



# **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:

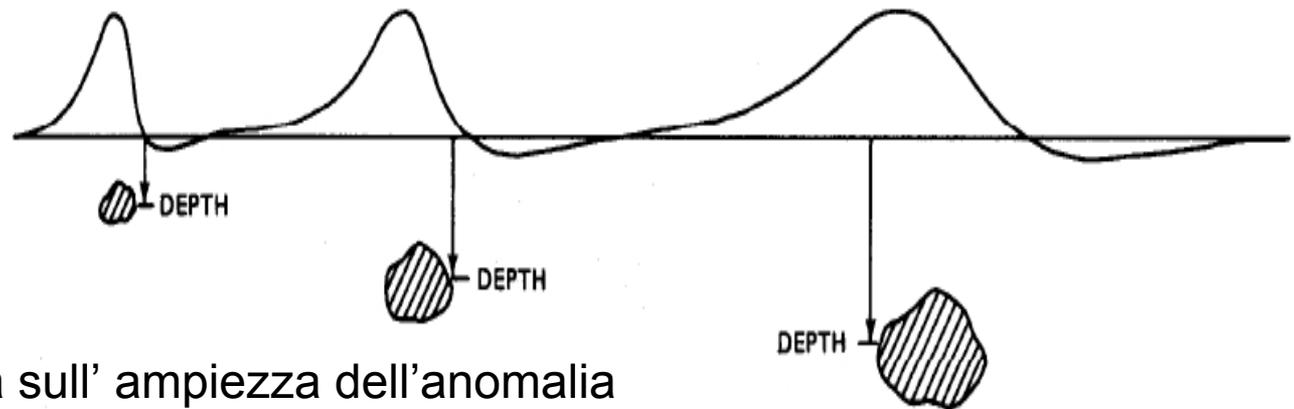
i metodi passivi rilevano le variazioni dei campi naturali associati alla Terra;

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

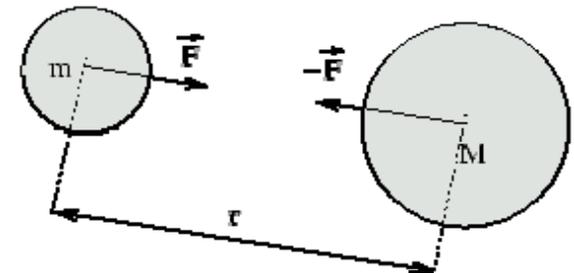
### 3. Metodo gravimetrico

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 minerali 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.



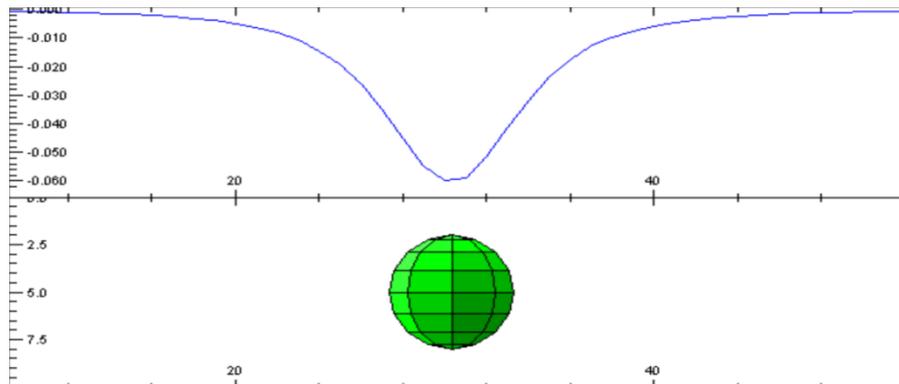
### 3. Metodo gravimetrico

#### **Esecuzione, elaborazione ed interpretazione dei dati gravimetrici**

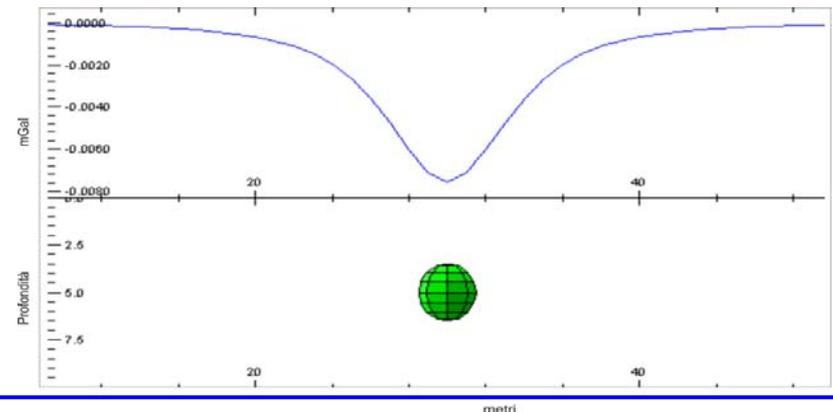
- ✓ Una prospezione gravimetrica rileva le variazioni di gravità tra le stazioni di misura, che corrispondono a variazioni di densità nel sottosuolo.
- ✓ Le misure devono essere corrette: per gli effetti della deriva strumentale, per l'attrazione delle masse della luna e del sole.
- ✓ Ulteriori correzioni: 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  $1 \mu\text{Gal}$ .
- ✓ 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.



