro individuazione.

6. METODO ELETTROMAGNETICO

Questa metodologia si basa sull'invio di un segnale in frequenza VLF (Very Low Frequency) nel sottosuolo attraverso una bobina che genera un campo magnetico che viene ricevuto da una seconda bobina. In base all'elaborazione dei segnali di uscita e di ingresso si può risalire alla resistività apparente del mezzo di propagazione. La presenza di discontinuità induce variazioni nel campo dello spettro primario (provocato dalla prima bobina) causando fenomeni di dispersione e diffrazione. Si genera così un campo secondario distorto da quello primario in direzione, ampiezza e fase. I valori di resistività che vengono ricavati variano in base al tipo di materiale esaminato, alla presenza di terreno o roccia, alla presenza di cavità, allo spessore e alla tipologia della copertura detritica e alle condizioni di umidità.

I metodi elettromagnetici principalmente utilizzati sono :

- EM RESISTIVITY: si applica sia nel dominio del tempo che della frequenza. Il metodo nel dominio della frequenza viene utilizzato per indagare fino alla profondità di pochi metri per individuare anomalie nella conducibilità elettrica dovute a strutture antropiche o ad inquinanti. Il metodo nel dominio del tempo viene invece utilizzato per indagare profondità che arrivano a circa 50 m, si basa sulla misurazione di un campo secondario in assenza del campo inducente allo scopo di ottenere misure accurate e stabili.
- GEORADAR

6a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione

La prospezione elettromagnetica viene eseguita spostando la strumentazione lungo linee equidistanti, eseguendo misure sia in continuo che per punti.

Viene utilizzata per individuare aree di discarica sepolte, zone di scavo, materiali ferrosi, strutture antropiche, vuoti nel terreno, materiali di riporto, spessore delle coperture dei terreni sia di origine detritica che alluvionale.

La profondità di indagine varia da pochi metri a 50 metri, a seconda della strumentazione, della configurazione e della litologia del terreno.

Le misure sono ottimali soprattutto là dove siano presenti materiali conduttivi e su suoli asciutti, possono essere facilmente influenzate dalla presenza di tubazioni, recinzioni o fabbricati posti a distanza minima di circa 5 metri. Anche il grado di umidità può influire sui risultati. Terreni fortemente argillosi riducono la profondità di esplorazione del 30-40%.

7. GROUND PROBING RADAR (GEORADAR O GPR)

Il Georadar è un metodo geofisico basato sulla propagazione e sulla riflessione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo. Attraverso un antenna viene inviato nel sottosuolo un segnale impulsivo in alta frequenza (tra 80 e 1000 MHz). Questo segnale è condizionato dalla natura dei materiali che attraversa e dalla presenza di discontinuità elettriche e può essere riflesso verso l'alto o attenuarsi fino a dissipazione. Il segnale riflesso ha intensità, fase e frequenza che dipendono dai materiali attraversati e viene captato da un'antenna ricevente e correlato agli impulsi emessi. In questo modo si costruiscono delle sezioni verticali del terreno definite radargrammi. Il segnale riflesso può essere visionato direttamente su un monitor o registrato su

supporto magnetico e successivamente elaborato. L'elaborazione comporta il filtraggio, la rappresentazione delle sezioni, la trasformazione della scala verticale temporale in scala metrica delle profondità (in base alle caratteristiche geologiche e alle proprietà dielettriche dei materiali confrontate con la velocità dell'onda elettromagnetica) e un'attenta analisi di tutti i radargrammi sia uno per uno che nel complesso. L'analisi dei radargrammi permette di individuare anomalie nel segnale riflesso a diverse profondità (Fig. 8). Non sempre queste anomalie corrispondono a variazioni litologiche ma possono corrispondere, ad esempio, a variazioni delle caratteristiche dielettriche di uno stesso materiale con diverso contenuto d'acqua.

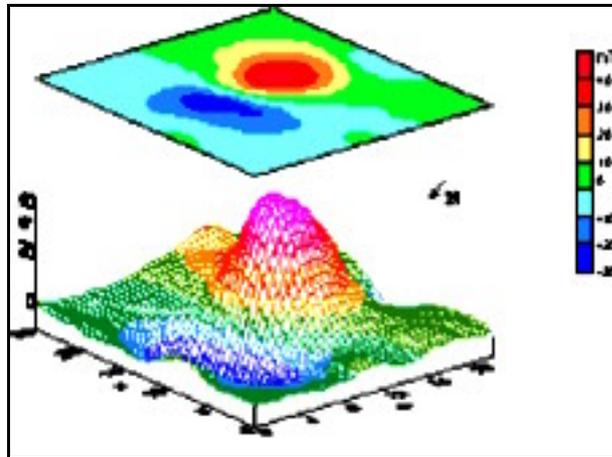


Fig. 8. Anomalie magnetiche prodotte da oggetti metallici

7a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione

Un Georadar è costituito essenzialmente da un trasduttore o antenna, da un generatore di forme d'onda, da un plotter grafico e da un sistema di acquisizione dati su supporto magnetico (Fig. 9).



