

SALVATORE PIRO

INTEGRAZIONE DI METODI GEOFISICI AD ALTA RISOLUZIONE PER L'INDAGINE NEI SITI ARCHEOLOGICI: IL CASO DI PIAZZA D'ARMI - VEIO

1. INTRODUZIONE

Il contributo che può essere apportato dalle metodologie geofisiche all'indagine degli strati più superficiali del terreno, interessati dalla presenza di manufatti o più generalmente da preesistenze di natura antropica, è ormai noto ed impiegato in modo frequente. Esse sono ormai considerate come un apporto fondamentale per individuare sistematicamente le risorse culturali che il territorio può contenere. Il territorio che ci circonda, infatti, va considerato come la sede fondamentale di tutti gli elementi delle pregresse attività dell'uomo e come supporto dell'organizzazione spaziale delle fasi culturali che su di esso si sono, nei tempi, succedute.

Le diverse metodologie di prospezione geofisica consentono di acquisire ed interpretare alcune proprietà costitutive del terreno indagato ed in particolare, nel caso specifico delle indagini finalizzate all'individuazione delle testimonianze antropiche, se impiegate in modo integrato, possono fornire quell'insieme sistematico di informazioni, necessario alla ricerca.¹

Le indagini geofisiche vanno considerate come il momento di verifica delle informazioni sulle preesistenze fisiche ed antropiche di un dato territorio ottenute attraverso l'acquisizione e l'interpretazione di immagini telerilevate. Tali informazioni, supportate da una maglia topografica di precisione, diventano lo strumento indispensabile per i controlli sul terreno. Le prospezioni geofisiche rappresentano uno dei principali metodi per il controllo immagini-terreno, completando in modo determinante, sia sul piano qualitativo, interpretativo che quantitativo, il quadro ottenuto dal telerilevamento.

L'impiego integrato di diverse metodologie di indagine per approfondire il livello di conoscenze nella fase che precede uno scavo, rappresenta l'aspetto di sistematicità che rende questo metodo di studio del territorio l'elemento di integrazione tra scienze fisiche e scienze umane.

In questo quadro le prospezioni geofisiche vengono 'mirate' sul territorio e le diverse metodologie vanno incrociate ed interfacciate fra loro al fine di produrre 'mappe geofisiche' da inserire nella cartografia tematica computerizzata che costituirà in tal modo lo strumento per la rappresentazione sintetica delle caratteristiche fisiche e degli indizi di tutte le preesistenze antropiche di un dato contesto territoriale.²

2. INTEGRAZIONE DI METODI GEOFISICI AD ALTA RISOLUZIONE

Lo studio di un'area archeologica, utilizzando le tecniche di indagine della Geofisica Applicata, può essere schematizzato nei seguenti punti fondamentali:

- a) caratterizzazione geolitologica e fisiografica dell'area;
- b) individuazione delle aree da investigare sulla base della interpretazione delle immagini telerilevate;
- c) modellizzazione del problema fisico da affrontare;
- d) scelta dei metodi di prospezione da impiegare;
- e) realizzazione delle campagne di prospezione;
- f) sviluppo delle opportune tecniche di elaborazione ed interpretazione dei dati acquisiti;
- g) interpretazione integrata dei risultati geofisici ottenuti;
- h) inquadramento e 'lettura' dei risultati geofisici nella cartografia tematica, integrandoli con i risultati delle ricerche di altri settori disciplinari.

In genere risulta complesso applicare le prospezioni geofisiche all'identificazione di corpi di limitate dimensioni posti a piccola profondità soprattutto per il basso rapporto segnale / rumore che caratterizza

L'Autore ringrazia la prof.ssa G. Bartoloni e la dott.ssa F. Boitani per la collaborazione manifestata nel corso di questo progetto di indagini. L'Autore ringrazia i tecnici dell'ITABC, G. Morelli e D. Verrecchia per il supporto tecnico durante tutte le campagne di prospezioni.

1. E. BRIZZOLARI, S. PIRO, L. VERSINO, *Monograph on the geophysical exploration of the Selinunte Archaeological Park*, in *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* xxxiv, n. 134-135, 1992, pp. 83-217.

2. S. PIRO, P. SANTORO, *Analisi del territorio di Colle del Forno (Montelibretti, Roma) e scavo della necropoli sabina arcaica*, in *Orizzonti* II, 2001, pp. 1-16.

i dati acquisiti sul campo. Le più importanti fonti di disturbo, come noto, risultano da un lato l'intrinseca disomogeneità del sottosuolo, dall'altro i disturbi ambientali, intendendo con ciò l'influenza della urbanizzazione che può condizionare in modo negativo le misure delle grandezze fisiche.

Per affrontare e risolvere questi problemi si possono seguire diverse vie: a) aumentare le capacità delle tecniche di acquisizione per i vari metodi impiegati; b) approfondire le tecniche di elaborazione ed interpretazione, impiegando anomalie geofisiche opportunamente calcolate e tecniche numeriche di esaltazione del rapporto segnale/rumore; c) integrare fra loro più metodi di indagine.³

Passo successivo all'impostazione appena descritta, è rappresentato dalla ricostruzione della geometria dei corpi oggetto di indagine direttamente nel volume di sottosuolo investigato. Tutti i metodi geofisici misurano le variazioni di singoli parametri fisici del terreno, pertanto se impiegati da soli non permettono in genere una completa caratterizzazione dei corpi che si intendono individuare. Lo sviluppo, viceversa di opportune tecniche di indagine integrata fornisce, come si è avuto modo di dimostrare, un insieme di informazioni, acquisite da diversi punti di vista, in grado di aumentare l'affidabilità dell'interpretazione finale.⁴

Tenendo conto del tipo di strutture da identificare e della necessità di impiegare quelle tecniche che consentono da un lato di acquisire un gran numero di dati in tempi relativamente contenuti e dall'altro di dettagliare ad alta risoluzione le strutture nel volume di sottosuolo investigato, sono stati selezionati i seguenti metodi di indagine: metodo magnetometrico differenziale 'fluxgate' (MDF), metodo georadar (GPR) e metodo geoelettrico dipolare (GD).