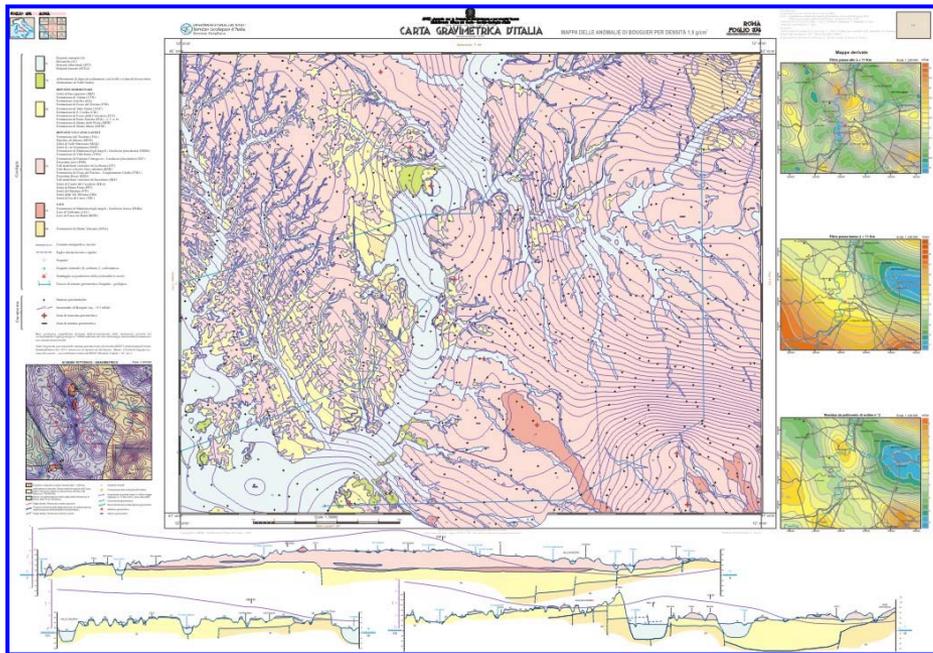
Calcolo dell'effetto di una cavità sferica con densità  $=0 \text{ g/cm}^3$ , raggio 3 m, profondità centro 5 metri, contrasto di densità  $= -2.0 \text{ g/cm}^3$ . Max effetto:  $-59 \mu\text{Gal}$



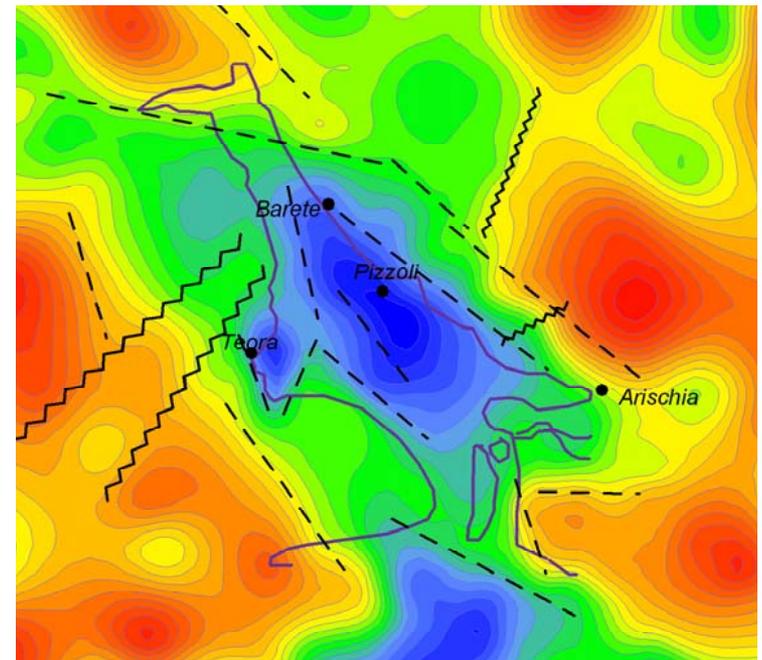
Calcolo dell'effetto di una cavità sferica con densità  $=0 \text{ g/cm}^3$ , raggio 1.5 m, prof. centro 5 metri, contrasto di densità  $= -2.0 \text{ g/cm}^3$  Max effetto:  $-7 \mu\text{Gal}$

