



Università degli Studi di Ferrara
Dipartimento di Studi Umanistici

LA GEOFISICA E FOTOGRAMMETRIA APPLICATE ALL'ARCHEOLOGIA

Dott.ssa Marija Obradovic

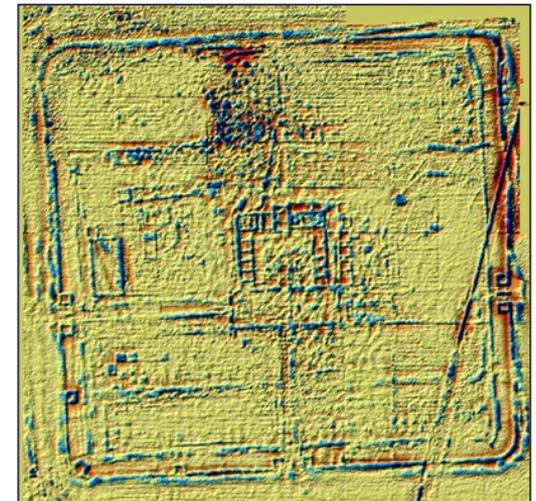
Le geofisica applicata all'archeologia

La geofisica applicata è la scienza che studia la parte più superficiale della Terra dal punto di vista di sue proprietà fisiche, principalmente rivolta alla ricerca nel campo di ingegneria civile, ingegneria idraulica, ingegneria mineraria, geologia ed per l'individuazione di fonti di energia geotermica.

La geofisica applicata all'archeologia rappresenta un insieme di metodi e tecniche volte a rilevare la struttura del sottosuolo o dei corpi sepolti mediante opportune misure alla superficie degli essi con minima o nulla invasività.

Le principale caratteristiche o proprietà fisiche che vengono prese in considerazione sono:

- La suscettività magnetica
- La resistività elettrica
- La permittività o costante dielettrica
- La velocità delle onde magnetiche



Metodi attivi e passivi

- Nel ambito delle metodologie d'indagine si distinguono i metodi attivi (quando si invia un segnale nel sottosuolo e si misura la risposta) e passivi (quando si solo misurano i segnali già presenti nel sottosuolo).

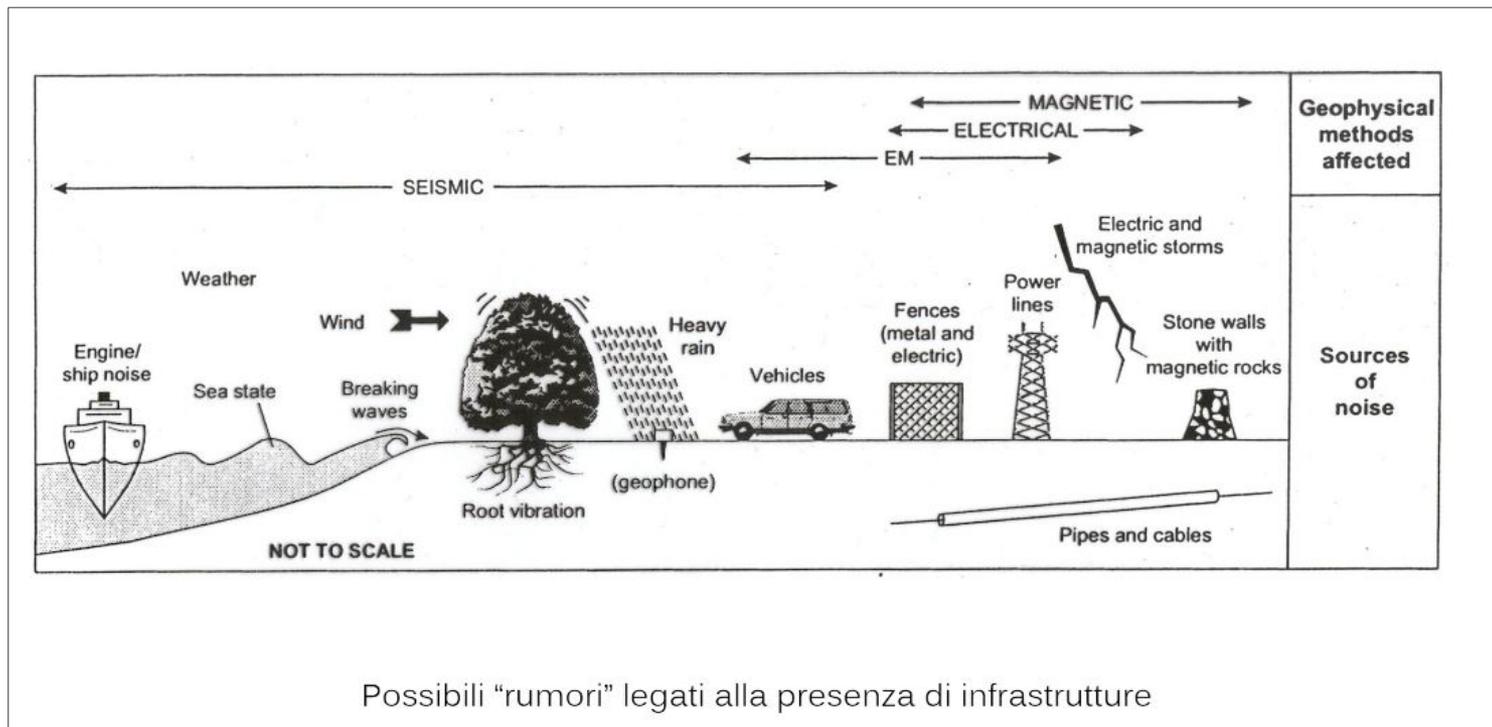
ATTIVI

Georadar
Goelettrica
Elettromagnetico
Polarizzazione indotta
Sismica attiva

PASSIVI

Magnetometria
Sismica passiva
Termografico
Gravimetrico

- Non esiste un specifico metodo d'indagine geofisica per la ricerca archeologica, ma il metodo ricerca più adatto ad un determinato contesto. La scelta del tipo di metodogia dipende da:
 - la costituzione geolitologica del terreno
 - la morfologia ed uso del suolo
 - le condizioni logistiche dell'area oggetto degli indagini
 - gli eventuali disturbi causati dalle infrastrutture dei centri abitati ed industriali.



Quindi quali sono i vantaggi di geofisica applicata in archeologia?. Per i Beni Culturali visualizzare all'interni dei corpi significa:

- Individuare e definire la geometria di strutture archeologiche sepolte vicino la superficie.
- Individuare i paleosuoli (le superficie antropizzate)
- Definire la struttura interna dei manufatti, come elementi architettonici o le statue.

Vantaggi:

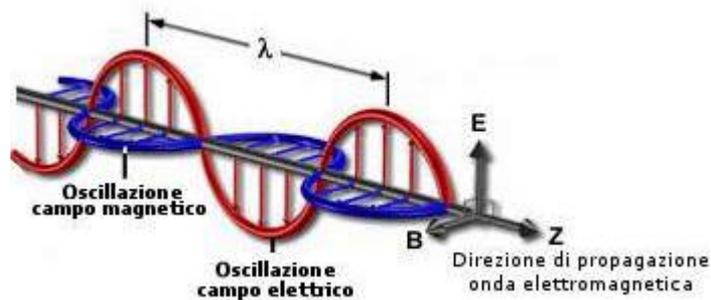
- Metodi di indagine non invasivi
- La velocità
- Individuare le strutture ancora sconosciute o presunte
- Comprendere meglio un sito già noto
- Pianificazione del lavoro
- Modellazioni dei profili 2D e 3D del sottosuolo
- Durante gli scavi d'emergenza

L'indagine geofisica procede per passi successivi:

- progettazione della campagna di misure
- esecuzione di misure sul campo
- elaborazione dei dati raccolti sia per presentazione dei dati stessi che soprattutto della ricostruzione della geometria dell'interno dei corpi investigati.

Le onde elettromagnetiche

- Un fenomeno ondulatorio (dovuto alla sovrapposizione di due o più onde), simile nelle modalità di propagazione alle onde elastiche, nel quale però non ci sono le particelle materiali vibranti ma un campo elettrico e un campo magnetico associati tra loro a formare un campo elettromagnetico.