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA DI PIAZZA D'ARMI

L'area in studio rientra nella tavoletta topografica a scala 1:25000 F. 143 II SW del foglio topografico a scala 1:100000 F. 143 Bracciano in riva destra del fiume Tevere. Questa zona presenta affioramenti costituiti dai 'tufi stratificati' di La Storta, prodotti dall'emissione del complesso vulcanico dei Sabatini. Tale unità largamente affiorante in tutto il settore nord-orientale e meridionale del sistema sabatino, ricopre una superficie di circa kmq. 800. La formazione è costituita in prevalenza da materiali risedimentati, depositatisi con maggiori accumuli nelle zone strutturalmente e tettonicamente molto disturbate e intercalati a vere e proprie piroclastiti solo nelle vicinanze dei centri di emissione attivi durante la sua messa in posto. Il complesso dei tufi di La Storta è caratterizzato da un'alternanza di strati e lenti di natura eterogenea, costituiti prevalentemente da materiale vulcanico di origine piroclastica. Tali strati sono caratterizzati da differenti modalità deposizionali in funzione della zona e delle variazioni morfologiche locali, in genere con potenza variabile da pochi centimetri a qualche metro in corrispondenza delle depressioni. I livelli preponderanti sono costituiti da materiale cineritico di colore variabile dal bruno al grigio, incoerente, localmente litoide con spessori variabili da m. 0,5 a m. 2,3. Il materiale si presenta spesso argillificato (tufo terroso) per alterazione del vetro vulcanico; non presenta laminazioni e contiene in genere pomici gialle alterate e a volte completamente argillificate, frammenti di scorie e di lava. Localmente si presentano come una massa cineritica ricca di resti organici, molto simile ad un paleosuolo, di spessore variabile tra m. 0,2 e m. 2.⁵

4. ACQUISIZIONE, ELABORAZIONE E RAPPRESENTAZIONE DEI DATI

Per approfondire le problematiche emerse nel corso degli studi effettuati dal 1996 in poi, sono state sviluppate una serie di indagini geofisiche integrate nelle aree ubicate ad Ovest, a Nord e ad Est dell'asse stradale principale, come riportato nella Fig. 1.

Scopo delle prospezioni è stato quello di ricavare elementi utili sia alla individuazione delle strutture ipotizzate (tracciato stradale e tracce delle unità abitative), sia la verifica dell'applicabilità dei metodi geofisici selezionati con particolare riferimento alla tecnica di integrazione dei risultati.⁶

3. E. BRIZZOLARI, F. ERNIOLLI, L. ORLANDO, S. PIRO, L. VERSINO, *Integrated geophysical methods in archaeological surveys*, in *Journal of Applied Geophysics* XXIX, 1992, pp. 47-55; S. PIRO, *Integrated geophysical prospecting at Ripa Tetta Neolithic site (Lucera, Foggia-Italy)*, in *Archaeological Prospection* III, 1996, pp. 81-88; F. CAMMARANO, P. MAURIELLO, D. PATELLA, S. PIRO, F. ROSSO, L. VERSINO, *Integration of high-resolution geophysical methods. Detection of shallow depth bodies of archaeological interest*, in *Annali di Geofisica* XLI 3, 1998, pp. 359-368.

4. S. PIRO, *Multimethodological approach using GPR, magnetic and geoelectric methods to detect archaeological structures*, in *Filtering, optimisation and modelling of geophysical data in archaeological prospecting*, *Prospezioni Archeologiche*, vol. speciale 50th anniversary, 2001, pp. 135-148.

5. L. CORDA, F. DE RITA, F. TECCE, *Le piroclastiti del sistema vulcanico Sabatino: il complesso dei tufi stratificati varicolori de 'La Storta'*, in *Bollettino Società Geologica* 1978, pp. 353-366.

6. G. BARTOLONI, F. BOIFANI, S. PIRO, *Prospezioni geofisiche integrate nell'area di Veio, Piazza d'Armi*, in *StEtr* LXII, 1996 (1998), pp. 321-336.

4. 1. Magnetometria differenziale 'fluxgate'

Il metodo magnetometrico differenziale o gradiometrico, si basa sull'impiego di un magnetometro differenziale o gradiometro dove lo spazio tra i sensori è fissato ed è piccolo rispetto alla distanza dalle sorgenti i cui gradienti sono oggetto di misura. L'informazione relativa al gradiente è particolarmente utile nella ricerca di anomalie superficiali poiché consente di rimuovere gli effetti dovuti al campo magnetico regionale locale, e ad esaltare i contributi di corpi posti a piccola profondità, purché esista un contrasto di caratteristiche magnetiche.

Nel corso delle campagne di acquisizione si è fatto uso del gradiometro Fluxgate FM 36 della Geoscan costituito da due sensori posti, con gli assi paralleli, all'interno di un'asta di alluminio ad una distanza fra loro di m. 0,50. I due sensori misurano il valore della componente verticale z a due quote diverse e lo strumento fornisce direttamente il valore della loro differenza (gradiente di z) in relazione al fondo scala prescelto.

