



METODOLOGIE DI INDAGINE GEOFISICA

Valeria Eulilli

**ISPRA – Dipartimento Difesa del Suolo
Servizio Geofisica**



Indice

1. Introduzione
2. I metodi geofisici
3. Metodo gravimetrico
4. Metodo magnetico
5. Metodi sismici
6. Metodi elettrici
7. Metodi elettromagnetici
8. Carotaggi geofisici
9. Conclusioni



1. Introduzione

- ✓ La Geofisica studia la Terra con metodi fisici e si avvale di algoritmi matematici, anche complessi, per ottenere dei modelli del sottosuolo.
- ✓ La geofisica applicata viene distinta dalla geofisica globale perché studia la porzione più superficiale della crosta terrestre.
- ✓ Le indagini geofisiche sono generalmente finalizzate allo studio dell'assetto geologico e in campo ambientale sono rivolte alle problematiche ingegneristiche, alla valutazione e mitigazione dei rischi naturali ed antropici, ed all' archeologia.
- ✓ I metodi geofisici sono metodi indiretti e non distruttivi



2. I metodi geofisici

✓ Le indagini geofisiche integrano le informazioni ottenibili dai sondaggi meccanici, sono molto più veloci da realizzare ed hanno un minor costo rispetto ad essi.

✓ Consentono di ottenere informazioni non solo puntuali ma anche areali.

✓ I metodi geofisici si distinguono in metodi passivi ed attivi:

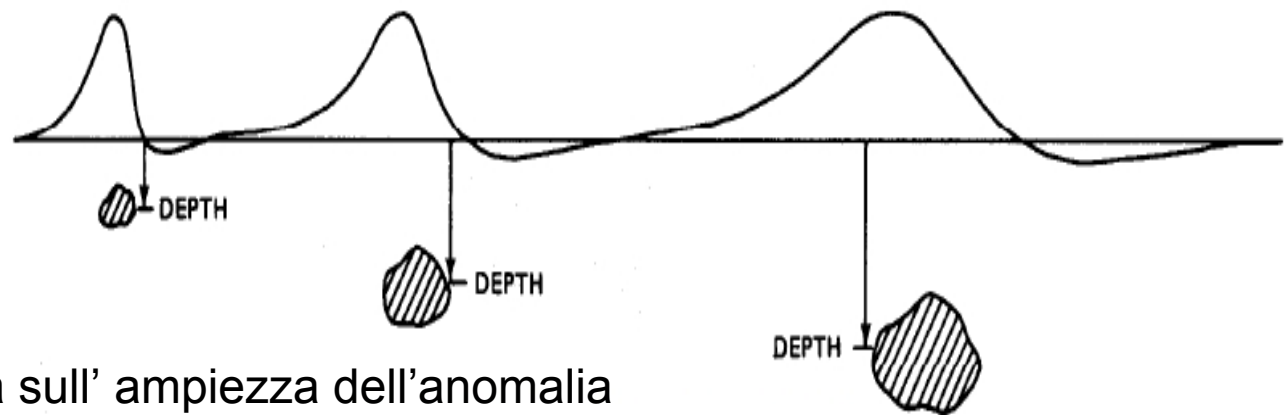
i metodi passivi rilevano le variazioni dei campi naturali associati alla Terra;

con i metodi attivi invece viene trasmesso nel terreno un segnale creato artificialmente; lo stesso segnale, raccolto ad un ricevitore, risulterà alterato e correlato alle caratteristiche fisiche del mezzo attraversato.

2. I metodi geofisici

Perché l'applicazione di una tecnica geofisica abbia successo sono necessari i seguenti requisiti:

- ✓ Caratteristiche fisiche intrinseche del target e del terreno incassante sufficientemente differenti in modo da produrre un contrasto apprezzabile in superficie.
- ✓ Rapporto dimensioni /profondità adeguato ai fini della individuazione del target
- ✓ Rapporto segnale/rumore elevato



Effetto della profondità sull' ampiezza dell'anomalia

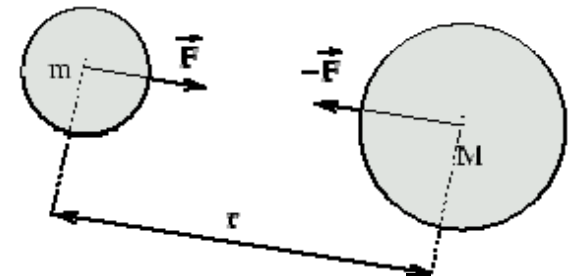
3. Metodo gravimetrico

I principi sul campo gravitazionale vennero enunciati da Isaac Newton nel 1600. La legge sulla gravitazione universale è la seguente :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

secondo cui due masse qualsiasi m_1 e m_2 , poste alla distanza reciproca r , si attraggono con una forza F .

Su un'unità di massa posta alla superficie della Terra supposta sferica agiscono la forza di attrazione newtoniana e la forza centrifuga, dovuta alla rotazione della terra attorno al proprio asse. La risultante delle due forze è l'accelerazione di gravità e coincide con la direzione del filo a piombo (g). L'unità di misura è il Gal (m/s^2) nel sistema c.g.s.; la gravità varia da 9.78 a 9.83 Gal dall'equatore ai poli, in funzione della latitudine.



G = costante di gravitazione universale = $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ (SI)

3. Metodo gravimetrico

Strumentazione



Gravimetro LC&R

Applicazioni

- Migliore conoscenza dell'assetto strutturale del sottosuolo;
- Delineazione di strutture regionali profonde (duomi salini, trappole strutturali per idrocarburi);
- Localizzazione di cavità (gallerie/pozzi minerari o vuoti dovuti a processi chimici di soluzione);
- Localizzazione di camere, tombe e cunicoli sepolti in ambito archeologico;
- Localizzazione di zone di faglia;
- Zone di forte mineralizzazione.



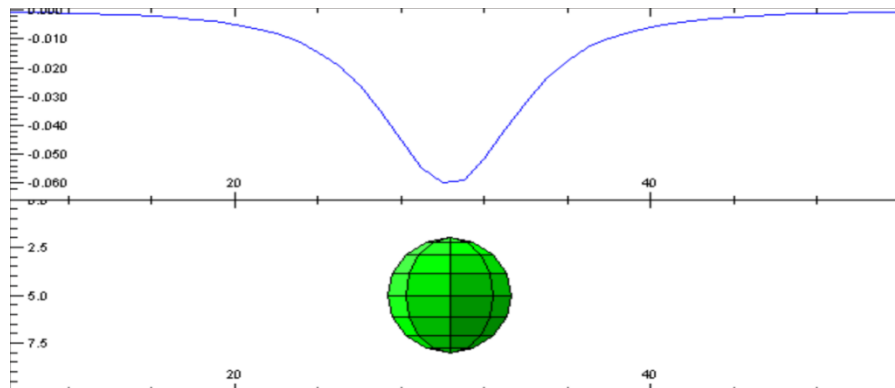
3. Metodo gravimetrico

Esecuzione, elaborazione ed interpretazione dei dati gravimetrici

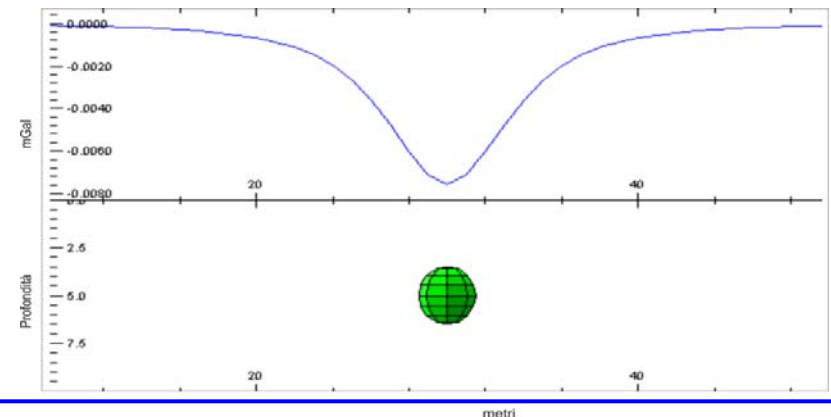
- ✓ Una prospezione gravimetrica rileva le variazioni di gravità tra le stazioni di misura, che corrispondono a variazioni di densità nel sottosuolo.
- ✓ Le misure devono essere corrette: per gli effetti della deriva strumentale, per l'attrazione delle masse della luna e del sole.
- ✓ Ulteriori correzioni: Riduzione di Faye, Riduzione di Bouguer, Correzione Topografica per ridurre i valori misurati all'ellissoide di riferimento.
- ✓ L'Anomalia di Bouguer é lo scostamento positivo o negativo rispetto alla gravità normale in una certa stazione e rappresenta la distribuzione anomala delle masse al di sotto della stazione di misura.
- ✓ Il metodo gravimetrico necessita, soprattutto in rilievi di dettaglio, di un accurato rilievo topografico di supporto.

3. Metodo gravimetrico

- ✓ Nelle applicazioni archeologiche vengono adoperati strumenti ad alta risoluzione, i microgravimetri con sensibilità di 1 μGal .
- ✓ Il passo di campionamento deve essere commisurato alle dimensioni ed alla profondità del target e la lunghezza del profilo (o la dimensione della griglia) di misura deve essere sufficiente a indagare compiutamente l'anomalia.



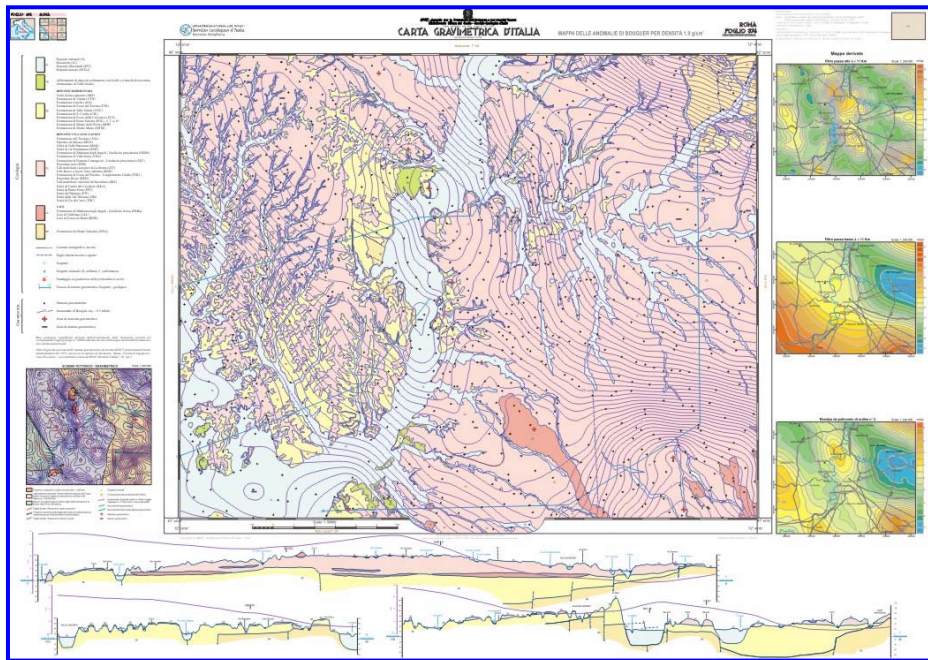
Calcolo dell'effetto di una cavità sferica con densità = 0 g/cm^3 , raggio 3 m, profondità centro 5 metri, contrasto di densità = -2.0 g/cm^3 . Max effetto: -59 μGal



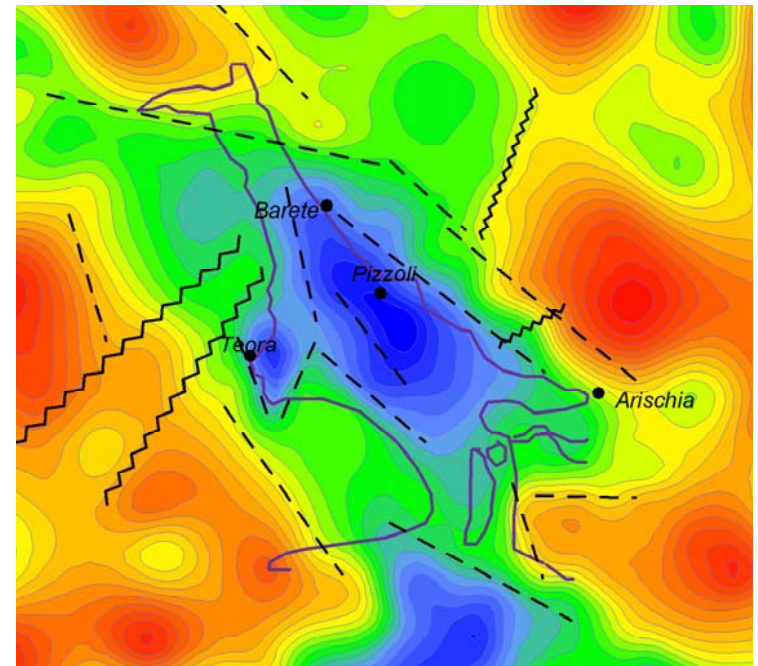
Calcolo dell'effetto di una cavità sferica con densità = 0 g/cm^3 , raggio 1.5 m, prof. centro 5 metri, contrasto di densità = -2.0 g/cm^3 Max effetto: -7 μGal

3. Metodo gravimetrico

Risultati dell'indagine gravimetrica: le mappe dell'anomalia di Bouguer



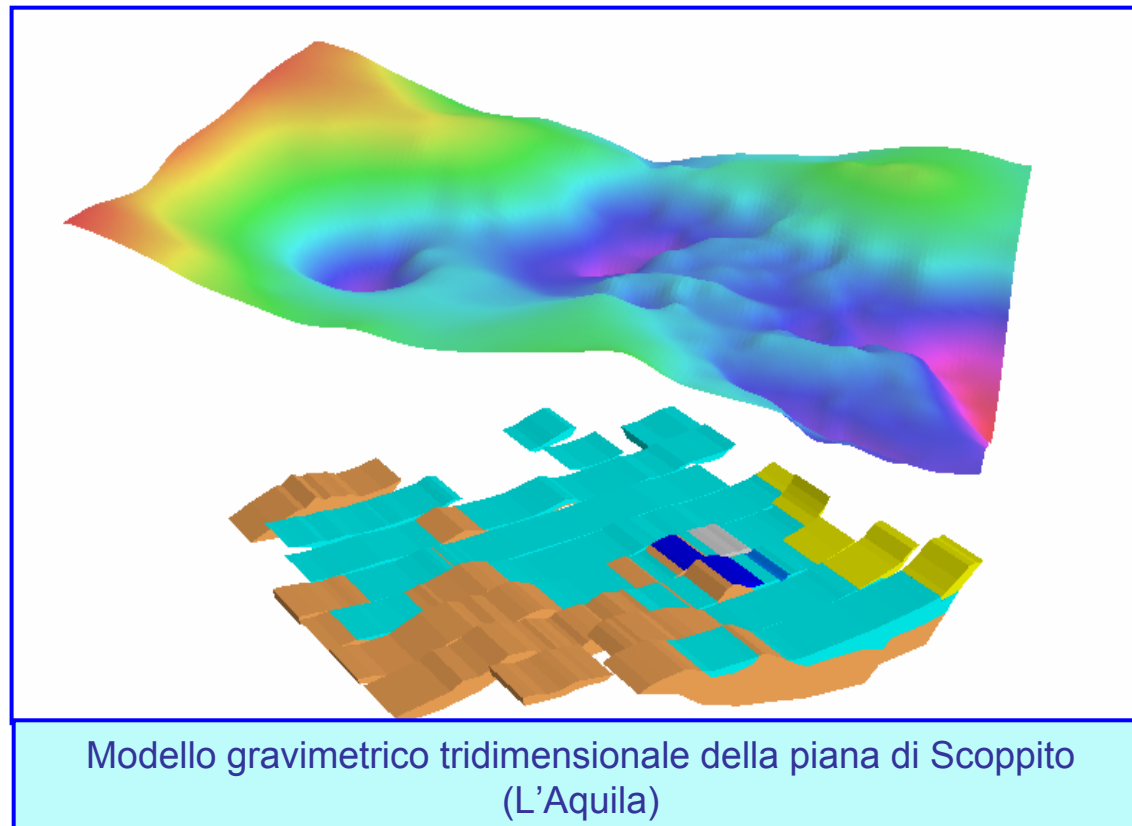
Carta gravimetrica del Foglio 374 a scala 1:50000 - Roma



Le anomalie di Bouguer nella conca intermontana di Pizzoli (AQ)

3. Metodo gravimetrico

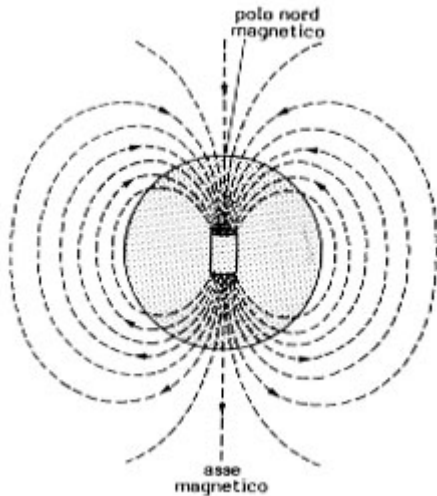
Risultati dell'indagine gravimetrica: i modelli 2D o 3D del sottosuolo



4. Metodo magnetico

✓ E' un metodo passivo perché con esso si effettuano misurazioni del campo magnetico terrestre.

✓ La terra si comporta come una sfera magnetizzata uniformemente e l'origine del c.m.t. ha principalmente sede nel nucleo ed al confine con il mantello inferiore; in pratica è come se al suo centro ci fosse un dipolo magnetico.



✓ Il c.m.t. è soggetto a variazioni che possono essere: di breve periodo, secolari, di lunghissimo periodo, ma ai fini dei rilievi effettuati a scopi ambientali ed archeologici interessano soprattutto quelle giornaliere.

✓ Il parametro fondamentale è la suscettività magnetica che varia nelle diverse rocce a seconda del contenuto in ferro.



4. Metodo magnetico

Quando un corpo con suscettività magnetica non nulla è immerso in un campo magnetico esterno come quello terrestre, si magnetizza per induzione e produce da solo un campo magnetico che si somma al cmt.

✓ In tal modo in linea teorica è possibile individuare la presenza e le caratteristiche di un corpo suscettivo, in base alle alterazioni del campo naturale nelle sue vicinanze.

✓ La magnetizzazione “termoresidua”, è tipica di strutture archeologiche (terracotte, forni, focolari) e conserva la traccia dell'effetto del campo geomagnetico presente al momento della formazione dell'oggetto.

4. Metodo magnetico

Strumentazione



Magnetometro a protoni (Geometrics 856)



Magnetometro al cesio (Geometrics 858)

Applicazioni

- Profondità del basamento magnetico;
- Indagini preliminari nella ricerca di idrocarburi;
- Ricerca di giacimenti minerali (ricchi in minerali di ferro);
- Individuazione di ammassi di fusti metallici sepolti;
- localizzazione di tombe, focolari e cinte murarie in ambito archeologico

4. Metodo magnetico

Effettuazione dei rilievi



✓ Generalmente il rilievo viene effettuato secondo percorsi di andata e ritorno lungo profili equidistaziati in modo da ottenere una griglia uniforme.

✓ la correzione topografica è necessaria in caso di morfologia accidentata.

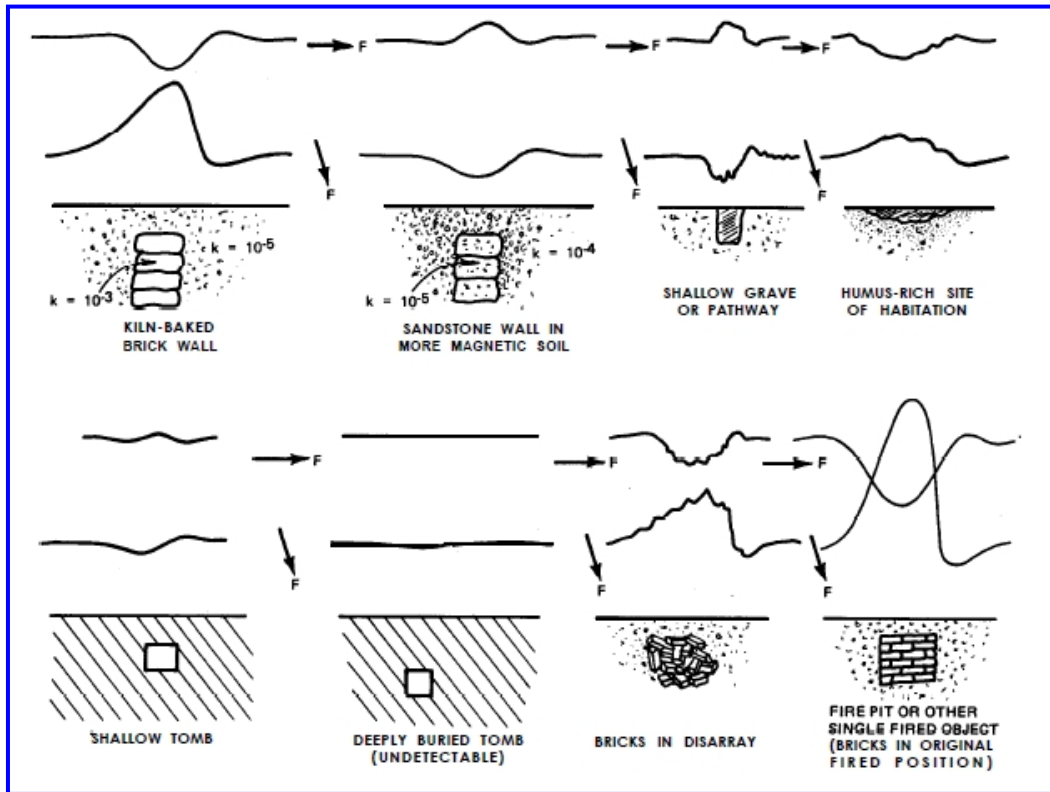
✓ Per depurare le misure dalla variazione giornaliera, si utilizzano 2 strumenti di cui è utilizzato come stazione base per la registrazione in continuo del c.m.t.

✓ Le misure magnetiche sono molto sensibili agli oggetti ferrosi, ed anche l'operatore è tenuto ad una personale "pulizia magnetica". Occorre tenersi lontano da reticolati metallici, sottoservizi metallici, linee ferroviarie.

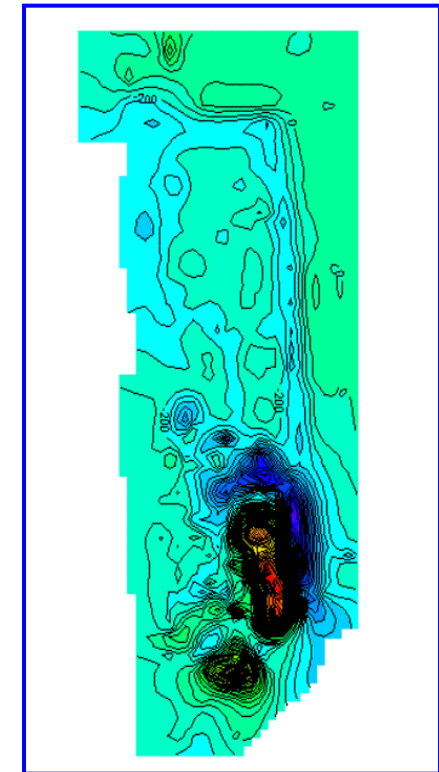
✓ Nella configurazione gradiometrica, 2 sensori sono posti a distanza ravvicinata (circa 60 cm) e non risentono di disturbi esterni, quali quelli derivanti da linee elettriche. In più con tale tecnica non è necessaria la registrazione della variazione diurna.



4. Metodo magnetico



Tipiche anomalie magnetiche di oggetti o resti archeologici sepolti



Misura dell'intensità del c.m.t per la ricerca di fusti metallici sepolti in una cava abbandonata (Maddaloni, CE)



5. Metodi sismici

- ✓ Con questi metodi si effettua l'esplorazione del sottosuolo attraverso lo studio della propagazione di onde elastiche artificiali (quelle naturali sono legate agli eventi sismici);
- ✓ Le onde elastiche vengono generate in superficie da una sorgente che può variare a seconda della profondità di indagine richiesta dallo scopo del lavoro (dalla massa battente all'esplosivo);

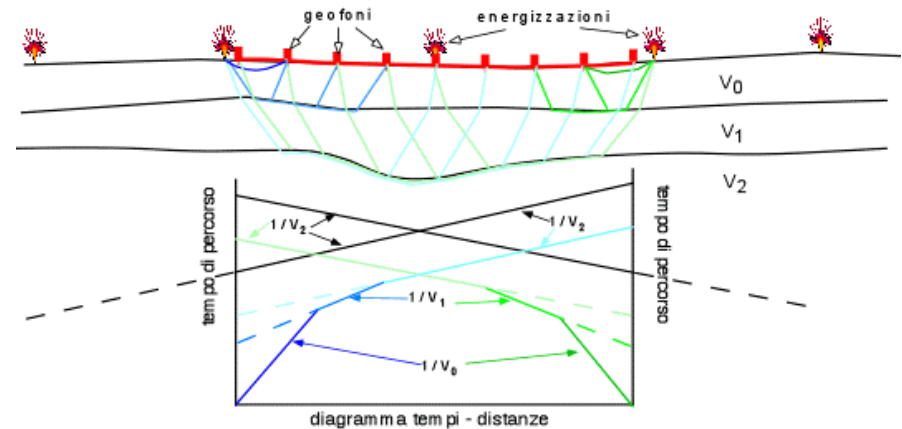


- ✓ Esse attraversano il sottosuolo e vengono riflesse (sismica a riflessione) o rifratte (sismica a rifrazione) dalle superfici di discontinuità del mezzo che corrispondono a limiti tra materiali con parametri elastici differenti (superfici di strati e contatti tra formazioni rocciose);

Sismografo a 24 canali

5. Metodi sismici

- ✓ I geofoni registrano l'arrivo in superficie delle onde dopo che queste hanno subito riflessioni e rifrazioni ad opera della struttura del sottosuolo;
- ✓ ogni geofono registra un segnale in funzione della distanza dalla sorgente, consentendo di misurare il tempo intercorso tra l'istante di scoppio e quello di arrivo delle onde;
- ✓ l'insieme delle tracce registrate ai vari geofoni costituisce il sismogramma.



Principio della sismica a rifrazione.

- ✓ Dalla misura dei tempi di percorso dalla stazione energizzante alla successione dei geofoni, è possibile dedurre la velocità e gli spessori degli orizzonti in cui si propagano le onde elastiche e quindi ottenere informazioni sulla natura e struttura del sottosuolo, per profondità che variano da pochi metri fino a decine di Km.



5. Metodi sismici

✓ Il grafico tempi di arrivo-distanze progressive tra sorgente e geofoni consente di ottenere le dromocrone, cioè dei segmenti di retta che segnalano percorsi effettuati con eguale velocità.

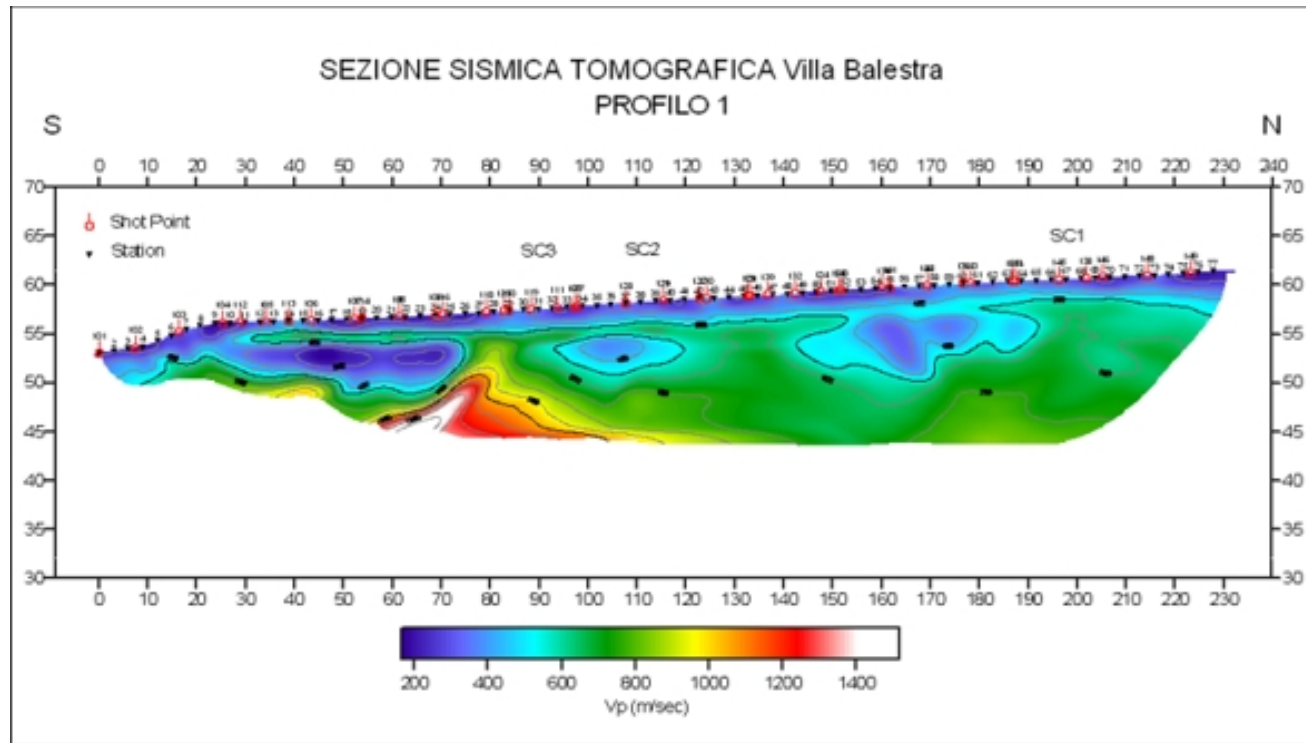
✓ La sismica a riflessione considera i tempi che intercorrono tra l'istante di generazione e l'istante di ricezione dell'impulso elastico dopo una o più riflessioni su superfici riflettenti.

✓ Rispetto al metodo a rifrazione, la sismica di riflessione consente un maggior dettaglio delle superfici di discontinuità, e quindi delle caratteristiche strutturali, ma è adatto soprattutto per indagini a grandi profondità.

Applicazioni

- ✓ Descrizione dettagliata della geologia e della idrogeologia di un sito;
- ✓ valutazione del grado di fratturazione di un ammasso roccioso;
- ✓ Ricostruzione della geometria delle prime unità sottostanti la coltre superficiale;
- ✓ Ricostruzione dell'andamento e della profondità del bedrock;
- ✓ Determinazione della profondità della falda freatica.

5. Metodi sismici

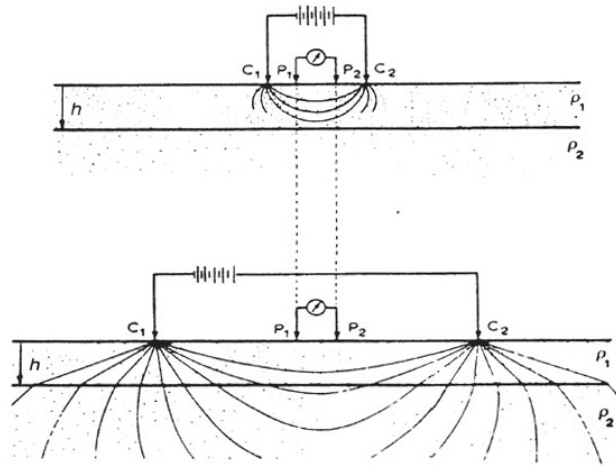


Esempio di sezione sismica a rifrazione eseguita a Villa Balestra (Roma) per caratterizzare i terreni sabbiosi della scarpata che dà verso Viale Tiziano, dove nel dicembre 2007 si era verificato un crollo. Si notano le variazioni di velocità delle onde P tra le piroclastiti sovrastanti, alterate e scarsamente consistenti, ad un livello inferiore corrispondente alle sabbie a luoghi travertinizzate e quindi più compatte.

6. Metodi elettrici

Resistività

Il principio fisico del metodo consiste nel trasmettere una corrente elettrica nel sottosuolo tramite una coppia di elettrodi (elettrodi di corrente C1 e C2) e misurare la risultante differenza di potenziale elettrico su un'altra coppia di elettrodi (elettrodi di potenziale P1 e P2) connessi ad un voltmetro.



Sotto l'ipotesi di stazionarietà della corrente elettrica, la legge di Ohm

$$\rho = \left(\frac{V}{I} \right) \cdot K$$

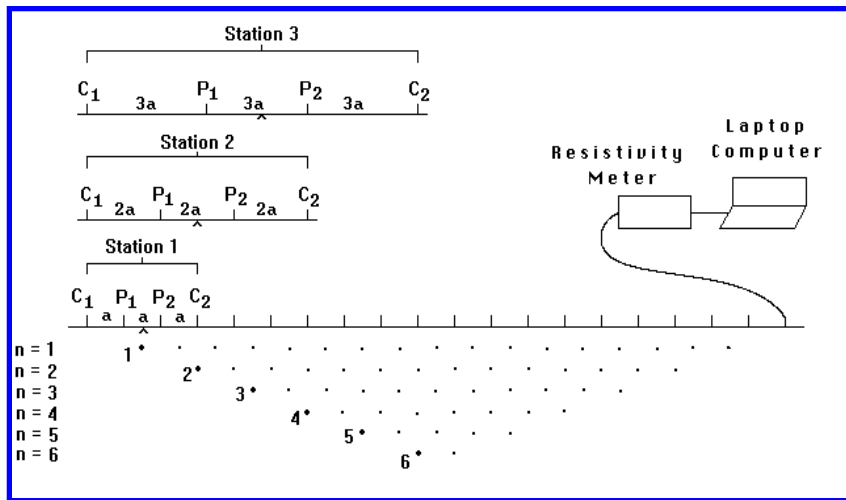
definisce il parametro **resistività elettrica** come il rapporto tra la differenza di potenziale misurata V e la corrente inviata I secondo un coefficiente geometrico K dipendente dalla disposizione degli elettrodi sul terreno.

La resistività è un parametro intrinseco dei terreni e rappresenta la resistenza che oppone a lasciarsi attraversare dalla corrente o meno.

6. Metodi elettrici

Resistività

- ✓Le misure vengono acquisite lungo allineamenti con maggiore o minore dettaglio a seconda delle finalità della ricerca.
- ✓La posizione reciproca degli elettrodi di potenziale e di corrente determina diversi tipi di acquisizione: SEV, Profilo di resistività, tomografia elettrica e differenti configurazioni elettrodiche: Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-polo e polo-dipolo.



Schema di acquisizione Wenner in una configurazione multielettroda

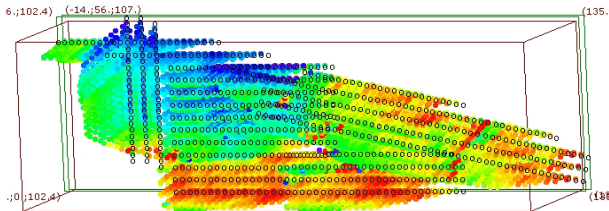
Argilla	10 ⁰ - 10 ¹
Marne	10 ¹ - 10 ²
Suolo copertura	10 ¹ - 10 ²
Suolo argilloso	10 ² - 10 ³
Suolo sabbioso	10 ² - 10 ³
Sabbie sciolte	10 ³ - 10 ⁴
Sabbie e Ghiaie	10 ² - 10 ³
Gessi	10 ¹ - 10 ²
Calcarei marnosi	10 ¹ - 10 ²
Calcarei	10 ² - 10 ³
Conglomerati	10 ³ - 10 ⁴
Arenarie	10 ² - 10 ³
Dolomie	10 ² - 10 ³
Rocce ignee	10 ² - 10 ³
Rocce cristalline	10 ³ - 10 ⁵

Valori indicativi della resistività di alcune rocce, in Ohm m

6. Metodi elettrici

Resistività

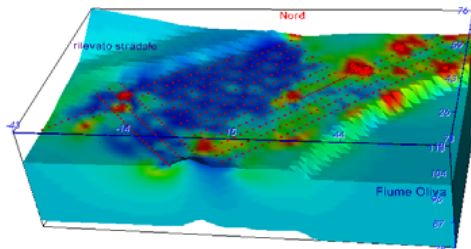
Misure



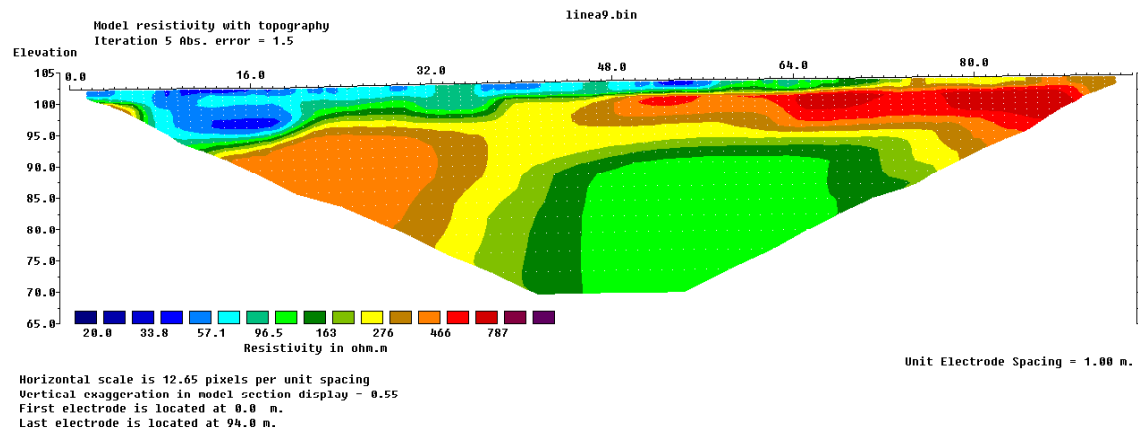
INVERSIONE DATI



Caratterizzazione geoelettrica



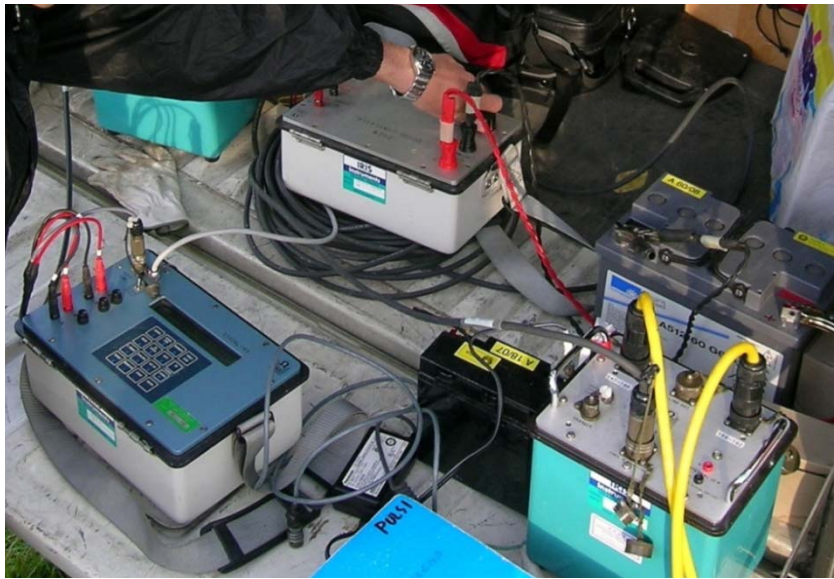
✓Dai singoli profili acquisiti, si ottiene una matrice bidimensionale o tridimensionale di punti dalla quale è possibile a seguito di elaborazioni con l'uso di appositi algoritmi matematici (processo di inversione) ottenere la distribuzione nel terreno del parametro elettrico misurato.



Tomografia elettrica su un sito contaminato

6. Metodi elettrici

Strumentazione

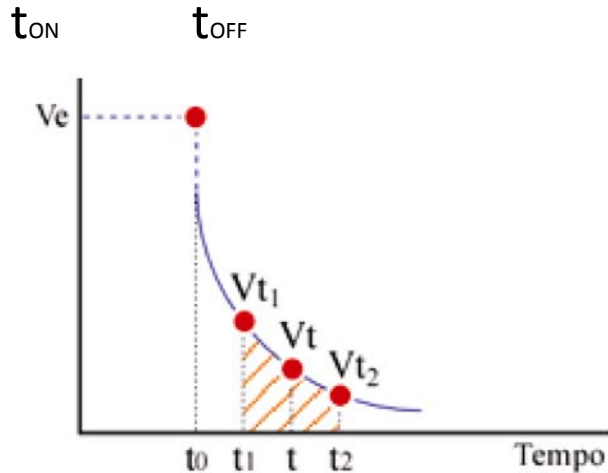


Resistivimetro SYSCAL R2 della IRIS instruments

Applicazioni

- ✓ Caratterizzazione geologica del sottosuolo
- ✓ Ricerca di falde acquifere
- ✓ Individuazione di cavità sotterranee e discontinuità litologiche
- ✓ Delimitazione corpi di frana e identificazione superficie di scivolamento
- ✓ Individuazione di strutture murarie in archeologia
- ✓ Individuazione, delimitazione e monitoraggio di corpi di discarica
- ✓ Individuazione ammassi metallici interrati o di plumes di inquinamento

6. Metodi elettrici



Polarizzazione indotta

- ✓ Si analizza l'andamento della curva di scarica del terreno, precedentemente energizzato con un classico dispositivo elettrodico.
- ✓ La caricabilità (mV/V) dipende generalmente dalla percentuale di argilla.
- ✓ Si acquisisce generalmente in combinazione con i valori di resistività

Potenziali spontanei

- ✓ Potenziali elettrici naturali che vengono originati nel terreno da processi di filtrazione di fluidi o di mineralizzazione. Le differenze di potenziale vengono misurate attraverso l'infissione di due elettrodi "impolarizzabili" collegati ad un galvanometro.
- ✓ *Potenziali di mineralizzazione o di ossido-riduzione;*
- ✓ *potenziali elettrochimici o altrimenti detti di membrana o di diffusione;*
- ✓ *potenziali di elettrofiltrazione o elettrocinetici.*

7. Metodi elettromagnetici

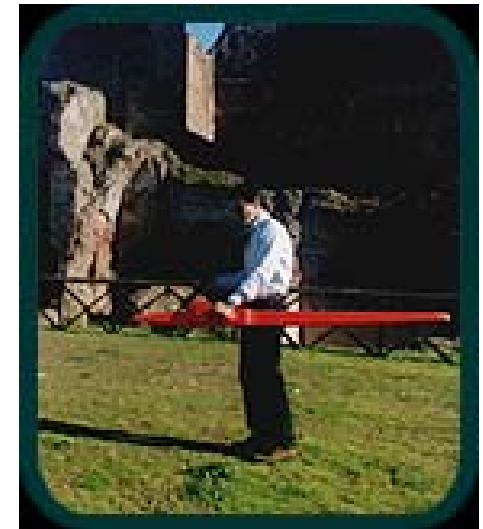
Metodo EM

✓ Due bobine, separate tra loro da una distanza costante, vengono utilizzate una come trasmettitore e l'altra come ricevente;

✓ se nella prima bobina viene fatta passare una corrente elettrica alternata, questa, per il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, produrrà un campo magnetico variabile che induce un flusso di corrente nel terreno.

✓ se è presente nel terreno un corpo conduttore, la corrente indotta creerà un campo magnetico secondario, distorto rispetto a quello primario in direzione, ampiezza e fase, che verrà registrato dalla bobina ricevente.

✓ La profondità di indagine dipende sia dalla distanza tra le bobine che dalla frequenza impiegata.





7. Metodi elettromagnetici

Georadar

- ✓ Il GPR trasmette nel terreno impulsi elettromagnetici alle radio frequenze (30 – 3000 MHz) tramite una antenna posta alla sua superficie, e registra gli echi riemessi da parte di superfici di discontinuità geologiche sub-superficiali e da parte di eventuali corpi sepolti;
- ✓ Spostando l'antenna lungo un allineamento, i segnali ricevuti vengono visualizzati sullo schermo in tempo reale, e costituiscono un'immagine in sezione verticale del sottosuolo investigato.
- ✓ Sistema monostatico: una sola antenna che alternativamente funziona da trasmittente e ricevente;
- ✓ Sistema bistatico: due antenne separate Tx e Rx la cui distanza può essere variata o meno;
- ✓ Le antenne ad alta frequenza presentano minore penetrazione ma un maggior dettaglio, le antenne a bassa frequenza hanno minore assorbimento e penetrano di più in profondità con minor dettaglio;
- ✓ Quando l'onda emessa incontra una discontinuità, parte viene riflessa in funzione del coefficiente di riflessione e delle impedenze dei mezzi attraversati.
- ✓ L'impedenza è funzione della costante dielettrica, della conducibilità e della permittività.

7. Metodi elettromagnetici

Georadar



✓ Maggiore è la conducibilità del mezzo e maggiore è l'assorbimento. Quindi un terreno con alta conducibilità (argille e limi argillosi) assorbe le onde elettromagnetiche e potrebbe non produrre alcuna riflessione.

✓ La saturazione del mezzo complica la penetrazione del segnale.

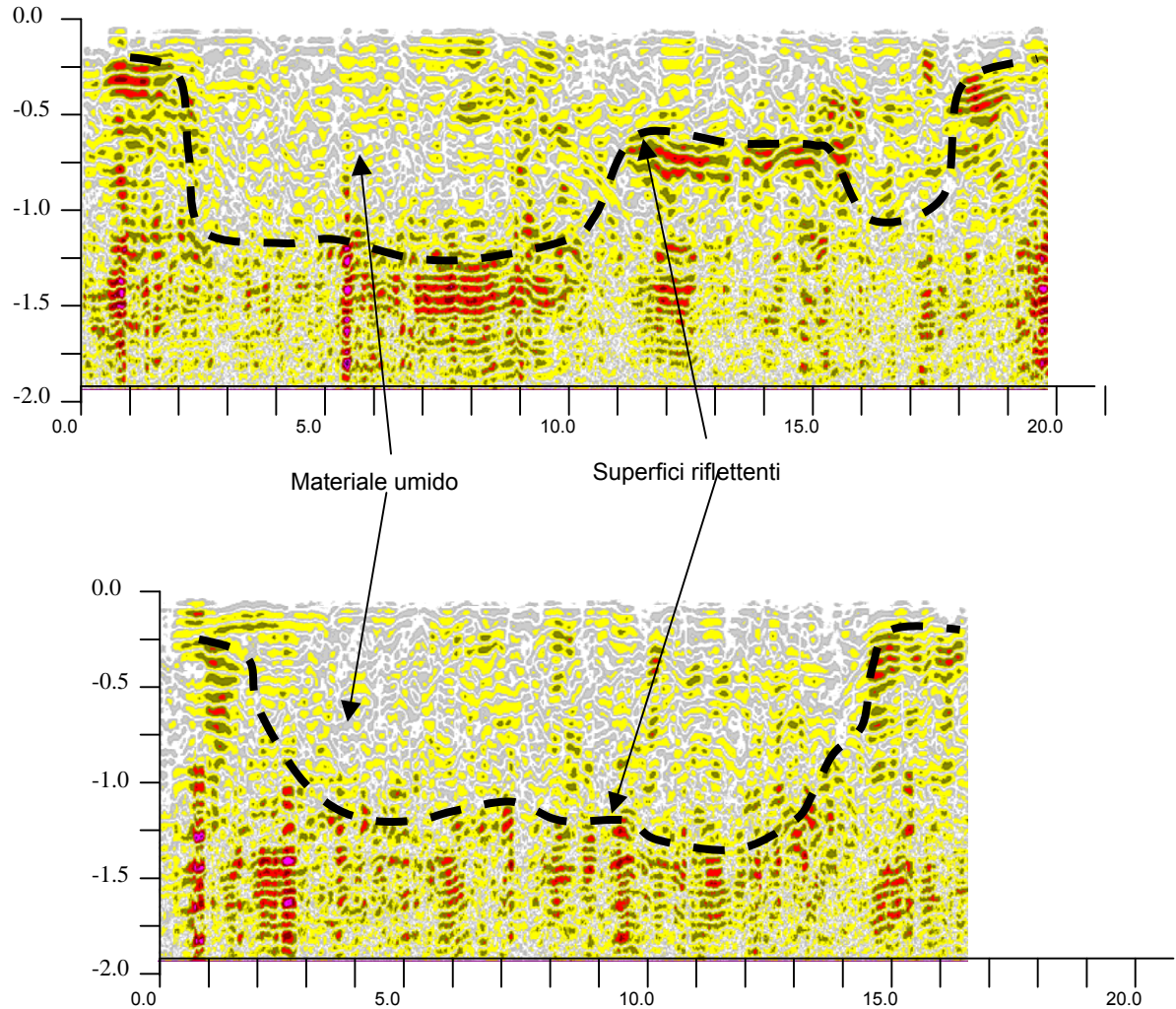
✓ Per la ricerca archeologica di solito si utilizzano frequenze comprese tra 100 e 600 MHz; per le analisi su strutture murarie e/o cemento, si privilegiano le antenne a maggiore frequenza, da 900 fino a 1500 MHz.

Applicazioni

- ✓ valutazione dell'inquinamento dei suoli legata a fuoriuscita di percolato da una discarica;
- ✓ individuazione di contenitori metallici (fusti in ferro da 55 galloni)
- ✓ Identificazione di strutture archeologiche sepolte

7. Metodi elettromagnetici

Georadar



Indagine georadar presso Villa dei Quintili -Roma (Zona "Teatro")





8. Carotaggi geofisici

- ✓ Consistono nell'esecuzione di misure geofisiche lungo le pareti di un sondaggio e forniscono informazioni dettagliate sulle proprietà fisiche degli strati attraversati. In genere sono sismici, elettrici e nucleari.
- ✓ La sismica in foro utilizza lo stesso principio della prospezione sismica con la sorgente energizzante in superficie ed i geofoni disposti in verticale lungo l'asse del pozzo.
- ✓ Il cross-hole prevede l'esecuzione di scoppi in un foro e le registrazioni in un altro adiacente, caratterizzando il terreno compreso tra i due pozzi.
- ✓ I carotaggi sismici con tecnica Down Hole (DH), misurano lungo l'asse del foro profili delle onde di compressione P e delle onde di taglio S con la profondità, avendo posto la sorgente energizzante in superficie. Dalla misura di velocità delle onde S nei primi 30 metri si determina la categoria di suolo di fondazione mentre dai rapporti reciproci tra velocità compressionali e trasversali si determinano le costanti elastiche dei terreni in condizioni dinamiche.



9. Conclusioni

- ✓ Le indagini geofisiche si sviluppano sempre in quattro fasi principali: la progettazione, il rilievo di campagna, l'elaborazione dei dati e l'interpretazione con software specialistici.
- ✓ Le indagini geofisiche non vanno mai considerate separatamente dal contesto geologico.
- ✓ La scelta della/e metodologia/e più appropriata/e va operata sulla base del target e dei contrasti attesi, anche con la predisposizione di modelli fisici del sottosuolo.
- ✓ Spesso l'approccio migliore é l'integrazione di diverse metodologie al fine di minimizzare gli errori interpretativi correlati ai limiti delle singole tecniche.
- ✓ Per la loro intrinseca ambiguità, i risultati vanno verificati ed integrati con altre informazioni provenienti da altri ambiti disciplinari (sondaggi meccanici etc.)