- Le onde sono caratterizzate da tre parametri: **la velocità (v)**, **la frequenza (f)** e **la lunghezza d'onda (λ)**. Mentre la frequenza è la caratteristica del sorgente, la velocità è la caratteristica del mezzo e può variare.

f - Hz (1Hz = 1 ciclo/s); v - m/s; T - s

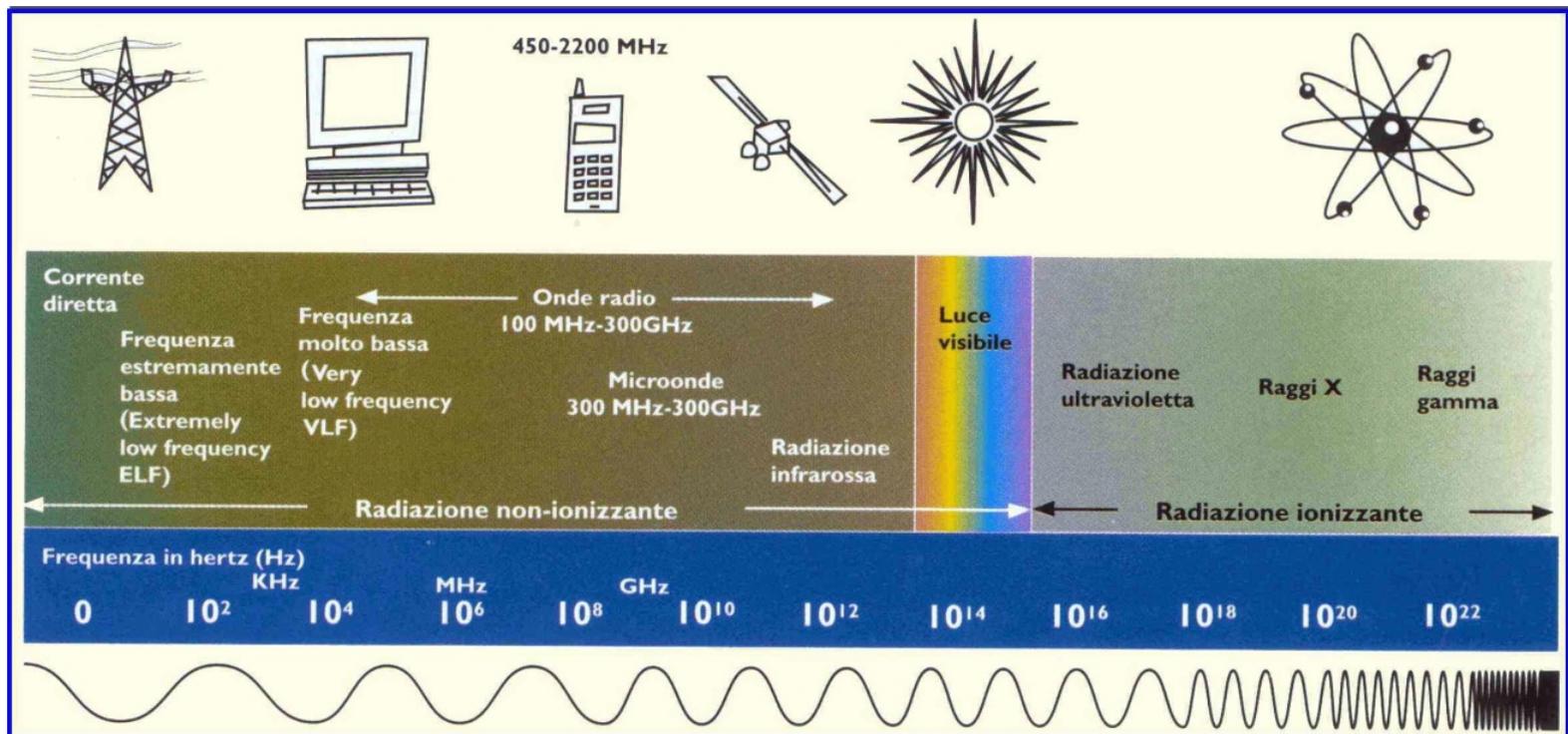
- La propagazione delle onde elettromagnetiche dentro un corpo dipende da due fattori: **permeabilità magnetica (μ_0) e costante dielettrica (ϵ_0) del mezzo**. Per calcolare la velocità di propagazione dentro un mezzo (con una buona approssimazione) occorre usare seguente formula:

$$v \approx c / \sqrt{\epsilon_r}$$

- Più è alta la resistività, minore è il limite di frequenza oltre il quale le onde si propagano con tale velocità. Per i mezzi comuni tale limite di velocità è 10MHz.

<i>Material</i>	ϵ_r	<i>v(m/hs)</i>
Air	1	0,3
Dry sand	3-5	0,15
Ice	3-4	0,16
Limestone	4-8	0,12
Granite	4-6	0,13
Clay	5-40	0,06-0,17
Concrete	6	0,09
Saturated sand	20-30	0,15
Fresh water	80	0,033
Salty (sea) water	81-88	0,01
Soils:		
Sandy, dry	2.6	0,3
Sandy, wet	25	0,06
Clayey, dry	2.5	0,19
Clayey, wet	19	0,07
Frozen	6	0,12
Cultural layer	70	0,04

- Le onde elettromagnetiche si differiscono tra loro SOLO per la frequenza, da quale anche dipende la nostra esperienza dalle stesse. Le più basse sono quella delle onde radio, mentre più alte quelle dei raggi X. La energia trasportata dalle onde è in grado a dare luogo alle correnti elettriche nei mezzi attraversati, e questo è in modo principale in quale vengono assorbite. Un mezzo in quale non si riescono formare le correnti elettriche è un mezzo isolante (per esempio il vetro, aria).



Georadar



Il georadar è un strumento che trasmette e riceve impulsi di onde elettromagnetiche a frequenza che varia tra 50 e 1500MHz. L'impulso viene inviato ad un'antenna e immesso nel corpo da investigare. Le riflessioni vengono ricevute da una seconda antenna che le manda al sistema di registrazione.

La grandezza fisica misurata è la permittività dielettrica, ossia la capacità di un materiale di immagazzinare la e poi restituire la energia elettromagnetica quando ad esso è applicato una campo elettromagnetico.

Uso:

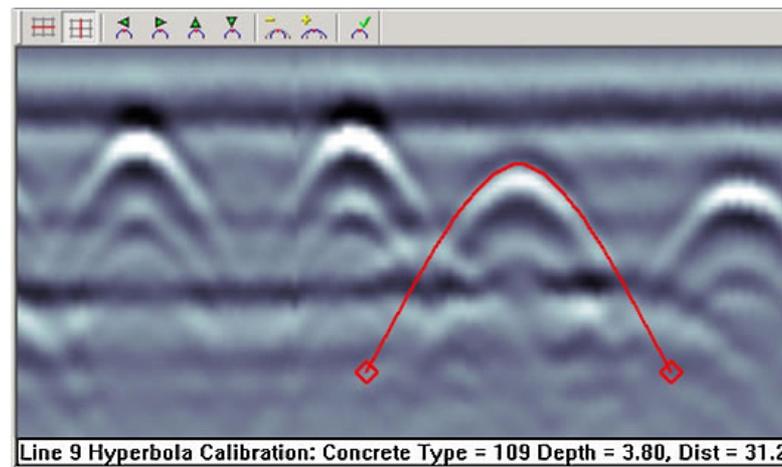
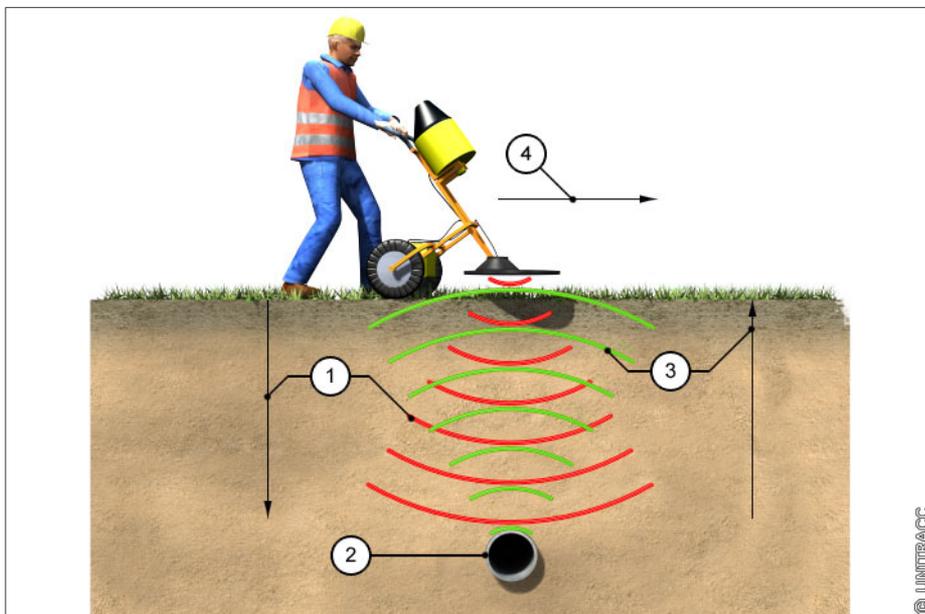
- Individuare i paleosuoli o superfici antropizzate nelle epoche passate.
- Gli analisi delle morfologie litologiche.
- Per determinare la profondità dei contatti e delle strutture geologiche.
- Per determinare la distribuzione spaziale di riempimento sedimentario.
- L'individuazione di canali e vuoti oscurati da depositi superficiali consolidati.