L'area m. 130 × m. 90, per ragioni strettamente strumentali è stata suddivisa, nel corso delle diverse campagne di acquisizione, in 78 quadrati di m. 10 di lato, all'interno dei quali sono stati effettuati 21 profili magnetici paralleli fra loro e diretti S-N. In relazione alla profondità ed alle dimensioni delle strutture ipotizzate è stata adottata una tecnica di acquisizione ad alta risoluzione con passo di campionamento delle misure pari a m. 0,5. Il numero di misure all'interno di ogni quadrato ammonta a 400 punti stazione, per un totale complessivo relativo all'area 130 × 90 di 31.200 misure. La sensibilità strumentale adottata è pari a 1 nT m⁻¹ (nanoTesla/metro).

I dati così raccolti sono stati, nel corso delle acquisizioni, trasferiti su PC portatile direttamente sul campo e successivamente elaborati, assemblati e rappresentati.

Nel corso della elaborazione è stata seguita la seguente procedura:

- eliminazione all'interno di ogni quadrato di dimensioni 10 × 10 sia di eventuali valori puntiformi isolati (disturbi ambientali superficiali), che di possibili errori strumentali;
- calcolo dei valori residui operando una interpolazione con funzioni di primo grado con lo scopo di ridurre da un lato gli effetti di stiramento ai bordi di congiunzione tra differenti quadrati, dall'altro i contributi riconducibili a strutture più profonde;
- assemblaggio dei quadrati per ricostruire l'intera area m. 130 × m. 90.⁷

I risultati di queste elaborazioni sono rappresentati in forma di mappa per isolinee dei valori residui del gradiente della componente verticale del CMR e sono riportati in Fig. 2.

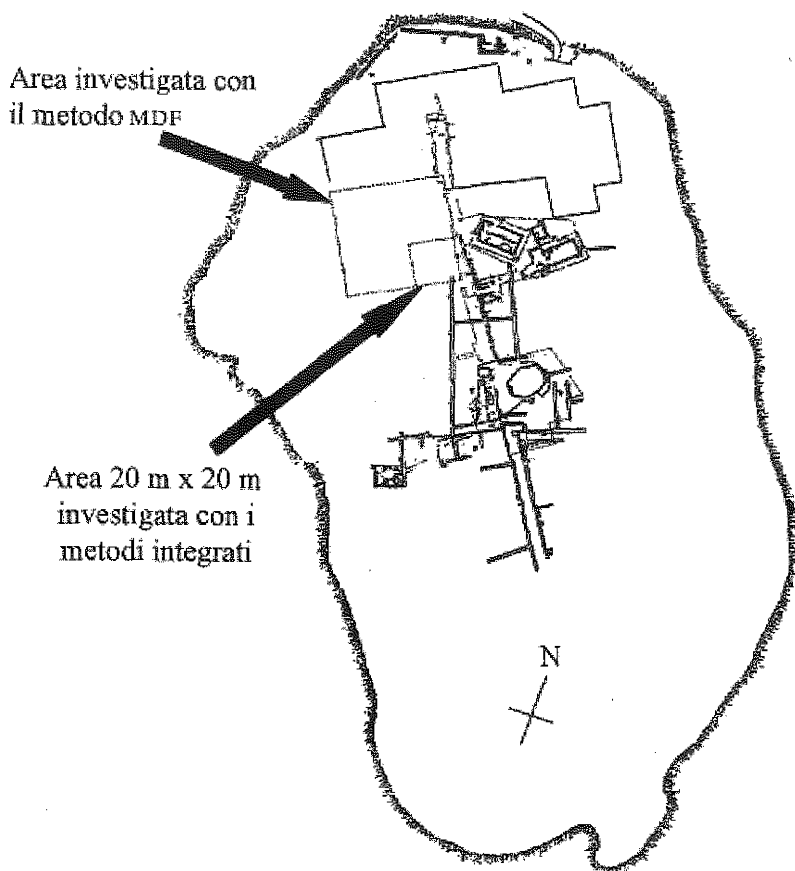


FIG. 1. Veio-località Piazza d'Armi. Schematizzazione, non in scala, del sito ed ubicazione delle aree investigate con i metodi geofisici.

7. PIRO, *Integrated geophysical prospecting at Ripa Tetta*, cit. (nota 3).

L'analisi di questa mappa permette di osservare che l'area, nel suo complesso, risulta caratterizzata da innumerevoli anomalie di varia forma, comprese in un range dei valori da -27 a +21 nT m⁻¹. In particolare si notano delle fasce con diversi gradi di curvatura, caratterizzati da una associazione continua di valori negativi e positivi che fanno presupporre presenti nel sottosuolo delle discontinuità geometriche responsabili della mancata continuità del segnale riferibile al deposito di tufo. Inoltre risulta presente in tutta l'area investigata una disposizione più o meno rettilinea dei dipoli magnetici.

Per verificare il metodo di integrazione, messo a punto nel corso del 1998, si è scelto di utilizzare i dati acquisiti, in modalità ad alta risoluzione, nel quadrato m. 20 × 20, ubicato nella zona meridionale s-B dell'area.

Dall'analisi di questa figura emergono alcune anomalie con andamenti pseudolineari che potrebbero essere associate alla presenza di strutture artificiali (porzioni di muratura) costituite da blocchi di materiale tale da determinare un contrasto di suscettività con l'ambiente circostante.