Fig. 9. Strumentazione georadar

La parte più importante del GPR sono le antenne, che operano in frequenze variabili tra 80 e 1000 MHz. La loro scelta dipende dalla natura del sottosuolo e dalla tipologia delle strutture ricercate. Antenne con frequenze minori consentono di arrivare a maggiore profondità, ma con risoluzione minore rispetto a quelle con frequenze più alte.

Le misurazioni vengono effettuate spostando il Georadar sul terreno lungo linee di misura equidistanti. La profondità di indagine è funzione della resistività elettrica del terreno, della presenza d'acqua o di materiale fine e della frequenza del segnale inviato, in genere è di alcuni metri (fino a qualche decina in condizioni ideali). L'accuratezza nella misura della profondità è di circa il 10% della distanza georadar-oggetto sepolto.

La dimensione minima degli oggetti identificabili è funzione della frequenza emessa dal radar; non si riescono a rilevare oggetti che hanno diametro medio inferiore a metà della lunghezza d'onda.

Il GPR viene utilizzato per individuare discontinuità sepolte di varia natura (cisterne in ferro e cemento armato, fusti, tubazioni in ferro - PVC – calcestruzzi, cavità e reti di sottoservizi), variazioni stratigrafiche, aree di discarica sepolte, sacche di inquinamento o aree contenenti percolato.

Per la perimetrazione di aree inquinate da agenti chimici si utilizzano antenne a bassa frequenza, separando trasmettente e ricevente per avere massimo dettaglio ed eliminare l'influenza degli strati più superficiali.

Questo tipo di indagine ha tempi di esecuzione molto rapidi ed ottima risoluzione.

In caso di terreni molto umidi o saturi questo metodo di indagine non è applicabile, in quanto quasi tutta l'energia emessa verrebbe dissipata a causa dell'elevata conducibilità e non si avrebbero riflessioni leggibili. E' inoltre necessario che corpo inglobato e terreno abbiano valori di resistività molto diversi.

8. MICROGRAVIMETRIA

La Gravimetria è un metodo geofisico che consiste in una analisi dettagliata delle deformazioni del campo gravitazionale terrestre, indotte dalle anomalie e dalle eterogeneità presenti nel sottosuolo. La Gravimetria, e più in particolare la microgravimetria, viene impiegata in piegata nella mappatura delle densità rocciose e nella ricerca di cavità sotterranee naturali e/o artificiali. L'applicazione del metodo gravimetrico é basata sul contrasto di densità tra i diversi tipi di roccia presenti, o, come nel caso della ricerca di ipogei e di fenomeni di carsismo, tra la roccia e la cavità. Attraverso l'utilizzo di strumenti di misura di particolare sensibilità e precisione (microgravimetri) é possibile misurare le perturbazioni del campo gravimetrico e da queste risalire alla conformazione del sottosuolo e indicare la possibile presenza di cavità sotterranee. Il metodo è impiegato per ricerche di filoni e di corpi minerali che presentino un contrasto di densità rispetto alle rocce incassanti. Si possono localizzare faglie, anticlinali, sinclinali, duomi salini, trappole strutturali per idrocarburi. L'applicazione del metodo gravimetrico richiede una particolare esperienza e cura non solo

nell'interpretazione dei risultati, ma anche e soprattutto nell'effettuazione delle misure e nelle correzioni che devono essere applicate. L'anomalia gravimetrica minima, prevedibile per una cavità di dimensioni sferiche di raggio 1 m e profondità dell'asse 5 m, è dell'ordine di circa 0.005 mGal, valore al limite del potere della sensibilità dello strumento. Appare dunque fondamentale applicare tutte le precauzioni necessarie tanto nella messa in opera che nelle correzioni alle misure al fine di poter mettere in evidenza la maggior parte possibile delle strutture oggetto della ricerca. La conoscenza dello strumento e del suo comportamento in particolari condizioni, nonché l'esperienza necessaria nella corretta applicazione di tutte le correzioni usuali (topografica, luni-solare, ecc.) possono costituire il discriminante nella valutazione finale dei risultati ottenuti. Un fattore estremamente importante ai fini dell'ottimizzazione di una campagna di rilevamento gravimetrico è inoltre il trattamento sul posto delle misure effettuate durante la giornata al fine di poterne valutare la coerenza e l'eventuale necessità, nei giorni successivi, di intensificarle in zone di particolare interesse.

Le misure effettuate vengono sottoposte a tre tipi di correzione: di aria libera, di Bouguer e topografica. In questo modo si riportano i dati acquisiti ad un unico modello di riferimento e ciò permette di evidenziare le differenze tra campo misurato e campo teorico (Fig. 10).