È possibile ottenere le sezioni verticali e planimetrie.

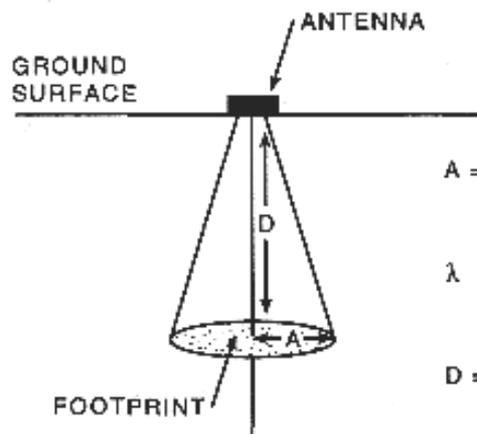


L'impulso trasmesso subisce una prima riflessione alla superficie del mezzo, poi si propaga al velocità specifica del mezzo stesso fino alla prima superficie di discontinuità della costante dielettrica diversa. La parte dell'onda si riflette e viene registrata dall'antenna ricevente, mentre altra parte continua a trasmettersi fino alla successiva discontinuità. Le onde possono propagarsi fino all'infinito se non incontrano nessuna **anomalia**, ovvero la variazione della grandezza fisica. Il tempo tra prima riflessione e ricevimento delle onde riflesse si chiama **two-way travel time**.

La durata d'impulso è circa pari al periodo di oscillazione e viene espressa in ns (10^{-9} or $1/1,000,000,000$ s). La durata di registrazione d'impulso dipende dall'assorbimento dell'energia da parte del mezzo sotto forma di corrente. Minore è resistività del mezzo minore sarà la profondità d'indagine.



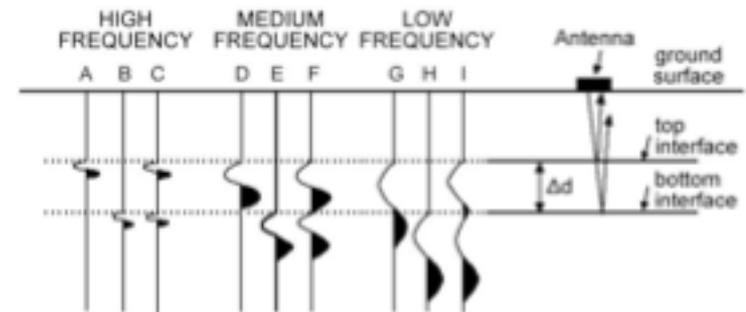
- La profondità d'indagine però non dipende solo dalla resistività ma anche dalla frequenza. Più è alta la frequenza, diminuisce la profondità d'indagine con una migliore risoluzione e vice versa. Questo è conosciuto anche come il «potere risolutivo» o capacità a vedere distinti due oggetti.



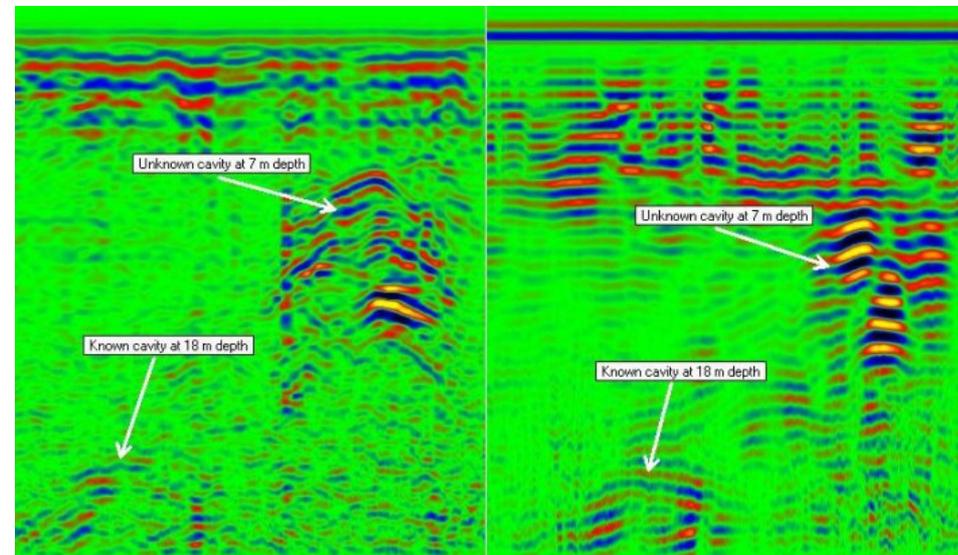
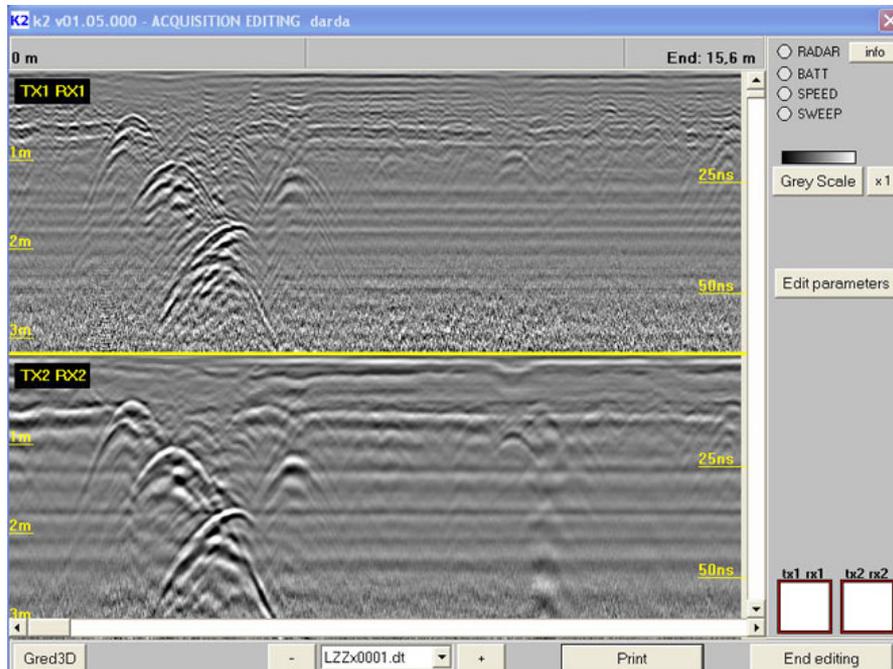
EQUATION 3.

