

Indagini non invasive nell'area del Granaio pubblico

Giovanni Santarato, Nasser Abu Zeid, Maria Alberta Brugnatti, Maria Silvia Siviero

INTRODUZIONE

Nell'area del cortile di pertinenza del Liceo Classico L. Ariosto che dà su Corso Ercole I° d'Este è accertata la presenza di fondazione del settecentesco granaio pubblico di Ferrara. Per evidenziarne la posizione e stimarne luce e profondità sotto l'attuale piano di calpestio, senza con questo aprire trincee esplorative, sono necessari strumenti d'indagine indiretta, tipici della Geofisica Applicata.

Nell'ambito della convenzione esistente tra il Liceo Classico ed il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Ferrara, e nello sviluppo di un progetto di laboratorio archeologico proposto da Silvana Onofri, che coinvolse alcune classi della Scuola, furono eseguiti nel Novembre del 2003 cinque profili di tomografia della resistività elettrica ("ERT"), i cui risultati, in forma di sezioni verticali della distribuzione della resistività elettrica, furono a suo tempo presentati e commentati presso le classi coinvolte.

Il giorno 9 novembre 2005 gli stessi profili di misura furono investigati da un'indagine con lo strumento correntemente denominato georadar. In quell'occasione fu anche investigata un'area rettangolare di dimensioni 30x20 m.

CENNI SUI METODI D'INDAGINE

La tomografia della resistività elettrica-ERT

La tomografia della resistività elettrica o tomografia elettrica "tout court" è un metodo d'indagine non invasiva che permette di rilevare la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo nelle 3 dimensioni spaziali.

Essa deriva dal cosiddetto "metodo geoelettrico", che si basa sulla misura della differenza di potenziale ΔV tra due elettrodi, associata alla distribuzione nel sottosuolo di una corrente elettrica continua I immessa in una diversa coppia di elettrodi. In questo modo si ottiene una resistività detta apparente ρ_a

$$\rho_a = K*(\Delta V/I) (\Omega m),$$

che è funzione oltre che della posizione reciproca dei quattro elettrodi (dipendenza contenuta nel parametro K , detto fattore geometrico), della distribuzione della resistività elettrica nelle rocce del sottosuolo coinvolte nella propagazione della corrente I .

La metodologia di misura tomografica, con acronimo ERT, dall'inglese Electrical Resistivity Tomography, è stata introdotta circa 30 anni fa. Essa, sfruttando la possibilità di utilizzare personal computer direttamente in campagna, permette di disporre sul terreno molte decine di elettrodi, allineati regolarmente lungo un profilo o distribuiti su un'area, con passo (distanza tra gli elettrodi) dipendente dalla risoluzione e con estensione del profilo o dell'area dipendente dalla profondità d'indagine richiesta. S'intende per risoluzione, o potere risolutivo, la capacità di distinguere oggetti separati e per profondità d'indagine la massima profondità alla quale le misure eseguite consentono di definire compiutamente un corpo anomalo; la prima equivale a circa la metà del passo interelettrodo alla superficie, per poi decrescere con la profondità, la seconda è una frazione, da circa 1/3 a circa 1/6 della distanza tra gli elettrodi più lontani della quaterna, in dipendenza dallo specifico dispositivo quadripolare usato. In ciascuna coppia di elettrodi viene alternativamente inviata la corrente o misurata la differenza di potenziale, in una sequenza programmata ed interamente automatica.

Si ottiene così un'informazione della variazione sia verticale sia laterale della resistività apparente ρ_a , che si usa rappresentare in forma di pseudo-sezione, cioè come tabella di valori organizzati in un piano dove l'asse orizzontale del sistema di riferimento è la distanza sul terreno lungo il profilo di misura e l'asse verticale una frazione (solitamente 1/3) della distanza tra gli elettrodi più lontani della quaterna. Per rendere più leggibile la tabella, vengono poi congiunti i punti di uguale valore della ρ_a (tracciando delle iso-resistive). Questo quadro non rappresenta, se non in maniera suggestiva, il sottosuolo investigato, deve cioè essere interpretato in modo da potere trasformare l'insieme dei dati di ρ_a nella distribuzione delle resistività reali nel sottosuolo investigato. Il risultato sarà un "modello" bi-dimensionale, cioè una sezione verticale, lungo il profilo di misura nel caso di indagini per profili e un modello tri-dimensionale nel caso di misure condotte arealmente. L'interpretazione avviene confrontando l'insieme dei dati di ρ_a con quelli calcolati da un modello di prova, utilizzando procedimenti numerici. Da questa distribuzione, con opportune tarature o in base alle conoscenze geo-litologiche, il modello geofisico viene trasformato in modello geo-litologico.

Il "georadar"

Il GPR, acronimo di "Ground Probing Radar", e più comunemente chiamato georadar, è forse lo strumento per indagini non invasive più noto e per questo usato anche da personale non geofisico (purtroppo). Se per un verso questo ha portato ad un'ampia diffusione dello strumento, e quindi alla diffusione del concetto d'indagine non invasiva (peraltro poco frequentato in Italia), anche grazie alle "performances" notevoli nelle circostanze favorevoli al suo impiego, per un altro ha portato a qualche delusione poiché, come ogni altro metodo geofisico, non può essere considerato una panacea. Personale non competente può infatti considerare l'eventuale insuccesso dell'indagine col georadar come l'insuccesso delle tecniche non invasive "tout court" e comunque può non essere in grado di operare la corretta scelta di acquisizione o di elaborazione dei dati.

Il principio del metodo si basa sulla propagazione nel sottosuolo delle onde elettromagnetiche (e.m.), generate artificialmente da un'opportuna antenna, a frequenze tali che le correnti di spostamento prevalgano su quelle di conduzione. Tale condizione, che è necessaria

per poter parlare di “propagazione di un’onda e.m.”, è soddisfatta a partire da frequenze di qualche decina di MHz (Mega-Hertz). Le antenne commerciali emettono infatti impulsi a frequenze comprese tra 50 e 2000 MHz. La propagazione delle onde e.m. nei mezzi materiali è però condizionata dal cosiddetto effetto pelle, quantificato dalla profondità pelle δ , data da:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$$

dove μ è la permeabilità magnetica assoluta, σ la conducibilità elettrica del mezzo ed infine ω è la frequenza angolare della sorgente. δ è la distanza, in m, alla quale l’ampiezza dell’onda si riduce a 1/e. L’attenuazione è infatti esponenziale e rappresenta l’assorbimento, tramite effetto Joule, dell’energia e.m.. Questo assorbimento è quindi proporzionale sia alla frequenza che alla conducibilità elettrica. Ciò significa che:

- a) data un’onda ad una certa frequenza, un mezzo più conduttivo la assorbe più rapidamente di uno più resistivo,
- b) nello stesso mezzo conduttore un’onda a frequenza minore viene assorbita di meno (e dunque può indagare più in profondità) di un’onda a frequenza maggiore.

Poiché si dimostra che il potere risolutivo di un qualsiasi metodo d’indagine basato sulla propagazione di un’onda (sia essa e.m. od elastica) è inversamente proporzionale alla lunghezza d’onda¹, si arriva ad una contraddizione insuperabile in quanto profondità d’indagine e potere risolutivo sono esigenze opposte: si avrà la massima profondità d’indagine alla minima frequenza utilizzabile e la massima risoluzione spaziale alla massima frequenza.

Qualche esempio numerico può meglio illustrare il problema. In genere gli strumenti e le antenne di ultima generazione sono in grado di registrare impulsi riflessi a profondità fino a 10 profondità pelle. Supponiamo allora di avere un mezzo di conducibilità $\sigma=10^{-3} (\Omega\text{m})^{-1}$ (una sabbia asciutta, un calcare) ed un’antenna a 200 MHz. In questo caso, con rapidi calcoli e posto $\mu=4\pi\cdot 10^{-7}$ Henry/m, risulta $\delta=1.1$ m. Per la stessa frequenza, ma con $\sigma=10^{-1} (\Omega\text{m})^{-1}$ (un’argilla satura in acqua dolce), $\delta=0.11$ m soltanto, cioè la profondità pelle si riduce di un fattore 10. Nel primo caso si ottengono informazioni utili da profondità fino a 10 m, nel secondo non è facile superare 1 m.

Le indagini mediante georadar possono essere eseguite, in dipendenza dalle condizioni operative e dalle esigenze di progetto, sia per riflessione che per trasmissione. Nel primo caso l’antenna ricevente registrerà gli echi, o riflessioni, alle superfici di discontinuità della velocità delle onde e.m., o che è lo stesso, della permittività dielettrica (meglio nota come “costante” dielettrica, che però costante non è, in quanto varia da mezzo a mezzo e nello stesso mezzo, in dipendenza dal contenuto d’acqua), mentre nel secondo caso si misurerà il tempo di percorrenza dell’onda tra l’antenna trasmittente e l’antenna ricevente, ad es. tra le due facce di un muro. Ne seguono due percorsi del tutto diversi di elaborazione dei dati e di rappresentazione dei risultati.

Nel primo caso, infatti, le riflessioni vengono rappresentate, come ottenute sul campo, in un grafico distanza-tempo, detto radargramma (figure 1 e 2). Nei casi più semplici e quando non è richiesta una valutazione precisa delle profondità degli orizzonti riflettenti, ciò può bastare. In casi più complessi o quando si desidera una corretta distribuzione delle geometrie delle superfici riflettenti, occorre un’analisi più approfondita della velocità di propagazione dell’impulso e.m. all’interno dei vari mezzi attraversati.