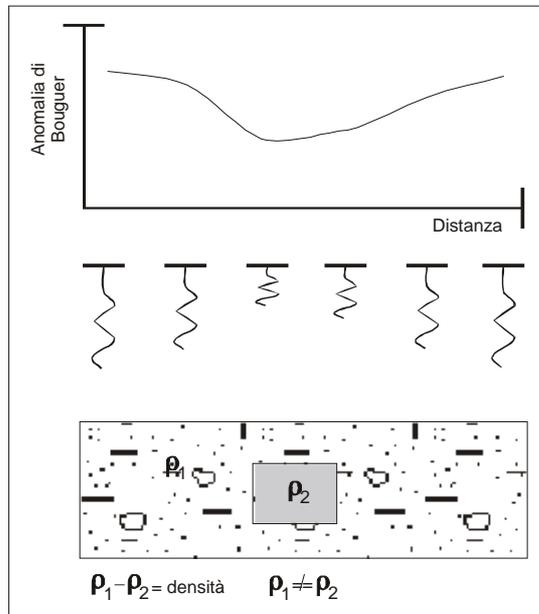


Fig. 10. Funzionamento del metodo gravimetrico

La profondità di indagine dipende dalla distanza tra le stazioni di misura e dal contrasto di densità tra terreno ed oggetto sepolto.

A volte le anomalie gravimetriche indotte da discariche sono talmente piccole che hanno lo stesso ordine di grandezza dell'approssimazione delle correzioni e questo rende problematica la loro individuazione.

9. PROSPEZIONI MAGNETICHE

La Magnetometria è un metodo d'indagine del sottosuolo che misura le anomalie del campo magnetico terrestre originate da strutture sotterranee ferro-magnetiche di vario tipo e si basa sul principio della induzione magnetica. La Terra possiede un proprio campo magnetico di cui è possibile misurare l'intensità localmente. Le misure vengono effettuate o riferendosi ad una stazione fissa o in configurazione gradiometrica per evitare variazioni di campo dovute a modifiche locali del campo magnetico terrestre. Variazioni del valore misurato sono indotte da materiali con caratteristiche ferromagnetiche sepolti nel sottosuolo, mentre materiali non ferromagnetici (ad es. alluminio) non provocano

variazioni. Le unità di misura utilizzate per misurare il campo magnetico sono il gamma (?) o il nanoTesla (nT).

9a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione

Esistono due tipi principali di magnetometri: magnetometro a protoni e magnetometro fluxgate. Nel magnetometro a protoni viene generato un campo magnetico attorno ad un fluido particolare che provoca l'orientamento dei suoi protoni. Nel momento in cui il campo magnetico viene annullato i protoni si allineano lungo la direzione del campo totale. Questo movimento genera una frequenza che è proporzionale all'intensità del campo permettendo di misurare il campo magnetico locale.

Nel magnetometro fluxgate vi è un nucleo ferromagnetico che subisce variazioni a saturazione di magnetizzazione con l'ambiente circostante. Queste variazioni sono proporzionali all'intensità del campo e vengono amplificate e registrate elettronicamente.

Il magnetometro viene spostato lungo linee di misura equidistanti e le misurazioni possono essere puntuali o continue.

Il metodo magnetometrico viene utilizzato sia per la ricerca di materiale ferroso nel sottosuolo (bidoni, rottami) sia per escludere la sua presenza. Questo tipo di prospezione viene ampiamente utilizzato nel campo delle ricerche archeologiche, nelle discariche, per verificare la presenza di eventuali corpi anomali (bidoni, fusti, ecc.), e nelle aree a rischio d'inquinamento da rifiuti pericolosi.

La profondità di esplorazione dipende dalla grandezza del corpo sepolto e dalle sue qualità ferromagnetiche. I risultati ottenibili sono particolarmente interessanti nel caso in cui il terreno inglobante possieda deboli proprietà magnetiche e le masse ferrose siano consistenti oppure poco profonde. Le buche e i fossati interrati generano anomalie nel

campo magnetico: infatti la suscettività magnetica del loro contenuto è maggiore di quella del sottosuolo circostante (Fig.11).

Materiale	Suscettività (?) x 10³
Aria	~ 0
Quarzo	- 0,01
Sale	- 0,01
Calcite	- 0,001 – 0,01
Pirite	0,05 - 5
Magnetite	1200 – 19.200
Calcari	0 - 3
Arenarie	0 - 20
Granito	0 - 50
Basalto	0,2 - 175

Fig. 11 Valori tipici di suscettività magnetica delle rocce

Il magnetometro a protoni è sensibilissimo alla presenza di linee elettriche e di qualsiasi oggetto metallico nei dintorni; non può perciò essere utilizzato in aree urbane o in aree vicine a ferrovie e a cavi elettrici, e anche gli operatori non possono avere addosso alcun elemento metallico. Altri tipi di magnetometri, quali i gradiometri e i magnetometri a nucleo saturabile (o fluxgate) non presentano invece questo tipo di problemi, e danno in più il vantaggio di una rilevazione continua del sottosuolo e non per punti.