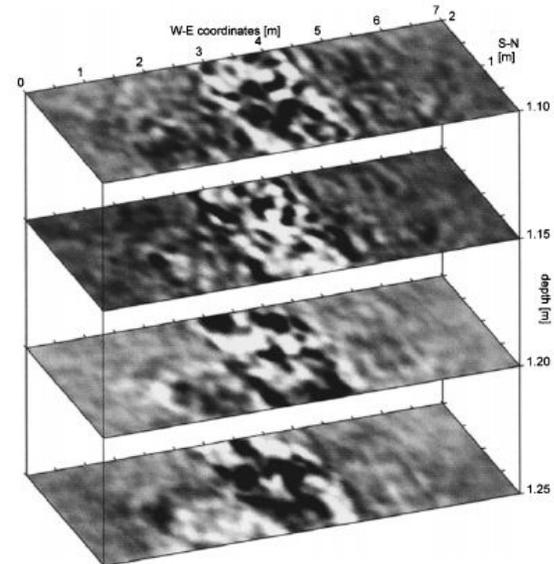
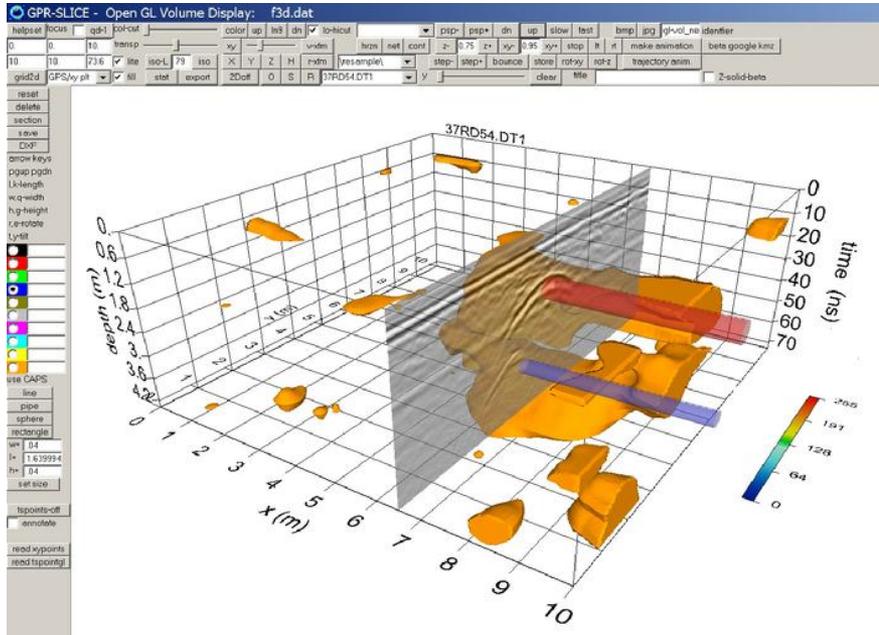
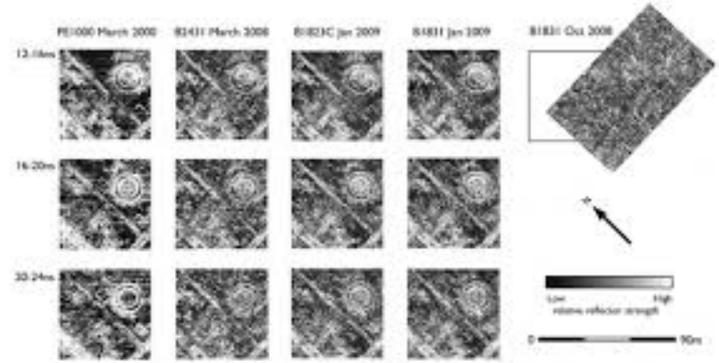
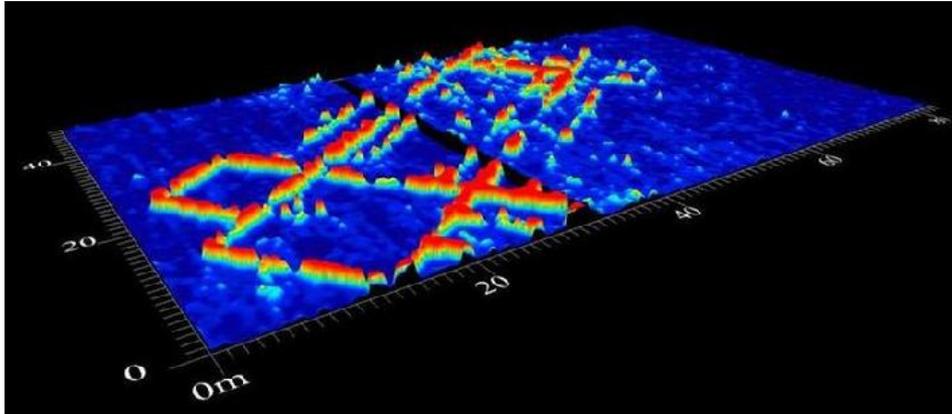
$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{K+1}}$$

- A = approximate long dimension radius of footprint
- λ = center frequency wavelength of radar energy
- D = depth from ground surface to reflection surface
- K = average relative dielectric permittivity (RDP) of material from ground surface to depth (D)



- I risultati sono presentati tramite un diagramma dove l'asse dei tempi è orientato positivamente verso il basso e che si chiama **radargramma** e dove ogni riflessione rappresenta una superficie della discontinuità. Il radargramma viene costruito affiancando tante tracce e camminando o trascinando l'antenna si può ottenere un radargramma continuo. La caratteristica forma di strisce viene ottenuta annerendo le semionde positive e negative sopra una certa soglia cancellando la stessa traccia quando piatta.

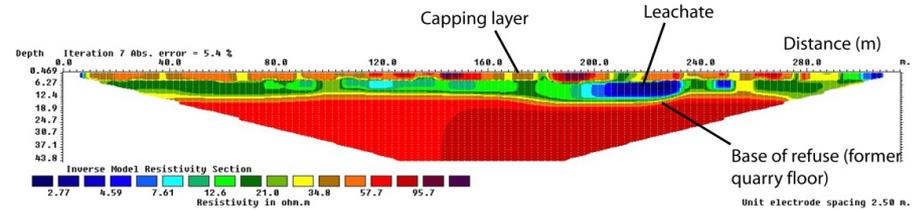




Geoelettrica

- Il metodo si basa sulla misura della resistività elettrica, ovvero di resistenza che oggi corpo oppone al passaggio di corrente elettrica. Lo strumento misura le variazioni del campo elettrico indotto tramite elettrodi posizionati alla certa distanza. Nello specifico si analizzano le variazioni al passaggio di corrente elettrica prodotte da corpi presenti caratterizzati da una diversa resistività elettrica.
- Il passaggio della corrente elettrica in un corpo è possibile solo se esistono delle particelle cariche in grado a muoversi quando viene applicata un campo elettrico (differenza di potenziale). Le uniche particelle cariche disponibili sono gli elettroni e gli ioni, cioè druppi di atomi con la carica positiva o negativa.
- La corrente circola tra l'anodo e il catodo solo se c'è continuità nella distribuzione d'acqua. I fattori da quali dipende principalmente la resistività dei materiali sono:

- Composizione mineralogica
- Stato di alternazione o di degrado
- Porosità
- Grado di saturazione dei pori
- Salinità dell'acqua contenuta dei pori



L'uso in archeologia:

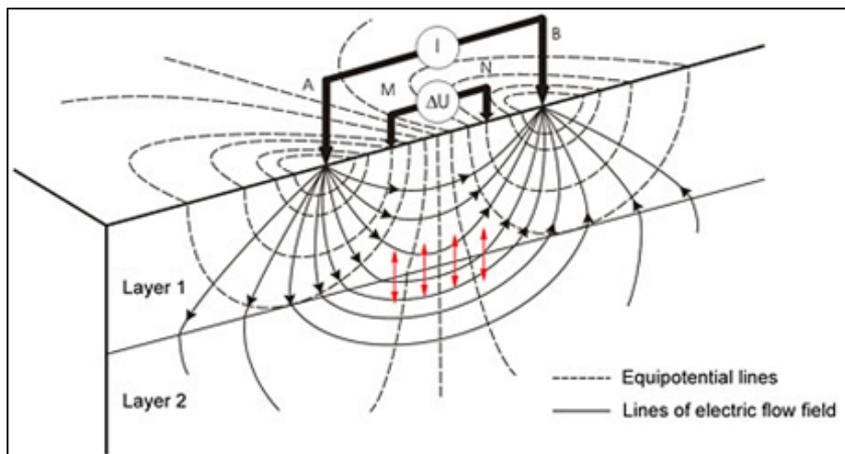
- Elevata possibilità di incontrare i materiali diversi nello stesso luogo e con le stesse caratteristiche chimico-fisiche in una maniera non invasiva.
- Potere diagnostico sullo stato di degrado e alterazione (soprattutto generato dalla presenza dei sali disciolti potenzialmente dannosi)
- La relativa facilità di misure e semplicità contettuale del metodo e della strumentalizzazione.

rosita.

litotipo	Resistività (Ωm)	Porosità (%)
Acqua	10-100	-
Acqua di mare	0.2-0.3	-
Sabbie sciolte secche	1000	30-50
Sabbie sciolte sature in acqua dolce	80-150	30-50
Limi saturi in acqua dolce	15-50	10-30
Arenarie		10-25
Argille in acqua dolce	5-20	-
Argille in acqua salata	1-2	-
Ghiaie asciutte	>1000	10-40
Ghiaie sature in acqua dolce	150-300	10-40
Calcari	500-2000	2-25
Dolomie	1000-5000	2-20
Marne	10-100	10-60
Graniti	10000-50000	<1
Basalti	20-2000	<1
Mattoni asciutti	3000-10000	3-10
Mattoni saturi	10-1000	3-10
Malte	100-1000	?
Calcestruzzo	100-300	?