Le indagini per trasmissione, o, meno propriamente, per trasparenza, vengono invece eseguite secondo il principio della “tomografia”.

¹ La lunghezza d’onda λ è legata alla frequenza f della sorgente ed alla velocità dell’onda nel mezzo v dalla nota relazione: $\lambda f=v$.

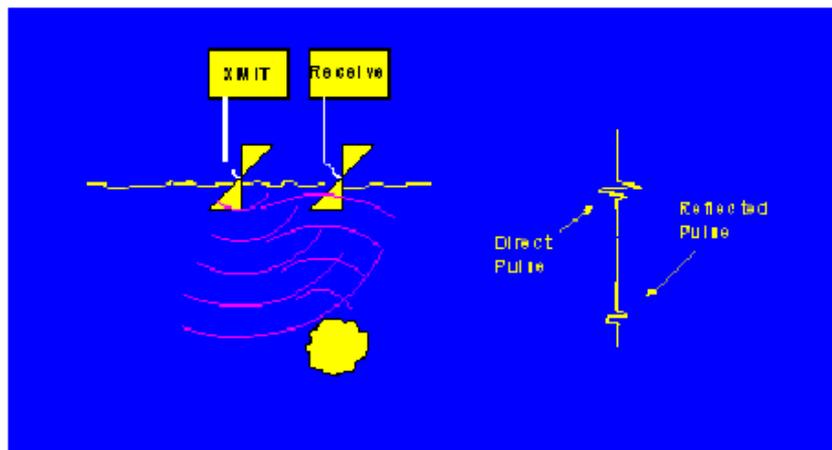


Fig. 1: principio del georadar (dal sito <http://www.georadar.com/>) per “riflessione”.

materiale	ϵ_r	v (cm/ns)
aria	1	30
Acqua dolce	80	3.3
Sabbia secca	4-6	12-15
Sabbia satura d’acqua	30	5.5
Argilla satura d’acqua	8-12	9-11
ghiaccio	3-5	13-17
granito	5	13
Rocce carbonatiche (calcari, dolomie)	7-9	10-11
cemento	6.4	12

Tabella 1: permittività dielettrica relativa ϵ_r (rapporto tra la permittività dielettrica assoluta del mezzo e la permittività dielettrica assoluta del vuoto ϵ_0), e velocità v di propagazione delle onde e.m. in alcuni mezzi materiali. La relazione tra ϵ_r e v è la seguente: $v=c/\epsilon_r^{1/2}$, dove $c=3 \cdot 10^8$ m/s è la velocità delle onde e.m. nel vuoto (la velocità della luce).

L’uso del georadar nella prospezione del sottosuolo deve dunque essere attentamente valutato a tavolino in funzione del problema posto, della conducibilità elettrica o della presenza di acqua.

Lo strumento, dopo aver inviato l’impulso all’antenna trasmittente, inizia immediatamente la registrazione degli “echi”, per una durata prefissata, legata alla profondità d’indagine, tenendo conto della velocità stimata delle formazioni presenti nel sottosuolo (v. tabella 1). Tornando all’esempio della prospezione con un’antenna a 200 MHz, se la profondità d’indagine di progetto è stimata in 1 m e la velocità delle onde e.m. in 10 cm/ns (corrispondente ad una velocità di 10^8 m/s e ad una permittività dielettrica relativa ϵ_r di 9: v. tabella 1), il tempo di registrazione sarà

$$T = \frac{100\text{cm}}{10\text{cm/ns}} \times 2 = 10 \times 2 = 20 \text{ ns}$$

(la moltiplicazione per 2 è dovuta alla somma dei tempi di andata e ritorno -tempi doppi-).

Un impulso successivo che, essendo la frequenza 200 MHz, durerà 5 ns, può essere emesso alla fine della registrazione, cioè dopo almeno 20 ns. Possono quindi essere

emessi e registrati milioni di impulsi in un secondo. Sul radargramma, cioè sulla registrazione delle misure, una singola traccia sarà la somma di migliaia di eventi di trasmissione e ricezione elementari, con ciò migliorando di molto il rapporto segnale/rumore. Avremo comunque la possibilità di acquisire migliaia di tracce “somma” al secondo, il che permette di acquisire i dati con l’antenna in movimento, anche a velocità considerevole.

Trascinando l’antenna sul terreno con continuità, per esempio camminando (fig. 2a), si potrà acquisire un radargramma “continuo”, dove tutte le molte migliaia di tracce somma vengono affiancate, in modo quasi indistinguibile l’una dall’altra (sono cioè molto “affollate”), così permettendo di inseguire visivamente, anche con una certa facilità, un orizzonte riflettente (Figg. 2b e 2c).

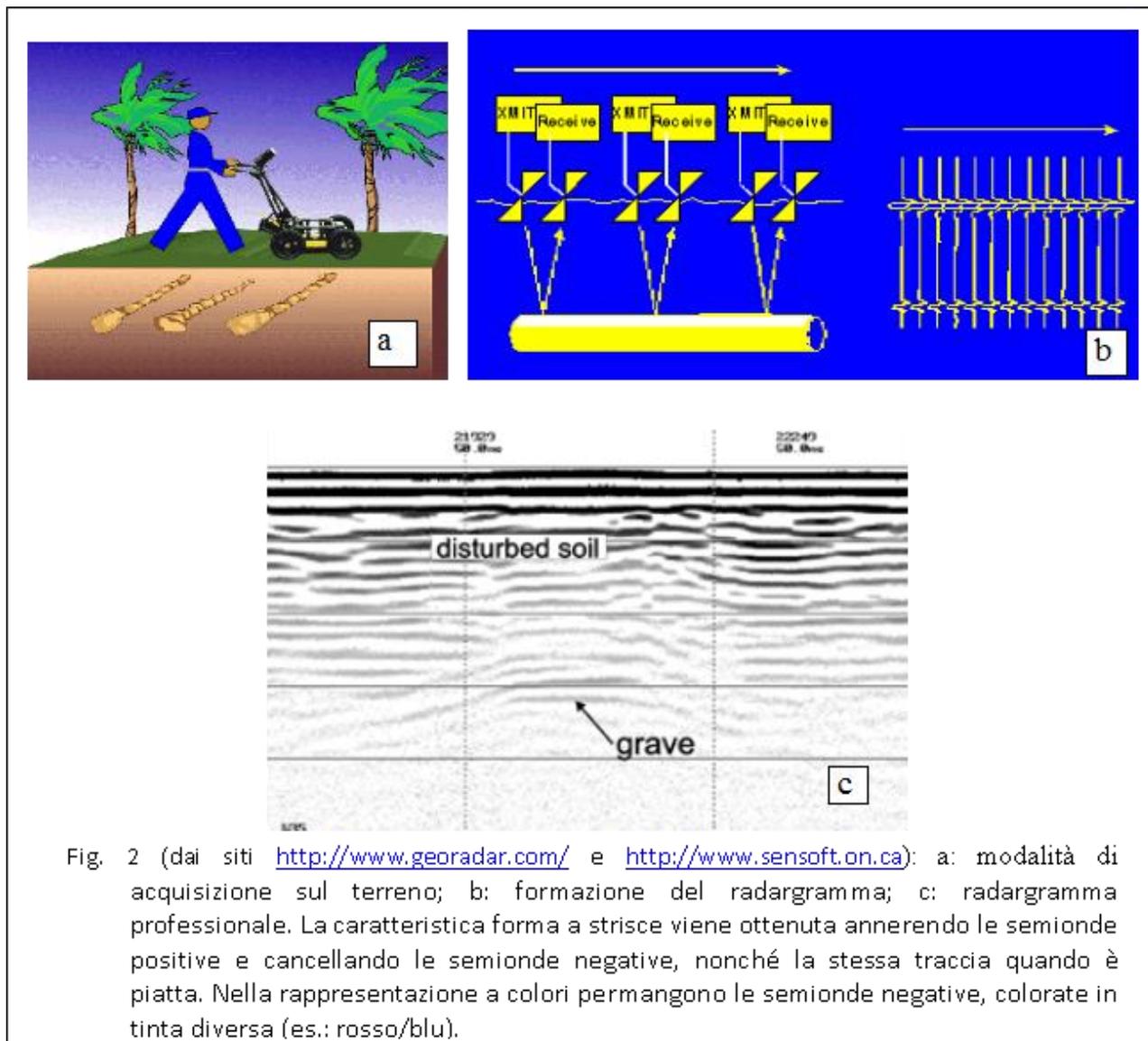


Fig. 2 (dai siti <http://www.georadar.com/> e <http://www.sensoft.on.ca>): a: modalità di acquisizione sul terreno; b: formazione del radargramma; c: radargramma professionale. La caratteristica forma a strisce viene ottenuta annerendo le semionde positive e cancellando le semionde negative, nonché la stessa traccia quando è piatta. Nella rappresentazione a colori permangono le semionde negative, colorate in tinta diversa (es.: rosso/blu).

È stata proprio questa apparente facilità di interpretazione dei risultati del georadar che ha portato alla sua ampia diffusione ed alla sua notorietà.

Permane una difficoltà. Il radargramma ha in ascissa la distanza lungo il profilo ed in ordinata ha il tempo, orientato positivamente verso il basso, proprio per suggerire fin da subito la struttura del sottosuolo. Quindi il radargramma è una sezione “in tempo”, più precisamente “in tempo

doppio" (all'inglese t.w.t., two way time), per l'andata ed il ritorno dell'impulso riflesso. Che fine ha fatto la profondità, che è senza dubbio il dato che interessa? In altri termini, che significato pratico può avere il dire che un evento di riflessione si è registrato, per esempio, a 30 ns (twt)?