## 3. Metodo gravimetrico

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



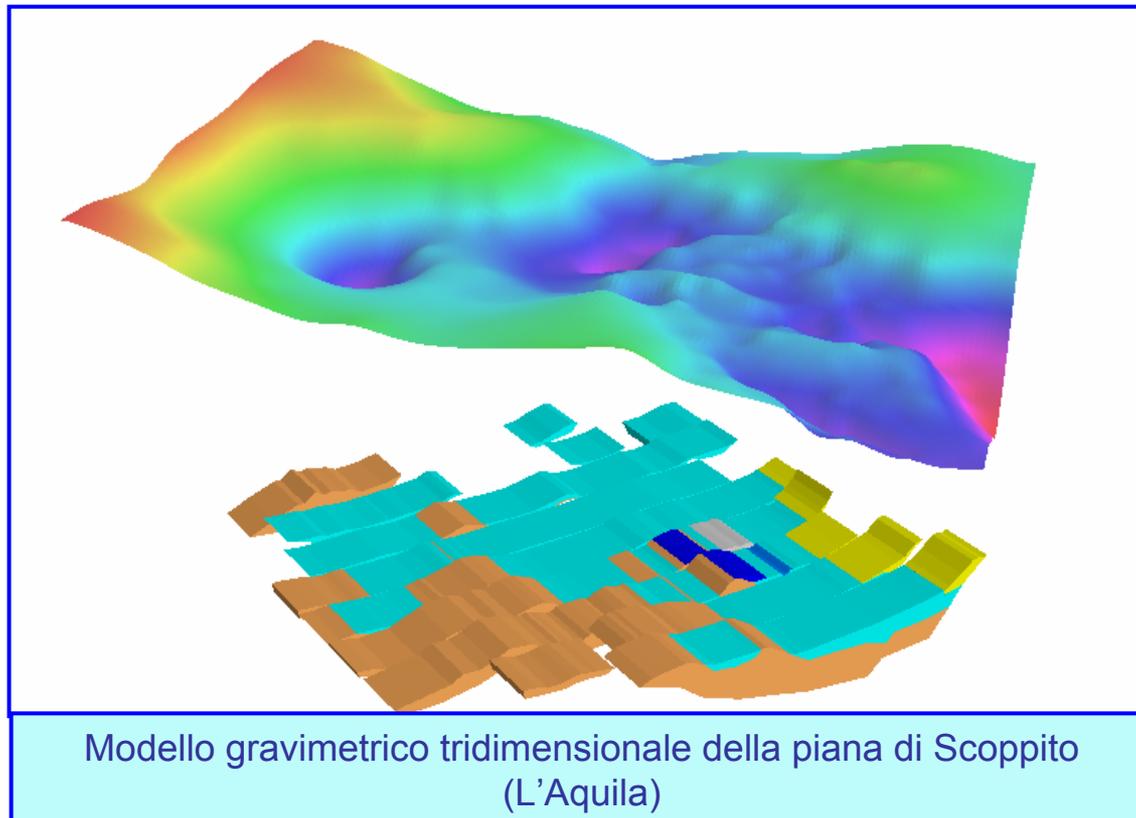
Carta gravimetrica del Foglio 374 a scala 1:50000 - Roma



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

### 3. Metodo gravimetrico

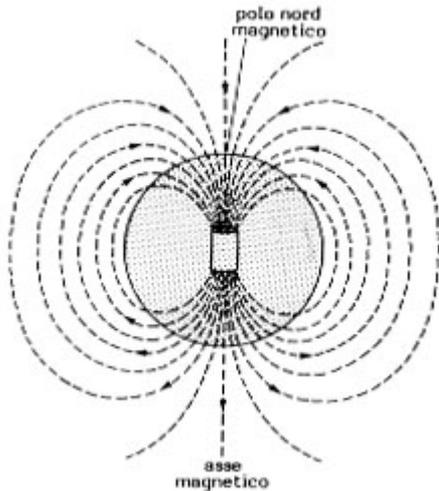
Risultati dell'indagine gravimetrica: i modelli 2D o 3D del sottosuolo