10. PROSPEZIONI SISMICHE

Le prospezioni sismiche si basano sulle modalità di propagazione delle onde elastiche attraverso il terreno. Le onde che vengono utilizzate in questo tipo di indagine sono longitudinali e vengono generate da una

sorgente di energia artificiale (esplosivi, vibratori elettro-idraulici, masse battenti), viaggiano nel sottosuolo in forma sferica e subiscono fenomeni di rifrazione e riflessione in base alle discontinuità in esso presenti. Il loro ritorno in superficie viene captato da ricevitori elettrodinamici detti geofoni che trasformano gli impulsi rifratti o riflessi in energia elettrica (Fig. 12).

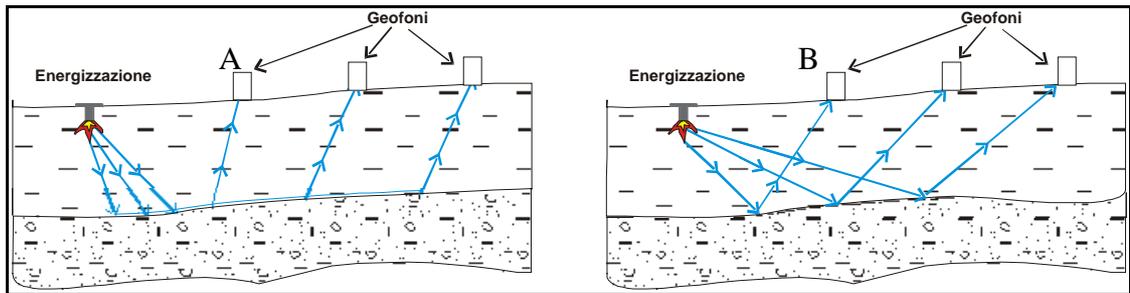


Fig 12. Propagazione delle onde sismiche. A = rifrazione B = riflessione

Il segnale così trasformato viene inviato ad un sismografo che lo registra e crea una sua traccia grafica detta sismogramma. Un sismogramma è formato da tracce (in numero uguale al numero dei geofoni utilizzati) che riproducono graficamente l'arrivo in superficie delle onde riflesse o rifratte (Fig. 13).

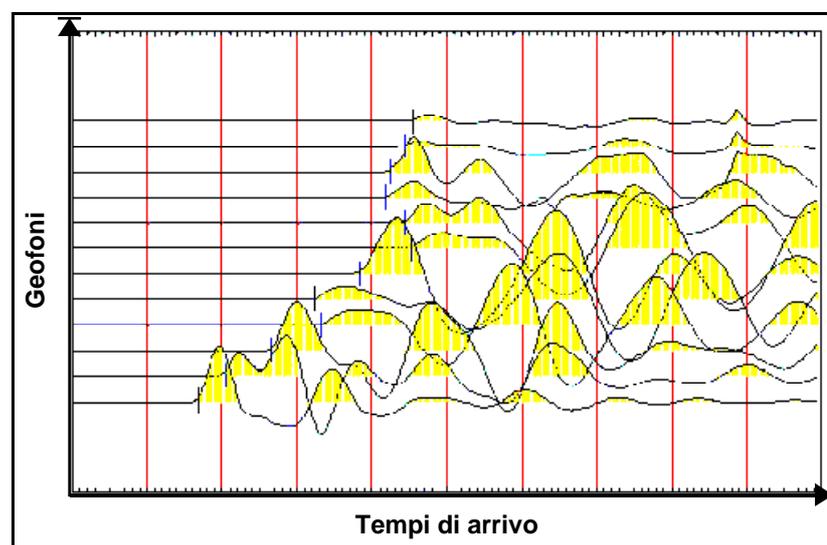


Fig. 13. Sismogramma ricavato da prospezioni sismiche a rifrazione

In base all'analisi dei sismogrammi è possibile ricavare il tempo intercorso tra l'energizzazione del terreno e l'arrivo del segnale ai geofoni. Questo tempo e la distanza dei geofoni dal punto di energizzazione costituiscono una coppia di valori in base alla quale si individuano dei punti in un diagramma Spazio-Tempo. Unendo tutti i punti corrispondenti a ogni geofono e ai rispettivi tempi di arrivo si costruiscono linee dette dromocrone. Calcolando la velocità di ogni tratto di dromocrona e analizzando la dromocrona stessa è possibile ricavare profondità, spessore e pendenza delle superfici di discontinuità presenti nel terreno.

Le rocce hanno un modulo di elasticità molto diverso tra loro, anche se presentano densità non molto differenti. Quando nel sottosuolo esistono strati con proprietà elastiche diverse, si hanno velocità diverse di propagazione delle onde elastiche che rendono possibile ottenere dati sulla profondità e sullo spessore dei corpi investigati, come ad esempio una eventuale discarica.

I principali metodi sismici utilizzati sono:

- **Prospezioni sismiche a rifrazione:** le onde sono captate fino a grande distanza dalla sorgente da una serie di geofoni e si misurano i tempi di percorso delle onde rifratte in condizione di incidenza critica all'interfaccia tra gli strati. In queste condizioni, ci sono onde che si propagano lungo il rifratte inviando verso l'alto le vibrazioni, che vengono captate dai geofoni in superficie. Il metodo funziona solo se il secondo

strato, che ha agito da rifrattore, possiede una velocità sismica maggiore del primo.