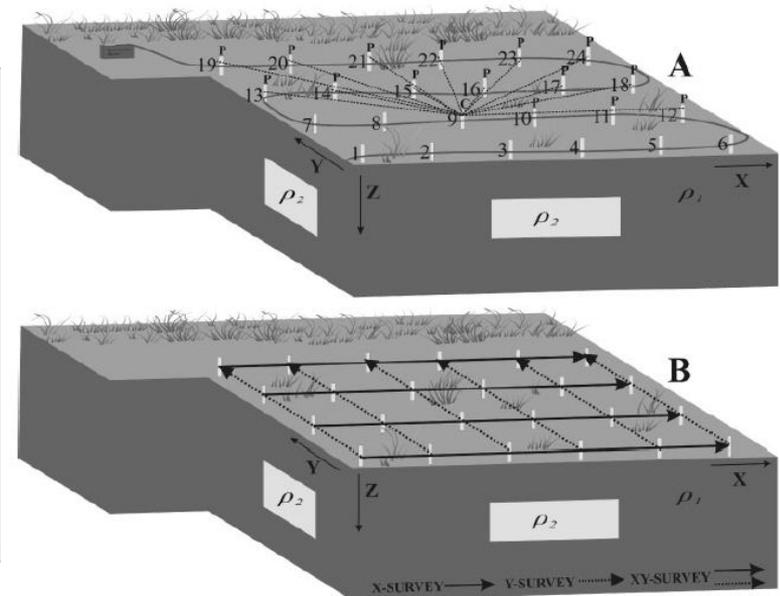
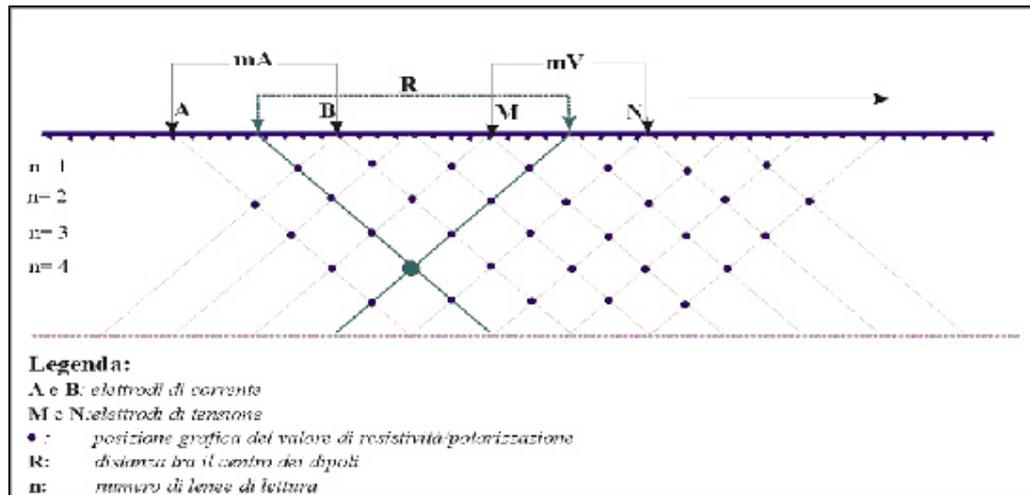
High resistance anomalies	Low resistance anomalies
Walls	Ditches/pits
Rubble	Slots and gullies
Made-up surface	Drains
Roads	Graves
Stone coffins/cists	Metal pipes

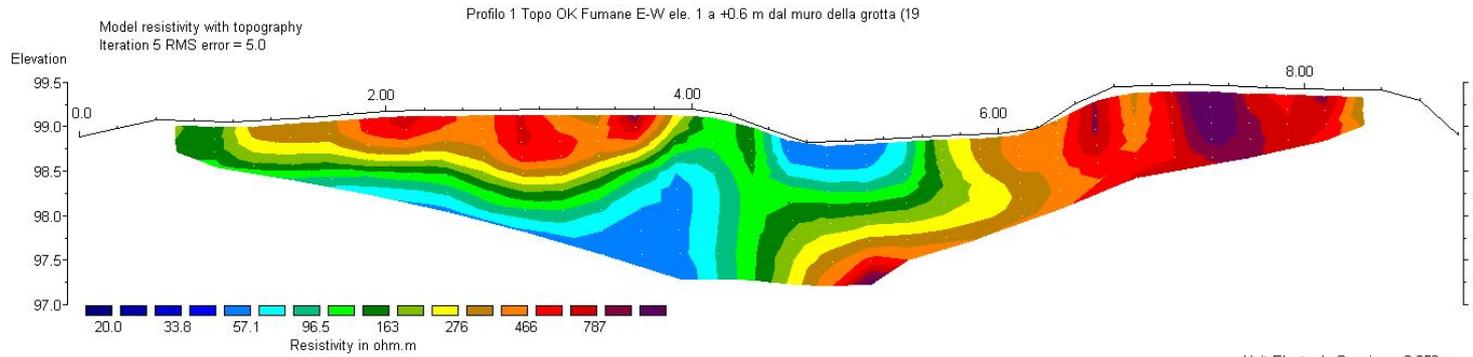
- Il metodo di misura più semplice e più usato è il cosiddetto il metodo geoelettrico che utilizza la misura delle distribuzione del potenziale elettrico dovuto alla circolazione di una corrente elettrica continua. Il campo elettrico causato dalla passaggio della corrente elettrica, è in tutto simile al campo magnetico con la sola differenza che le sorgenti sono le cariche elettriche e non magnetiche.
- Le misure vengono eseguite utilizzando un sistema di 4 elettrodi, due che iniettano la corrente e due che misurano la differenza di potenziale. La profondità d'indagine è una frazione purtroppo molto piccola del quadripolo di misura e varia tra 1/3 a 1/10 nei casi più favorevoli e dipende dalla distanza tra gli stessi.



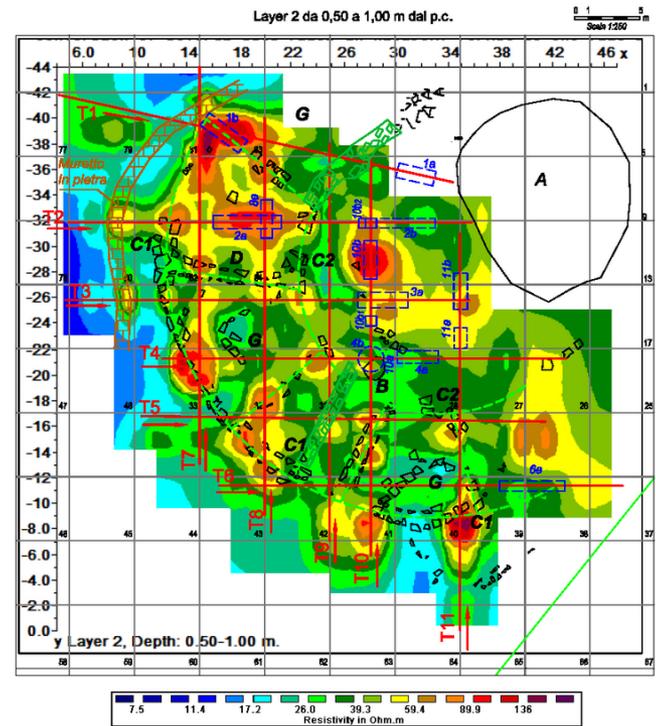
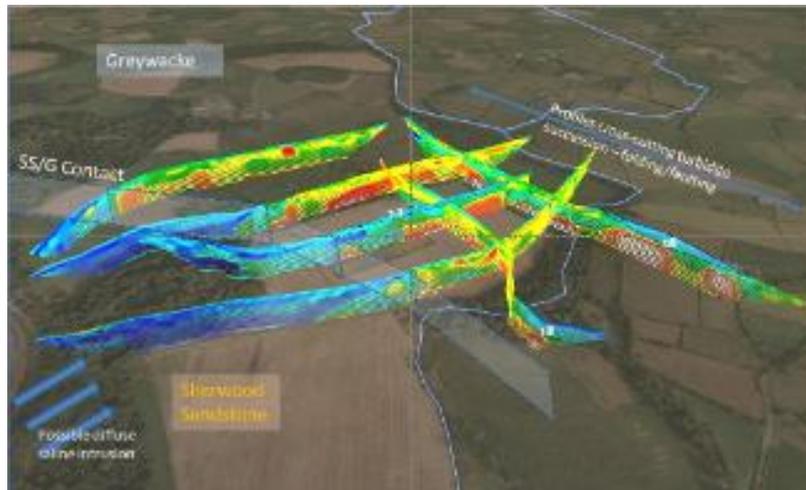
<p style="text-align: center;">Wenner</p> <p style="text-align: center;"> C1 P1 P2 C2 $\bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet$ $k = 2 \pi a$ </p>	<p style="text-align: center;">Wenner Beta</p> <p style="text-align: center;"> C2 C1 P1 P2 $\bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet$ $k = 6 \pi a$ </p>
<p style="text-align: center;">Wenner Gamma</p> <p style="text-align: center;"> C1 P1 C2 P2 $\bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet$ $k = 1.5 \pi a$ </p>	<p style="text-align: center;">Pole - Pole</p> <p style="text-align: center;"> C1 P1 $\bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet$ $k = 2 \pi a$ </p>
<p style="text-align: center;">Dipole - Dipole</p> <p style="text-align: center;"> C2 C1 P1 P2 $\bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \leftarrow na \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet$ $k = \pi n(n+1)(n+2) a$ </p>	<p style="text-align: center;">Pole - Dipole</p> <p style="text-align: center;"> C1 P1 P2 $\bullet \leftarrow na \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet$ $k = 2 \pi n(n+1) a$ </p>
<p style="text-align: center;">Schlumberger</p> <p style="text-align: center;"> C1 P1 P2 C2 $\bullet \leftarrow na \rightarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \leftarrow na \rightarrow \bullet$ $k = \pi n(n+1) a$ </p>	<p style="text-align: center;">Equatorial Dipole - Dipole</p> <p style="text-align: center;"> C2 P2 $\uparrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \downarrow$ C1 P1 $\downarrow \bullet \leftarrow a \rightarrow \bullet \uparrow$ $k = 2 \pi a s / (s - a)$ $s = (a * a + b * b)^{0.5}$ </p>
<p>NOTES: k = geometric factor C = current source electrodes P = potential (measuring) electrode a = electrode separation; n = an integer</p>	