## 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.

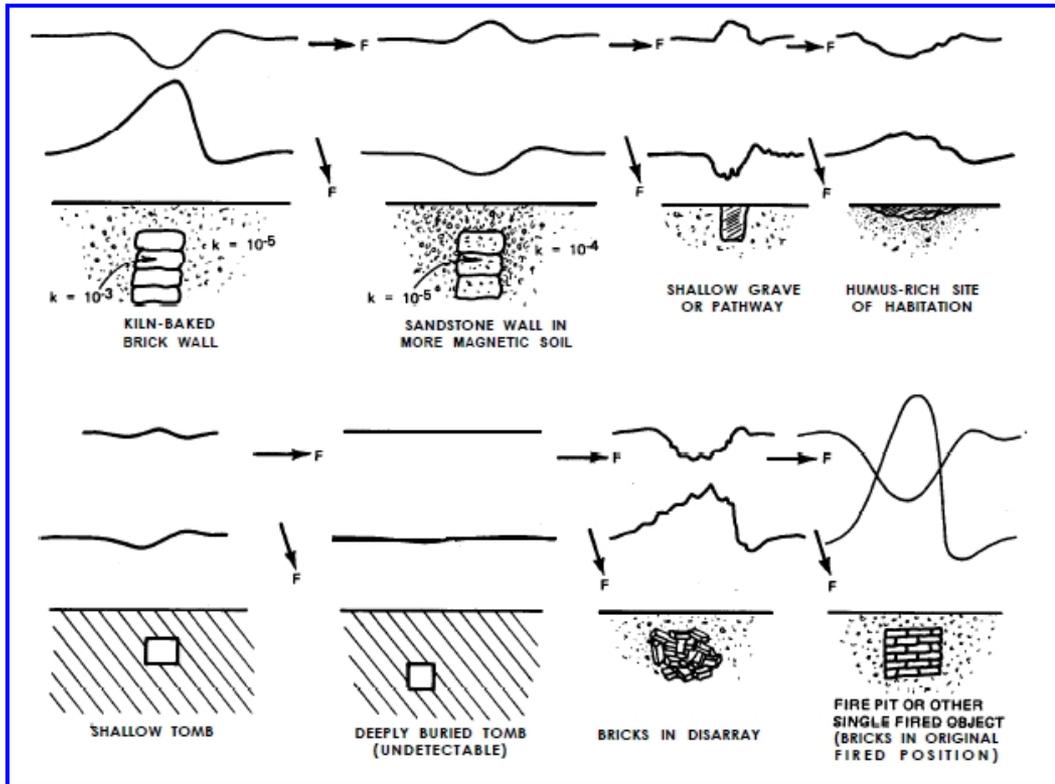
✓ Per depurare le misure dalla variazione giornaliera, si utilizzano 2 strumenti di cui è utilizzato come stazione base per la registrazione in continuo del c.m.t.

✓ 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.

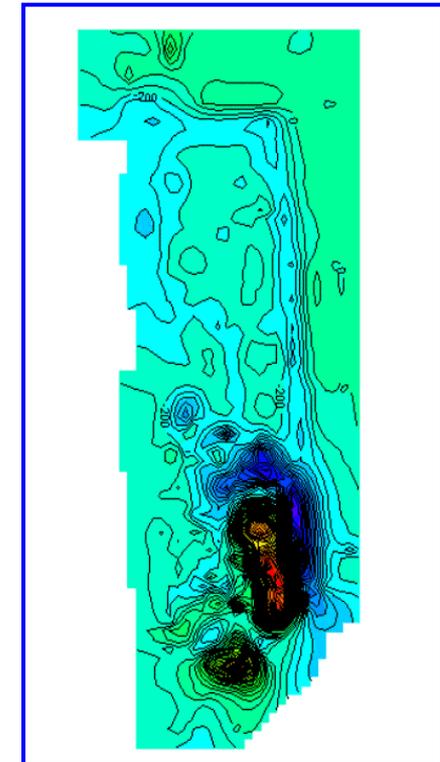
✓ Nella configurazione gradiometrica, 2 sensori sono posti a distanza ravvicinata (circa 60 cm) e non risentono di disturbi esterni, quali quelli derivanti da linee elettriche. In più con tale tecnica non è necessaria la registrazione della variazione diurna.



### 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);

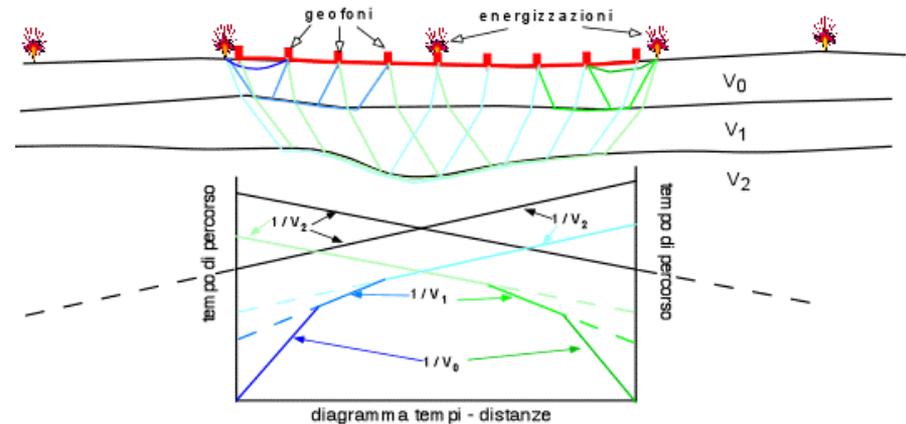


Sismografo a 24 canali

- ✓ 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);