- **Prospezioni sismiche a riflessione:** si utilizzano onde elastiche generate in superficie e captate da geofoni posti a piccola distanza dalla sorgente. Si misurano i tempi di ritorno sia di onde superficiali sia di onde penetrate nel terreno e riflesse da una superficie d'interfaccia tra due mezzi con proprietà elastiche diverse.

10a. Modalità esecutive, campo e limiti di applicazione

La strumentazione utilizzata per questo tipo di indagine è costituita da un sismografo; geofoni (frequenza 10-14 Hz per la rifrazione, 40-100 Hz per la riflessione); cavo sismico; strumento per l'energizzazione del terreno (Fig. 14).



Fig. 14. Strumentazione per prospezioni sismiche

Il sismografo per la riflessione ha caratteristiche diverse da quello per la rifrazione poiché deve registrare onde con minore energia, minore velocità e maggiore frequenza rispetto alle onde rifratte. I geofoni

vengono collocati sul terreno lungo stendimenti lineari e collegati al sismografo. Il posizionamento e la lunghezza delle linee sismiche sono scelti in funzione del dato da ottenere e della profondità da investigare; la profondità massima è circa $1/3$ della lunghezza della linea sismica, ma dipende molto dalle litologie presenti nel sottosuolo e dal loro grado di alterazione. Vengono poi indotte nel terreno delle onde che saranno rifratte o riflesse dalle discontinuità presenti nel sottosuolo. Nella sismica a rifrazione vengono letti i tempi di arrivo ai geofoni delle onde rifratte e dirette, in quella a riflessione quelle delle onde riflesse. I dati acquisiti in campagna vengono opportunamente filtrati per ridurre il disturbo dovuto a cause esterne, nel caso di topografia accidentata è necessario introdurre, in fase di elaborazione dati, il dislivello presente tra un geofono e l'altro misurato contestualmente all'esecuzione della prova. I sismogrammi ottenuti vengono poi interpretati e vengono costruite delle dromocrone che permettono di ricostruire l'andamento delle geometrie del sottosuolo.

Nella sismica a riflessione vengono utilizzate lunghezze d'onda che non permettono di individuare corpi di dimensioni ridotte. Per questo motivo ha una limitata applicazione nello studio delle discariche ma viene ampiamente utilizzata nelle ricerche di gas ed idrocarburi.

La sismica a rifrazione ha validità solo nell'ipotesi che la velocità delle onde sismiche aumenti con la profondità. Se il mezzo rifratore è più lento del primo, non si ha rifrazione critica e, per gli stessi motivi, un mezzo a bassa velocità posto tra due mezzi a velocità più elevata può non essere rilevato.

In genere i materiali depositati in una discarica hanno velocità delle onde sismiche minori del terreno nel quale sono stati depositati, ed è quindi possibile ricostruire l'andamento della superficie sulla quale poggiano i rifiuti.

Le prospezioni sismiche vengono utilizzate anche per studi idrogeologici e strutturali. Permettono inoltre di valutare il grado di fratturazione dei materiali e quindi di valutare la loro permeabilità rispetto ai fluidi in circolazione nel sottosuolo.

Nessuno dei metodi sismici può comunque fornire indicazioni sulla presenza di contaminanti nei terreni indagati perché i contrasti di velocità sono troppo piccoli o distribuiti su spessori troppo grandi (non si realizzano cioè vere e proprie superfici di discontinuità in grado di generare riflessioni o rifrazioni).

I metodi sismici presentano il vantaggio di un basso costo e tempi rapidi di esecuzione.

11. ESEMPI APPLICATIVI

Vengono proposti a titolo di esempio 2 casi di applicazione della geofisica per l'analisi di siti contaminati e ricostruzione del substrato.

Le tecniche utilizzate sono: prospezioni sismiche a rifrazione e prospezioni magnetiche.

11a. Prospezioni sismiche a rifrazione

L'indagine è stata eseguita nel territorio del Comune di Poggio Moiano (Ri) con lo scopo di costruire opere di sbarramento lungo un corso d'acqua al fine di preservare l'acquedotto comunale che lo attraversa da fenomeni franosi.

E' stata eseguita una linea sismica a rifrazione della lunghezza di 39 m che ha permesso di arrivare ad una profondità di indagine di circa 12 m dal piano campagna. Lungo la linea sono stati disposti 12 geofoni

elettromagnetici a bobina mobile con distanza intergeofonica costante di 3 m. L'energizzazione è stata eseguita con cannoncino sismico in tre punti: diretta, centrale ed inversa per ottenere un segnale chiaro e una maggiore risoluzione. Il sismografo utilizzato è il Terralock MK6 della Abem. La linea sismica è stata tarata tramite sondaggio geognostico. L'analisi dei tracciati dei sismogrammi relativi alle tre energizzazioni ha permesso di costruire le relative dromocrone (Fig. 15).