I dati relativi a quest'area sono stati interpretati ricorrendo al calcolo di anomalie magnetiche teoriche generate da corpi tridimensionali a profondità stabilita e di dimensioni, forma e costituzione fisica determinata.⁸ Per l'area in studio è stata calcolata una anomalia teorica relativa ad un corpo cubico con dimensioni di m. 1 × 1, posto ad una profondità di m. 0,5 e con un contrasto di suscettività pari a $\Delta\chi = 10^3$. I dati di campagna sono stati quindi interpretati impiegando la tecnica della crosscorrelazione, che consiste nell'esaltare il rapporto segnale/rumore utilizzando l'anomalia teorica calcolata come segnale di riferimento. I risultati ottenuti sono mostrati nella mappa di FIG. 3, nella quale sono riportate solo le zone maggiormente indiziate della presenza dei manufatti.

4. 2. Metodo Geoelettrico Dipolare

Il metodo geoelettrico della resistività si basa sulla circolazione di corrente elettrica stazionaria (continua o a bassissima frequenza, affinché siano trascurabili i fenomeni di induzione) nel sottosuolo. I mezzi materiali, infatti, rispondono ad un flusso di corrente in maniera diversa, in base al valore che assume il parametro fisico della resistività.

Definendo DV in volts, I in Amperes e κ in metri, la resistività ρ viene espressa in $[Ohm\ m]$, Ωm . In realtà quella che calcoliamo è una resistività apparente (ρ_a) ossia è un valore di resistività dovuto ai diversi contributi di tutto il sottosuolo che si sentiranno, in maniera più o meno forte, a seconda della distanza dal dispositivo di misura.

La scelta del dispositivo da impiegare a Piazza d'Armi è stata influenzata dalla volontà di ottenere informazioni tridimensionali (3-D). È stato quindi utilizzato il dispositivo dipolare assiale (dipolo-dipolo) che, tramite una particolare procedura di acquisizione, consente di ottenere una griglia regolare di valori di resistività apparente nella sezione verticale sotto il profilo di indagine. Eseguendo più profili paralleli, distanziati in modo regolare, si ottiene una griglia 3-D di valori di ρ_a . Da questo insieme di dati si possono quindi estrarre sia Tomografie Geoelettriche Verticali (TGV), nel piano xz , che Tomografie Geoelettriche Orizzontali (TGO), nel piano xy a varie profondità, che rendono un quadro chiaro della distribuzione di resistività nel sottosuolo.⁹

La strumentazione utilizzata per le misure (Syscal R2-BRGM) ha assemblati sia il sistema energizzante che quello ricevente. Il sistema di ricezione è costituito da un millivoltmetro digitale, atto a misurare la tensione correlata al segnale di corrente inviato; mentre il trasmettitore, alimentato da batteria esterna, invia nel terreno un segnale di corrente regolare. L'apparecchiatura procede ad una rimozione immediata del fattore di disturbo stazionario (generato da fenomeni di polarizzazione spontanea) tramite l'inversione della polarità del flusso di corrente continua nel sottosuolo, cioè grazie all'uso dell'onda quadra di corrente. La distanza dipolare a , per ogni singolo profilo, è stata scelta pari a m. 0,5, mentre la distanza massima n tra i centri dei due dipoli è di m. 27 ed è stata scelta in base alla profondità di investigazione fissata a m. 4. Da sottolineare che tale profondità è, in realtà, una profondità teorica che coinciderebbe con quella reale solo nel caso di un sottosuolo perfettamente omogeneo, dal punto di vista del comportamento elettrico. Si può tuttavia ritenere di non commettere un errore apprezzabile nell'approssimare la profondità teorica a quella reale. Dall'analisi della FIG. 4 è possibile vedere che i valori più alti della resistività apparente, attribuiti alla presenza delle strutture archeologiche, risultano concentrati nel 'range' di profondità compreso tra m. 0,5 e m. 1,5.

8. E. BRIZZOLARI, E. CARDARELLI, S. PIRO, L. VERSINO, *Detection of subsurface magnetic anomalies of archaeological interest. Computation of three-dimensional magnetic anomalies and interpretation using bi-dimensional cross-correlation*, in *Theory and Practice of Applied Geophysics* VII, 1993, pp. 3-16; S. PIRO, A. SAMIR, L. VERSINO, *Position and spatial orientation of magnetic bodies from archaeological magnetic surveys*, in *Annali di Geofisica* XLI 3, 1998, pp. 343-358.