## 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.

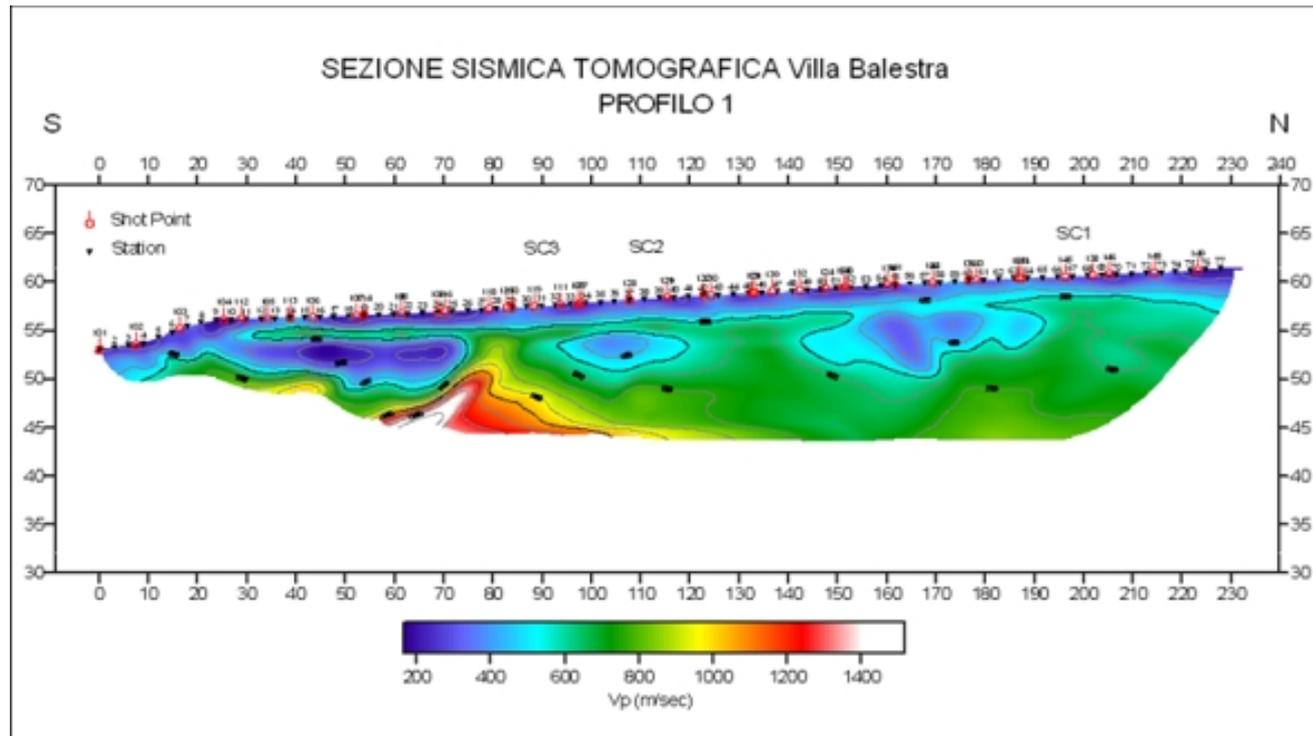
✓ La sismica a riflessione considera i tempi che intercorrono tra l'istante di generazione e l'istante di ricezione dell'impulso elastico dopo una o più riflessioni su superfici riflettenti.

✓ 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

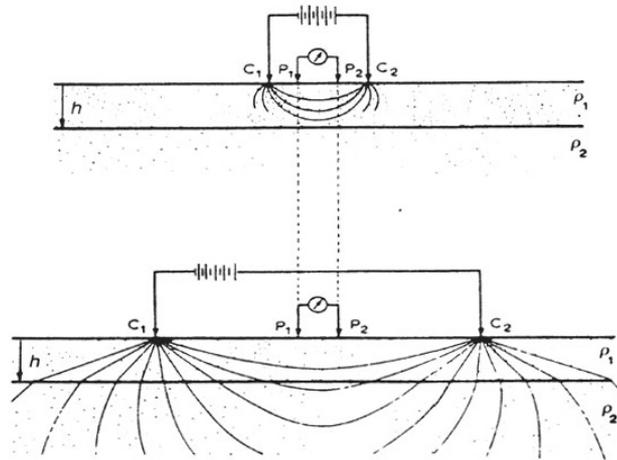


Esempio di sezione sismica a rifrazione eseguita a Villa Balestra (Roma) per caratterizzare i terreni sabbiosi della scarpata che dà verso Viale Tiziano, dove nel dicembre 2007 si era verificato un crollo. Si notano le variazioni di velocità delle onde P tra le piroclastiti sovrastanti, alterate e scarsamente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