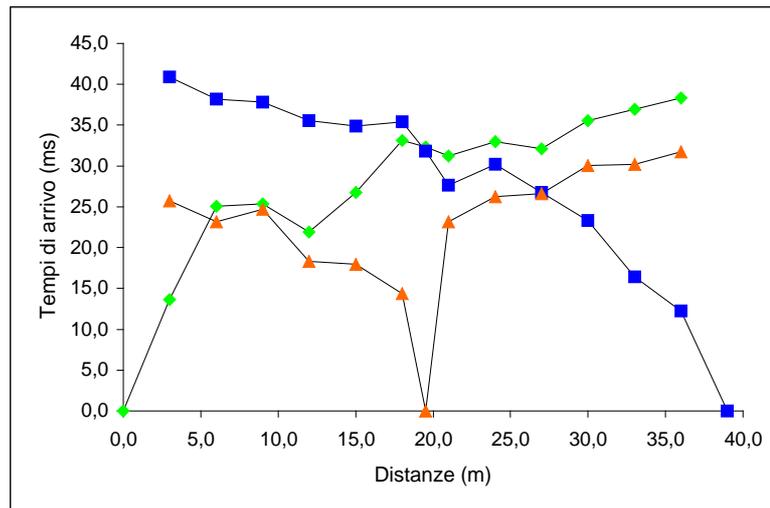


Fig. 15. Dromocrone. Diretta ◆ Centrale ▲ Inversa ■

E' stato individuato un rifrattore la cui profondità varia tra 3 m e 7 m. Al di sopra del rifrattore la velocità delle onde sismiche è di 1000 m/s ed è dovuta alla presenza di detrito in matrice marnosa e limosa con clasti eterogenei ed eterometrici e di materiale profondamente alterato e cataclasato.

Al di sotto del rifrattore la velocità oscilla tra 1800 m/s e 2000 m/s ed è dovuta a marne con sottili interstrati calcarei e calcareo-marnosi fratturati passanti a calcari, calcari marnosi avana e calcareniti con selce scura in noduli e livelli e con interstrati di marne verdastre (Fig. 16).

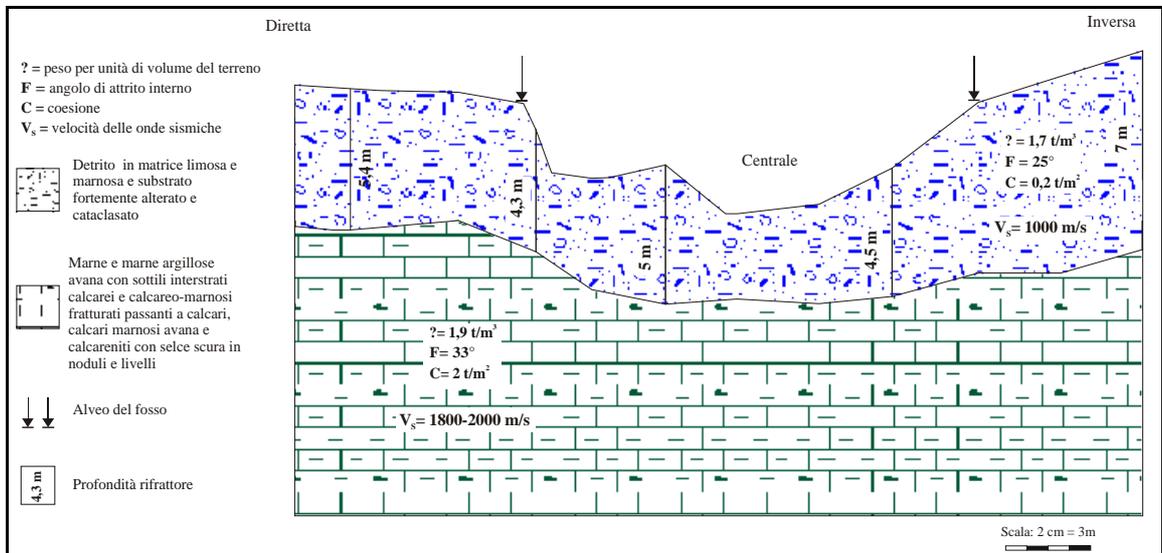


Fig. 16. Interpretazione della linea sismica

La bassa velocità delle onde sismiche nei sedimenti calcarei fa supporre ad una loro fratturazione dovuta a movimenti tettonici avvenuti nel passato lungo un piano di faglia che passa nelle vicinanze del sito in esame. La velocità nei sedimenti detritici è invece abbastanza elevata ed è dovuta alla presenza di una abbondante matrice marnosa che ha permesso una loro forte compattazione.