9. CAMMARANO, MAURIELLO, PATELLA, PIRO, ROSSO, VERSINO, *citt.* (nota 3).

Veio - Piazza d'Armi
campagne 1996 -2001

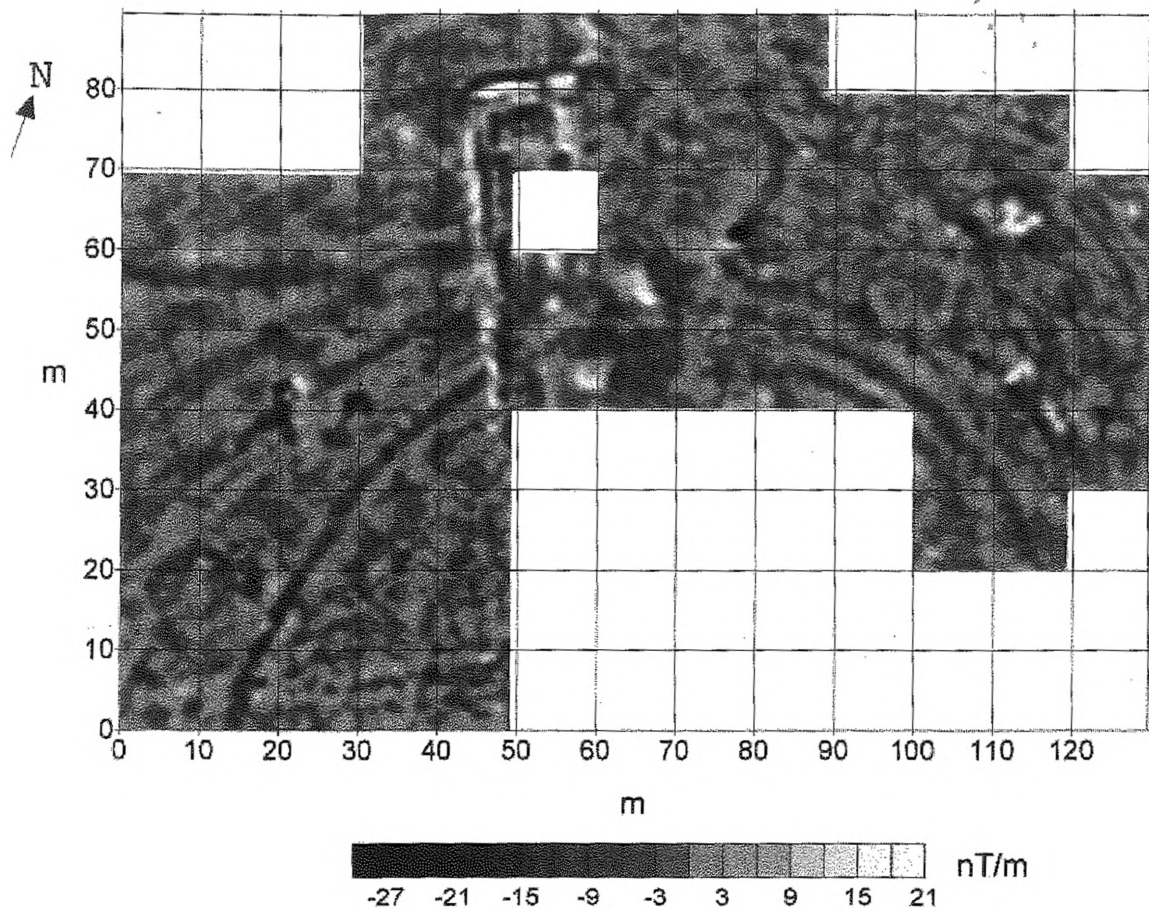


Fig. 2. Veio-Piazza d'Armi. Area 130 × 90, mappa per isolinee dei valori residui del gradiente della componente verticale z del Campo Magnetico Terrestre.

Nell'area 20 × 20 sono stati effettuate 11 pseudosezioni parallele lungo l'asse x a distanza di m. 2 l'una dall'altra. In tal modo si è ottenuta una matrice tridimensionale di valori sperimentali. Da questa è stato possibile ricostruire una serie di elaborati che mettono in evidenza le variazioni laterali di resistività; tali mappe o tomografie geoelettriche orizzontali (TGO) si riferiscono a diverse profondità di osservazione.¹⁰

Nella Fig. 5 *b* è riportata la TGO relativa alla profondità compresa tra m. 0,50 e m. 1,0 che rappresenta l'intervallo di sottosuolo con le variazioni di resistività più alte.

4. 3. Metodo GPR (Ground Penetrating Radar)

Il GPR sta ormai diventando uno dei metodi geofisici di indagine più frequentemente impiegato per la ricerca di strutture archeologiche sepolte. Infatti, se la profondità e le dimensioni dei corpi da individuare sono compatibili con la penetrazione e la propagazione che gli impulsi elettromagnetici sono in grado di raggiungere, l'elevata risoluzione che esso consente rispetto ad altri metodi geofisici lo rende capace di individuare le strutture archeologiche con grande dettaglio.¹¹

¹⁰. F. CAMMARANO, P. MAURIELLO, S. PIRO, *High-resolution geophysical prospecting with integrated methods. The Ancient Acropolis of Veio (Rome, Italy)*, in *Archaeological Prospection IV*, 1997, pp. 157-164.

¹¹. E. FINZI, S. PIRO, *Radar (GPR) methods for historical and archaeological surveys*, in *The Archaeology of Mediterranean Landscape. Non-destructive techniques applied to landscape archaeology IV*, 2000, pp. 125-135; S. PIRO, F. CAMMARANO, *Metodi geofisici non di-*