- Il procedimento d'indagini che si è affermato negli ultimi anni è la cosiddetta tomografia della resistività elettrica. Le misure vengono. Sul campo si realizza disponendo un certo numero di elettrodi collegati tramite cavi al strumento di misura dell'intensità di corrente, l'ampermetro, il voltmetro per la misura della differenza di potenziale tra li elettrodi M e N e un generatore di corrente elettrica.
- In questo modo si ottengono in tempi brevi centinaia valori di resistività apparente che vengono rappresentati di solito profilo per profilo sotto forma di pseudosezione.



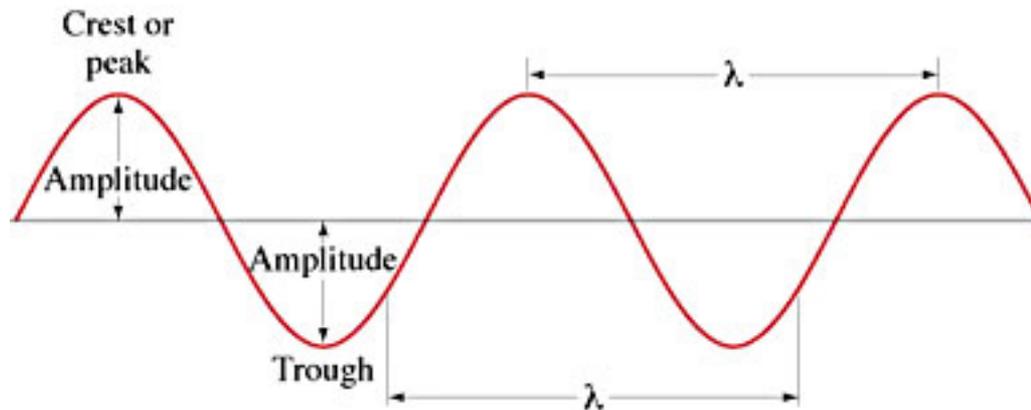


Horizontal scale is 35.39 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.59
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 9.0 m.



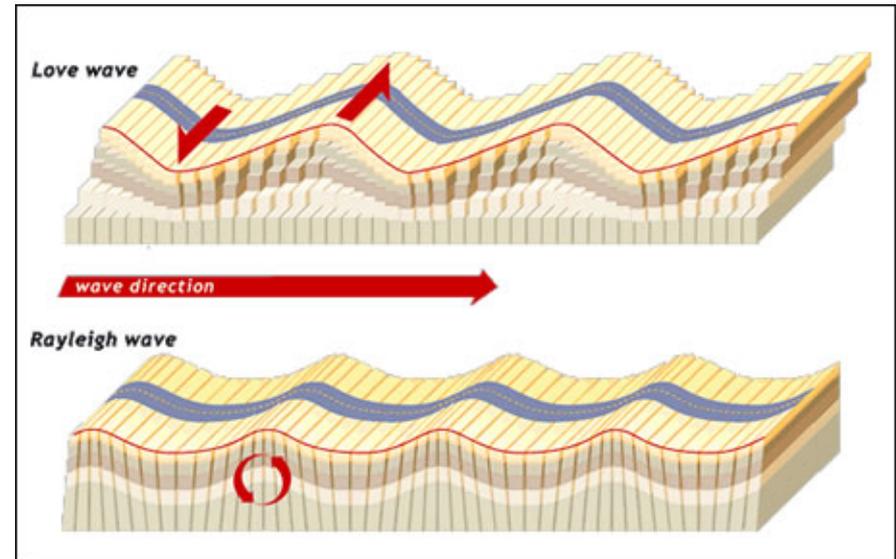
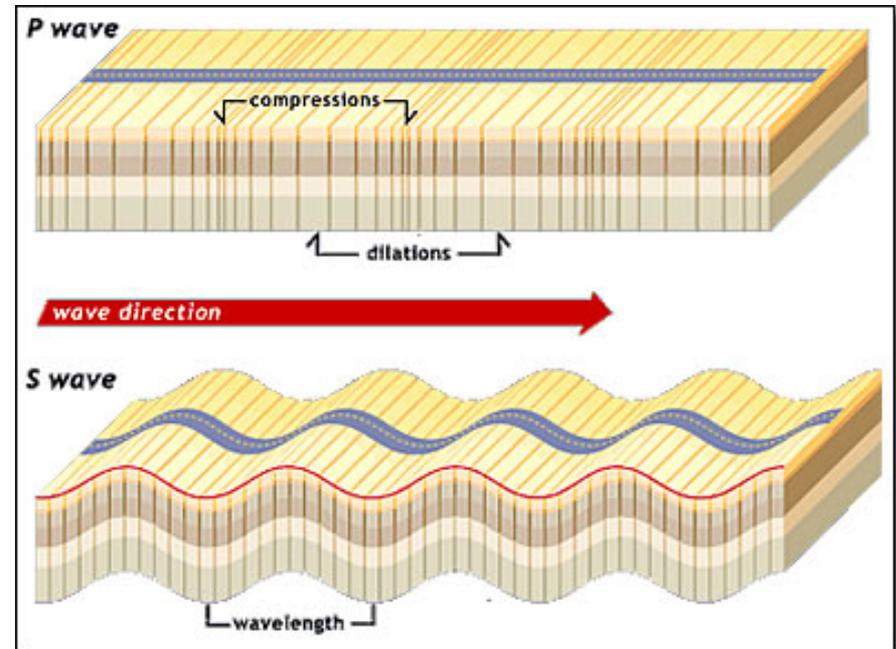
Le onde elastiche

- Propagazione delle onde elastiche è nota come fenomeno ondulatorio ovvero propagazione di energia da una sorgente senza spostamento di materia. Le onde appartengono a due grandi famiglie:
 - le onde elettromagnetiche (luce, onde radio, raggi X, etc.)
 - le onde elastiche (meccaniche/elastiche/sismiche).
- Le onde sono caratterizzate da tre parametri:
 - la velocità
 - la frequenza
 - la lunghezza d'onda