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

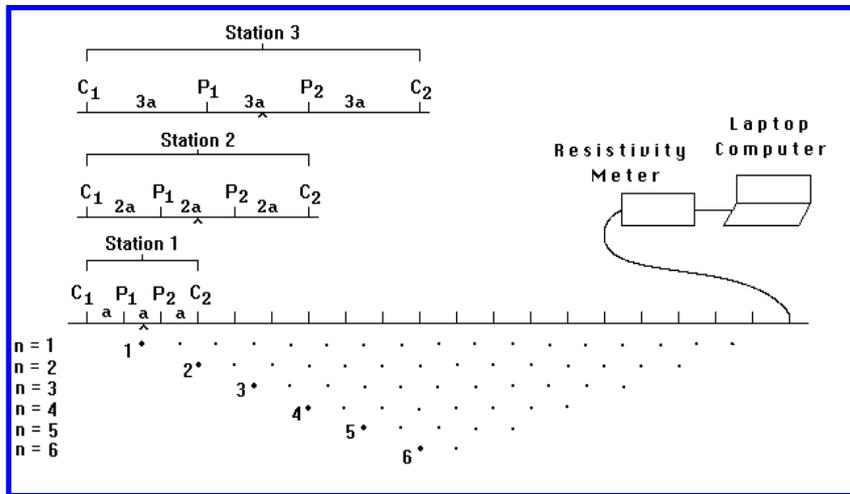
definisce il parametro **resistività elettrica** come il rapporto tra la differenza di potenziale misurata  $V$  e la corrente inviata  $I$  secondo un coefficiente geometrico  $K$  dipendente dalla disposizione degli elettrodi sul terreno.

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

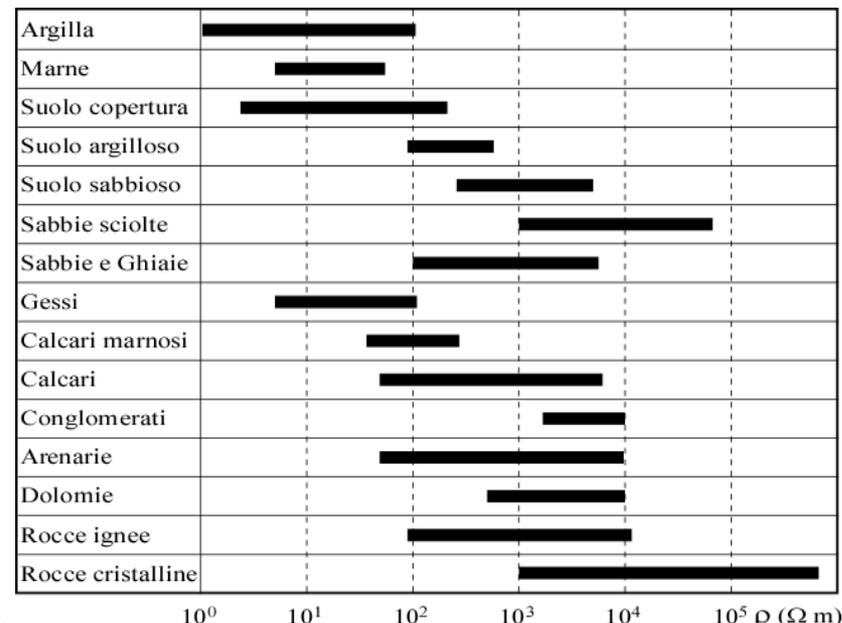
### 6. Metodi elettrici

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



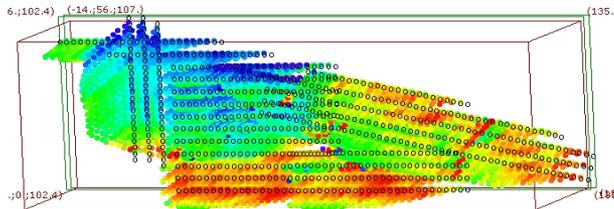
Valori indicativi della resistività di alcune rocce, in Ohm m



### 6. Metodi elettrici

### Resistività

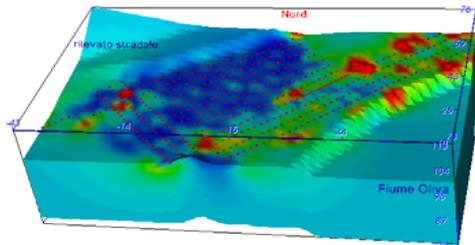
Misure



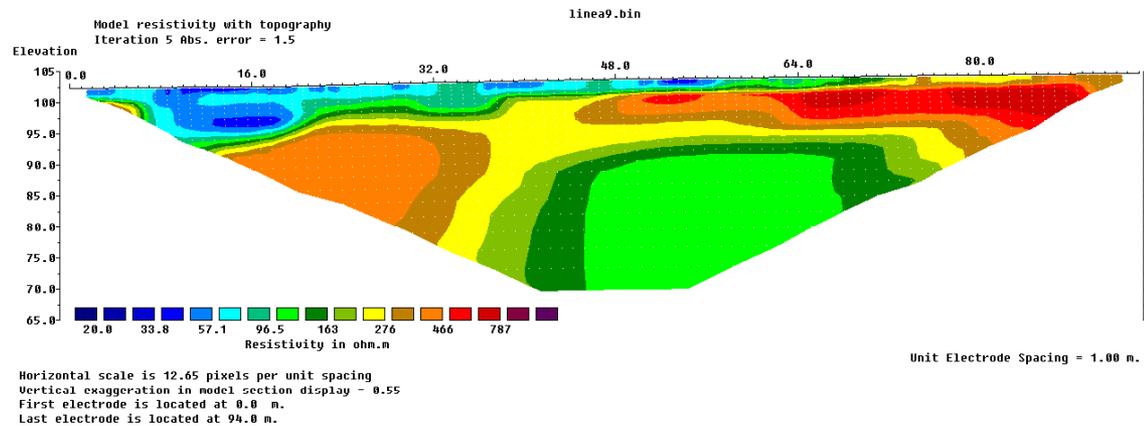
INVERSIONE DATI



Caratterizzazione geoelettrica



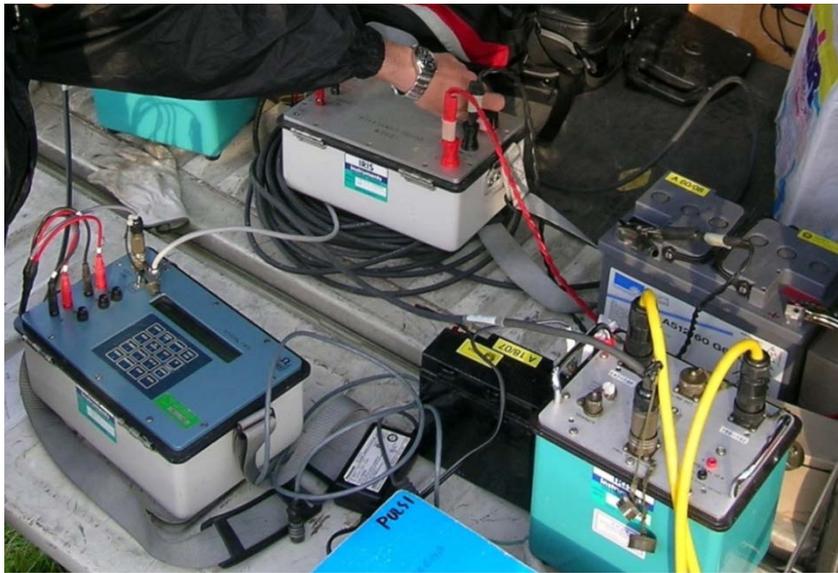
✓Dai singoli profili acquisiti, si ottiene una matrice bidimensionale o tridimensionale di punti dalla quale è possibile a seguito di elaborazioni con l'uso di appositi algoritmi matematici (processo di inversione) ottenere la distribuzione nel terreno del parametro elettrico misurato.



Tomografia elettrica su un sito contaminato

## 6. Metodi elettrici

### Strumentazione

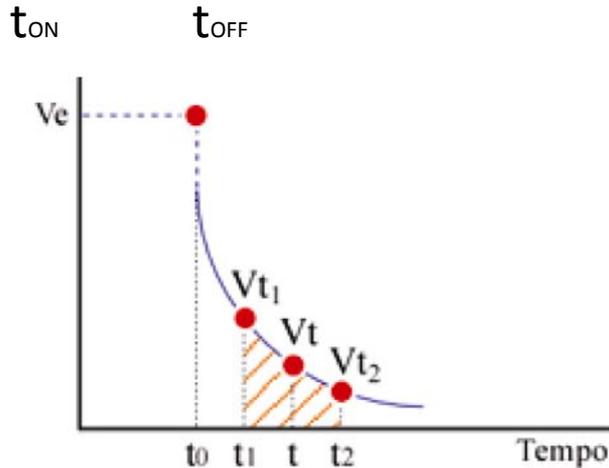


Resistivimetro SYSCAL R2 della IRIS instruments

### 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

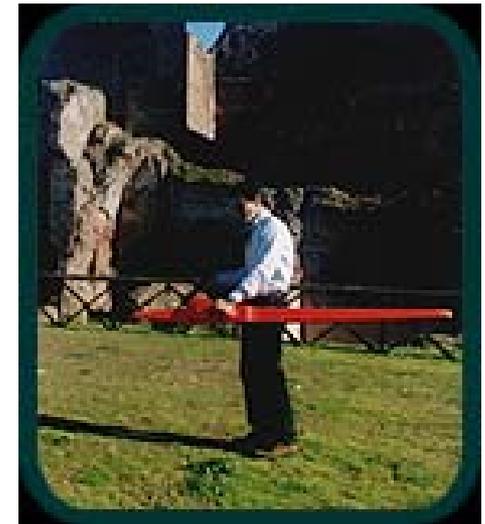
### Potenziali spontanei

- ✓ 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



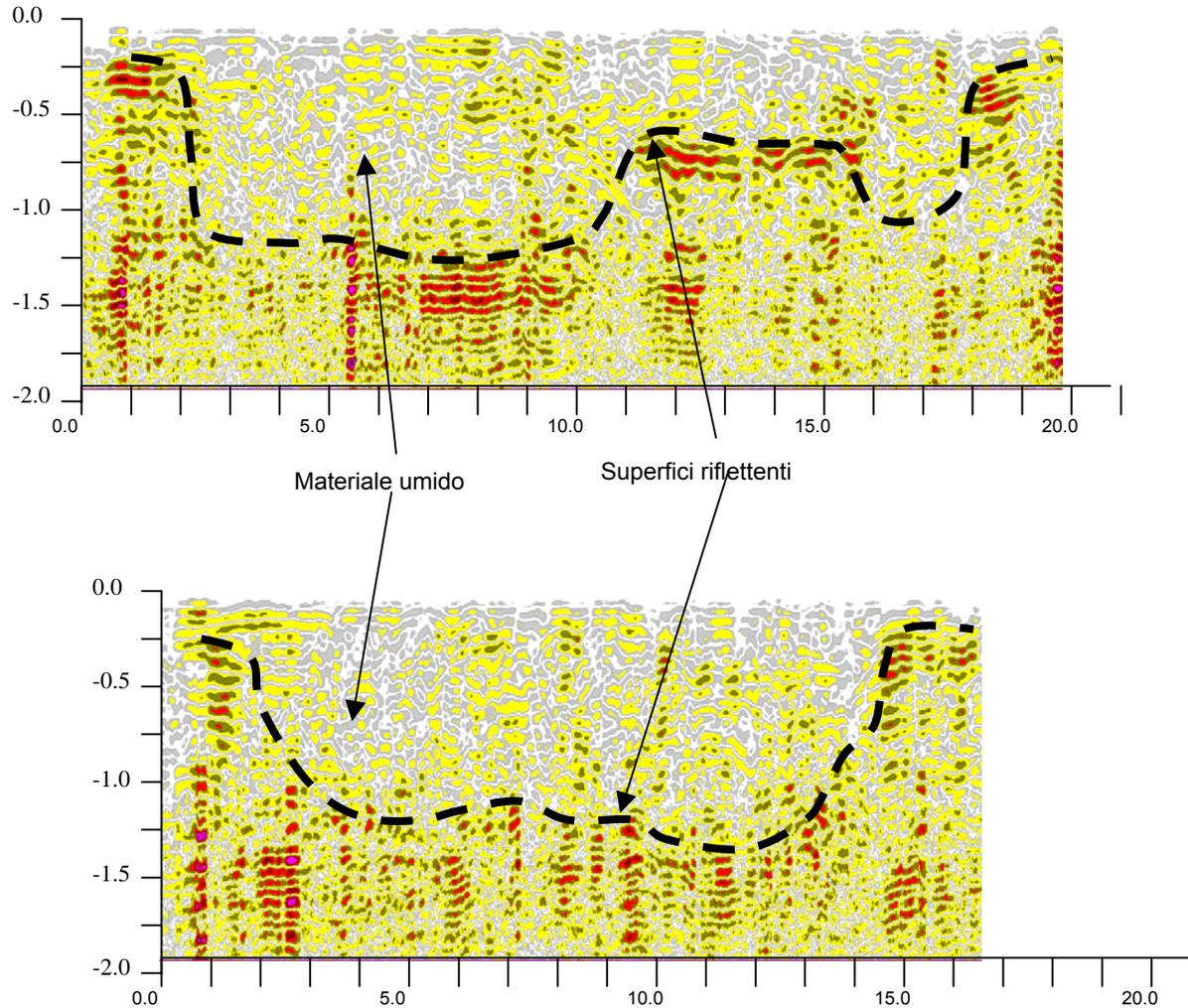
- ✓ Maggiore è la conducibilità del mezzo e maggiore è l'assorbimento. Quindi un terreno con alta conducibilità (argille e limi argillosi) assorbe le onde elettromagnetiche e potrebbe non produrre alcuna riflessione.
- ✓ La saturazione del mezzo complica la penetrazione del segnale.
- ✓ Per la ricerca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