Veio - Acropoli area 20 × 20 - Crosscorrelazione 2D
Magnetometria differenziale

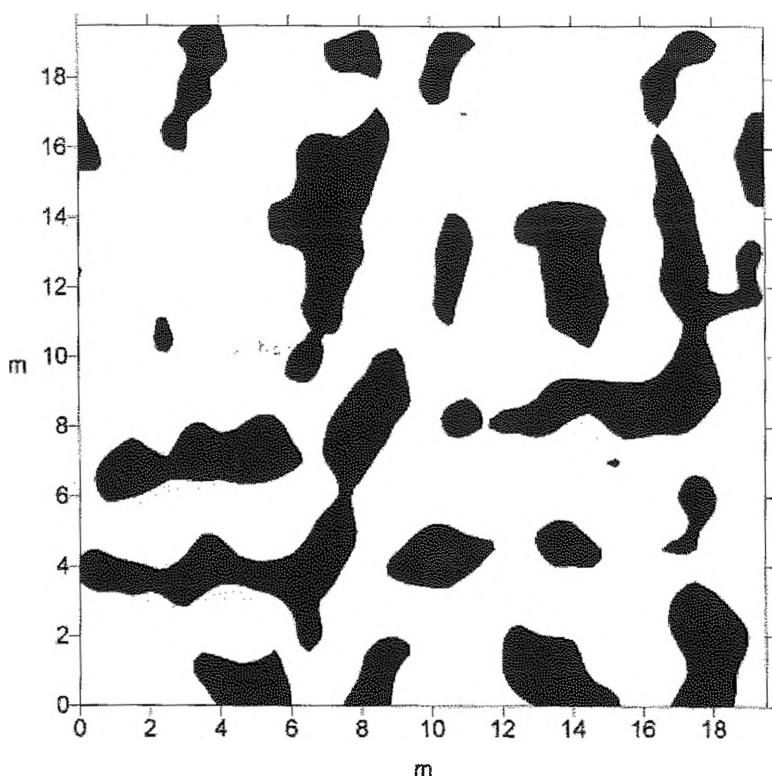


FIG. 3. Veio - Piazza d'Armi. Area 20 × 20, mappa dei valori di cross-correlazione rappresentanti l'ubicazione delle sorgenti di anomalie magnetiche.

profili paralleli. L'interdistanza tra i profili dipende dalle dimensioni ipotizzate dei corpi sepolti. Dopo avere effettuato l'acquisizione in campagna e dopo una elaborazione delle tracce registrate, le anomalie individuate sulle singole sezioni radar, vengono posizionate su una mappa, corrispondente in pianta al percorso del profilo, e correlate con quelle provenienti dai profili adiacenti. Operando in questo modo si ottiene una gestione bidimensionale del dato georadar, mentre l'integrazione con le informazioni laterali avviene solamente in fase di interpretazione.

Per cercare di aumentare il dettaglio dell'informazione ottenibile dalle sezioni radar, si possono sfruttare le informazioni provenienti dai profili paralleli in modo automatico, effettuando successivamente la vera e propria interpretazione. A tale scopo è necessario impostare l'acquisizione in modo da ottenere la distribuzione delle tracce su una maglia regolare. I dati così raccolti vengono memorizzati su computer formando una matrice tridimensionale e successivamente elaborati ricavando sezioni orizzontali a tempi costanti ('time-slices') dei valori assoluti delle ampiezze dei segnali. In questo modo è possibile ottenere una visione planimetrica della zona investigata a diversi tempi (o profondità) correlando le anomalie vicine in modo indipendente dalla soggettività dell'interprete.¹²

Tenendo in considerazione le caratteristiche dell'area oggetto di studio ed i risultati delle prospezioni sopra descritte è stata effettuata una indagine GPR (Georadar) nell'area di dimensioni 20 × 20, FIG. 1. I

L'efficacia del metodo GPR nel caso delle prospezioni archeologiche per l'individuazione di strutture di limitate dimensioni, ubicate a piccola profondità, può essere condizionata dalla presenza di terreni poco resistivi. Dato che molti siti archeologici risultano caratterizzati da coperture di questo tipo, i parametri fisici del terreno abbinati alle limitate dimensioni dei corpi possono determinare, sulle sezioni radar, un basso rapporto segnale/rumore. Per superare in parte questi inconvenienti ed ottenere dati sempre più affidabili sono state di recente sperimentate tecniche di acquisizione tridimensionali con l'intento di ottenere il maggior numero possibile di informazioni sul sottosuolo investigato. Questo insieme di dati permette di realizzare una rappresentazione planimetrica, a tempi costanti ('time-slices'), correlando le ampiezze delle diverse riflessioni registrate.

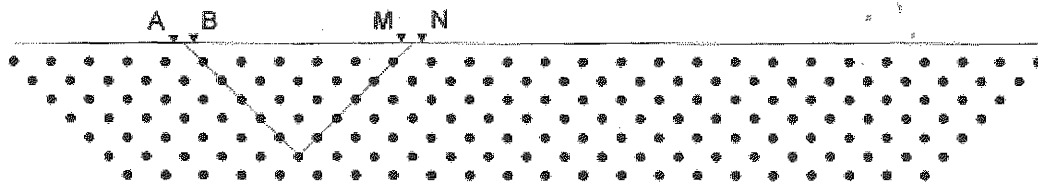
Generalmente durante una campagna di prospezione Georadar a fini archeologici, la zona nella quale si presume siano posizionate le strutture ricercate viene investigata secondo

struttivi per l'individuazione di strutture a piccola profondità. Il caso di M.te Serico (Basilicata), in *Atti del convegno 'Castra ipsa possunt et debent reparari'. Indagini conoscitive e metodologie di restauro delle strutture castellane normanno-sveve*, 1, Roma 1997, pp. 189-204.

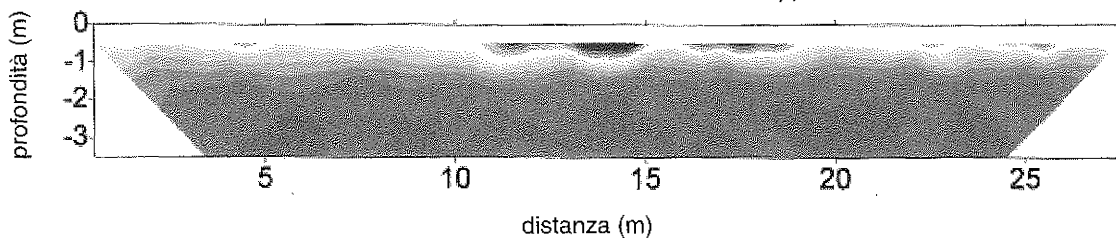
12. S. MALAGODI, L. ORLANDO, S. PIRO, F. ROSSO, *Location of archaeological structures using GPR method: three-dimensional data acquisition and radar signal processing*, in *Archaeological Prospection* III, 1996, pp. 13-23; S. PIRO, D. GOODMAN, Y. NISHIMURA, *The location of Emperor Traiano's Villa (Altopiano di Arcinazzo-Roma) using high-resolution GPR survey*, in *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 43, n. 1-2, 2002, pp. 143-155.