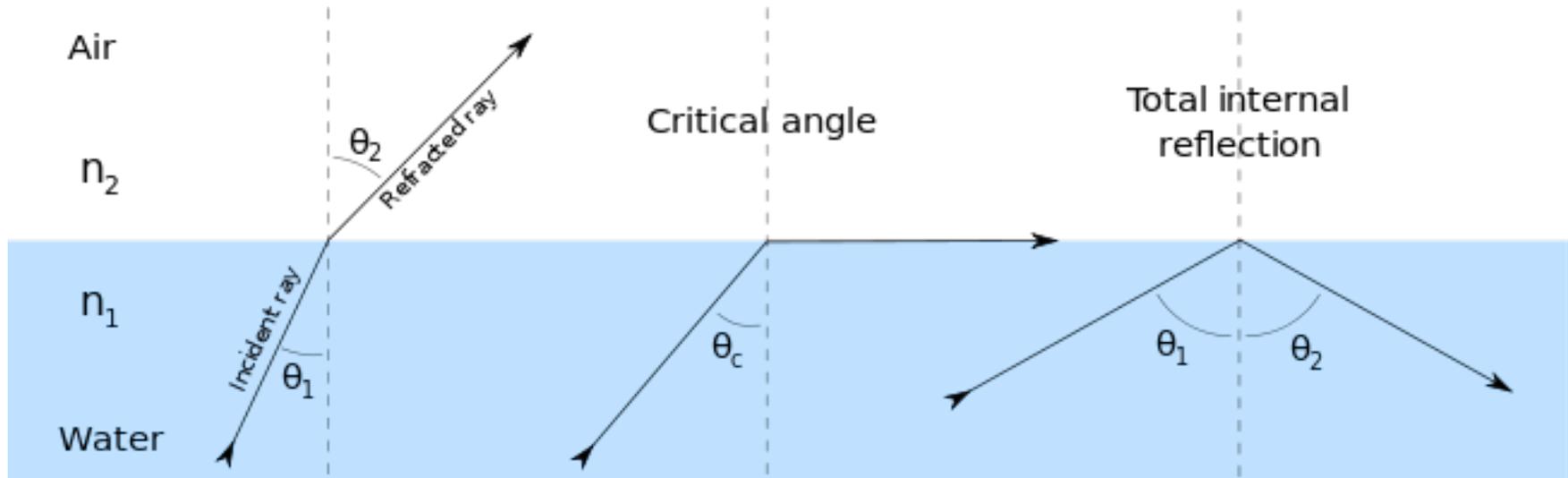


$$V = \lambda/T = \lambda f$$

- Mentre la frequenza è una caratteristica della sorgente, la velocità è una caratteristica del mezzo. Ne consegue che la lunghezza d'onda può variare al variare del mezzo, a parità di frequenza della perturbazione. Le onde elastiche consistono in piccole oscillazioni delle particelle dei mezzi materiali intorno alla loro posizione di equilibrio al passaggio di una perturbazione.
- Le onde elastiche si suddividono in:
 - onde P - longitudinali o di compressione
 - onde S - trasversali o di taglio (no in fluidi)
 - * le onde superficiali
 - * le onde di Love
 - * le onde di Rayleigh
- Durante le indagini la proprietà che interessa di più è la velocità delle onde tramite quale si può identificare la natura del mezzo. La velocità dipende dalle proprietà elastiche e dalla densità. Per elasticità si intende la capacità di deformarsi sotto uno sforzo applicato e di riprendere la forma una volta cessato il sforzo (viscosità).



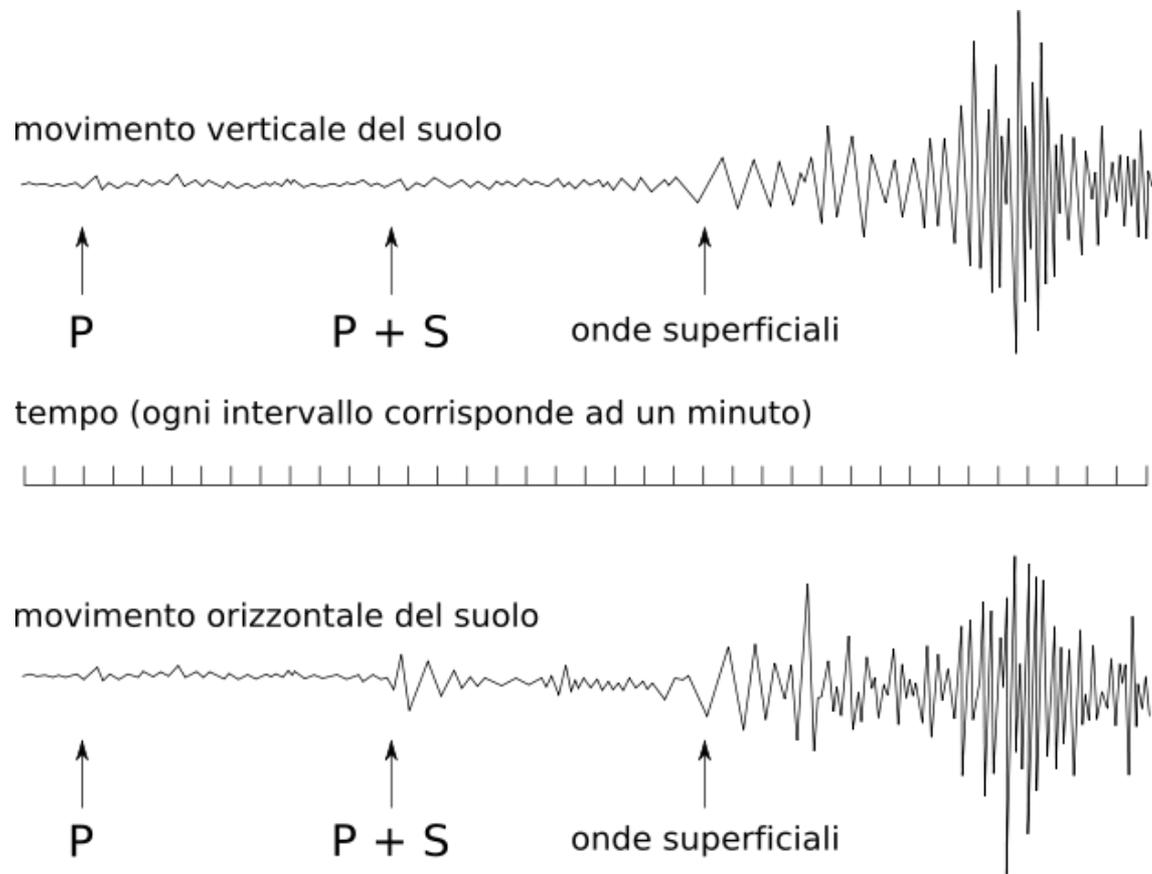
- Sottosuolo e manufatti sono costituiti da materiali diversi, ciascuno caratterizzato da proprie specifiche proprietà fisiche. Durante il passaggio di una onda elastica da un corpo a un altro a diversa velocità, l'onda incontra le superficie di discontinuità e secondo la legge di Descartes può essere:
 - in parte si riflette ed in parte torna nel mezzo di provenienza
 - i raggi dell'onda incidente, dell'onda riflessa, dell'onda trasmessa e della normale sono nello stesso piano.
 - il raggio riflesso forma con la normale alla superficie di discontinuità angolo uguale a quello del raggio d'incidenza.
 - il raggio trasmesso forma angolo diverso di quello di incidenza, ovvero si rifrange.
 - quando la velocità del mezzo di arrivo è più alta di quella del mezzo di provenienza, l'onda non si trasmette più nel secondo mezzo e viene interamente riflessa.

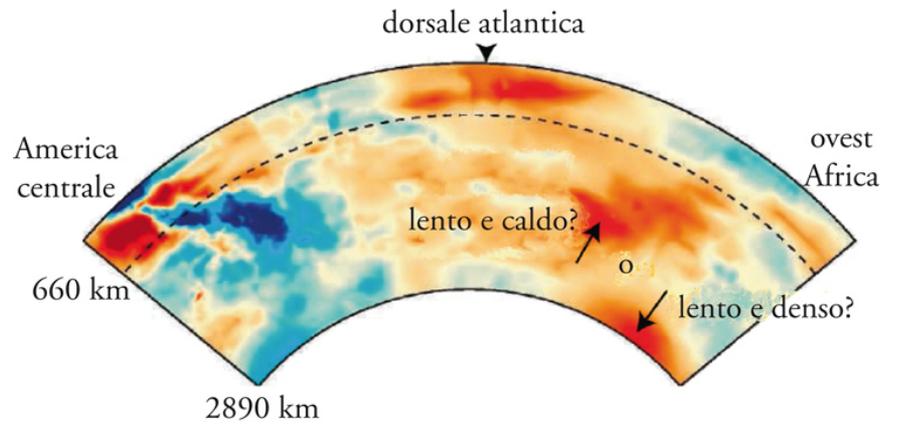
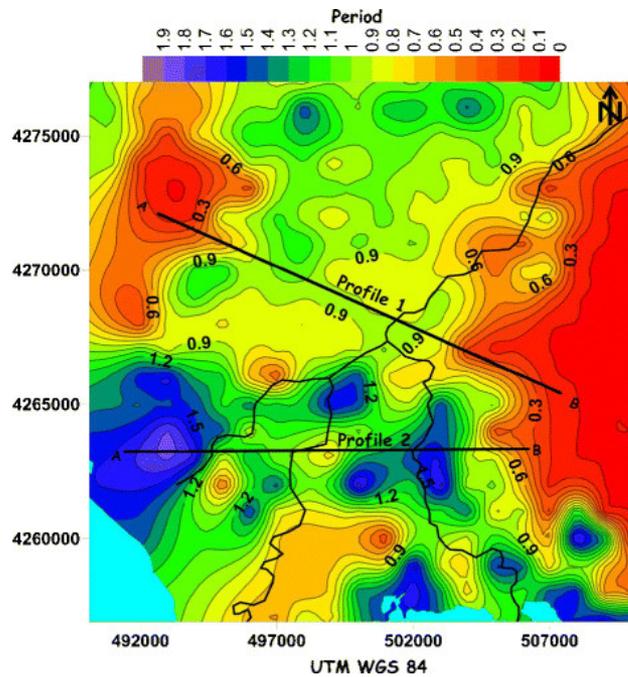
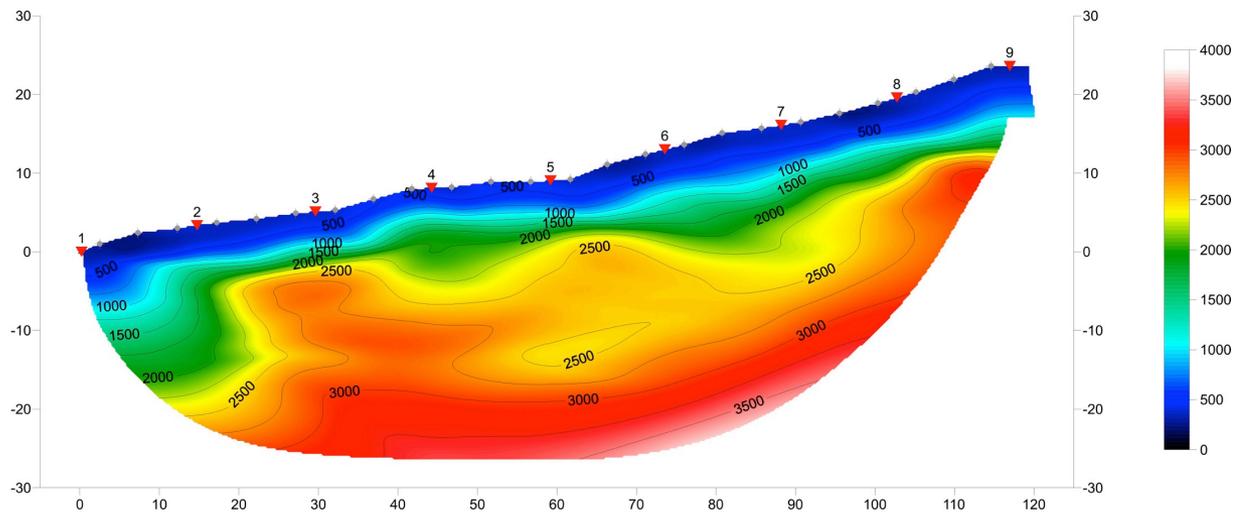