La profondità, o distanza dalla superficie, è funzione non solo del tempo di transito (nel caso 15 ns), ma anche della velocità del (dei) mezzo (i) attraversato (i). La velocità si stima per esempio ricorrendo alla tabella 1 o direttamente dai dati in modi la cui descrizione è troppo complicata per questa sede. La profondità z di un orizzonte riflettente sarà data allora semplicemente da: $z=vt/2$, se t è il tempo d'arrivo dell'impulso (tempo doppio!).

LE INDAGINI

Risultati ERT

Nell'area del giardino prospiciente il Corso Ercole I° d'Este, sono stati tracciati cinque profili, denominati L1, L-2, lunghi 98 m, e T-1, T-2 e T-3, lunghi 38 m, disposti come nella Fig. 3. gli elettrodi, materializzati da picchetti di acciaio inossidabile, sono stati conficcati nel terreno per circa 10-20 cm, in modo da assicurare un buon contatto elettrico ad un passo di 2 m. i dati di ρ_a sono stati acquisiti utilizzando il dispositivo quadripolare detto di Wenner-Schlumberger, mediante il georesistivimetro in dotazione al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Ferrara.

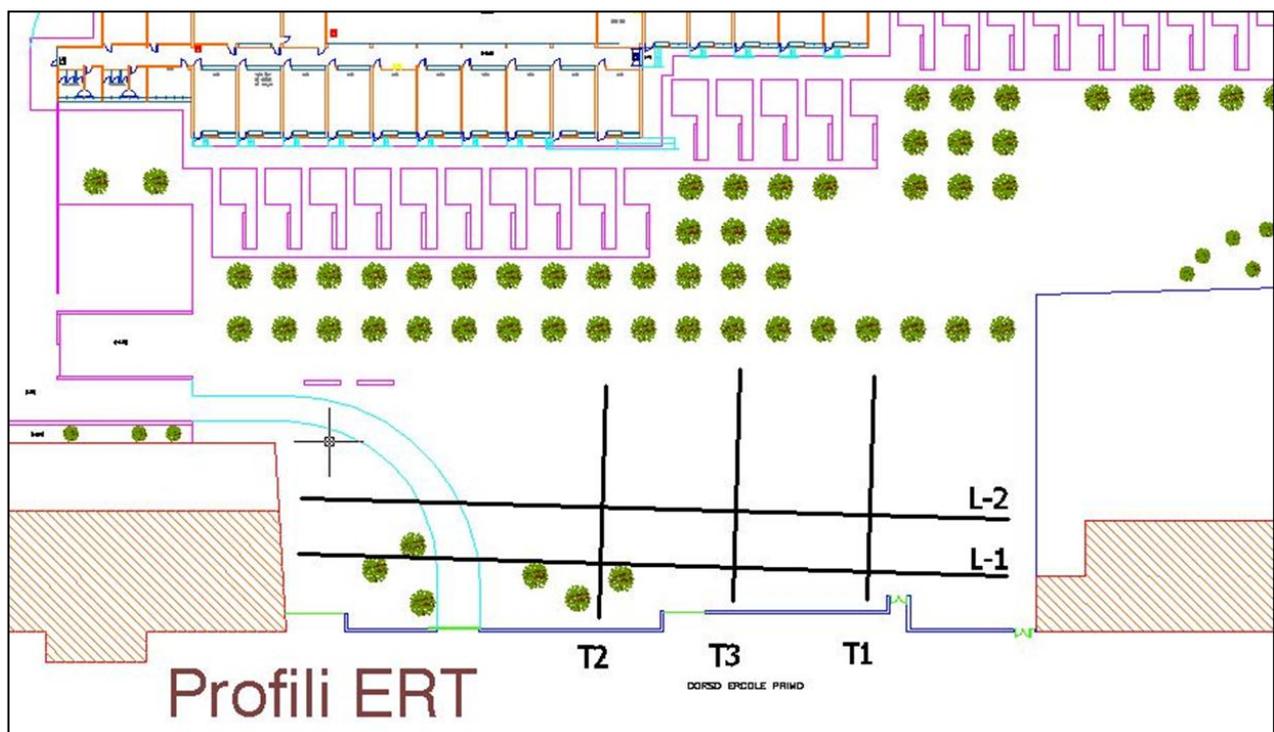


Fig. 3: mappa delle misure ERT

L'interpretazione dei 5 profili di ERT evidenzia un sottosuolo caratterizzato da tre intervalli di resistività:

- Conduttivo, con resistività minore di 33 Ωm
- di resistività intermedia, tra circa 30 Ωm e 150 Ωm
- resistivo con resistività maggiore di 150 Ωm

TRASVERSALE n°1 (T-1, Fig. 4). Il sottosuolo risulta costituito da:

- un elettro-strato superficiale resistivo (>150 Ωm) che raggiunge la profondità massima di circa 3 m e si estende orizzontalmente fino a 14 m da Est,
- un elettro-strato di resistività intermedia (tra 33 Ωm e 150 Ωm) fino alla profondità massima di 3,6 m esteso orizzontalmente lungo tutto lo stendimento,
- un elettro-strato basale conduttivo la cui resistività è <33 Ωm .

TRASVERSALE n° 2 (T-2, Fig. 5). Il sottosuolo risulta costituito da:

- un elettro-strato superficiale resistivo (>150 Ωm) che raggiunge la profondità massima di circa 2,6 m e si estende orizzontalmente fino a 17 m da Est,
- un elettro-strato di resistività intermedia (tra 33 Ωm e 150 Ωm) fino alla profondità massima di 4,6m, esteso orizzontalmente lungo tutto lo stendimento
- un elettro-strato basale conduttivo la cui resistività è <33 Ωm

TRASVERSALE n°3 (T-3, Fig. 6). Il sottosuolo risulta costituito da:

- un elettro-strato superficiale resistivo (>150 Ωm) che raggiunge la profondità massima di circa 2,2 m e si estende orizzontalmente fino a 14 m da Est,
- un elettro-strato di resistività intermedia (tra 33 Ωm e 150 Ωm) fino alla profondità massima di 4 m, esteso orizzontalmente lungo tutto lo stendimento,
- un elettro-strato basale conduttivo la cui resistività è <33 Ωm .

LONGITUDINALE n° 1 (L-1, Fig. 7). Il sottosuolo risulta costituito da:

- un elettro-strato superficiale resistivo (>150 Ωm) che raggiunge la profondità massima di circa 2,6 m e si estende orizzontalmente lungo tutto il profilo da Nord ad Sud,
- un secondo elettro-strato di resistività intermedia (tra 33 Ωm e 150 Ωm) fino alla profondità massima di 4,5 m, esteso orizzontalmente lungo tutto lo stendimento,
- un elettro-strato basale conduttivo la cui resistività è <33 Ωm .

LONGITUDINALE n° 2 (L2). Il terreno risulta costituito da:

- un primo elettro-strato superficiale resistivo (>150 Ωm) che raggiunge la profondità massima di circa 2,0 m e si estende orizzontalmente fino a 18 m da Nord,
- un secondo elettro-strato di resistività intermedia (tra 33 Ωm e 150 Ωm) fino alla profondità massima di 3,6m, esteso orizzontalmente lungo tutto lo stendimento,
- un elettro-strato conduttivo basale la cui resistività è <33 Ωm .

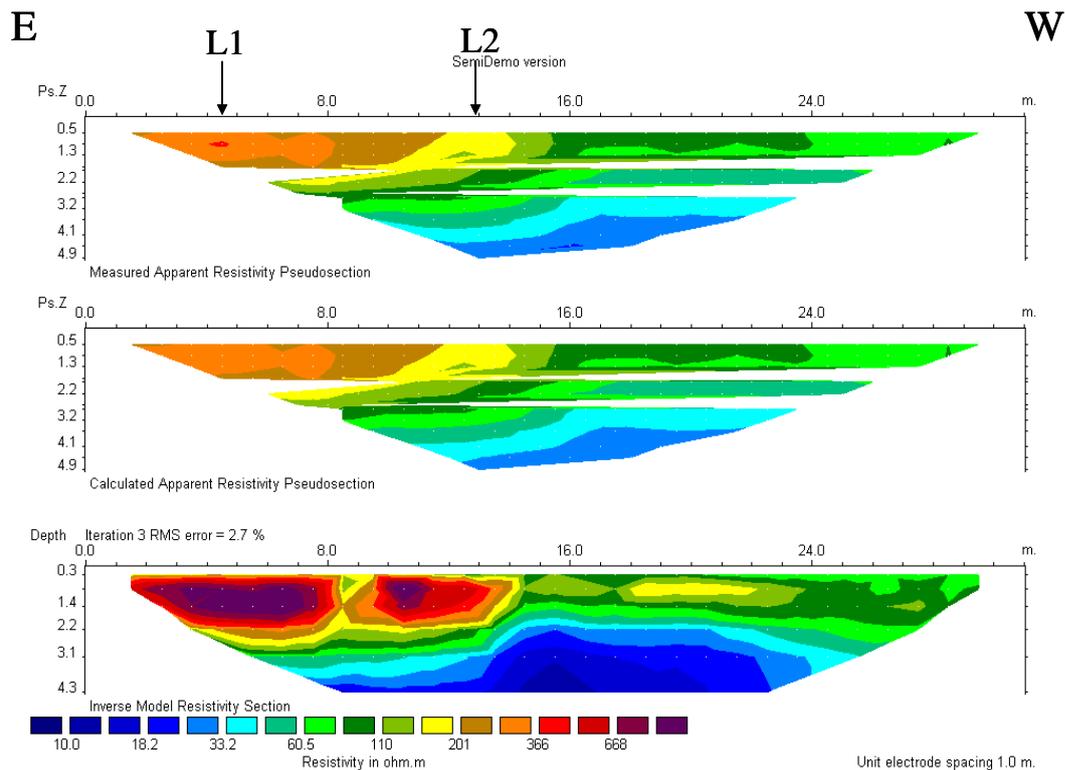


Fig. 4: sezione ERT T-1: in alto la pseudosezione di resistività apparente di campagna, al centro la pseudosezione calcolata dal modello, riportato in basso, all'iterazione finale; scarto quadratico medio

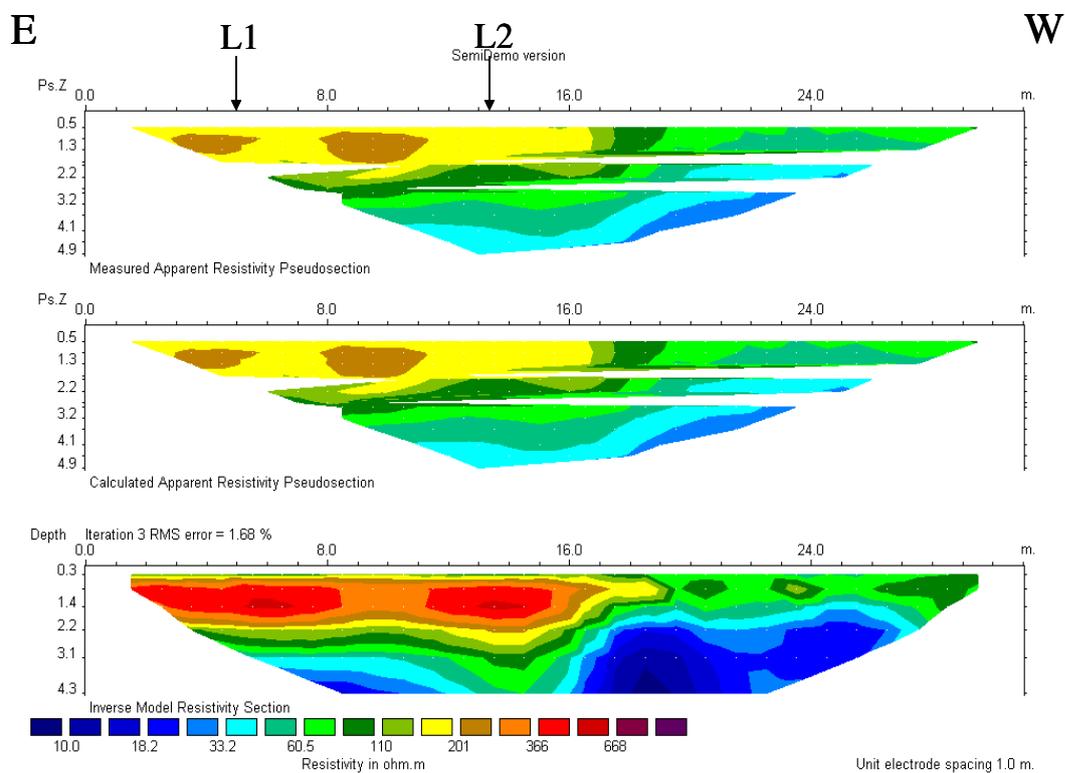


Fig. 5: sezione ERT T-2: in alto la pseudosezione di resistività apparente di campagna, al centro la pseudosezione calcolata dal modello, riportato in basso, all'iterazione finale; scarto quadratico medio (rms) percentuale <1.7%.

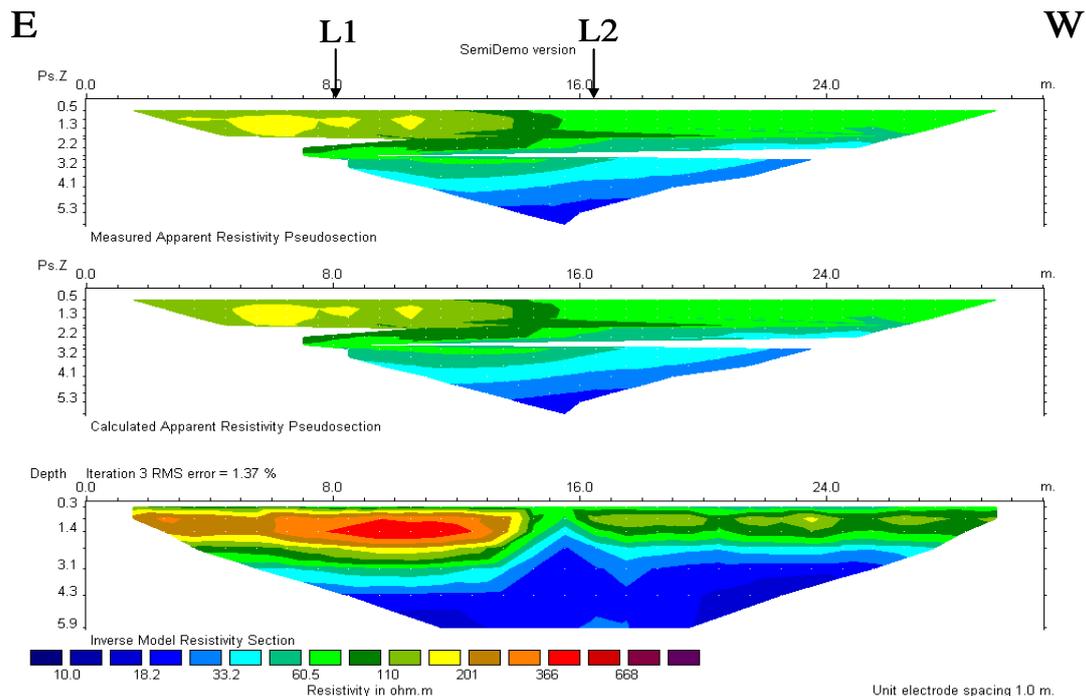


Fig. 6: sezione ERT T-3: in alto la pseudosezione di resistività apparente di campagna, al centro la pseudosezione calcolata dal modello, riportato in basso, all'iterazione finale; scarto quadratico medio (rms) percentuale <1.4%.

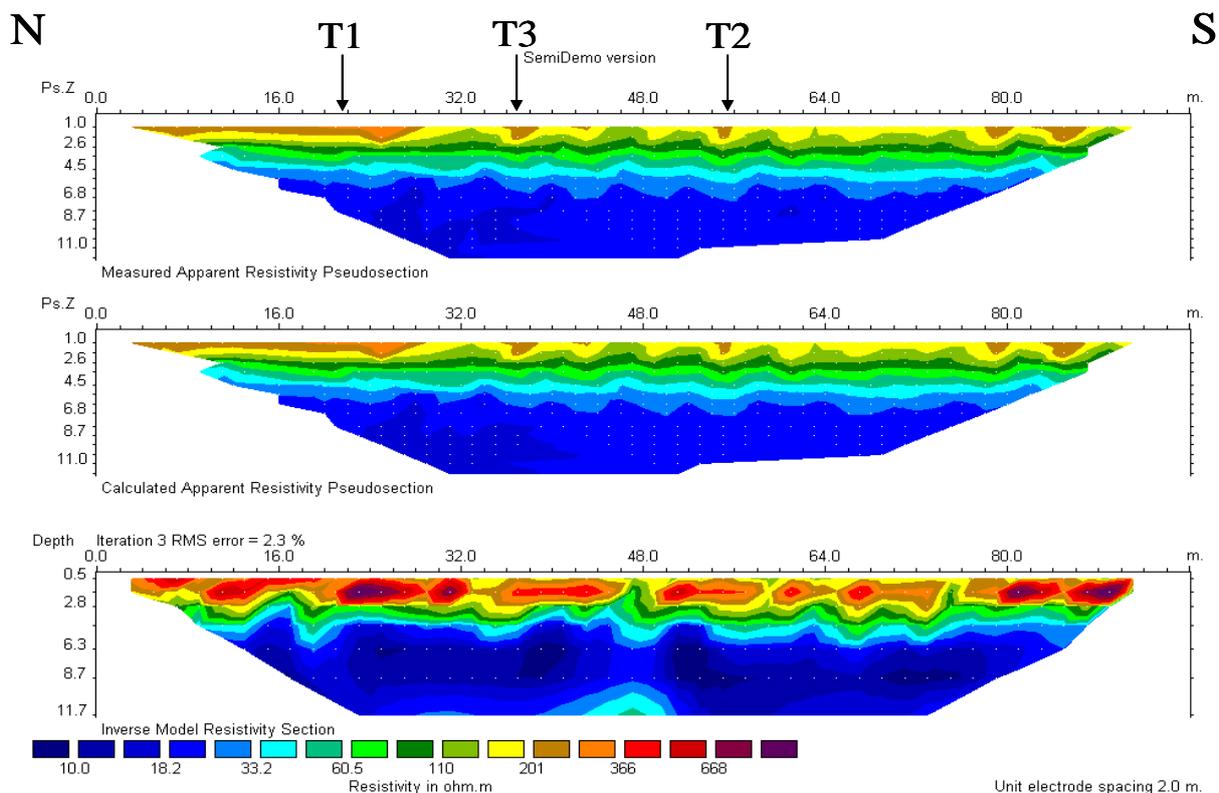


Fig. 7: sezione ERT L-1: in alto la pseudosezione di resistività apparente di campagna, al centro la pseudosezione calcolata dal modello, riportato in basso, all'iterazione finale: si noti la notevole somiglianza tra le due pseudosezioni, come testimoniata dallo scarto quadratico medio (rms) percentuale di appena 2.3%.

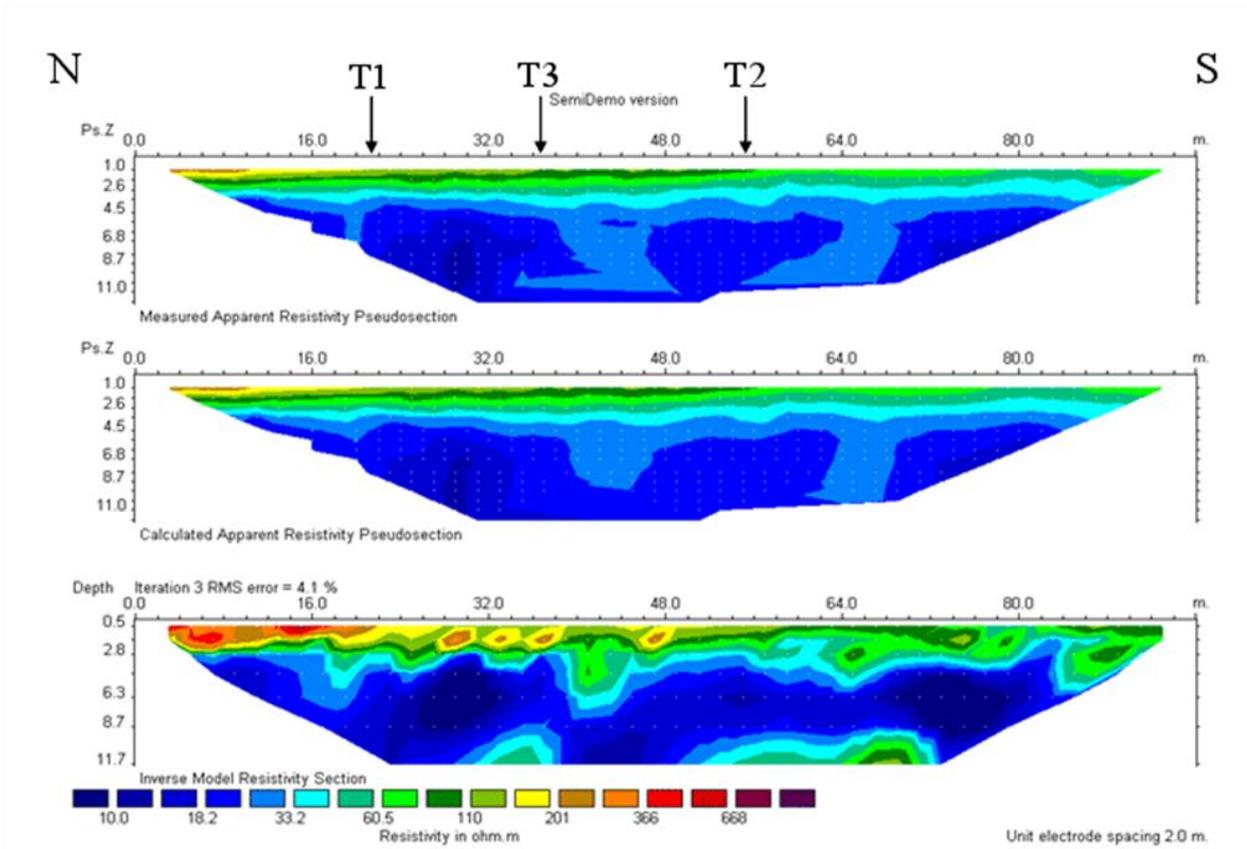


Fig. 8: sezione ERT L-2: in alto la pseudosezione di resistività apparente di campagna, al centro la pseudosezione calcolata dal modello, riportato in basso, all'iterazione finale; scarto quadratico medio (rms) percentuale

Interpretazione geolitologica dei profili ERT

Data la litologia locale, una possibile corrispondenza tra i suddetti intervalli di resistività e la tessitura dei terreni è probabilmente la seguente:

- argilla limosa, corrispondente all'elettro-strato di resistività $<33 \Omega\text{m}$, in genere alla base delle sezioni,
- litologie più grossolane, da limo a sabbia limosa saturi o parzialmente saturi corrispondenti all'elettro-strato con resistività tra $33 \Omega\text{m}$ e $150 \Omega\text{m}$, che si spingono fino ad una profondità massima di 4,6 m,
- volumi superficiali fortemente resistivi, difficilmente associabili a terreni naturali, che si estendono fino alla profondità di 3,0 m e orizzontalmente fino a circa 17 m da Est, come si nota sul profilo T-2. I valori di resistività potrebbero essere attribuiti, in base alla letteratura, ad una struttura muraria.

Sulla base di queste osservazioni, è stato costruito un modello del sottosuolo indagato in cui vengono rappresentati i volumi anomali di probabile interesse archeologico, quindi meritevoli di ulteriori indagini (Fig. 9).

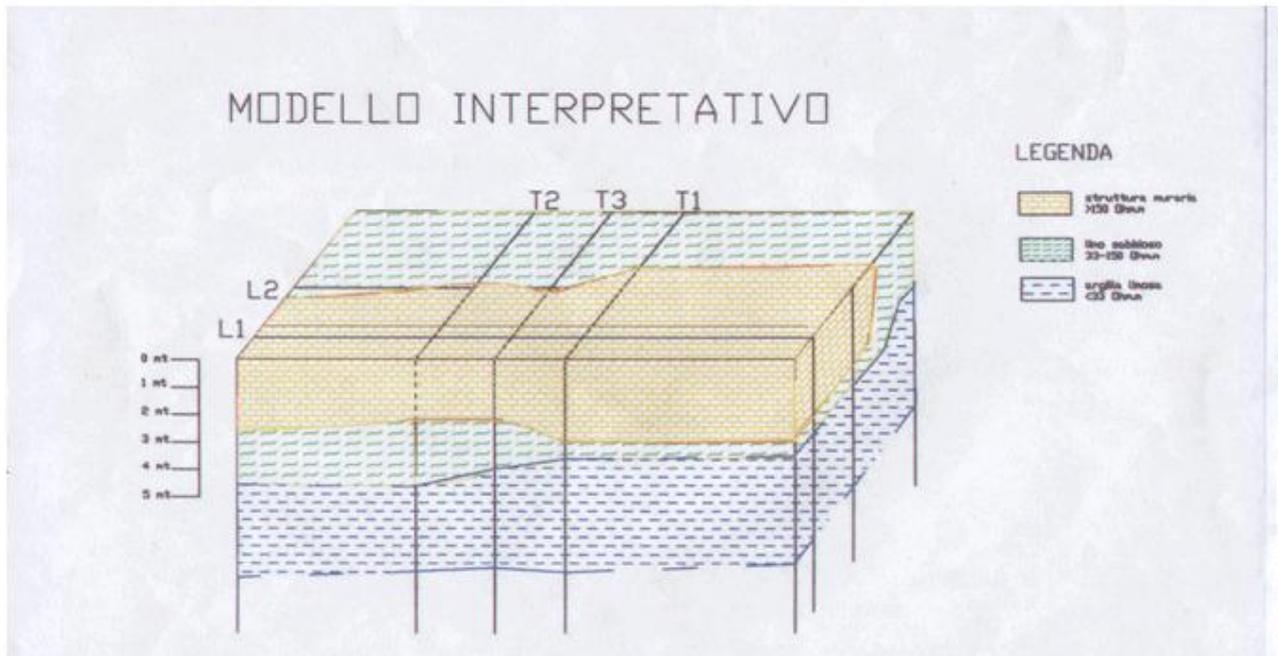


Fig. 9: possibile modello geolitologico dell'area indagata

Risultati con il georadar

Il georadar (Fig. 10) come detto “lavora” in una banda di frequenze compresa in genere tra 50 MHz e 2.0 GHz.

Nel caso specifico, data la natura conduttiva del terreno argilloso, già accertata dalla precedente indagine geofisica tramite ERT, è stata scelta un'antenna con frequenza nominale di 200 MHz, giudicata il miglior compromesso tra la profondità di penetrazione delle onde e.m. ed il potere risolutivo.

L'area sottoposta ad indagine ha riguardato la superficie già in precedenza indagata con profili ERT.

L'indagine con georadar si suddivide in due parti, la prima per profili, ripercorrendo i profili di ERT, per un confronto tra i risultati (Fig. 11).

Per l'indagine di tipo 3D, si è costruito un reticolo di 30m (direzione nord-sud) x 20m (direzione est-ovest) e si è delimitato il perimetro dell'intero rettangolo con l'utilizzo di una cordella metrica. Il rilevamento per mezzo del georadar è avvenuto seguendo le direttrici, dapprima nord-sud, poi est-ovest, lungo profili paralleli ad una distanza di 1 m tra loro. Il computer installato sul georadar, raccogliendo di volta in volta le immagini in presa diretta, ha potuto elaborare un'unica mappa.

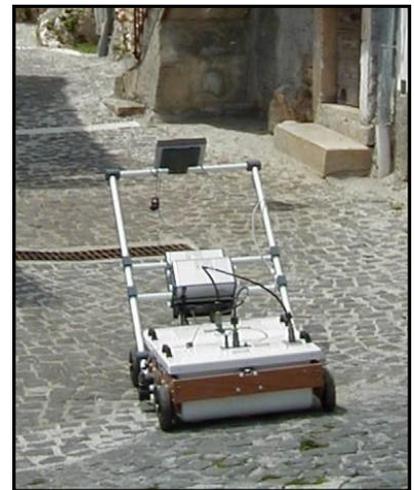


Fig. 10: il georadar; in basso l'antenna da 200 MHz.

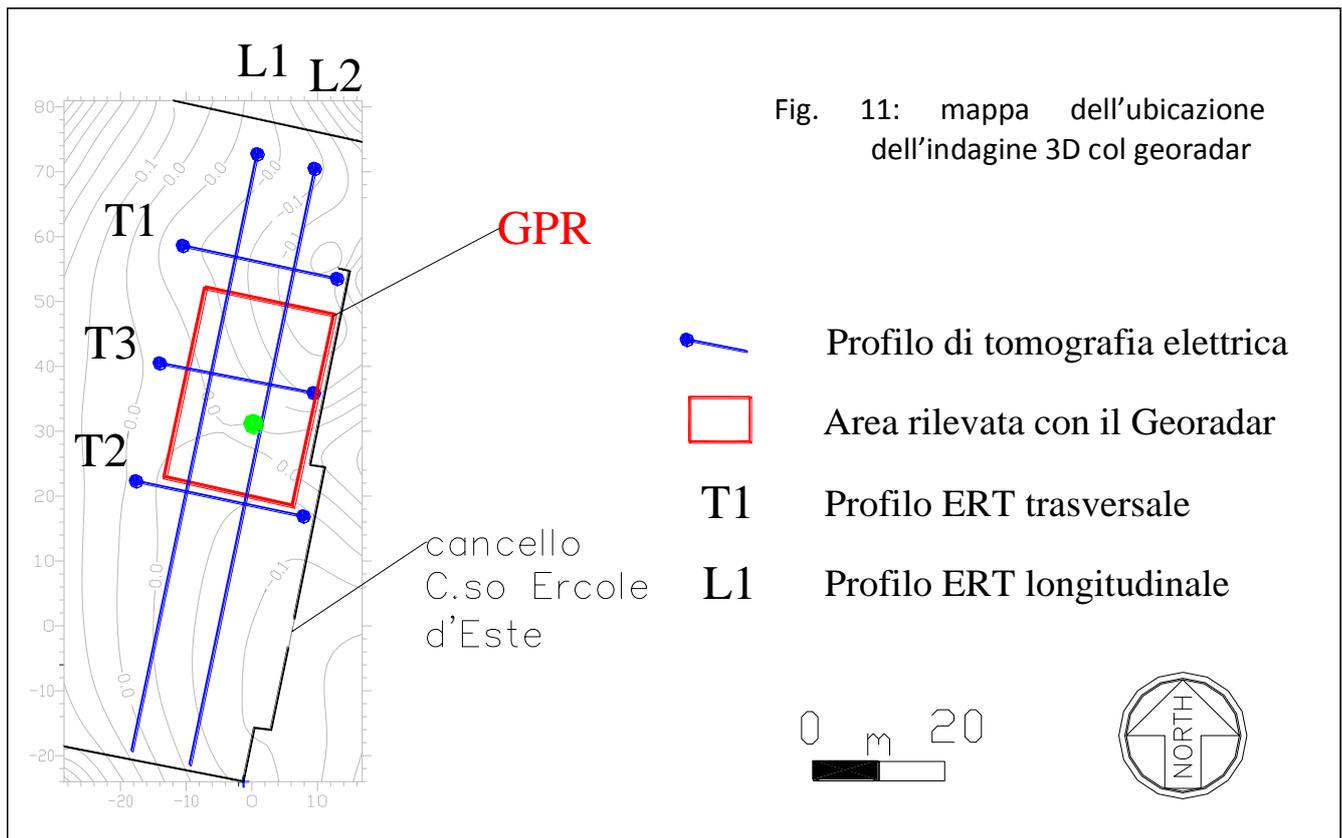


Fig. 11: mappa dell'ubicazione dell'indagine 3D col georadar

Nelle seguenti Figg. da 12 a 16 sono riportati i radargrammi ottenuti lungo i profili ERT e confrontati con le rispettive sezioni; nelle Figg. da 17 a 21 sono riportate le "timeslices"² ed il cubo dell'indagine areale. Le profondità sono state stimate attribuendo ai mezzi in posto una velocità media delle onde e.m. di 10 cm/ns.

Dall'analisi dei risultati si osservano situazioni diverse a seconda dei valori di resistività in relazione a quelli di profondità. In particolare:

- le sezioni verticali delle Figg. 12-16 danno un'informazione dettagliata limitatamente ai primi 50-100 cm di profondità, dove le riflessioni praticamente continue su tutti i profili sono da attribuirsi ad un pavimento sepolto, relativamente continuo. Localmente si intravedono più in profondità, riflessioni organizzate, messe in relazione alle strutture murarie già ipotizzate osservando le sezioni ERT;
- le timeslices (Figg. 17-19) segnalano presenze murarie diffuse fino a 120 cm (probabilmente fondamenta) in larga parte nel settore di NE, in prossimità del lato stradale (corrispondenti a colore rosso nei grafici);
- a profondità superiori a 150 cm, l'onda viene assorbita, incontrando resistività via via più basse nel sottosuolo, e le riflessioni sono via via coperte dal rumore (le immagini indistinte nei grafici);
- L'unico corpo consistente a profondità non superficiali (ca. 80 cm.) che si sviluppa per 50 cm di estensione si colloca in posizione isolata vicino al lato sud-ovest del reticolo, di materiale presumibilmente metallico, considerata la notevole ampiezza dell'energia riflessa (cubi di Figg. 20 e 21).

² sezioni "orizzontali" del segnale radar selezionate allo stesso istante sui profili paralleli

Profilo L1

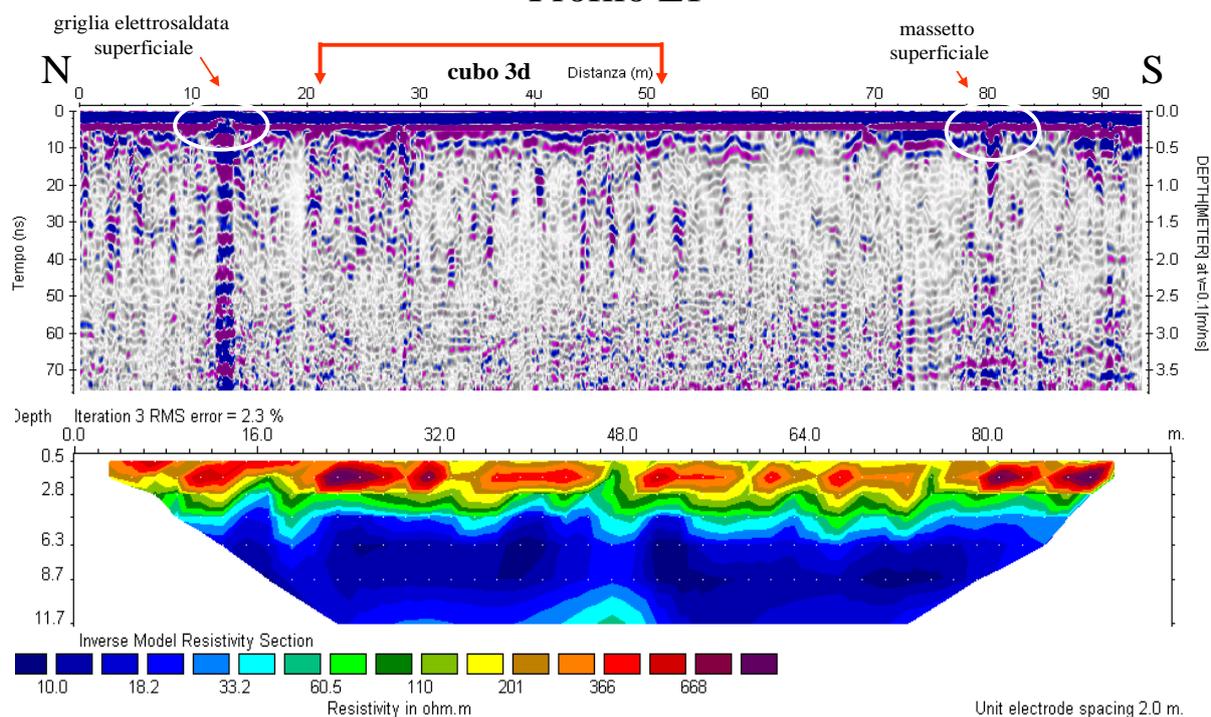


Fig. 12: radargramma (sopra) e sezione ERT (sotto) del profilo L-1

Profilo L2

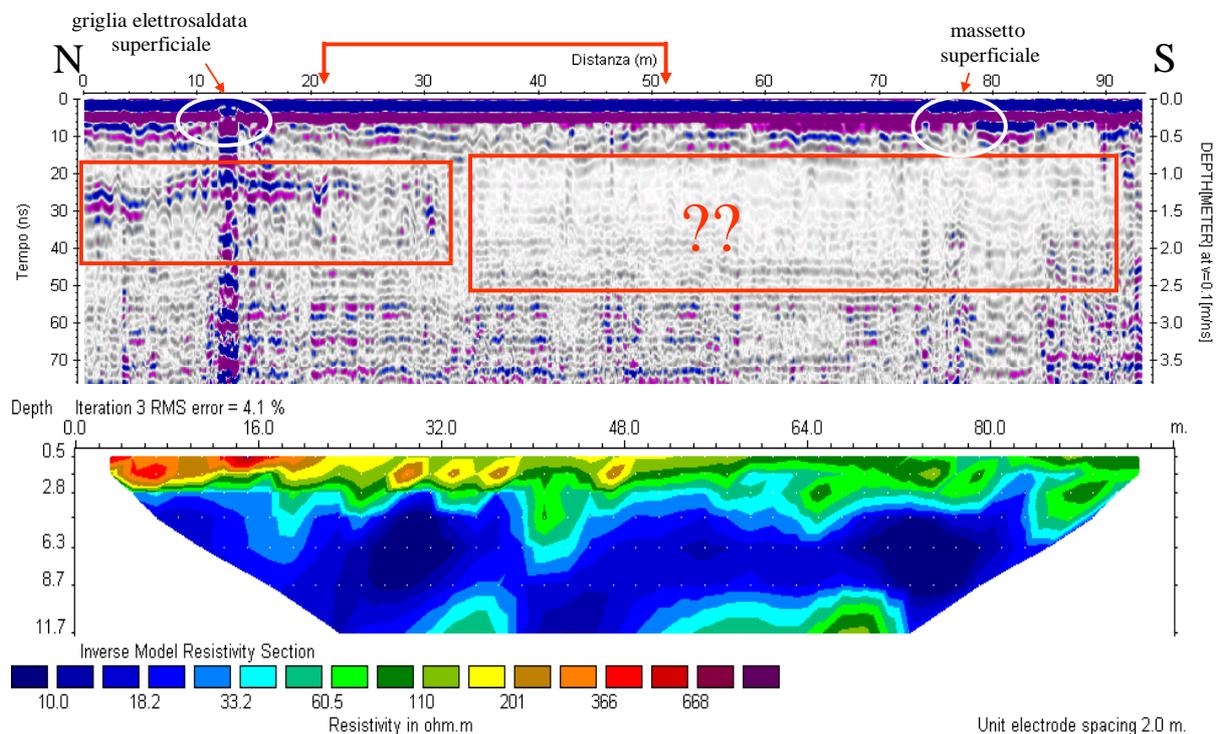


Fig. 13: radargramma (sopra) e sezione ERT (sotto) del profilo L-2

Profilo T1

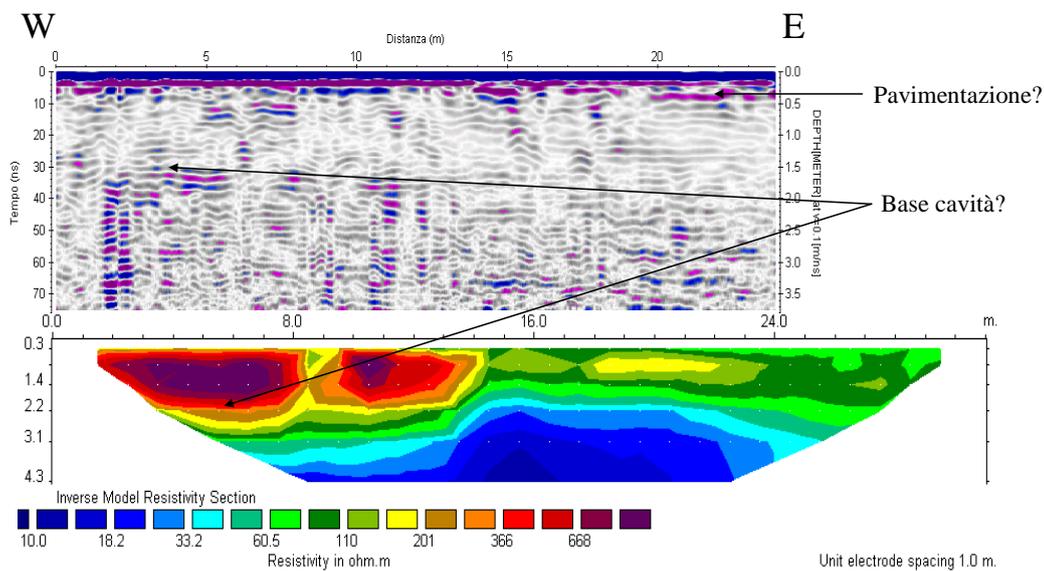


Fig. 14: radargramma (sopra) e sezione ERT (sotto) del profilo T-1

Profilo T2

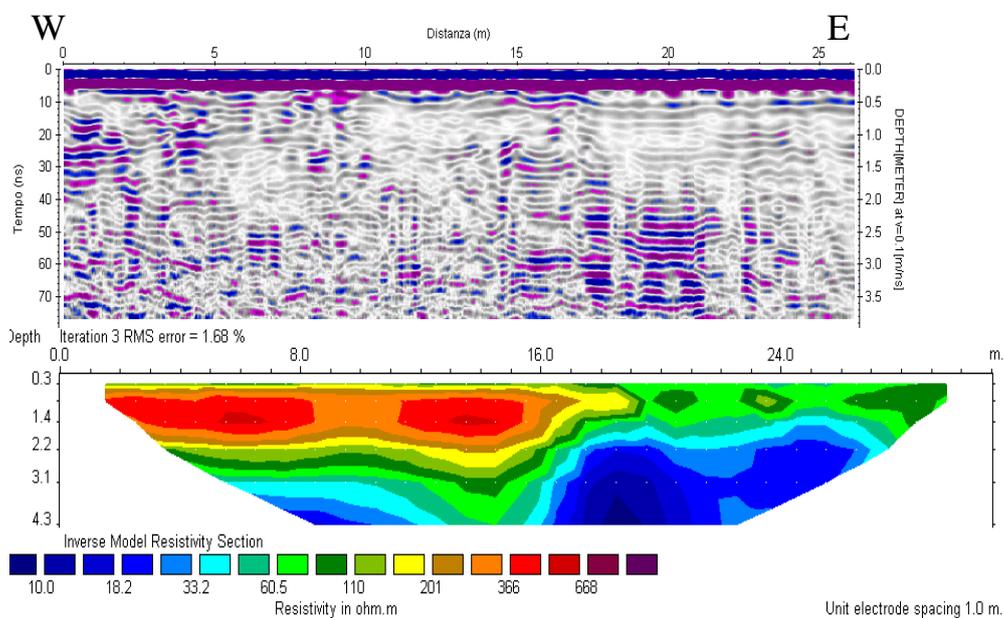


Fig. 15: radargramma (sopra) e sezione ERT (sotto) del profilo T-2

Profilo T3

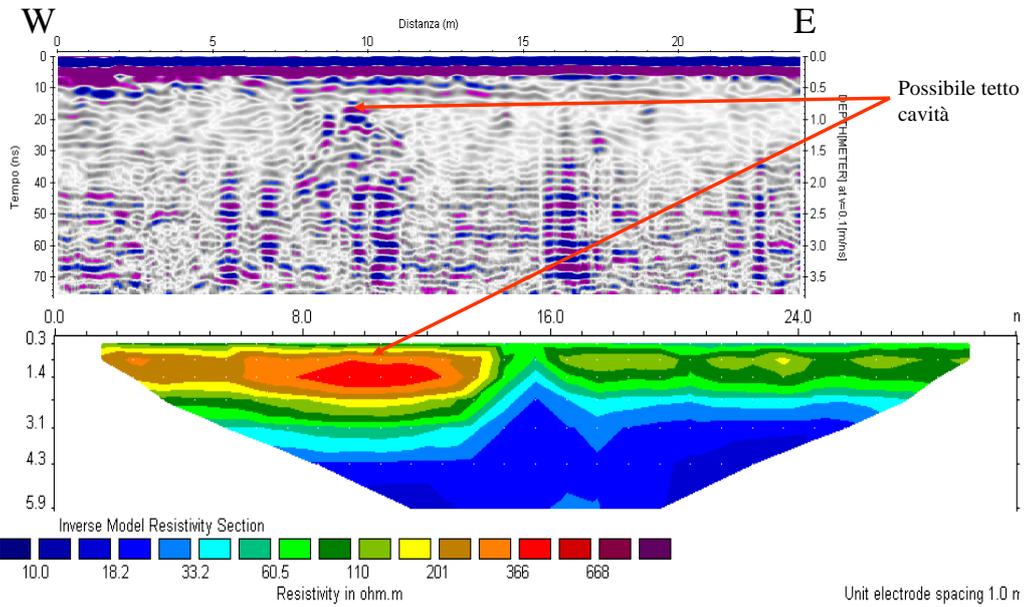
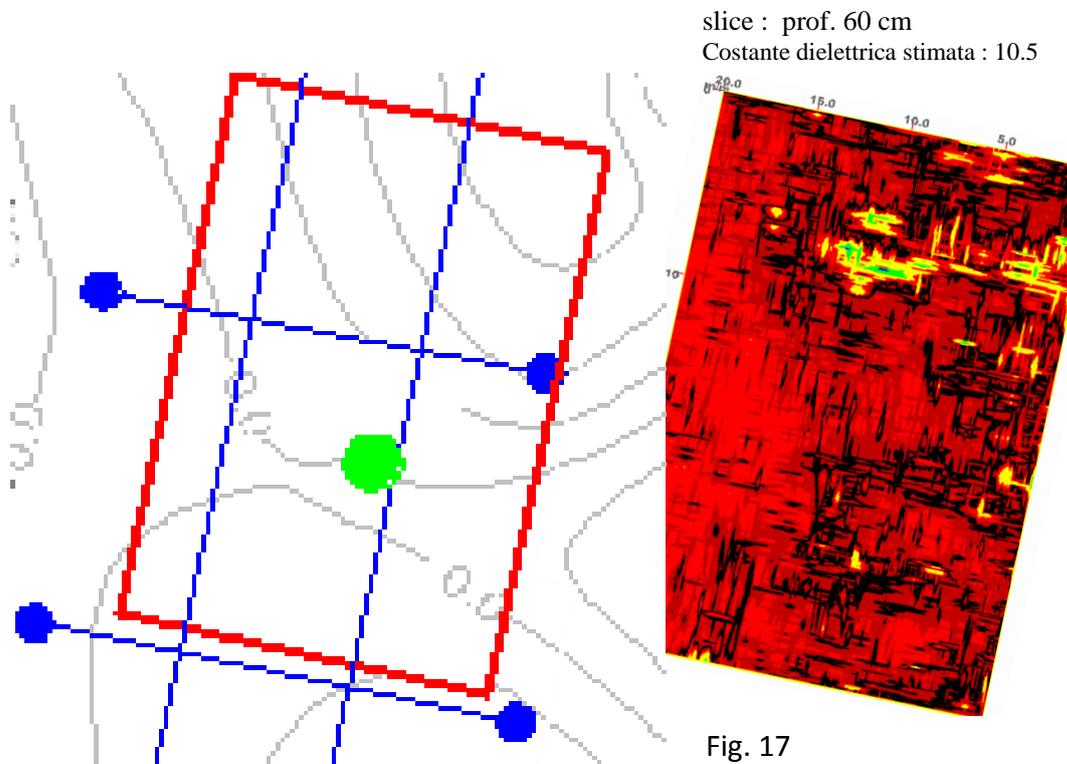
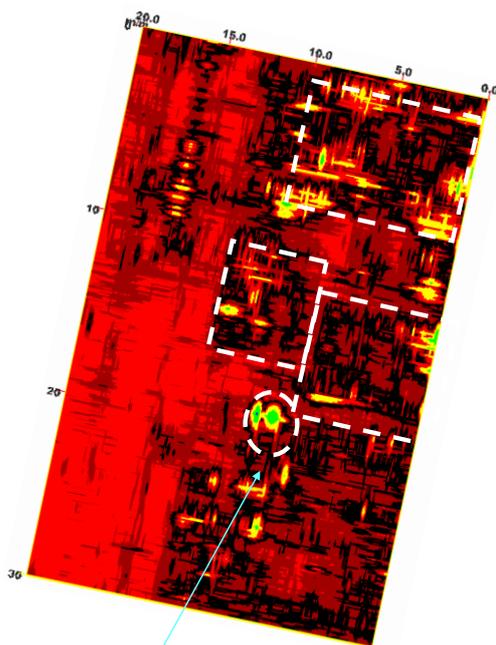


Fig. 16: radargramma (sopra) e sezione ERT (sotto) del profilo T-3



slice : prof. 120 cm



Oggetto metallico isolato

slice : prof. 150 cm

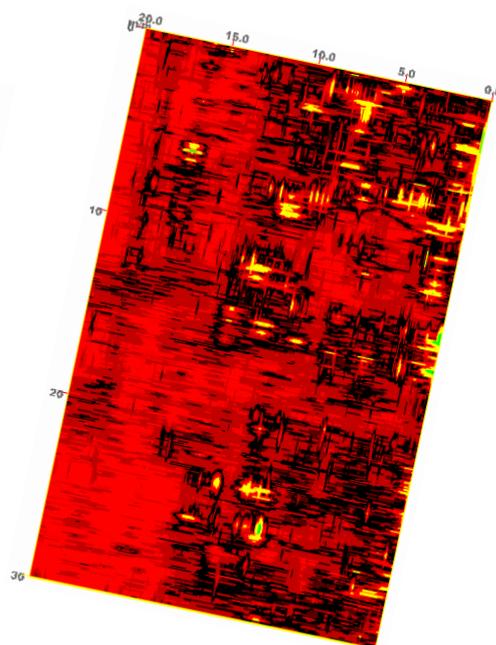
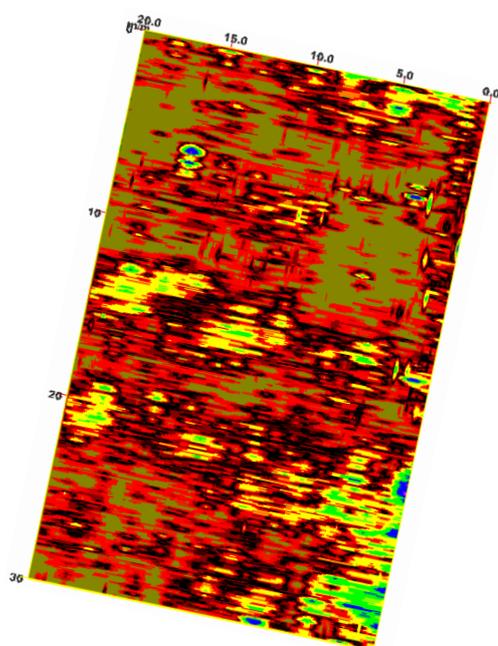


Fig. 18

slice : prof. 200 cm



slice : prof. 250 cm

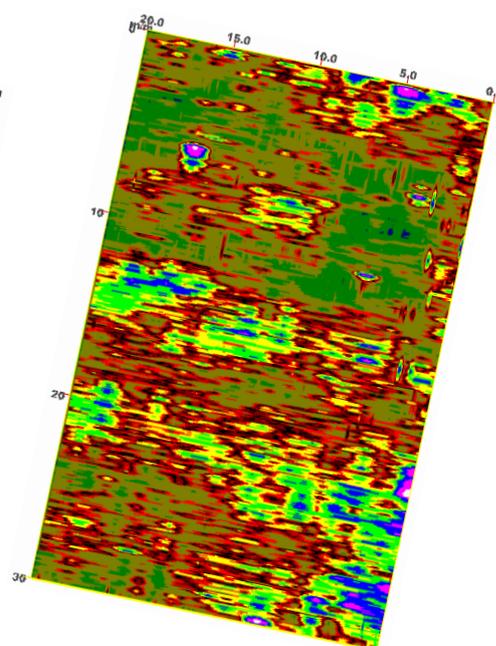


Fig. 19

Vista da NW

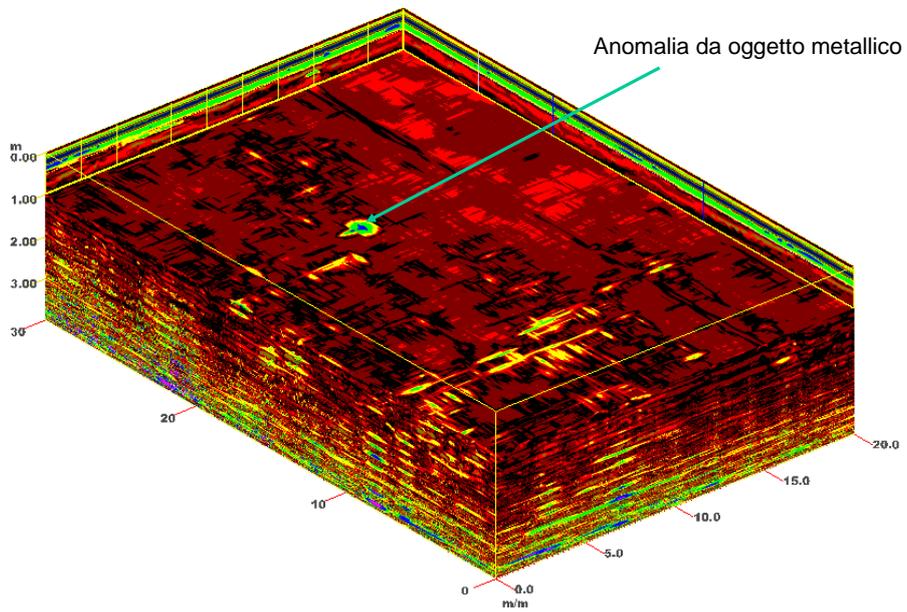


Fig. 20

Vista da NW con ritaglio a X = 19 m e Y = 12 m

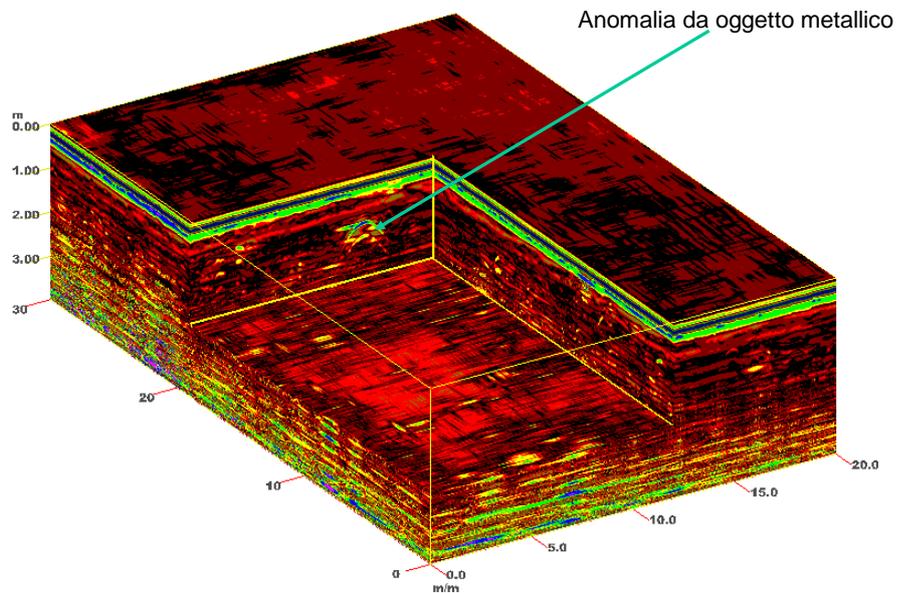


Fig. 21