11b. Prospezioni magnetiche

L'indagine è stata eseguita in provincia di Rieti per la localizzazione di corpi metallici in una piana alluvionale. La prospezione è stata eseguita con magnetometro a precessione di protoni con sensibilità di 0,1 gamma. Sono state utilizzate 453 stazioni di misura su una maglia quadrata di 4 m per lato. Si è inoltre utilizzata una stazione base per rilevare le variazioni diurne S_q ad intervalli di 5 minuti per poter riferire tutti i valori del campo ad un unico tempo di registrazione. I valori di campo geomagnetico totale sono stati rielaborati ottenendo una carta della sua intensità totale. Per ricavare le corrispondenti anomalie magnetiche si è fatto riferimento al valore teorico del campo geomagnetico (in assenza di

corpi perturbanti) ottenuto dall'I.G.R.F. (International Geomagnetic Reference Field). Sottraendo ad ogni stazione di misura l'intensità teorica si è ottenuta l'anomalia magnetica totale e per visualizzare l'ubicazione dei corpi perturbanti si è proceduto alla riduzione al polo magnetico. In questo modo si è ottenuta una corrispondenza verticale tra anomalia e corpo perturbante. Nell'ipotesi che i corpi perturbanti si trovassero ad una profondità massima di 5 m dal piano campagna si è concentrata l'attenzione sulle anomalie con lunghezza d'onda inferiore ai 10m, facendo riferimento alla relazione tra profondità Z e lunghezza d'onda X: $Z = X / 2$

E' stata così creata la carta delle anomalie con lunghezza d'onda inferiore a 10 m (Fig. 16). Da questa si individuano delle anomalie positive dovute al fatto che i corpi metallici si trovano inglobati in un materiale diamagnetico. Vengono messi in luce 5 corpi perturbanti di cui uno corrisponde ad un mucchio di materiale ferroso affiorante. Per avere un'idea sulla profondità e sull'estensione dei corpi è stato costruito un modello che evidenzia la presenza di due corpi con contrasto di suscettività pari a 0,5 unità c.g.s., profondi 1 m e di dimensioni tra i 2 e 3 m.

È necessario tenere presente che bisognerebbe attuare indagini dirette per confermare quanto emerso dalla magnetometria. Questo perché le anomalie magnetiche possono essere dovute a fenomeni di magnetizzazione residua di sedimentazione o magnetizzazione residua chimica dovuta alla precipitazione di idrossidi di ferro da acque ferruginose.

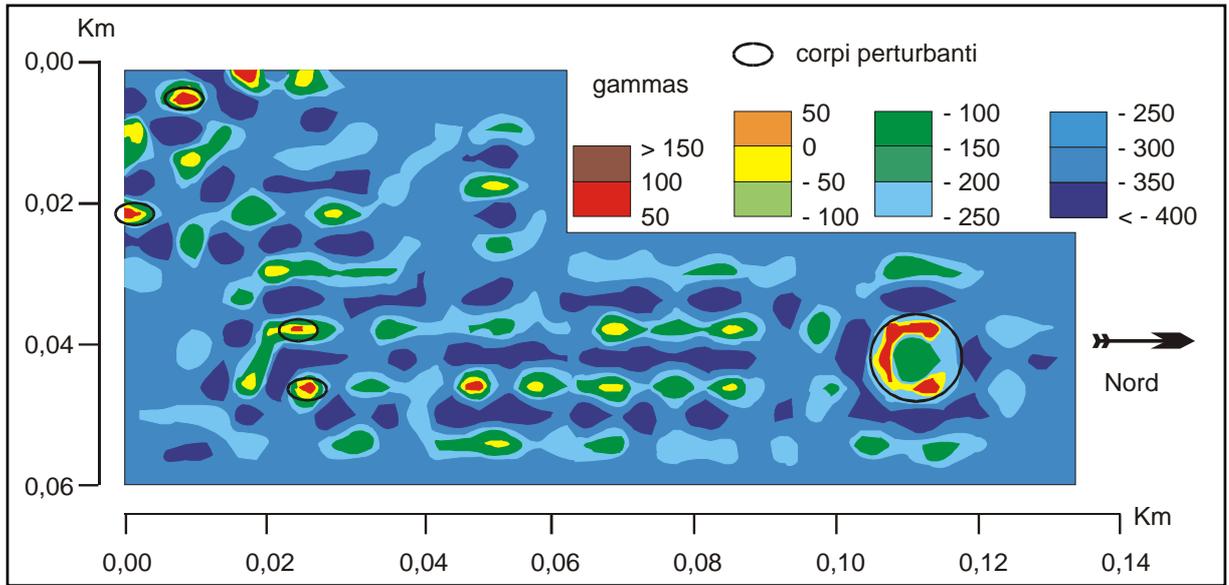


Fig. 16 Carta delle anomalie con lunghezza d'onda inferiore ai 10 m

12. CONCLUSIONI

La Geofisica applicata a problematiche di tipo ambientale rappresenta uno strumento indispensabile per la loro risoluzione. Permette di investigare con ottima risoluzione ampie aree soggette a degrado e ad inquinamento. Le metodologie utilizzate sono di tipo non invasivo e permettono di studiare i siti contaminati con costi relativamente contenuti. Indispensabile alla loro esecuzione è la precisione delle misure effettuate e l'esperienza dell'operatore, che in molti casi diventa la discriminante fondamentale per l'ottenimento di risultati attendibili. Con l'evoluzione tecnologica si stanno ottenendo strumenti sempre più sensibili che permettono di superare alcuni dei problemi operativi ed interpretativi che la geofisica comporta.