- Il modo più semplice a produrre una onda elastica è un colpo di martello soprattutto nel sottosuolo a piccole profondità. I metodi sismici si tra loro differenziano a attivi e passivi.
- Gli strumenti che si usano per le indagini sismiche registrano arrivo di un'onda elastica trasformandola in un segnale elettrico basandosi sul ricavo della resistività dalle misure di differenza di potenziale) nel terreno. E mentre sismografo viene utilizzato per registrare i fenomeni sismici, il sismometro effettua la sola misura e non la registrazione della stessa.



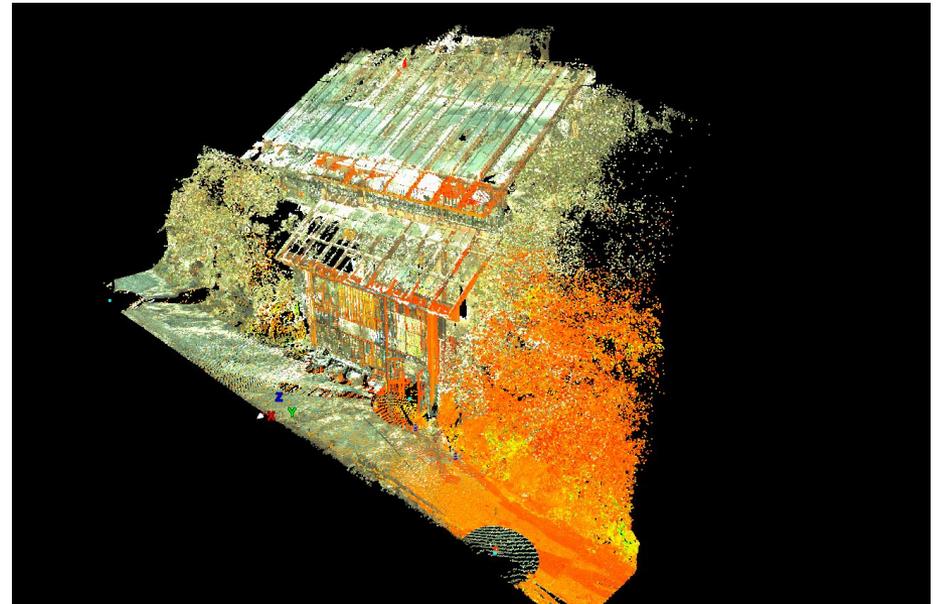
- La rappresentazione grafica dell'andamento del segnale sismometrico nel tempo viene sotto forma di un sismogramma. Analizzando il sismogramma si può conoscere l'entità, la natura (con una singola stazione solo in modo parziale), e la distanza del perturbazione dal punto dove è avvenuta la registrazione del sismogramma stesso. Il sismografo deve dunque rappresentare fedelmente il movimento del suolo oppure le grandezze (accelerazione o velocità) con le quali si può in seguito estrapolare il movimento assoluto del suolo.





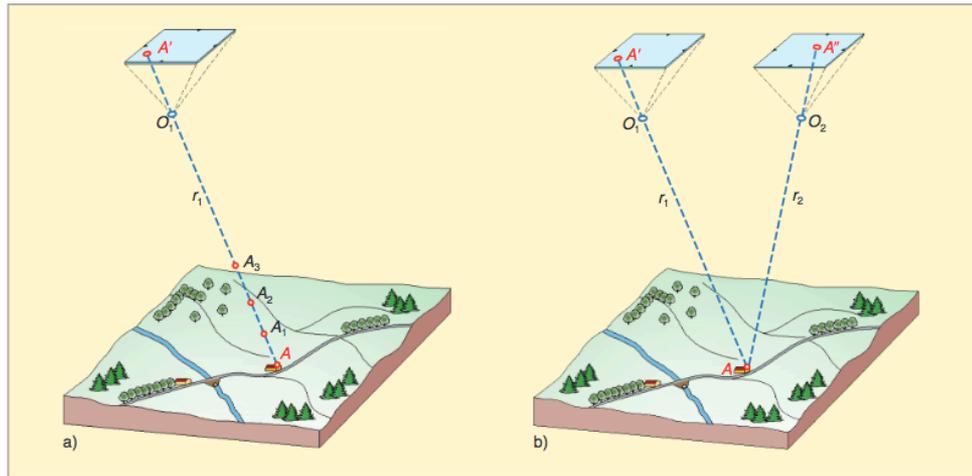
Tecniche digitali per il rilievo e la modellazione tridimensionale – La fotogrammetria

- Il campo dei Beni Culturali è quello che più degli altri si presta ad un approccio complementare e integrato di tecniche e tecnologie diverse, tutte di grande interesse e in continuo sviluppo diffondendo l'idea che sempre di più la conoscenza di un bene non può riguardare solo la sua storia, ma deve comprendere anche la sua posizione, forma e geometria.
- I metodi di rilievo si dividono in due grandi gruppi: image based (fotogrammetria) e range based (laser scanner, GPS).



- La fotogrammetria *close-range* negli ultimi anni è diventata una delle tecniche più usate e rigorose nel campo dei Beni Culturali. Le possibilità oggi offerte dal digitale ha accresciuto la già ampia diffusione delle tecniche fotogrammetriche nel rilievo di aree, edifici ed oggetti di interesse storico, architettonico ed archeologico. Gli maggiori vantaggi sono:
 - flessibilità
 - precisione nella determinazione metrica della forma e delle geometrie
 - velocità
 - basso costo
 - gli interventi possono venire su scale diverse (fotogrammetria aerea e terrestre).
- L'acquisizione può essere diretta (camere analogiche o digitali) o indiretta (scanner fotogrammetrici). La migliore apportate al settore dei Beni Culturali dall'avvento del digitale sono un importante contributo per la documentazione, conservazione, monitoraggio e lo studio del patrimonio culturale.
- La fotogrammetria da sola o integrata con laser scanner costituisce importante strumento per lo studio visuale e le analisi strutturali combinando un'accurata informazione metrica con una descrizione fotografica qualitativa di alta qualità.
- Per singoli oggetti, lo studio può essere utilizzato usando diverse tecniche secondo le caratteristiche dell'oggetto e degli scopi del rilievo. In questo caso la fotogrammetria è una ottima soluzione, grazie alle sue caratteristiche di realizzare il rilievo senza contatto ed in tempo breve.

- Gli approcci possibili per il rilievo fotogrammetrico terrestre di un edificio o di un oggetto sono:
 - approccio a singola immagine
 - approccio stereoscopico



- Dal punto di vista di data processing, le fasi del processo fotogrammetrico sono:

