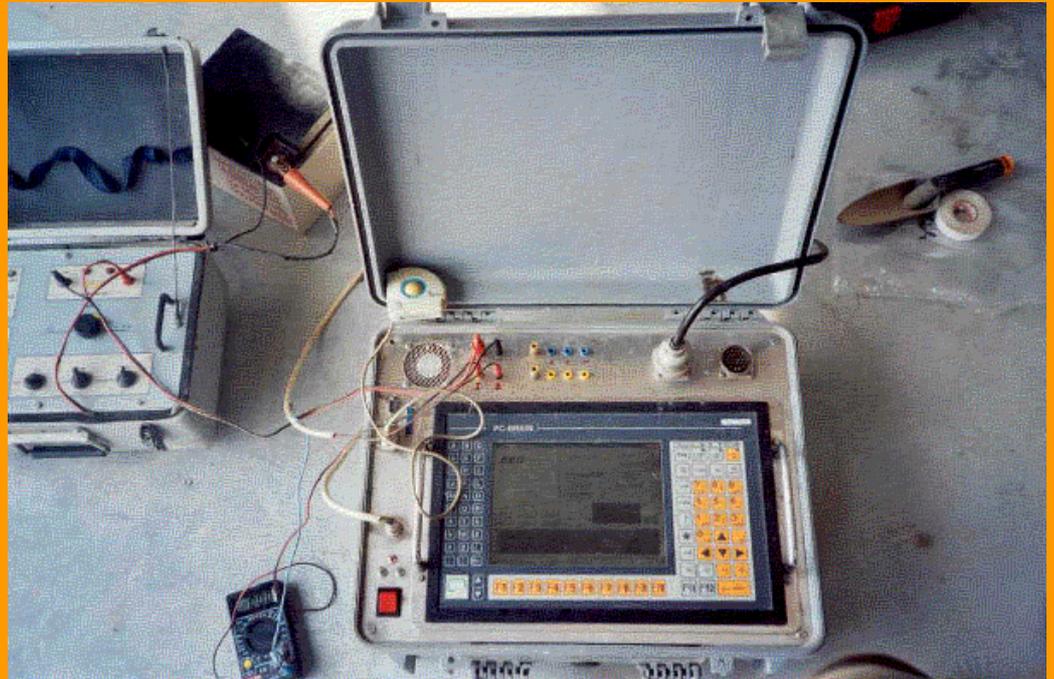




Provincia
di Milano

LA PROSPEZIONE GEOFISICA IN CAMPO AMBIENTALE



Direzione
centrale
ambiente



Provincia
di Milano

Presidente:
Assessore all'Ambiente:

On. Ombretta Colli
Luigi Cocchiaro

A cura della:
Direttore Centrale:

Direzione centrale ambiente
Vincenzo Imparato

Coordinamento:
Supporto tecnico e redazionale:

Luca Raffaelli
Simona Rizzi, Andrea Zelioli,
Alberto Pagano (libero professionista esterno che ha
collaborato per la formazione interna alla Direzione
Centrale Ambiente nel corso del 2001)

PRESENTAZIONE

La normativa vigente finalizzata alla bonifica dei siti contaminati (D.Lgs. 22/97 e D.M. 471/99) non prevede "specifiche" indicazioni di carattere tecnico-operativo in materia. Pertanto il presente documento, nato dalla collaborazione della Direzione Centrale Ambiente con il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli studi di Milano, vuole essere una proposta di standardizzazione di alcune procedure in parte già consolidate nella prassi.

In tal modo si è voluto fornire un supporto tecnico agli operatori del settore ed in particolare ai professionisti privati, nelle fasi di progettazione e realizzazione degli interventi di caratterizzazione e di bonifica.

Alla base del documento vi sono sia criteri di omogeneizzazione e razionalizzazione di tecniche operative, sia una congrua applicazione delle stesse, anche nella prospettiva dell'evoluzione delle tecnologie oggi disponibili.

Grazie a questa prima collaborazione tra Provincia di Milano ed Università degli Studi di Milano, che focalizza l'esperienza del Servizio Bonifiche siti contaminati, sarà possibile incrementare l'efficacia delle azioni sui siti, senza voler fissare né obblighi né requisiti minimi, lasciando inalterata la responsabilità professionale che "il Progettista" ha nell'affrontare le varie specifiche situazioni progettuali.

Ing. Vincenzo Imparato
Direttore Centrale Ambiente

LA PROSPEZIONE GEOFISICA IN CAMPO AMBIENTALE

INDICE

1. PREMESSA	2
2. PROSPEZIONI GEOFISICHE.....	4
2.1 Tomografia Elettrica	4
2.2 Geoelettrica.....	6
A. Metodo di Resistività e “caricabilità” in tomografia elettrica.....	8
B. Caricabilità o Polarizzazione Indotta	12
B.1 Polarizzazione elettronica.....	13
B.2 Polarizzazione di membrana	16
2.3 Collaudo integrità teli in HDPE.....	19
2.4 Georadar[GPR]	21
C. Metodo georadar [GPR].....	23
2.5 ELETTRROMAGNETICO [EM RESISTIVITY].....	26
D. Metodo elettromagnetico ad induzione EM-Resistivity.....	28
2.6 MAGNETOMETRIA [M]	33
E. Magnetometria	34
2.7 RADIAZIONI IONIZZANTI [β , γ]	38
3. PREZZIARIO.....	39
4. BIBLIOGRAFIA	40

1. PREMESSA

La Provincia di Milano in adempimento alle proprie attività istituzionali ha sviluppato negli anni un notevole bagaglio di conoscenze tecnico-scientifiche in materia di contaminazione del sottosuolo e delle acque sotterranee.

Sulla scorta di tale esperienza ed al fine di ottimizzare la tempistica di intervento dell'Ufficio, uniformando le scelte operative ispirandole ai medesimi standard tecnici, è stata predisposta e divulgata, tramite il sito Internet della Direzione Centrale Ambiente, una serie di Linee Guida, anche al fine di permettere a tutti gli "addetti ai lavori" di trarne spunti nell'ambito delle proprie attività professionali.

Nell'ottica dello sviluppo ed approfondimento di quanto già presente negli allegati n. 2 e 4 del D.M. 471/99, sulla scorta delle esperienze maturate dall'Ufficio nell'ambito delle attività di controllo in materia di indagini e bonifiche di siti contaminati, l'Ufficio Bonifiche ha realizzato il presente documento di approfondimento in materia di geofisica ambientale traendo peraltro ampiamente spunto dalla nutrita bibliografia esistente.

L'adozione di tecniche di indagine indiretta, quali le prospezioni geofisiche in campo ambientale, permette di ottimizzare le risorse impiegate durante la caratterizzazione del sito al fine di raggiungere la definizione del modello concettuale. Infatti, le anomalie delle grandezze fisiche del terreno che sono misurate in campo possono essere compatibili, attraverso un'opportuna e strutturata interpretazione, con la presenza di oggetti o di strutture sepolte.

Risulta, in effetti, specifico compito della geofisica ambientale e dei suoi vari metodi d'applicazione individuare ed indicare, quando possibile, tutte le ubicazioni di eventuali focolai di contaminazione. Per questo tipo di anomalie, indicate come "possibili", almeno là dove non ne venga espressa la certezza, rimane ovviamente risolutiva l'indagine diretta; è in ogni modo compito precipuo della geofisica indicarne la localizzazione, la distribuzione e soprattutto le priorità della verifica.

L'esigenza di fornire un sintetico quadro delle varie metodologie di prospezione geofisica utilizzate in campo ambientale nasce anche dalla necessità di ricondurre tale materia ad un processo applicativo ben codificato mediante il quale sia possibile, anche ai "non geofisici", comprendere, in fase di progettazione, le metodiche più adeguate alle caratteristiche specifiche del sito ed ai meccanismi di contaminazione preventivamente ipotizzati, nonché controllare in modo efficace la correttezza delle modalità esecutive e l'affidabilità dei dati acquisiti.

Le esplorazioni geofisiche si basano sulla misura di differenti grandezze quali:

- La resistività o conducibilità elettrica;
- La permeabilità elettrica o costante dielettrica;
- La permeabilità magnetica;
- Le cariche elettriche degli elementi e dei composti, peso atomico e molecolare.

I metodi geofisici illustrati nelle schede sono i seguenti:

- Tomografia Elettrica & I.P. [R I.S. & I.P.];
- Geoelettrica [SEV, SEO];
- Georadar GPR;
- Elettromagnetico EM;
- Magnetometria M;
- Rilevazioni Radiazioni Ionizzanti β , γ .

Ogni tecnica di intervento viene introdotta dal principio fisico sul quale si basa, si descrivono le applicazioni ottimali e si riporta un breve elenco di vantaggi e svantaggi inerenti l'utilizzo del metodo in esame. Ogni scheda termina con la descrizione delle modalità esecutive e delle condizioni ambientali ottimali d'impiego.

Per alcune metodiche le schede sono accompagnate da approfondimenti scientifici riguardanti i parametri ed i principi fisici su cui si basano.

Si ringrazia il dott. Alberto Pagano, Geofisico che ha collaborato alla stesura di diverse parti del presente documento.

2. PROSPEZIONI GEOFISICHE

2.1 *Tomografia Elettrica*

[IMAGING DC RESISTIVITY, I.P.]

PRINCIPIO FISICO

- Si applica al terreno una corrente elettrica “quasi” continua attraverso elettrodi infissi nel terreno. Si ricava la resistività del terreno dalla misura della corrente, del potenziale elettrico generato e dalle dimensioni del terreno energizzato;
- La misura di “caricabilità” del terreno (I.P. Induced Polarization) consiste invece nella misura del tempo t di decadimento della carica elettrica applicata;
- Si utilizzano i sistemi dipolo-dipolo i quali sono sensibili lateralmente e servono per ricostruire andamenti e variazioni laterali ma a profondità inferiori rispetto a quelle ottenute coi sondaggi elettrici verticali (SEV).

APPLICAZIONI

- Individuazione di superfici stratigrafiche orizzontali del sottosuolo per ricerche idriche e ambientali;
- Individuazione della profondità dell’acquifero, degli spessori di depositi alluvionali acquiferi, del bed-rock, delimitazione di strutture artificiali (discariche, orizzonti antropizzati);
- Ricostruzione dei limiti e delle variazioni laterali di grandi strutture sepolte (discariche, accumuli sepolti);
- Individuazione perdite da discariche, traccia di percolati e contaminanti in falda;
- Monitoraggio dello stato di avanzamento di processi di bonifica in-situ;
- Profondità d’esplorazione: variabile a seconda del dispositivo e della risoluzione richiesta, es. fino a 5 m, fino a 10 m, fino a 30 m, fino a 50 m, fino a 100-200 m e oltre. La profondità d’esplorazione è mediamente 1/6 della lunghezza dello stendimento.

VANTAGGI E SVANTAGGI

- Buona risoluzione stratigrafica in senso verticale e laterale;
- Utilissima per la discriminazione di materiali metallici, di argille/sabbie acquifere con I.P.;
- Per ottenere precisione, occorre una stratigrafia di taratura a riferimento;
- Difficoltà d’interpretazione in zone accidentate morfologicamente o con numerosi sottoservizi;
- Limitazioni per l’individuazione di contaminanti non conduttivi o elettricamente non diversificati dal terreno circostante;
- Sensibile alla presenza di condotte e/o tubazioni interrate, di linee aeree di tensione, di messe a terra, di corpi metallici superficiali.

MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Stendimento di cavi ed elettrodi (circa 12-64) lungo allineamenti dell'ordine delle decine/centinaia di metri;
- Ottima applicabilità anche in condizioni di terreno sia umido che saturo d'acqua;
- Occorrono spazi aperti per lo stendimento dei cavi, occorre l'infissione di elettrodi nel terreno (possibile applicazione anche in aree asfaltate, urbanizzate con predisposizione di fori).

2.2 **Geoelettrica**

[DC RESISTIVITY, Misé a la masse]

PRINCIPIO FISICO

- Si applica al terreno una corrente elettrica “quasi” continua attraverso elettrodi infissi nel terreno. Si ricava la resistività del terreno dalla misura del potenziale elettrico generato e dalle dimensioni del terreno energizzato;
- Sondaggi elettrici verticali (SEV) utilizzando le configurazioni di Wenner o Schlumberger servono per investigare in profondità. Il sondaggio è puntuale e riferito al centro dello stendimento.

APPLICAZIONI

- Individuazione di superfici stratigrafiche orizzontali del sottosuolo per ricerche idriche e ambientali nei casi in cui gli altri metodi non siano efficienti;
- Individuazione della profondità dell'acquifero, degli spessori di depositi alluvionali acquiferi, del bed-rock, di strutture artificiali (discariche, orizzonti antropizzati);
- Individuazione perdite da discariche, traccia di percolati e contaminanti in falda;
- Studio del cono di depressione di falda intorno a pozzi/sorgenti per la determinazione della direzione di scorrimento della falda, per il computo, mediante calcolo della velocità di flusso, della zona di salvaguardia ad “isocrona”;
- Profondità d'esplorazione: variabile a seconda del dispositivo e della risoluzione richiesta, es. fino a 5 m, fino a 10 m, fino a 30 m, fino a 50 m, fino a 100-200 m ed oltre. La profondità d'esplorazione è mediamente 1/5-1/6 della lunghezza dello stendimento.

VANTAGGI E SVANTAGGI

- Basso costo delle apparecchiature;
- Possibilità di ottenere informazioni sul sottosuolo anche a grandi profondità con costi notevolmente inferiori rispetto alle indagini dirette;
- Buona risoluzione stratigrafica in senso verticale;
- Difficoltà d'interpretazione in zone accidentate morfologicamente o con numerosi sottoservizi;
- Scarsa attendibilità in terreni con variazioni laterali naturali/antropiche;
- Necessità di disporre
- Per ottenere precisione, occorre una stratigrafia di taratura a riferimento;
- Limitazioni per l'individuazione di contaminanti non conduttivi o elettricamente non diversificati dal terreno circostante;

MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Stendimento di cavi ed elettrodi (SEV e SEO n. 4 elettrodi) lungo allineamenti dell'ordine di decine/centinaia di metri;
- Necessità di disporre di ampi spazi per poter indagare in profondità, con una lunghezza dell'array circa dieci volte la profondità di indagine;
- Ottima applicabilità anche in condizioni di terreno umido;
- Difficoltà di contatto degli elettrodi su ghiaie grosse asciutte o macerie.

A. Metodo di Resistività e “caricabilità” in tomografia elettrica

Le prospezioni *geoeltriche di resistività* (*Direct Current Resistivity sounding* o *Méthode des Résistivité*) si basano, in generale, sugli effetti sotterranei di una corrente elettrica, rilevabili in superficie attraverso misure di differenza di potenziale o intensità di corrente.

I minerali costituenti le rocce, nella loro originaria fase solida, sono pressoché degli *isolanti* perfetti.

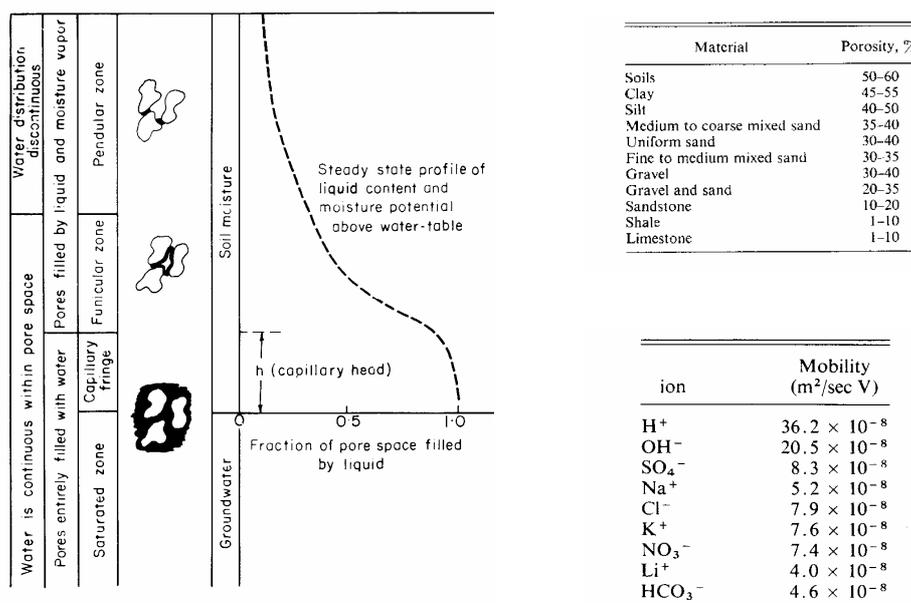


Figura A1 - La fase liquida nei terreni incoerenti (a sinistra), (da Meyboom, 1967). Intervalli di porosità delle rocce e principali ioni presenti naturalmente nei fluidi delle rocce (a destra), (da McNeill, 1980).

La *resistività* dei terreni è una complessa funzione della porosità, permeabilità, contenuto ionico dei fluidi di ritenzione e mineralizzazione argillosa; questa grandezza esprime l’attitudine del terreno all’attraversamento di una corrente elettrica (v. Fig. A.1).

Con il metodo di *resistività* in corrente continua *D.C. Resistivity* (in realtà la tecnica attuale utilizza corrente in frequenza capace sia di escludere i notevoli disturbi della corrente di rete di 50 Hz, sia di prevenire effetti di *saturazione elettrica* del terreno che ne impediscono l’esplorazione in profondità) viene immessa nel sottosuolo, mediante due elettrodi (A, B), una corrente elettrica che determina una differenza di potenziale misurata mediante altri due elettrodi (M, N). Condizione fondamentale perché il metodo risulti efficace è che esista e sia elevato il contrasto di *resistività* tra gli oggetti dell’indagine (v. Fig. A2).

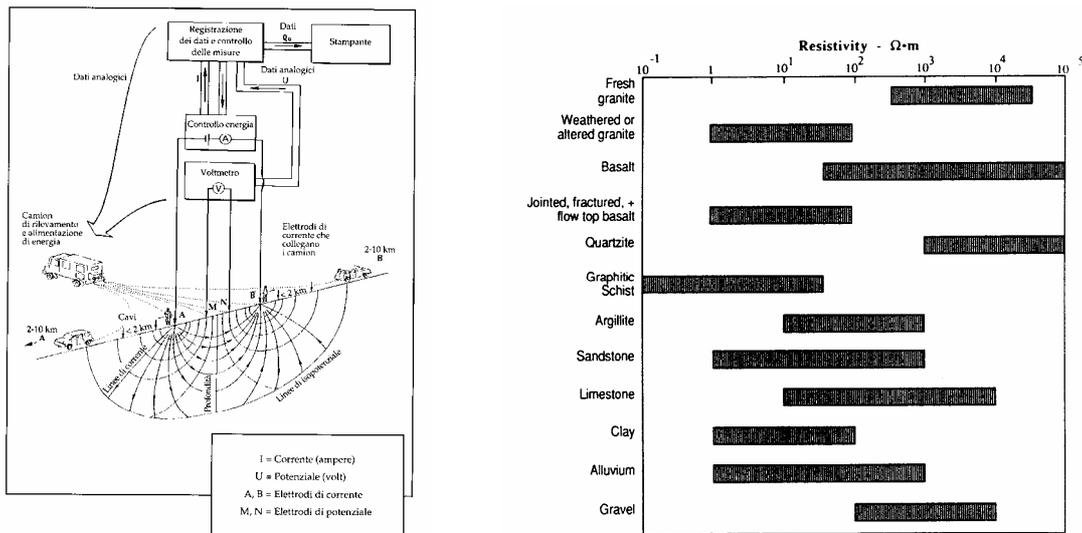


Figura A2 - Configurazione generale del metodo *geoelettrico di resistività* (a sinistra), (da Vogelsang, 1994). Intervalli tipici di *resistività* delle rocce (a destra), (da Culley *et al.*, 1975).

Dai valori noti di corrente erogata, dalla configurazione geometrica degli elettrodi e dalla differenza di potenziale misurata si calcola analiticamente la *resistività apparente* dei terreni indagati.

Roccia/Materiale	Resistività (ohm·m)
Argille, marne, grasse	3 - 30
Argille, marne, magre	10 - 40
Argille sabbiose, sil	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 - 10.000
Gneiss	400 - 6000
Rifiuti domestici	12 - 30
Fanghi industriali	40 - 200
Plume contaminato da rifiuti domestici	1 - 10
Olio esausto	150 - 700

Clay Alteration	↕	Weathering	↕
Dissolution	↕	Induration	↕
Faulting	↕	Carbonate Precipitation	↕
Salt Water Intrusion	↕	Silicification	↕
Shearing	↕	Metamorphism	↕
↕ Decreases	↕ Increases	↕ Increases or Decreases	

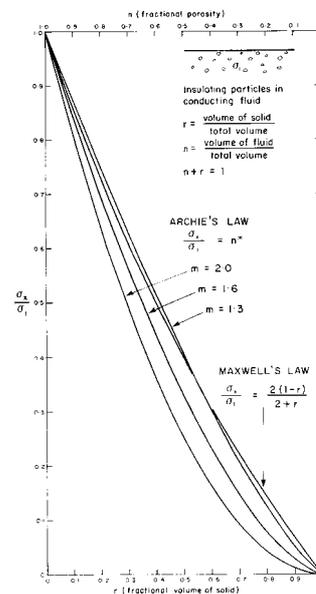


Figura A3 - Intervalli tipici di *resistività* di terreni, di rocce e di materiali di discarica (a sinistra, alto). Processi geologici che influenzano la resistività delle rocce (a sinistra), (da Ward, 1990). Rappresentazione della *legge di Archie* e della *legge di Maxwell* che esprimono la *conducibilità* in funzione della *porosità* del terreno, (da McNeill, 1980).

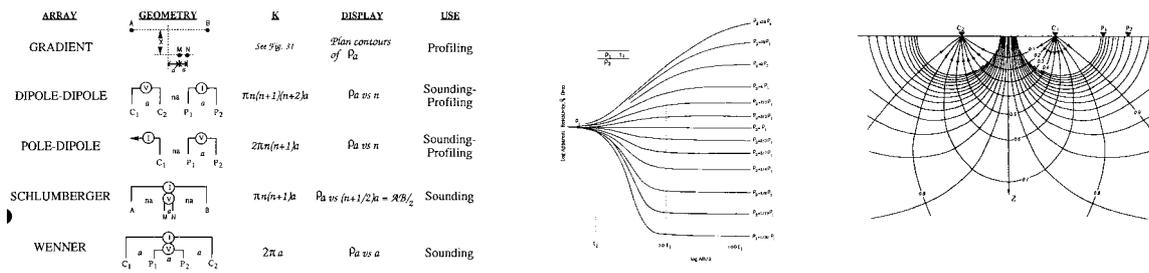


Figura A4 - Le configurazioni elettrodiche più utilizzate nei rilievi di misura di resistività e di caricabilità del terreno (a sinistra), (da Ward, 1990). Esempificazione di master curves di resistività, Schlumberger, modello a due strati (al centro), (da Cagniard, 1953). Distribuzione della corrente e delle linee equipotenziali in un terreno omogeneo intorno a due elettrodi (a destra), (da Van Nostrand & Cook, 1966).

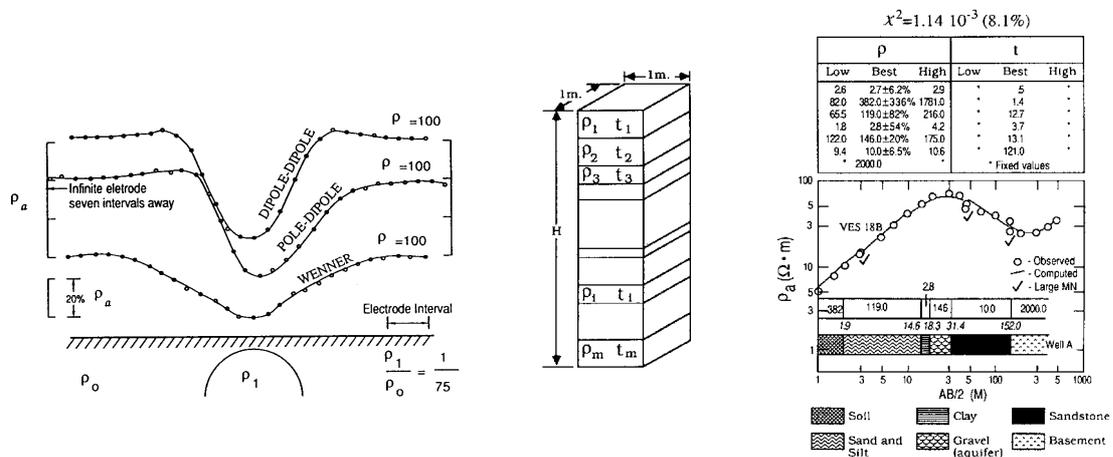


Figura A5 - Confronto tra profili di resistività ottenuti con configurazioni elettrodiche diverse su una sfera sepolta (a sinistra), (da Sumner, 1976). Modello teorico di terreno pluristratificato di resistività ρ e spessore t (al centro), (da Ward, 1990). Interpretazione a 7 strati di un Sondaggio Elettrico Verticale, tipo Schlumberger (a destra), (da Rijo et al., 1977).

Le misure possono essere svolte sul terreno mediante due schemi generali: distanziando via via gli elettrodi e mantenendo fisso il centro della configurazione per la misura del potenziale, si ottiene in tale modo una profondità di esplorazione via via maggiore (Sondaggi Elettrici Verticali); oppure, mantenendo fissa una configurazione, essa viene spostata per intero sul terreno in modo da sviluppare dei profili nell'area d'indagine. In tal modo si ottiene una misura delle variazioni laterali di resistività (Sondaggi Elettrici Orizzontali). I valori calcolati di resistività apparente vengono opportunamente rappresentati graficamente ed elaborati attraverso software specifici per il confronto delle curve sperimentali con curve di resistività teoriche ("abachi delle curve di resistività tipo" o master curves) per l'interpretazione (v. Fig. A5).

La combinazione dei due sistemi, *combined sounding and profiling*, adottando intervalli fissi di interdistanza tra gli elettrodi, consente di sviluppare un Profilo Elettrico Verticale, ossia una *tomografia* elettrica che si sviluppa lungo una determinata linea sul terreno (v. Fig. A6).

Tale configurazione è particolarmente efficace per l'individuazione di discontinuità di *resistività* sia in profondità sia laterali al terreno ed in condizioni di presenza d'acqua di falda. Consente quindi di delimitare, in sezione e quindi in volume, attraverso un'opportuna interpretazione dei valori, anomalie locali generate da strutture localizzate come corpi di discarica, tracce di dispersione di inquinanti, strutture in generale.

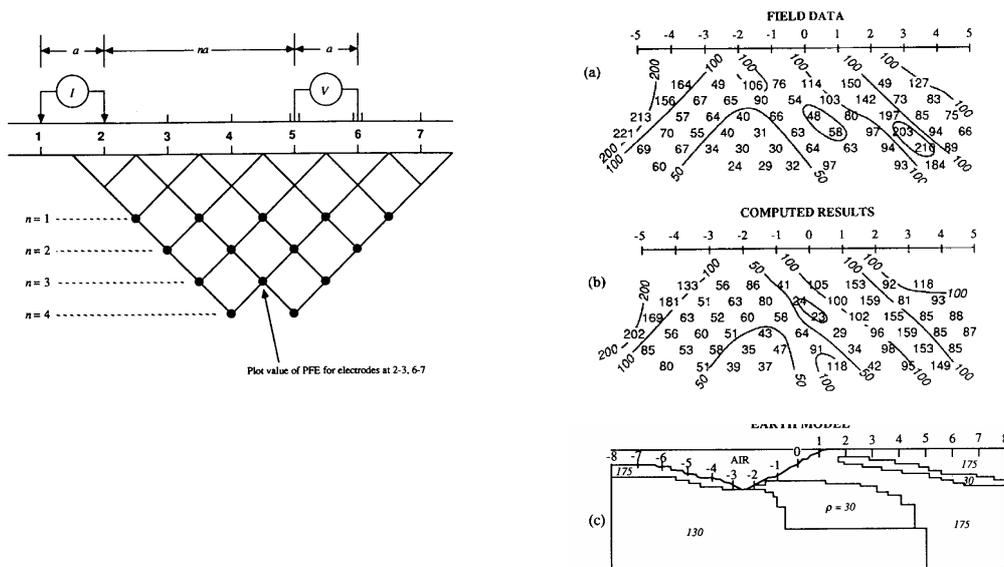


Figura A6 - Modello di *geoelettrica dipolo-dipolo* in *tomografia, combined sounding and profiling* (a sinistra), (da Ward, 1990). (a) valori misurati in tomografia, dipolo-dipolo; (b) valori calcolati da *software* di inversione grafica; (c) modello interpretativo del sottosuolo (in colonna, a destra), (da Hohmann, 1982).

- Signal-to-noise ratio
- Electromagnetic coupling
- Sensitivity to lateral location
- Resolution of steeply dipping structures
- Resolution of horizontal structures
- Depth of exploration
- Sensitivity to depth of target
- Sensitivity to dip
- Sensitivity to surficial inhomogeneities, sounding
- Sensitivity to surficial inhomogeneities, profiling
- Sensitivity to bedrock topography
- Sensitivity to lateral effects
- Shielding by uniform conductive overburden
- Sensitivity to topography

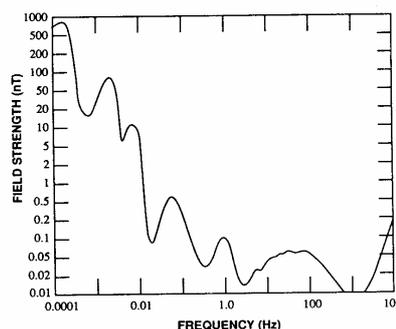
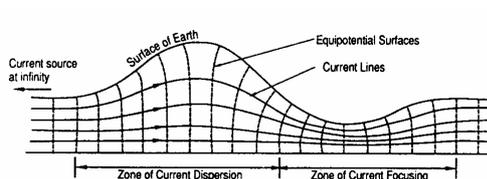


Figura A7 - Fattori che influenzano la scelta della configurazione elettroica nei rilievi di *resistività* e di *caricabilità* del terreno (a sinistra), (da Ward, 1990). Spettro del campo magnetico generale, *cultural noise* (a destra), (da Campbell, 1967).



Passive	Active
Fences	Power lines
Pipelines	Telephone lines
Power lines	Electrified rails
Telephone lines	Radio, TV, radar transmitters
Rails	

Figura A8 - Influenza della topografia sulla distribuzione delle *superfici equipotenziali* e delle *linee di corrente* (a sinistra), (da Fox *et al.*, 1980). Sorgenti di effetti d'interferenza d'origine antropica, *cultural noise* (a destra), (da Ward, 1990).

B. Caricabilità o Polarizzazione Indotta

Il metodo della *polarizzazione indotta I.P.* (*Induced Polarization* o *Polarisation Induite*) si applica attualmente contemporaneamente al metodo della tomografia elettrica di resistività.

La Polarizzazione Indotta fu sviluppata dapprima per la prospezione di piccole concentrazioni di elementi metallici, disseminati in *layer*, nell'ambito di ricerche per l'esplorazione mineraria.

Le prime applicazioni in campo ambientale risalgono agli anni '70 (Angoran *et al.*, 1974; Towle *et al.*, 1985; Zonge *et al.*, 1985; Hughes *et al.*, 1986; Anderson *et al.*, 1988).

Ogni volta in cui cambia la modalità di conduzione di una corrente, per esempio da *ionica a metallica*, viene richiesta energia dal sistema affinché della corrente fluisca nella nuova interfaccia. Questa barriera costituisce una *impedenza elettrica* (Schelkunoff, 1938). Le superfici della maggior parte dei solidi possiedono attrazione molto modesta tra ioni e cationi. Nelle immediate vicinanze della superficie esterna del solido è presente uno strato di ioni, essenzialmente immobili, costituito da uno o da alcuni strati molecolari (v. Fig. B2).

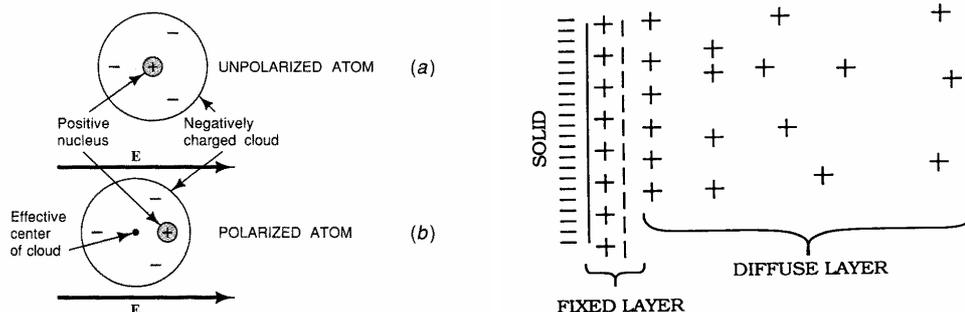


Figura B2 - (a) Atomo in equilibrio; (b) atomo polarizzato per applicazione di un *campo elettrico* (a sinistra), (Kraus, 1992). Teorica distribuzione anomala degli ioni all'interfaccia solido - liquido (a destra), (Ward, 1990).

Nelle immediate vicinanze di tale stratificazione c'è anche un gruppo di ioni relativamente mobili, di segno di carica uguale od opposto, conosciuto come strato di *diffusione*. Il numero di ioni anomali in questa zona decresce esponenzialmente verso l'esterno, a partire dallo strato verso la concentrazione ionica del liquido. La particolare distribuzione degli ioni appena descritta, nonostante risulti essere la più comune, è solo una tra quelle possibili.

Mentre le cariche disposte sulla stratificazione fissa sono abbastanza stabili al movimento, le cariche sulla stratificazione diffusa sono funzione della temperatura, della concentrazione di ioni presenti nell'elettrolita allo stato normale (cioè non sottoposto a corrente elettrica), della valenza elettronica e della *costante dielettrica* del mezzo.

Ci sono due circuiti possibili per cui la corrente può essere trasportata attraverso le stratificazioni descritte: percorso di tipo *Faraday*, cioè attraverso l'elettrolita, oppure per conduzione "metallica", percorso *non-Faraday*.

Il passaggio di corrente nel tipo *Faraday* è il risultato di una reazione elettrochimica come l'ossidazione o la riduzione di alcuni ioni. Si può sviluppare la diffusione degli ioni dall'interfaccia. La carica viene fisicamente trasportata dal movimento degli elettroni.

Nel caso *non-Faraday*, le particelle cariche non attraversano l'interfaccia; si genera piuttosto una corrente dall'alternarsi dei processi di carica e scarica delle due stratificazioni. Questo processo si può rappresentare come un fenomeno di tipo *capacitivo*, con variazione di *impedenza* al variare della frequenza.

Nel tipo *Faraday*, l'*impedenza* associata al trasferimento elettrico è rappresentata da una reazione di *resistenza*. Il processo di diffusione di ioni non è invece rappresentabile così semplicemente come da una combinazione di resistori e di capacità. Esso è riferito ad una *impedenza* detta di *Warburg*, la cui intensità varia inversamente con l'inverso della radice quadrata della frequenza. L'*impedenza* d'interfaccia tra molti metalli - elettroliti può quindi essere generalmente descritta in tale maniera.

Per frequenze maggiori di 1000 Hz, la maggior parte delle *correnti* elettriche seguono un percorso di tipo *non-Faraday*, per cui l'*impedenza* di interfaccia cambia, al variare della frequenza, approssimativamente come l'inverso della frequenza. Diminuendo la frequenza, la maggior parte della corrente viene trasportata attraverso il circuiti tipo *Faraday* e quindi l'*impedenza* di bassa frequenza varia con la frequenza (f) in un intervallo che va da $f^{-1/2}$ a f^0 , a seconda dell'intensità di impedenza di rapporto *Warburg / Resistenza*.

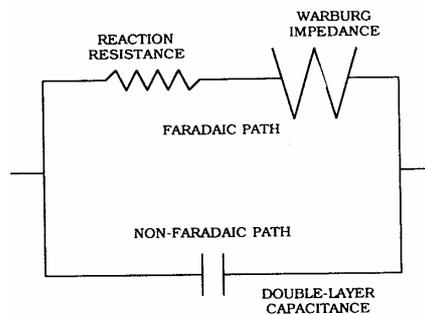


Figura B3 - Modello di circuito elettrico di rappresentazione dell'*impedenza interfacciale*, (Ward, 1990).

Il circuito di (v. Fig. B3) illustra il fenomeno della *polarizzazione indotta*. Tale modello è noto come principio di *Cole-Cole* (1941), schematizzato secondo Pelton *et al.* (1978) nella relazione:

$$Z(\omega) \cong R_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{(1 + i\omega\tau)^c} \right) \right] \cong R - i\omega L$$

dove $i = (-1)^{1/2}$; $\omega = 2\pi f$; C = capacità; τ = grandezza dipendente dall'induttanza L e dalla geometria del sistema

In un processo di *rilassamento*, la *fase* del circuito equivalente raggiunge il massimo nel punto in cui il valore assoluto dell'*impedenza* Z, attraverso il circuito, decade dalla resistenza R_0 a $m R_0$, essendo $m = (1, 2, 3, \dots)$, mostrando una inflessione nel picco di fase.

B.2 Polarizzazione di membrana

La *polarizzazione di membrana* è particolarmente importante nelle rocce contenenti una bassa percentuale di argilla nella matrice. L'effetto di questo tipo di polarizzazione aumenta notevolmente in rocce porose in cui le particelle d'argilla bloccano parzialmente il passaggio alle soluzioni di ioni (v. Fig. B4). La nuvola cationica di *diffusione* in vicinanza della superficie del minerale argilloso è caratteristica del sistema argilla-elettrolita.

Applicando un potenziale elettrico, le cariche positive manifestano una elevata mobilità attraverso la nube cationica, mentre quelle cariche negative tendono ad accumularsi (v. Fig. B4); esiste quindi una membrana ione-selettiva. All'eliminazione del potenziale elettrico tutte le cariche ritornano nella loro posizione di equilibrio.

Di conseguenza, una sovrabbondanza di cationi e di anioni si genera ad una estremità della zona di membrana, mentre una carenza di essi si localizza nella parte opposta. Il numero totale delle cariche di un segno non è molto diverso da quelle di segno opposto.

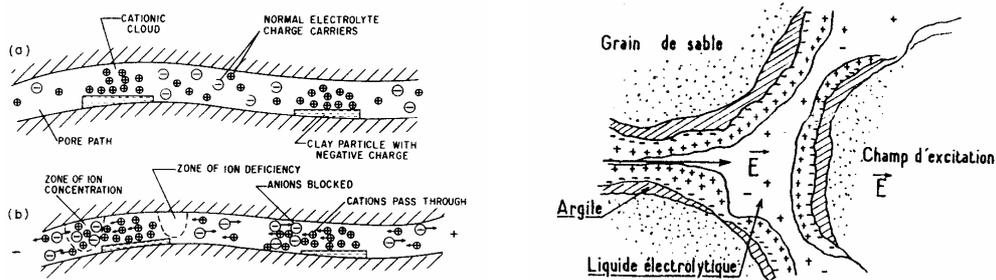


Figura B4 - A sinistra, rappresentazione della *polarizzazione di membrana* in roccia contenente minerali argillosi. (a) prima dell'applicazione di un *campo elettrico*; (b) dopo l'applicazione di un *campo elettrico*, (da Ward & Fraser, 1967). Rappresentazione della formazione di una *membrana elettrolitica* selettiva (argilla) per gli ioni della fase liquida generati dall'applicazione di un campo elettrico (a destra), (da Vacquier, 1956).

Questa concentrazione di ioni genera un gradiente opposto al flusso generale creando una diminuzione delle cariche mobilitate. Per variazioni rapide rispetto al tempo di diffusione (per esempio 1000 Hz) la mobilità ionica non si riduce sostanzialmente. Quindi la conducibilità elettrica del sistema membrana aumenta all'aumentare della frequenza della corrente.

La maggior parte delle cariche *adsorbite* adiacenti ad un'interfaccia è contenuta entro una distanza d dalla superficie, per cui (Grahame, 1947):

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

In cui

n = concentrazione ionica dell'elettrolita allo stato naturale

v = valenza elettronica degli ioni allo stato naturale

e = carica elementare

K_e = *permeabilità dielettrica relativa* del mezzo fluido

k = costante di *Boltzman*, 1.38054×10^{-16} Erg/°K

T = temperatura

Per l'esplorazione ambientale è importante notare come lo spessore d della stratificazione aumenti con la *permeabilità dielettrica* e con la temperatura e diminuisca invece con la concentrazione ionica e con la valenza degli elementi. In *plumes* di contaminanti del terreno e nelle dispersioni di agenti chimici, i fluidi sia tossici che non tossici possono notevolmente influenzare la distanza d .

Maggiore è il valore di tale distanza, maggiore è la probabilità che i pori del terreno possano essere bloccati da una stratificazione di diffusione. La polarizzazione indotta è quindi tanto maggiore quanto d risulta grande. Tale considerazione vale sia per la *polarizzazione di membrana* che per quella *elettrodica*.

Si ricorda infine come talora si possa incorrere in valori negativi di polarizzazione indotta, come anche di resistività, durante l'acquisizione dati. I valori negativi sono generati da condizioni complesse di strutturazione e configurazione del sistema terreno – strutture presenti – dispositivo. In genere si ottengono misure negative a causa di "noise" elettromagnetico, presenza di conduttori nel terreno di forma geometrica particolare, coperture di terreno notevolmente conduttive.

	ρ_a	IP
Abandoned mineshafts—detection	X	X
Archaeological site—delineation	X	
Chemical waste disposal—contamination plumes	X	?
Cropland salinization and desalinization— changes with time and space	X	
Dams—integrity of foundation, status	X	X
Earthquake risk—evaluation of fault movement	X	
Engineering geology—mapping	X	X
Faults—detection, delineation	X	X
Foundations—integrity, soil/bedrock interface	X	
Groundwater—delineation, evaluation, protection, contamination	X	X
Karst topography—soil/bedrock interface	X	X
Landfills—delineation, contamination plumes, drums	X	X
Landslides—delineation, water content	X	
Materials exploration—detection and delineation	X	X
Nuclear waste disposal—pre-site delineation	X	X
Oil shale retort monitoring	X	X
Permafrost—delineation of active layer and ice lenses	X	
Rippability—delineation of weathered rock	X	?
Road siting—soil/bedrock interface	X	X
Tunnels and cavities—detection and delineation	X	

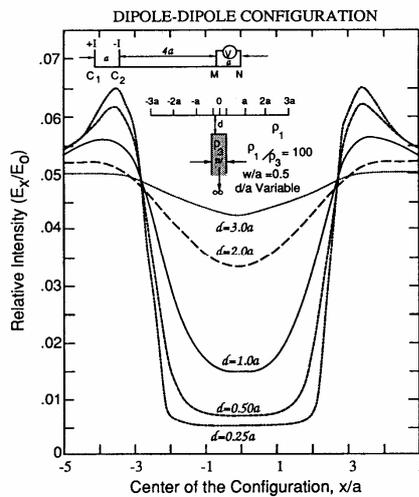
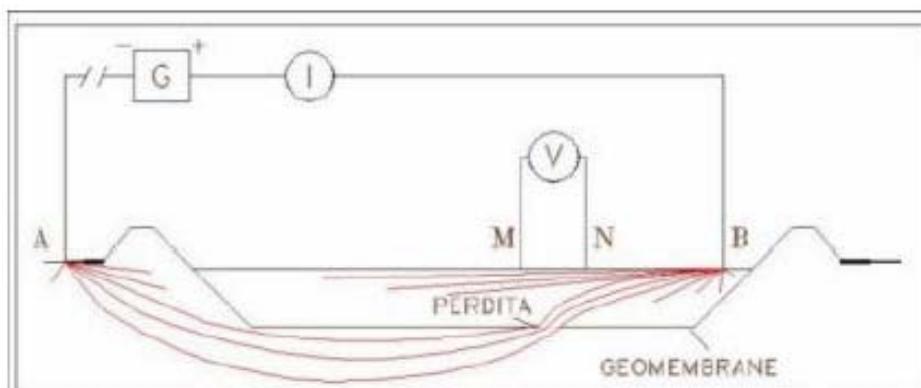


Figura B5 - Campi di applicazione dei metodi di *resistività* e di *polarizzazione indotta* (a sinistra), (da Ward, 1990). Configurazione dipolo-dipolo: profili di rappresentazione del rapporto dell'intensità del campo elettrico rispetto a quello primario $E_0 = I\rho_1/6.25 \pi a^2$, a varie profondità, su una struttura conduttiva verticale (a destra), (da Dey *et al.*, 1975).

2.3 Collaudo integrità teli in HDPE

PRINCIPIO FISICO

- Si tratta di una applicazione geoelettrica specifica, concepita per effettuare per il controllo dell'integrità delle barriere impermeabili, utilizzate per la messa in sicurezza di siti contaminati o discariche. Il metodo è basato sull'elevata resistività elettrica propria del polietilene ad alta densità (HDPE). Il monitoraggio consiste nella misura della continuità dell'isolamento elettrico mediante misure del potenziale elettrico. In corrispondenza di strutture di lesione del telo in HDPE (fori millimetrici, lesioni, saldature aperte) il gradiente risulta accentuato a causa del passaggio di corrente elettrica.



APPLICAZIONI

- Verifica dell'integrità fisica con localizzazione di qualsiasi tipo di lesione (fori millimetrici, strappi, fratture, saldature aperte) in geomembrane elastomeriche poste sul fondo di nuovi impianti di smaltimento di rifiuti, vasche, o coperture (Capping) di zone contaminate.

VANTAGGI E SVANTAGGI

- Deve essere attentamente verificato l'isolamento elettrico del sistema;
- Il materiale drenante deve essere abbondantemente bagnato;
- In discariche in uso si possono verificare fenomeni di distorsione o difficoltà logistiche di intervento.
- Si ottengono cartografie che illustrano, in planimetria per isolinee, i gradienti misurati con l'ubicazione dei punti di discontinuità.
- I punti di anomalia vengono direttamente individuati sulla superficie interna della discarica/capping, con possibilità di interventi immediati.
- Il rilievo può essere realizzato sia sul materiale di protezione, messo in posto subito sopra la geomembrana, o, successivamente, sul suolo di copertura superficiale.

MODALITA' ESECUTIVE

- Il telo in HDPE deve essere coperto da uno strato drenante di sabbia o ghiaia di spessore variabile. La vasca deve essere elettricamente isolata, e il drenante deve essere ben bagnato. Non è sufficiente che sia umido.
- Tramite una coppia di elettrodi A e B, posizionati uno sulla superficie del terreno all'interno dell'area da controllare e l'altro all'esterno, a debita distanza, si stabilisce una circolazione di corrente mediante l'applicazione di una differenza di potenziale tra i due elettrodi.
- La misura del potenziale elettrico relativo, realizzata sulla superficie tramite uno stendimento di cavi ed elettrodi lungo allineamenti dell'ordine delle decine/centinaia di metri, mostra l'andamento del campo elettrico.
- Quando nella membrana è presente una fessura o una lacerazione e si origina una perdita attraverso di essa viene a crearsi un marcato flusso di corrente con una conseguente forte caduta del potenziale elettrico nelle sue immediate vicinanze.
- Viene effettuata l'indagine su tutta la superficie interna alla vasca secondo una maglia regolare e successivamente vengono eseguiti gli infittimenti di controllo necessari all'ubicazione di precisione delle lesioni.
- Al fine di ottenere la massima risoluzione è raccomandabile una elevata densità di punti di misura, distribuiti sulla superficie da indagare secondo una maglia quadrata regolare. Normalmente si eseguono rilievi secondo un passo di misura di 1 x 1 m.

2.4 Georadar[GPR]

PRINCIPIO FISICO

- Il radar geologico utilizza la riflessione di onde elettromagnetiche per l'esplorazione del sottosuolo;
- Si trasmette nel terreno, con impulsi di brevissima durata, un'onda elettromagnetica di alta frequenza.
- Il segnale riflesso dalle superfici di discontinuità presenti nel sottosuolo viene captato da un'antenna ricevente e registrato dopo un campionamento ad adeguata frequenza.
- Corpi, stratificazioni o strutture presenti nel terreno, aventi diversa permeabilità elettrica (costante dielettrica), inducono rifrazioni e riflessioni del campo generando interferenza;
- Si eseguono rilievi ad alta risoluzione con restituzione grafica in tempo reale di una sezione (tempo-distanza) continua del sottosuolo;
- Il potere risolvete dello strumento è direttamente correlato alla frequenza;
- Si ottengono diagrammi (velocità-tempi) illustranti la morfologia, in sezione verticale, delle strutture incontrate.

APPLICAZIONI

- Individuazione e delimitazione di zone di discarica sepolta, di cisterne in ferro/c.a. e fusti, di vuoti, di tubazioni in ferro, PVC e cls;
- Individuazione di variazioni laterali del substrato;
- Individuazione e mappatura della rete dei sottoservizi, di mura/setti in cls, c.a., muratura;
- Studi per la caratterizzazione e la valutazione dello stato di conservazione di manufatti (individuazione fessurazioni, discontinuità, connessioni e giunti metallici, presenza di orizzonti d'alterazione, cavità);

VANTAGGI E SVANTAGGI

- Sezioni continue in tempo reale del sottosuolo;
- Metodo completamente non invasivo e di vasta applicabilità;
- Ottimo rapporto costi-qualità;
- Rapidità nell'acquisizione dei dati di elevato dettaglio;
- Possibilità d'indagine in luoghi chiusi ed anche su pavimentazioni armate;
- La profondità d'investigazione può limitarsi a soli 0.5-1.0 m in terreni di natura argillosa o in terreni saturi d'acqua. In tali condizioni è difficile individuare corpi sepolti di dimensioni ≤ 0.5 m;
- Perdita di dettaglio con l'aumentare della profondità e limitazioni per l'individuazione di contaminanti non conduttivi;
- L'interpretazione di un singolo profilo può dar luogo ad ambiguità sia sulla posizione del corpo anomalo che sulla profondità;

- Quando non vi è la possibilità di poter effettuare una taratura con saggi diretti la trasformazione della sezione-tempo in sezione-profondità è molto critica.

MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- La strumentazione georadar viene utilizzata su terreni non troppo accidentati. Infatti la necessità di avere acquisizioni continue implica lo spostamento del corpo centrale assieme all'antenna che viene trascinata sul terreno o sulla struttura da investigare;
- A seconda della tipologia del terreno la profondità esplorabile è limitata fra i 3 e i 10 metri da p.c.;
- L'utilizzo di alte frequenze è particolarmente indicato per ottenere un grande dettaglio nella ricerca di anomalie a profondità superficiali;
- Basse frequenze di utilizzano nella prospezione a maggiore profondità di più ampi orizzonti riflettenti.

C. Metodo georadar [GPR]

Il metodo georadar [GPR *Ground Probing Radar*] impiega un dispositivo denominato *klinstron-reflex* per generare impulsi di onde elettromagnetiche (v. Fig. C1. *Spettro delle onde elettromagnetiche*). Le onde vengono irradiate nel terreno, e contemporaneamente ricevute, al fine di determinarne alcune caratteristiche di interesse connesse alla presenza di discontinuità fisiche nel suo interno.

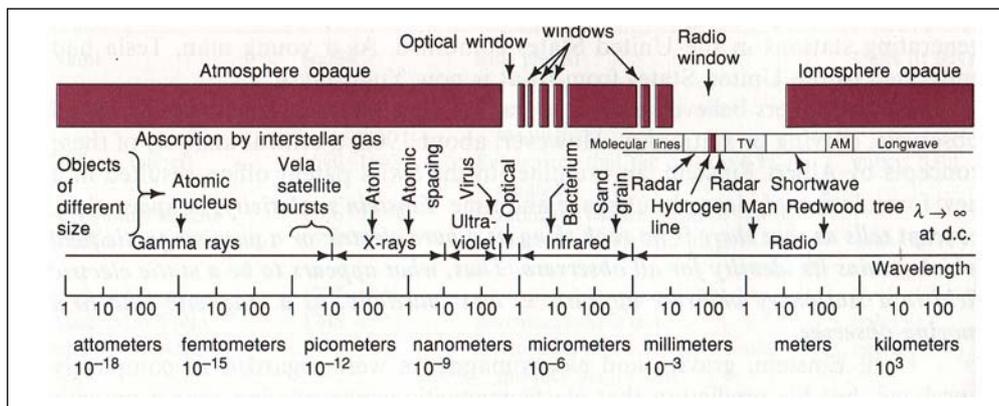


Figura C1 - *Spettro delle onde elettromagnetiche* (da KRAUS, 1992; modificata).
 [lunghezza d'onda $\lambda = c \cdot f^{-1}$, in cui: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, f : frequenza (Hz)].

La strumentazione invia, attraverso l'antenna, un impulso multifrequenza nel mezzo d'indagine. Eventuali discontinuità fisiche interferiscono con i campi dello spettro primario generando fenomeni di diffrazione. Le onde elettromagnetiche secondarie, distorte sia in *frequenza* che in *fase*, vengono ricevute dallo stesso apparato (v. Fig. C2. *Rappresentazione schematica del metodo GPR*).

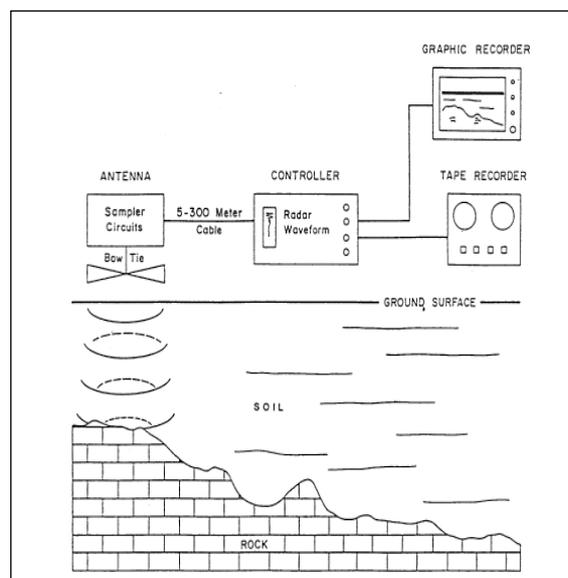


Figura C2 - *Rappresentazione schematica del metodo Ground Penetrating Radar GPR*. (da BENSON, GLACCUM & NOEL, 1982; modificata).

La relazione fondamentale di propagazione di un'onda, per il vettore campo elettrico E risulta essere:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(kz - \omega t)}$$

Per un mezzo a conducibilità finita, nelle condizioni di frequenza impiegate, la *costante di propagazione* K risulta un numero complesso (parte *reale* + parte *immaginaria*) pari a:

$$k = \alpha + i\beta$$

La *costante di propagazione* k risulta quindi caratterizzata dalle seguenti variabili proprie di ciascun mezzo di propagazione:

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad \beta = \omega \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \omega^2}} - 1 \right) \right]^{1/2}$$

Essendo:

$\omega = 2\pi \cdot f$ (Hz), frequenza angolare

μ = permeabilità magnetica (H m⁻¹)

σ = conducibilità elettrica (S m⁻¹)

ε = permeabilità elettrica (F m⁻¹)

Dall'elaborazione strumentale si ottengono una serie di diagrammi, *spikes*, la cui intensità dipende sia dal contrasto tra gli orizzonti attraversati sia dall'impostazione strumentale; l'ubicazione dei radargrammi dipende dalla velocità di propagazione delle onde nei materiali.

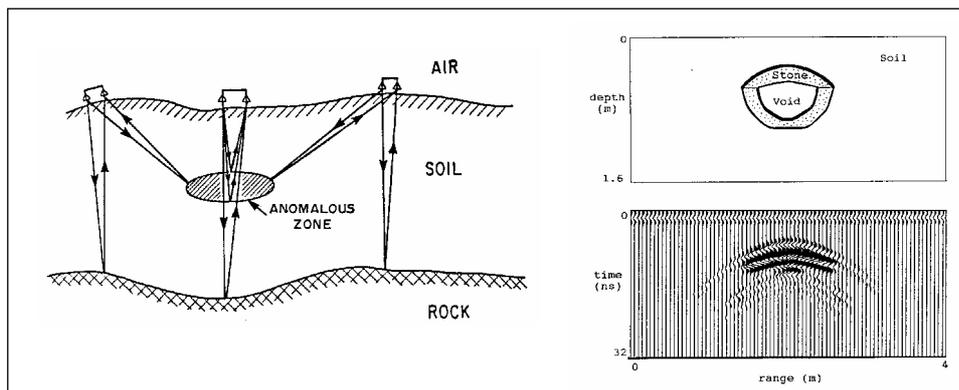


Figura C3 - A sinistra, *rappresentazione schematica dei vettori d'onda in relazione ad un bersaglio nel terreno ed alla stratificazione*, (da DAVIS J.L. & ANNAN A.P., *Geophysical Prospecting*, 1989). A destra, *simulazione GPR generata da una struttura tipo sepoltura*, a destra, (da GOODMAN D., *Geophysics*, 1994).

Conoscendo le principali grandezze fisiche elettromagnetiche dei terreni attraversati è possibile trasformare la sezione distanze-tempi in una sezione distanze-profondità (v. Fig. C3). La profondità massima di esplorazione risulta funzione della frequenza dominante del segnale emesso e della resistività elettrica del terreno.

L'unità di controllo e il *display* sono collegati mediante un cavo al trasduttore; i dati vengono visualizzati direttamente sullo schermo LCD a matrice attiva sotto forma di *radargrammi* a colori e registrati su *hard disk* interno, per poi essere trasferiti al computer di elaborazione.

Il successivo *processing* dei dati viene realizzato con *software* specifici. L'elaborazione consente di applicare ai segnali registrati funzioni matematiche utili per la *normalizzazione topografica* oppure per evidenziare le strutture individuate. Oltre a semplici funzioni di *filtraggio*, si applicano processi di *migrazione*, *deconvoluzione* e *correzione statica*.

2.5 Elettromagnetico [EM Resistivity]

PRINCIPIO FISICO

- Il metodo utilizza la generazione di un campo elettromagnetico, detto primario, che si trasmette intorno ad una bobina emittente, inducendo nel terreno una circolazione di una corrente. Questa originerà a sua volta un campo elettromagnetico secondario, la cui intensità è proporzionale alla conduttività del materiale;
- La conduttività elettrica (l'inverso della resistività) dei suoli e delle rocce dipende da vari fattori quali il grado di saturazione, la salinità dell'acqua dei pori, la composizione mineralogica;
- Si ottengono cartografie che illustrano in planimetria per isolinee la conducibilità elettrica e lo sfasamento dell'onda elettromagnetica.

APPLICAZIONI

- Individuazione e delimitazione di aree di discarica, discariche sepolte e zone di scavo del terreno. Il metodo è ottimale se si indagano terreni caratterizzati dalla presenza di materiali conduttivi, anche in debolissima concentrazione (composti inorganici con: metalli, metalli pesanti, Cl⁻, Na⁺, SO₄⁼, NO₃⁼, HCO₃⁻, Oli Minerali contenenti metalli e/o solfati, melme bituminose acide, fanghi,...);
- Individuazione del *plume* di dispersione nel terreno;
- Collaudo di omogeneità delle argilla in discariche in costruzione;
- Individuazione di corpi interrati (cisterne in ferro/c.a., fusti e latte metalliche, in plastica se pieni di materiale conduttivo, tubazioni di ferro in profondità);
- Individuazione di vuoti, macerie, materiali di riporto;
- Caratterizzazione planimetrica degli spessori di coperture di terreno, detritiche e di depositi alluvionali previa taratura con stratigrafie;
- La profondità d'esplorazione cambia (3, 5, 7, 10, 30 m) a seconda della configurazione, della strumentazione adottata e della natura del terreno.

VANTAGGI E SVANTAGGI

- Rilievi molto economici e speditivi;
- Facilità di trasporto e di utilizzo anche in ambienti con morfologia accidentata;
- Spiccata capacità di evidenziare discontinuità (superfici, strutture) a forte sviluppo verticale;
- Limitazioni per l'individuazione di contaminanti non conduttivi;
- Influenza di strutture quali recinzioni, corpi metallici in superficie, tubazioni, reti elettrosaldate, elettrodotti, c.a. e di edifici vicini posti a circa 5 m di distanza;
- Il metodo non si presta all'individuazione di dispersioni di gasolio, benzina, solventi, ecc. che non siano elettricamente conduttivi.

MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Mobilitazione della strumentazione lungo linee di misura equidistanti, grid 2x2/4x4 m; misurazione per punti lungo il tracciato o in continuo; possibilità di georeferenziazione con sistema GPS;
- Si applica al meglio in condizioni di terreno asciutto. In terreno molto argilloso la profondità d'esplorazione si riduce del 30-40%;
- Si può utilizzare anche su piazzali ad asfalto e calcestruzzo, purché il cemento non sia armato con rete metallica.

D. Metodo elettromagnetico ad induzione EM-Resistivity

Il metodo elettromagnetico ad induzione EM-Resistivity impiega onde elettromagnetiche in radio frequenza che vengono trasmesse nel terreno (v. Fig. D1).

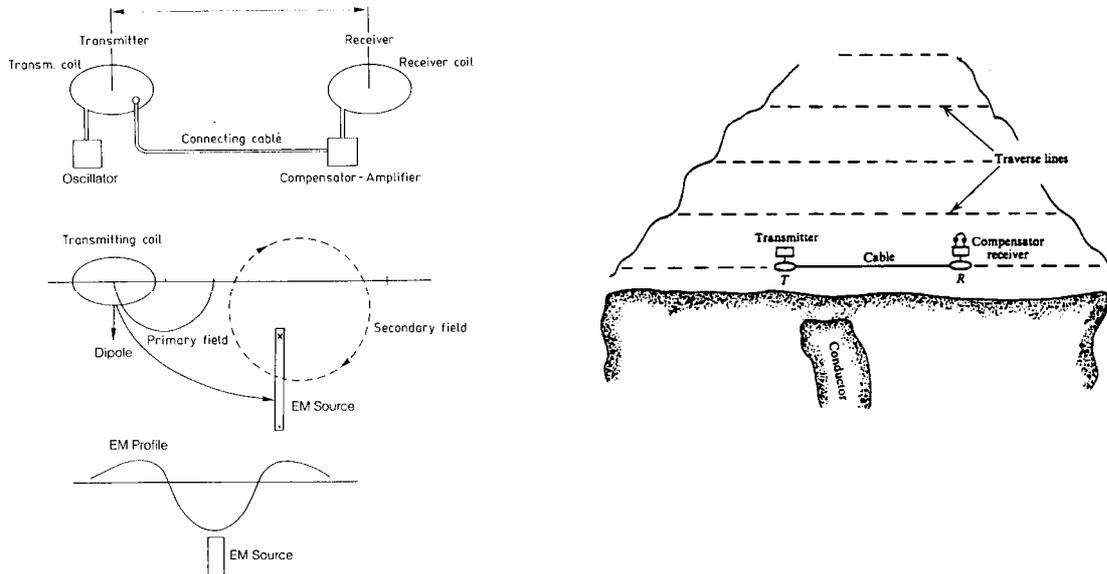


Figura D1 - Principio di funzionamento dei metodi elettromagnetici (a sinistra). (da D. VOGELSANG, 1991). Modalità di realizzazione di un rilievo elettromagnetico tipo (a destra). (da W.M. TELFORD *et al.*, 1976)

Il metodo utilizzato si configura tra quelli di carattere innovativo nella prospezione geofisica del terreno e viene attualmente impiegato sia per fini ambientali che geotecnici s. l..

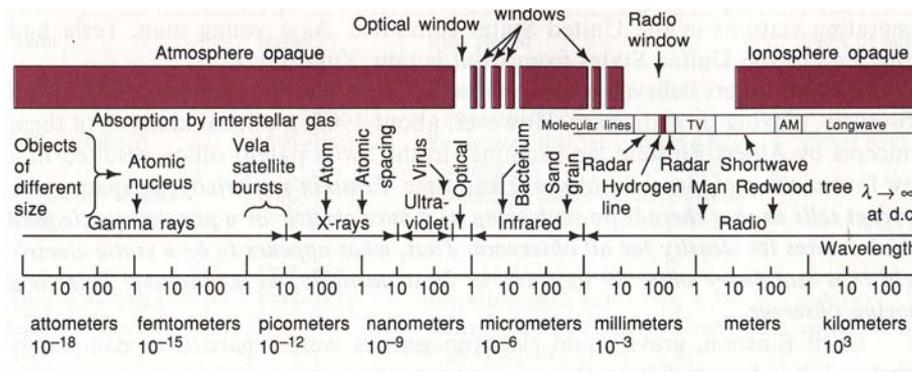


Figura D2 - Spettro delle onde elettromagnetiche. [lunghezza d'onda $\lambda = c \cdot f^{-1}$, in cui: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$, f : frequenza (Hz)], (da KRAUS, 1992; modificata).

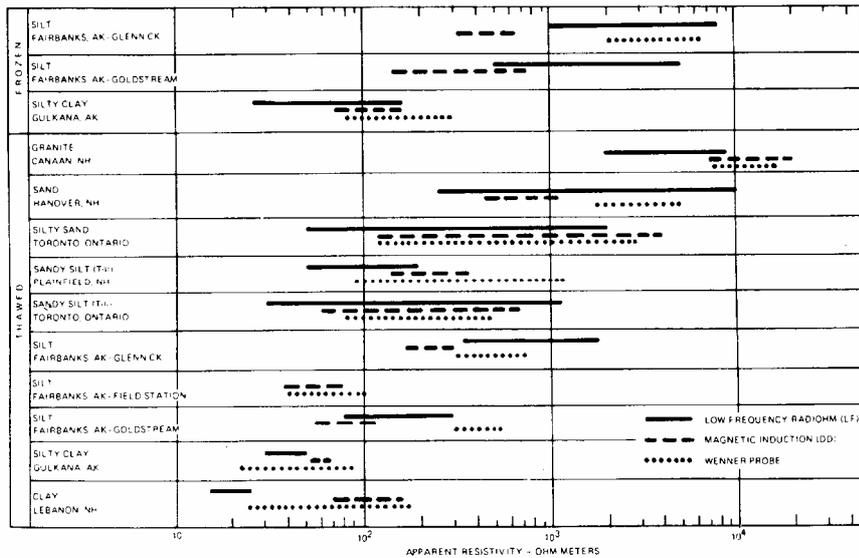


Figura D3 - Intervalli tipici di variabilità della *resistività* di rocce e di suoli ottenuti con metodi diversi (a sinistra), (da WARD & FRASER, 1967).

I principali vantaggi offerti dal metodo sono:

1. possibilità d'applicazione in aree topograficamente accidentate;
2. tempi di indagine sul terreno decisamente più brevi rispetto ai metodi tradizionali;
3. spiccata capacità di evidenziare discontinuità (superfici, strutture) a forte sviluppo verticale.

Clay Alteration	↓	Weathering	↓
Dissolution	↓	Incl' ration	↑
Faulting	↓	Carbonate Precipitation	↑
Salt Water Intrusion	↓	Silicification	↑
Shearing	↓	Metamorphism	↕
↓ Decreases	↑ Increases	↕ Increases or Decreases	

Figura D4 - Principali processi geologici che influenzano la *resistività* delle rocce soprattutto se misurata con metodi elettromagnetici, (da Ward, 1990).

Il metodo adottato consiste nell'invio, attraverso un'antenna a dipolo, di un segnale elettromagnetico, in frequenza VLF (*Very Low Frequency*) verso il mezzo d'indagine (v. Fig. D2). I segnali in uscita e in ingresso vengono elaborati nelle loro componenti fondamentali con restituzione della *resistività* elettrica "apparente" del mezzo alla propagazione (v. Figg. D3, D5).

Eventuali discontinuità fisiche interferiscono con i campi dello spettro primario generando fenomeni di *dispersione* e di *diffrazione*. Le onde elettromagnetiche secondarie, distorte sia in *frequenza* che in *fase*, vengono ricevute dallo stesso apparato strumentale.

Come illustra la Fig. D6, il campo elettrico E ed il campo magnetico H delle onde elettromagnetiche sono descritti, in un determinato istante *t* e per certe caratteristiche di configurazione di emissione, da onde polarizzate verticalmente.

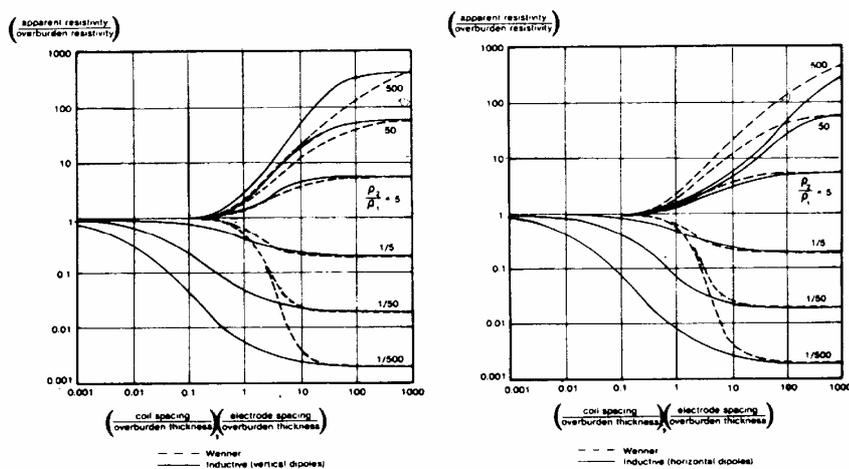


Figura D5 - Confronto tra curve di *resistività a due strati* ottenute con dispositivo D.C. Wenner, a sinistra, e ad induzione elettromagnetica, a destra, (da J.D. McNEILL, 1980).

E' noto che in prossimità del suolo il campo E è inclinato, rispetto alla verticale, verso la direzione X di propagazione dell'onda. Questo avviene per gli effetti della propagazione di onde elettromagnetiche in prossimità della superficie di separazione tra un dielettrico ed un conduttore, ovvero sulla superficie terrestre (ZENNECK, 1908; BURROWS, 1936). L'angolo di inclinazione, come sarà descritto, dipende dalle caratteristiche elettriche del suolo.

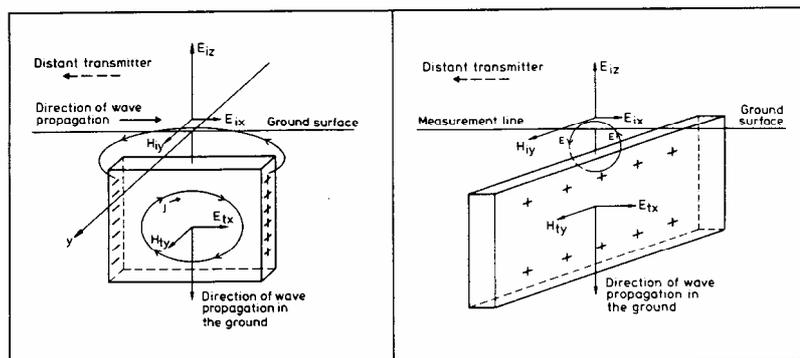


Figura D6 - Configurazioni possibili del campo elettromagnetico rispetto alla disposizione geometrica di una struttura teorica, (da D.S. PARASNIS, 1972).

Al suolo, la componente orizzontale del campo elettrico, a causa della conducibilità elettrica propria del mezzo che è molto maggiore di quella dell'aria, dà luogo ad una corrente di conduzione. Essa è diretta lungo la direzione di propagazione dell'onda ed è sfasata rispetto al campo elettrico dell'onda incidente.

Le ampiezze dei vettori **E** ed **H** in ciascun mezzo sono legate fra loro dalla relazione [STRATTON, 1941; SCHELKUNOFF S. A., 1938]:

$$H = (k^{1/2} / \mu \omega) E \tag{1}$$

dove k è il modulo del vettore d'onda di propagazione, μ è la permeabilità magnetica del mezzo ed ω la pulsazione angolare; per un mezzo conduttore, di conducibilità elettrica σ vale la relazione [STRATTON J. A., 1941]

$$k^{1/2} / \mu \omega = (\sigma / \mu \omega)^{1/2} \tag{2}$$

Poiché $\mu = \mu_0 \mu_r$, ove μ_r è la permeabilità magnetica relativa del mezzo e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H m⁻¹), la (2) può essere riscritta nella forma:

$$k^{1/2} / \mu \omega = 355.8 (\sigma / f \mu_r) \tag{3}$$

ove $f = \omega / 2\pi$ è la frequenza dell'onda incidente.

La *resistività* descrive lo stato di *conducibilità* del terreno indagato, funzione principalmente della natura chimica ed elettrolitica del terreno stesso. I valori di *resistività* variano in funzione di diverse caratteristiche: condizioni di umidità, profondità dell'interfaccia terreno/roccia, presenza di vuoti al loro interno, presenza di roccia con copertura detritica fine a spessore variabile, presenza di roccia cataclastica frammista a terreno fine (v. Fig. D7).

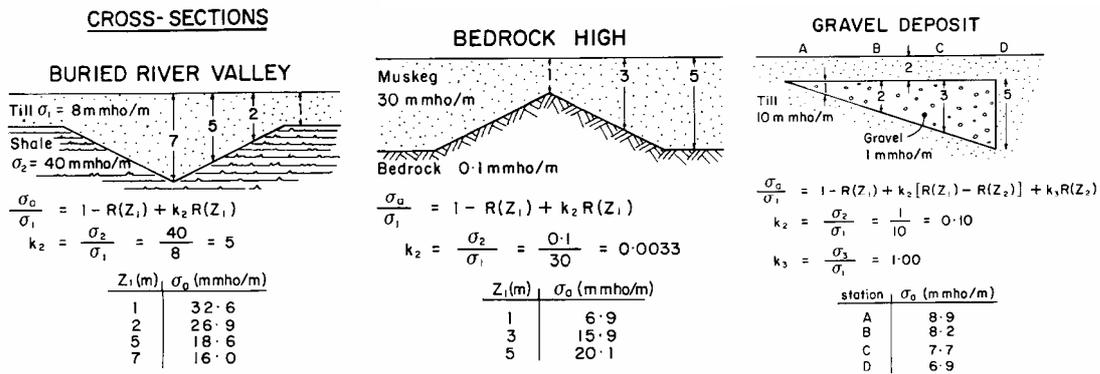


Figura D7 - Le figure descrivono l'efficacia del metodo elettromagnetico EM-Resistivity nella risoluzione di strutture geologiche contraddistinte da discontinuità laterale e di spessore, (da J.D. MCNEILL, 1980).

2.6 **MAGNETOMETRIA [M]**

PRINCIPIO FISICO

- Si basa sulla misura dell'interferenza, generata dagli oggetti ferromagnetici, sul Campo Magnetico Terrestre (CMT) [unità gamma, Tesla];
- Le misure possono essere riferite ad una stazione fissa sul sito oppure effettuate in configurazione gradiometrica al fine di escludere variazioni di campo dovute alle fluttuazioni naturali del Campo Magnetico Terrestre;
- Le misure, che vengono realizzate secondo profili o secondo grid regolari, consentono una mappatura degli oggetti sepolti;
- Si ottengono cartografie che illustrano per isolinee, in planimetria, il gradiente/CMT.

APPLICAZIONI

- Localizzazione e delimitazione di contenitori metallici sepolti;
- Individuazione di tubazioni di ferro e cavità o corpi contenenti materiali ferrosi;
- Ricerca discariche abusive;
- Bonifiche belliche;
- Profondità d'esplorazione: singoli fusti fino a 5-6 m di profondità, ammassi di fusti fino anche a 20 m di profondità.

VANTAGGI E SVANTAGGI

- Strumentazione maneggevole e adatta a qualsiasi tipo di terreno accidentato;
- Il metodo è facilmente applicabile anche per indagini su bacini idrici attraverso l'impiego di un'imbarcazione;
- L'indagine è limitata esclusivamente all'individuazione di materiali ferrosi (ferromagnetici);
- Limitazioni notevoli dovute alla interferenza con tubazioni, recinzioni o altri oggetti di ferro eventualmente presenti nell'area, linee dell'alta tensione;

MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Mobilitazione della strumentazione lungo linee di misura equidistanti (es. 2x2; 4x4 m grid), a seconda della risoluzione richiesta. Misure per punti o in continuo lungo i tracciati dei percorsi.
- La sonda è sospesa sul terreno. Possibilità di georeferenziazione con sistema GPS.

E. Magnetometria

Le misure del campo magnetico terrestre sono utilizzate per l'individuazione di strutture geologiche a scala regionale e nell'esplorazione mineraria. Intensificando invece le misurazioni rispetto l'area d'indagine e soprattutto incrementando la sensibilità strumentale, si impiegano per la localizzazione di tubazioni, di siti archeologici, di materiali metallici e di discontinuità sepolte nella prospezione ambientale.

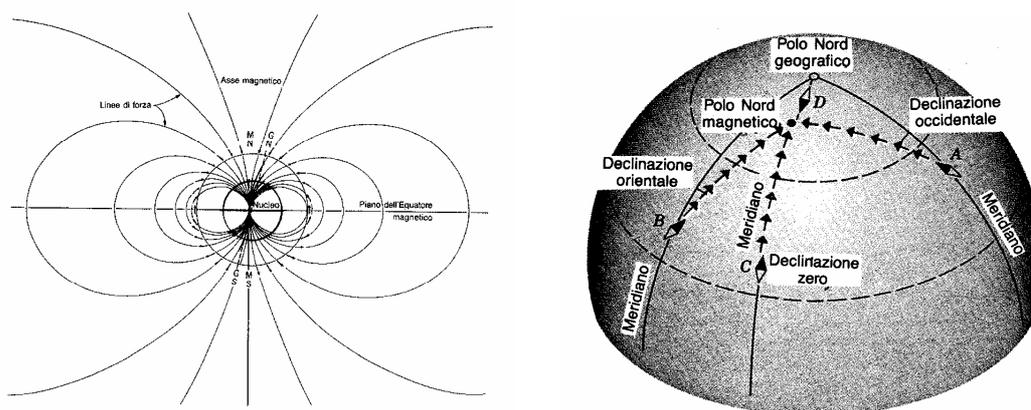


Figura E1 - Le linee di forza del campo magnetico terrestre (a sinistra). La declinazione magnetica relativa alla posizione dell'osservatore rispetto ai poli magnetici e geografici (a destra), (da Strahler, 1963).

Il magnetometro misura l'intensità del campo magnetico terrestre. La presenza di materiale *ferromagnetico* crea delle variazioni nel campo magnetico locale consentendo così l'individuazione di oggetti. La risposta di un magnetometro dipende dalla massa e dalla profondità a cui si trova l'oggetto metallico. Metalli *non-ferromagnetici*, quali l'alluminio, il rame e lo stagno, non inducono anomalie del campo magnetico (v. Fig. E2).

La forma delle linee di forza del *campo magnetico terrestre* sono simili a quelle che potrebbe creare una barra magnetica disposta verticalmente dal polo sud al polo nord (v. Fig. E1). L'intensità del campo magnetico totale varia considerevolmente, attraverso ciascun continente. Alle nostre latitudini le variazioni possono avere valori di circa 50.000 γ gamma (1 gamma γ = 1 nanoTesla nT) e angoli d'inclinazione di circa 60-70° rispetto l'orizzontale. Esistono inoltre variazioni giornaliere dovute alle esplosioni della corona solare, *sunspots*, e a perturbazioni della ionosfera, tempeste magnetiche, che possono produrre anche rapide ed intense variazioni.

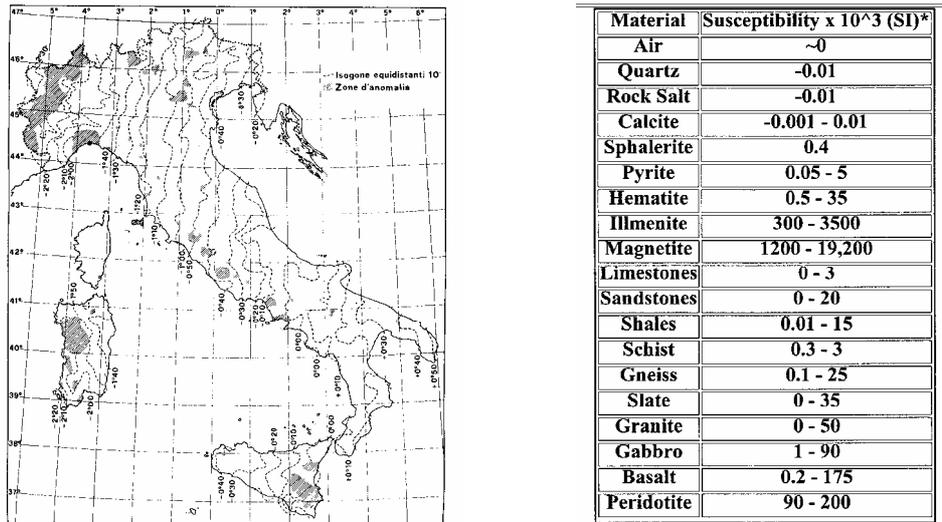


Figura E2 - La *declinazione magnetica* in Italia: carta *isogonica* d'Italia per il 1980 (a sinistra), (da Strahler, 1963). Valori tipici di *suscettività magnetica* χ delle rocce. $M = \chi \cdot H$ [in cui $M =$ momento magnetico indotto per unità di volume; $H =$ campo magnetizzante] (a destra), (da Parkhomenko, 1967).

Inoltre, nell'esplorazione di aree localizzate le condizioni delle proprietà magnetiche diversificate dei terreni, delle rocce e dei materiali inducono anomalie magnetiche. Una concentrazione di minerali ferrosi o di oggetti sepolti producono variazioni del campo magnetico locale che possono essere rilevate in superficie.

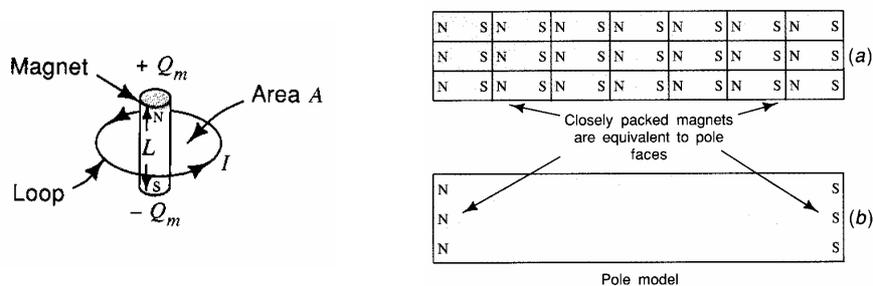


Figura E3 - *Magnete elementare* di momento $Q_m L$ e corrente equivalente di momento $I \cdot A$. (a sinistra). Ogni singolo effetto di dipolo magnetico elementare di un magnete uniforme (a) produce un unico magnete con un unico polo sud e polo nord magnetici (b) (a destra), (da Kraus, 1992).

Generalmente le variazioni di campo magnetico che si registrano in ricerche di tipo ambientale vanno da uno a qualche centinaia di unità gamma γ per piccole localizzazioni a diverse profondità. Accumuli di fusti possono creare anomalie da 100 a 1.000 γ e oltre.

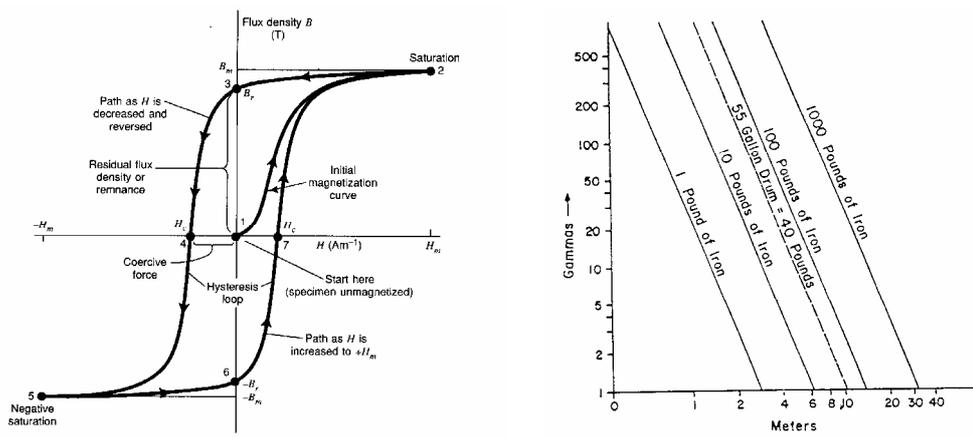


Figura E4 - La *Curva d'isteresi magnetica* illustra la variazione di magnetizzazione $B = \mu_0 \mu_r \cdot H$ di un materiale *ferromagnetico* sottoposto a campo magnetico H variabile in intensità e verso nel tempo ed essendo μ_r la permeabilità magnetica relativa del mezzo e μ_0 quella del vuoto (a sinistra), (da Kraus, 1992). Campo magnetico totale espresso in unità γ , registrato con un magnetometro relativamente ad oggetti di diversa massa e diversa profondità nel terreno (a destra), (da Benson *et al.*, 1982).

Esistono molti tipi diversi di magnetometri. In campo ambientale sono utilizzati generalmente due tipi: il magnetometro *fluxgate* ed il magnetometro a protoni. Nel magnetometro *fluxgate* il sensore è costituito da un nucleo ferromagnetico che subisce variazioni di saturazione di magnetizzazione con l'ambiente circostante. Tali variazioni sono proporzionali all'intensità del campo. Elettronicamente le variazioni vengono amplificate e registrate. Il *fluxgate* è molto sensibile a variazioni d'inclinazione dello strumento cosicché viene accoppiato con un *gradiometro* per l'orientazione, oppure vengono combinati due *fluxgate* insieme con un *radiometro* (v. Fig. E6).

Nel magnetometro a protoni viene generato un campo magnetico intorno ad un fluido di una sostanza particolare. Il campo creato produce una orientazione dei protoni del fluido. Nel momento in cui il campo magnetico viene annullato, il movimento di *spin* dei protoni si orienta secondo il campo magnetico totale. La loro precessione nucleare genera un segnale la cui frequenza è proporzionale all'intensità del campo. Viene così misurata direttamente l'intensità del campo magnetico locale.

Massa e profondità sono due fattori che influenzano la risposta di un magnetometro. Se si usa un gradiometro si registrano elevatissime variazioni dovute alla sensibilità strumentale. Un altro fattore rilevante e di difficile interpretazione è l'influenza di materiale dotato di magnetizzazione residua che può innalzare o diminuire la risposta totale dell'oggetto al campo magnetico terrestre. Anche la forma e l'orientazione dell'oggetto metallico influenzano l'intensità e la forma dell'anomalia risultante (v. Fig. E5).

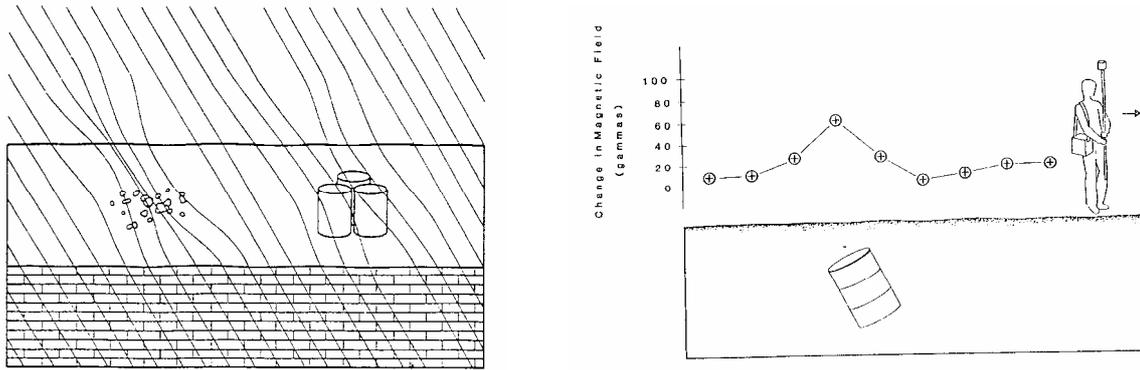
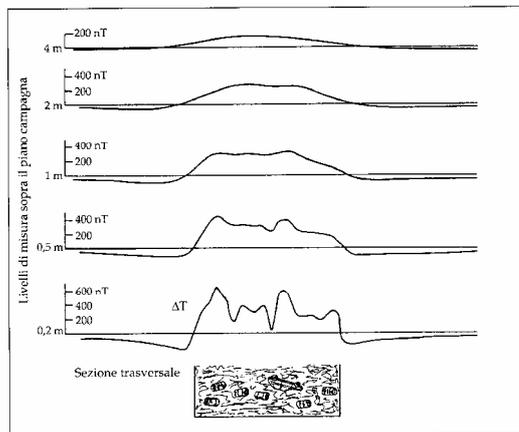


Figura E5 - Distorsione delle *linee di forza del campo magnetico terrestre* dovuta a concentrazioni di ossidi di ferro naturali nel terreno e ad oggetti in ferro sepolti (a sinistra). Profilo delle misure d'*anomalia magnetometrica* dovuta ad un fusto sepolto (a destra), (da Benson *et al.*, 1982).



	TOTAL FIELD MEASUREMENTS		GRADIENT MEASUREMENTS		
	Station	Continuous	Station	Continuous	Typical Sensitivity
FLUXGATE	NA	NA	YES	YES ¹	0.1 gammas/meter to 20 gammas/meter gradient
PROTON	YES ¹	NO ²	YES	NO	.1 gammas total field .1 gammas/meter gradient

NA - Not applicable
 1 - Commonly used mode of operation
 2 - Maximum sample time for portable proton ground magnetometers presently range from 2 to 4 seconds.

Figura E6 - Anomalie magnetiche registrate a differenti altezze dalla superficie (a sinistra), (da Vogelsang, 1994). Rappresentazione schematica delle principali caratteristiche dei magnetometri *fluxgate* e *a protoni* (a destra), (da Benson *et al.*, 1982).

Solitamente, per ricerche ambientali sensibilità elevate, di 0.1 γ per misure d'intensità totale e 0.05 γ/m di gradiente, sono difficilmente efficaci in quanto producono eccessive variazioni nei profili di misura che sono strumentalmente non controllabili.

L'interpretazione delle misure risulta molto spesso esclusivamente di tipo semi quantitativo, consentendo di determinare la località e l'estensione di eventuali oggetti in ferro senza però fornire indicazioni sulla quantità del materiale ritrovato.

2.7 RADIAZIONI IONIZZANTI [β , γ]

PRINCIPIO FISICO

- Si basa sulla misura quantitativa delle radiazioni ionizzanti (β , γ) emesse da elementi attivi/attivati. La misura si effettua mediante Contatore Geiger (Röntgen/ora)
- Si ottengono cartografie che illustrano, in planimetria, per isolinee la radiazione misurata.

APPLICAZIONI

- Individuazione e delimitazione di sorgenti radioattive
- Profondità d'esplorazione: dipende dall'intensità di emissione.

VANTAGGI E SVANTAGGI

- L'indagine è limitata esclusivamente all'individuazione di elementi e composti sorgenti di radioattività.

MODALITA' ESECUTIVE E CONDIZIONI AMBIENTALI IDONEE

- Mobilitazione della strumentazione lungo linee di misura equidistanti (es. 2x2; 4x4; 10x10 m grid), a seconda della risoluzione richiesta. La sonda è sospesa sul terreno.

3. PREZZIARIO

[I seguenti prezzi sono indicativi. I prezzi possono variare sulla base della superficie totale d'indagine e delle condizioni morfologiche ambientali di lavoro]

1. Geoelettrica [SEV, SEO] = 1,00 – 4,00 €. / m lineare di stendimento
2. Tomografia Elettrica & I.P. [R I.S. & I.P.] = 5,00 – 10,00 €. / m lineare di sezione
3. Elettromagnetico EM = 0,20 – 0,35 €. / m² superficie
4. Georadar GPR = 1,00 – 3,00 €. / m lineare d'indagine
5. Magnetometria M = 0,25 – 1,0 €. / punto di misura
6. Analisi gas interstiziali SGS = 100,00 €. / composto, misura
7. Rilevazioni Radiazioni Ionizzanti β, γ = 1,00 – 3,0 €. / punto di misura

4. BIBLIOGRAFIA

ANDERSON R., BELL P. & REYNOLDS R. (1990) - *Induced polarization used for highway planning*, Advances in applications and case histories of induced polarization, Fink J.B. and McAllister E.O., Eds.; SEG special Publication.

ANGORAN Y.E., FITTERMAN D.V. & MARSHALL D.J. (1974) - *Induced polarization: a geophysical method for locating cultural metallic refuse*, Science, **184**, 1287-1288.

BENSON R. C., GLACCUM R. A., & NOEL M. R. (1982) - *Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration*, Project Report to U.S.E.P.A., Office of Research and Development, under Contract no. 68.03.3050 Technos Inc., Miami, FL.

BURROWS C. R. (1936) - *Proc. Inst. Radio Engrs.* , **25**, 219.

CAGNIARD L. (1953) - *Basic theory of the Magneto-Telluric method of geophysical prospecting*, Geophys., **18**, 605-635.

CAMPBELL W.H. (1967) - *Geomagnetic Pulsation, in Physics of geomagnetic phenomena*, Matsushita S. and Campbell W.H., Eds. Academic Press 822-890.

CERRO A., MOGNASCHI E. R. & PAGANO A. (1997) - *Determinazione della resistività apparente di terreni alluvionali con il metodo elettromagnetico a radiofrequenza.*, **39**, Atti Tic. Sc. Terra, 79-84.

CULLEY R. W., JAGODITS F.L., MIDDLETON R.S. (1975) - *E-Phase System for Detection of Buried Granular Deposits*. Symposium on Modern Innovations in Subsurface Exploration, 54th Annual Meeting of Transportation Research Board.

DOBRIN M. B. (1960) - *Introduction to Geophysical Prospecting*, McGraw-Hill, New York.

FOX R.C., HOMANN G.W., KILLPACK T.J. & RIJO L. (1980) - *Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys*, Geophysics, **45**, 75-93.

GREENHOUSE J. P., MONIER-WILLIAMS M. E., ELLERT N. & SLAINE D. D. (1987) - *Geophysical Methods in Groundwater Contamination Studies*, Exploration '87 Proceedings.

HOHMANN G.W. (1982) - *Numerical Modeling for electrical geophysical methods*, Proc. Int. Symp. Appl. Geophys. Trop. Reg., Univ. Do para, Belem, Brazil 308-384.

HUGHES H.J., EINER D.R., FIGGINS S.J., ZONGE K.L., KUHN M.V., BENTLEY H.W. & TINLIN R.M. (1986) *Applications of two electrical geophysical techniques in mapping groundwater contamination*, Proc. Surface and Boreholes Geophys. Methods and Groundwater Instrumentation, Nat. Water Well Assn., Conf. And Expos., 65-86.

KRAUS J. D. (1992) - *Electromagnetics*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York.

LASFARGUES P. (1957) - *Prospection Électrique*, Masson & Cie Éditeurs, 120 Boulevard Saint-Germain, Parigi.

MCNEILL J. D. (1995) - *The application of electromagnetics techniques to environmental geophysical surveys*, unpublished.

MCNEILL J. D. (1994) - *Use of Electromagnetic Methods for Groundwater Studies*, 1, Review and Tutorial, Geotechnical and Environmental Geophysics, Ed. by Stanley H. Ward, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 147-190.

MCNEILL J. D. (1980) – *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Number*, Technical Note TN-6, Geonics Limited, Ontario.

MCNEILL J. D. (1980) - *Electrical Conductivity of Soils and Rocks*, Technical Note TN-5, Geonics Limited, Ontario.

MEYBOOM P. (1967) – *Hydrogeology*. Groundwater in Canada Ch. 2. Brown I.C., Ed. Geol. Survey Canada, Econ Geol. Rept. 24.

MISAC N., NABIGHIAN & CHARLES L. ELLIOT (1976) – *Negative IP effects from layered media*, 41, No 6A, Special Electromagnetic Supplement, Geophysics.

MÜLLER I., STIEFELHAGEN W. & INTCHI R. A. M. (1995) - *Réflexions sur les résultats obtenus par l'enregistrement en continu des paramètres géophysiques, électromagnétiques (VLF-EM) et magnétiques, pour l'exploration hydrogéologique des aquifères karstiques (Grotte De Milandre, Jura, Suisse)*, 118, Bulletin De La Société Neuchâteloise Des Sciences Naturelles, 109-119.

NAGATA T. (1956) - *Rock-Magnetism*, Maruzen Co., Ltd., Tokio.

PAGANO A. (1998); *Applicazioni dei Metodi VLF-EM/R, con una strumentazione prototipo e calcolo della Pseudo-Resistività Elettrica Apparente VLF per semplificazioni dell'interpretazione geologica*, Tesi di Dottorato di Ricerca X Ciclo, Dipartimento di Scienze della Terra – Università di Pavia, inedita.

PAGANO A. (1996); *Indagini VLF per la caratterizzazione di aree sede di discarica abusiva sepolta nel territorio dell'Oltrepo pavese*, Progetto di Ricerca: gestione del territorio e smaltimento dei rifiuti tossici e nocivi, Convenzione Università degli Studi di Pavia - Fondazione Lombardia per l'Ambiente, Regione Lombardia.

PARASNIS D. S. (1972) - *Principles of Applied Geophysics*, Chapman and Hall, London.

PARASNIS D. S. (1971) - *Physical Property Guide for Rocks and Minerals*, ABEM Geophysical Memorandum 4/71.

PARKHOMENKO E. I. (1967) - *Electrical Properties of Rocks*, Plenum Press, New York.

PEHME P. E., GREENHOUSE J. P. & MCNEILL J. D. (1992) - *Mapping and monitoring organic contaminants with terrain conductivity measurements*, Conference of the Canadian National Chapter, International Association Of Hydrogeologists, May 11-13, Hamilton, Ontario.

PELTON W.H., WARD S.H., HALLOF P.G., SILL W.R. & NELSON P.H.. I. (1978) – *Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP*, *Geophysics*, **43**, 588-609.

RIJO L., PELTON W.H., FEITOSA E.C. & WARD S.H. (1977) – *Interpretation of apparent resistivity data from Apodi Valley, Rio Grande Do Norte, Brazil*, *Geophysics*, **42**, 811-812.

SCHELKUNOFF S. A. (1938) - *The Impedance Concept and Its Application to Problems of Reflection, Refraction, Shielding and Power Absorption*, **17**, *Bell System Tech. J.*, 17-48.

SELLMANN P.V., ARCONE S.A., DELANEY A. (1976) – *Preliminary Evaluation of New LF Radiowave and Magnetic Induction Resistivity Units – Over Permafrost Terrain*, *Natl. Res. Council Canada Tech. Mem.* 119, *Proc. Symposium on Permafrost Geophysics*, 12 Oct.

STRAHLER A. N. (1984) – *Geografia Fisica*, Piccin Nuova Libreria, Padova.

STRATTON J. A. (1941) - *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York.

SUMNER J.S. (1976) – *Principles of Induced Polarization for Geophysical exploration*, Elsevier Scientific Pub. Co.

TELFORD W. M., GELDART L. P., SHERIFF R. E., KEYS D. A. (1976) - *Prospection géophysique*, E. R. G. Maurecourt, France.

TOWLE J.N., ANDERSON R.G., PELTON W.H., OLHOEFT G.R. & LABREQUE D.D. A. (1985) – *Direct detection of hydrocarbon contaminants using the induced-polarization method*, 55th Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts, 145-146.

TODD D.K. (1964) – *Groundwater*, Handbook of Applied Hydrology, Ch. 13 Chow V.T., Ed. McGraw Hill, New York.

VAN NOSTRAND R.G. & COOK K.L. (1966) – *Interpretation of Resistivity Data*, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 499.

VACQUIER V., KINTZINGER P.R., HOLMES C.R., FRISCHE R.H. (1956) – *Prospecting for groundwater by Induced Electrical Polarization*, New Mexico Institute of Mining and Technology Research and Development Division; Socorro.

VOGELSANG. D. (1994) – *Environmental Geophysics. A practical Guide*, Springer-Verlag, Berlino.

ZENNECK J. (1908) - *Ann. Phys.*, **23**, 846-866.

ZONGE K.L., FIGGINS S.J. & HUGHES L.J. (1985) – *Use of electrical geophysics to detect sources of groundwater contamination*, 55th Ann. Internat. Mtg., Soc. Explor. Geophys., Expanded Abstracts, 147-148.

WARD S. H. (1990) – *Geotechnical And Environmental Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, U.S.A.

WARD S. H. & FRASER D.C. (1967) – *Conduction of electricity in rocks*, Mining Geophysics, **2**, Soc. Explor. Geophysics, 197-223.

SOILTEST, INC. (1968) - *Earth Resistivity Manual*, Soiltest, Inc. Subsidiary of Cenco Instruments Corporation, Evanston, Illinois, U.S.A.