La geofisica può essere utilizzata per diversi scopi nell'analisi dei siti contaminati:

- Individuazione e perimetrazione di aree direttamente interessate da depositi inquinanti.
- Analisi e valutazione della tipologia dei materiali inquinanti.
- Effetti sulla circolazione idrica sotterranea di contaminanti di diversa natura.
- Individuazione di strutture sepolte legate o no a depositi di rifiuti.
- Ricostruzione dell'assetto stratigrafico ed idrogeologico del substrato.
- Analisi del grado di inquinamento del sottosuolo da percolati o sostanze inquinanti.

- Verifica della tenuta nel tempo delle metodologie di bonifica adottate.
- Individuazione di cavità sotterranee.

Attualmente si tende ad associare tra loro diversi tipi di indagine geofisica in modo da ottenere il maggiore numero possibile di informazioni, poiché ogni indagine può fornire dati particolari diversi che, integrati tra loro, forniscono un quadro completo della problematica. Poiché si tratta di metodologie di tipo indiretto, il loro utilizzo deve essere però associato ad indagini dirette per verificare l'attendibilità dei dati ottenuti. Comunque l'utilizzo di metodologie geofisiche consente di concentrare le indagini in settori ben localizzati di un sito contaminato, evitando spese eccessive e tempi troppo lunghi; inoltre hanno il vantaggio di non essere puntuali come le indagini dirette, ad es. sondaggi, ma di fornire un quadro ampio e ben definito delle aree investigate.

BIBLIOGRAFIA

- Aa. Vv. – 1996, *Le problematiche idrogeologiche delle aree altamente industrializzate, l'esempio di Milano*; Maggio 1996.
- Aa. Vv. – 1998, *Bonifica dei siti contaminati teoria e pratica dell'analisi di rischio nel contesto italiano*. Atti del seminario; Marzo 1998.
- Aa. Vv. – 2000, *Siti Contaminati: Indagini, analisi di rischio e tecniche di bonifica*; 51° corso di aggiornamento in Ingegneria Sanitaria-Ambientale, Milano.
- C. Cestelli Guidi – 1974, *Geotecnica e tecnica delle fondazioni*.
- F. Ippolito – 1975, *Geologia tecnica per ingegneri e geologi*.
- G. Rosti, A. Zelioli – 2000, Dm 471/99. *Procedure tecnico-amministrative e stato dell'arte delle attività di bonifica in provincia di Milano*; Atti del convegno AUDIS "Le bonifiche delle aree industriali dismesse: tecnologie e procedure a confronto", Bologna, 19 ottobre 2000.
- G. Rosti, L. Raffaelli, P. Raimondi – 1999, *Perimetrazione e caratterizzazione di un sito contaminato. Boundaries definition and characterisation of a contaminated site, english version*.
- L. Raffaelli, G. Rosti – 1999, *L'approccio della Provincia di Milano in tema di site assessment e site remediation*.
- M. Tanzini – 2002, *L'indagine geotecnica: caratterizzazione geotecnica delle terre e delle rocce attraverso prove in sito e di laboratorio*.

P. Raimondi – 1999, *Esempio di intervento di disinquinamento di aree industriali sotto controllo dell'Ente pubblico: l'ex raffineria Agip di Rho.*

P. Valentini, C. Arduini, G. Rosti – 2000, *Progetto Idro.I.S.I.: La realizzazione di un SIT Intranet/Internet per la gestione di dati idrogeologici ed ambientali finalizzato alla prevenzione dell'inquinamento ed al supporto negli interventi di bonifica.*

Raffaelli L. - Raimondi P. – 1999, *Accertamento, strategie e tecniche di bonifica. Maggio 1998.*

Lerici M. – 1963, *Nuove applicazioni della scienza e della tecnica nella ricerca, archeologica, Quaderni de « La Ricerca Scientifica », n° 10, CNR, Roma.*

Spada P. – 2000, *Sistema integrato per il monitoraggio del'inquinamento da metalli pesanti nei suoli; Workshop: Gestione integrata dell'ambiente urban: rifiuti, acque e suolo; Trieste.*

Stranieri D. – 2003, *Gestione dei rifiuti e la bonifica dei siti contaminati della Regione Piemonte di interesse nazionale: Normativa e pianificazione.*

www.provincia.milano.it/ambiente

www.area.trieste.it/index.php

www.provincia.milano.it/bonificheonline/main.html

www.ingv.it/ambiente/ambiente/corpimetallici.html

www.ingv.it/ambiente/ambiente/geoambiente.html

[www.unipd.it/San Galgano/Georadar](http://www.unipd.it/San_Galgano/Georadar)

www.area.fi.cnr.it

[geologi.it/geologia tecnica e ambientale-numero speciale.html](http://geologi.it/geologia_tecnica_e_ambientale-numero_speciale.html)