AB = dipolo energizzante

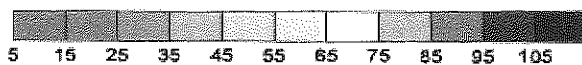
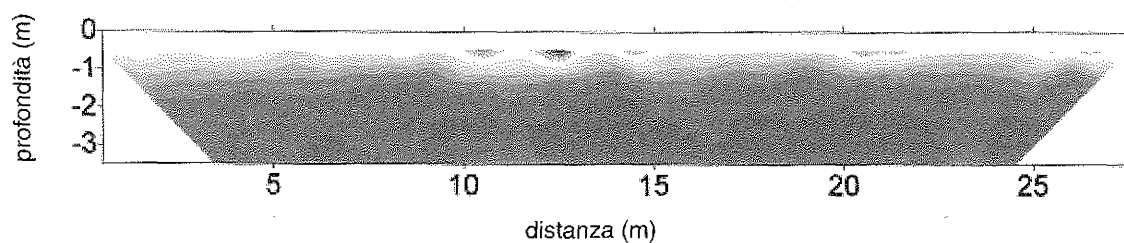
MN = dipolo ricevente



Veio 20-4 GD - Pseudosezione di resistività apparente



Veio 20-3 GD - Pseudosezione di resistività apparente



Resistività apparente (Ohm m)

Fig. 4. Schema di acquisizione per il metodo geoelettrico dipolo-dipolo. Esempio di pseudosezioni ottenute a Piazza d'Armi.

profili Georadar sono stati acquisiti impiegando il Sir System 10 A (GSSI), equipaggiato con una antenna bistatica da 500 MHz ad 'off-set' costante.

Nell'area presa in considerazione sono stati effettuati 41 profili paralleli, lunghi m. 20 e distanti fra loro m. 0,5. Lungo ciascun profilo è presente un 'marker' per i riferimenti geometrici ogni 2 metri. Le tracce radar sono state acquisite in modalità continua e con la seguente configurazione strumentale: fondo scala dei tempi $t = 30$ ns (nanosecondi), 512 campioni per traccia, 16 scansioni/secondo, nessun filtro in acquisizione. Le acquisizioni sono state ripetute con antenna da 900 MHz al fine di ottenere una diversa risoluzione dei segnali radar. La velocità delle onde elettromagnetiche nel terreno è stata preventivamente ottenuta acquisendo alcuni profili georadar in modalità WARR ('Wide Angle Refraction and Reflection'), impiegando due antenne da 100 MHz in configurazione bistatica ad 'off-set' variabile. Il valore medio di velocità ottenuto è pari a $5,5 \text{ cm. ns}^{-1}$.

Dopo l'analisi qualitativa descritta in precedenza, utile per valutare preventivamente il tipo di risposte registrate, i profili sono stati elaborati per ottenere, mediante un opportuno 'stacking' orizzontale le tracce radar posizionate ogni m. 0,20 lungo il profilo. Successivamente, tenendo conto che i profili sono stati acquisiti con una interdistanza di m. 0,5, è stata operata una interpolazione bilineare, ricostruendo una matrice tridimensionale che rappresenta il volume di dati (ampiezze d'onda) nella finestra tempo-

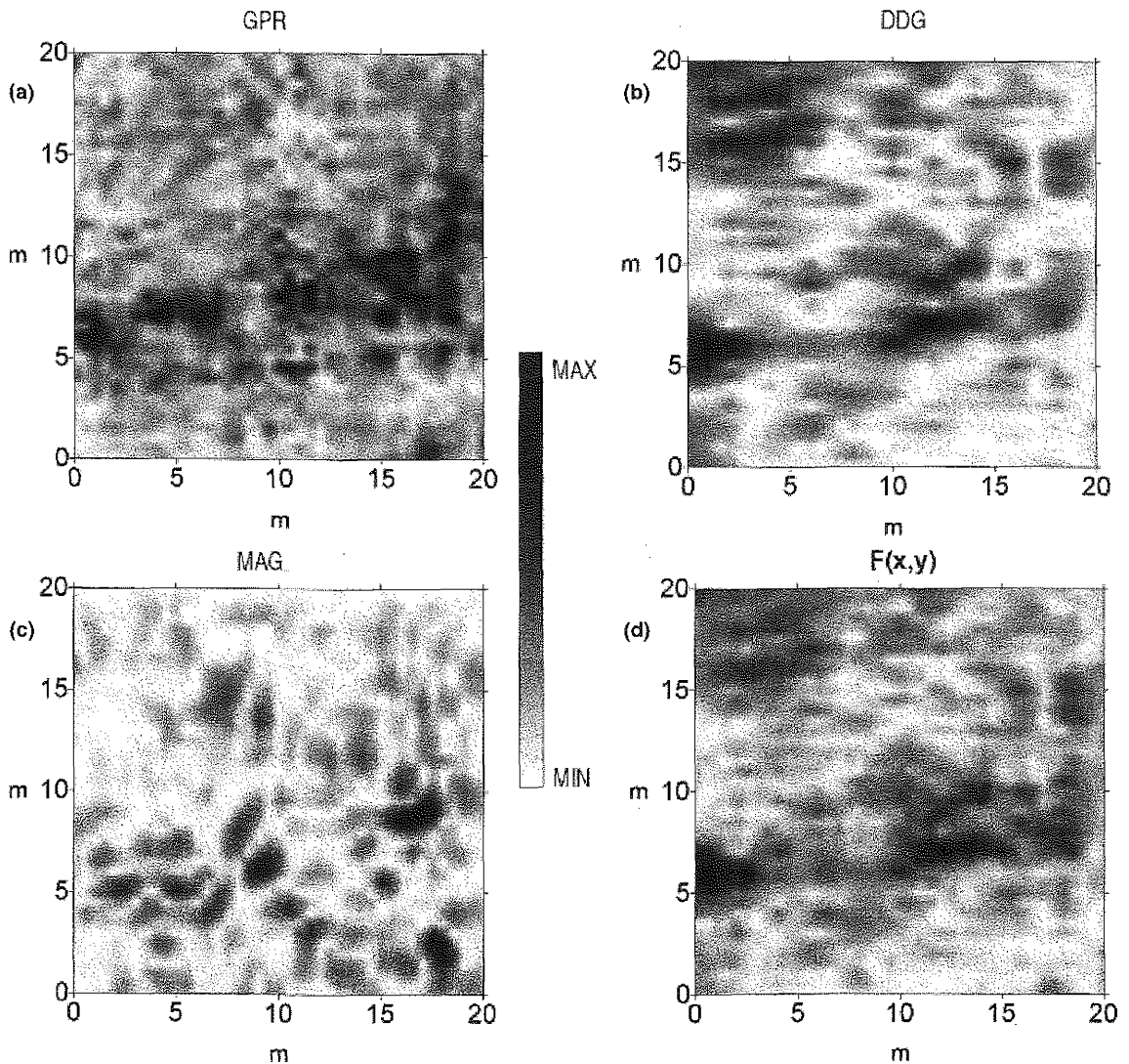


Fig. 5. Veio-Piazza d'Armi. Area 20×20 . a) 'Time-slice' normalizzata relativa ai dati del Georadar; b) Tomografia geoelettrica orizzontale (TGO) normalizzata; c) Crosscorrelazione normalizzata dei dati magnetici; d) L'immagine rappresenta la somma dei contributi di tutti i metodi impiegati.

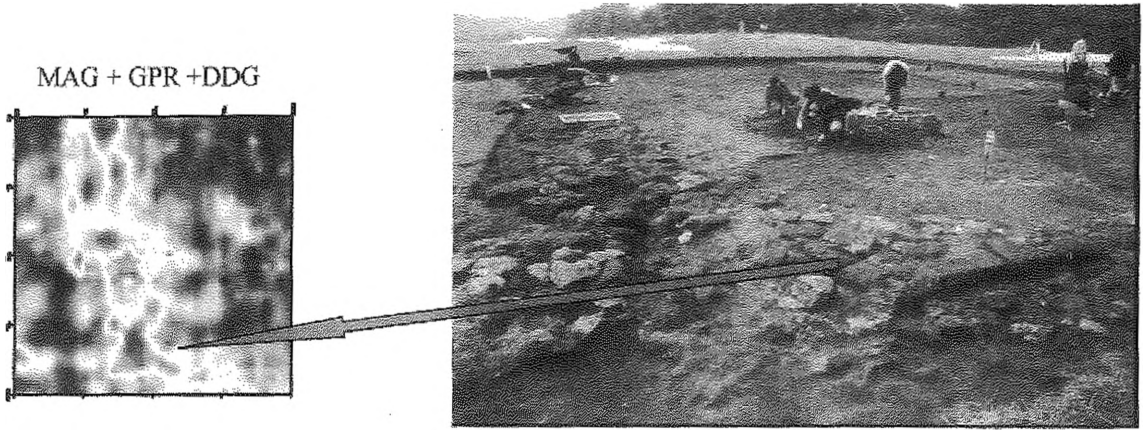


Fig. 6. Veio-Piazza d'Armi. Area 20 x 20, confronto non in scala fra l'immagine *d* di Fig. 5 e la foto relativa allo scavo in corrispondenza dello spigolo tra due muri.

rale adottata. Le 'time-slices' sono state infine calcolate creando delle mappe orizzontali del valore assoluto dell'ampiezza d'onda, le quali vengono raffigurate come immagini, FIG. 5 *a*. Le 'time-slices' sono state calcolate ogni nanosecondo e successivamente mediate nell'intervallo di 4 ns. Questa finestra temporale è stata scelta in modo da essere equivalente a due lunghezze nel mezzo dell'impulso corrispondente all'antenna impiegata.

5. INTEGRAZIONE QUANTITATIVA DEI DATI

Come esposto in precedenza, tutti i metodi geofisici misurano le variazioni di singoli parametri fisici del terreno, pertanto se impiegati da soli non consentono una completa caratterizzazione dei corpi (sorgenti di anomalie) che si intendono individuare. La probabilità di successo delle indagini risulta maggiormente accresciuta se si adotta un approccio multimetodologico, in accordo con la logica di una oggettiva complementarità delle informazioni e di una convergenza globale, delle informazioni multiparametriche, orientate alla costruzione di una immagine ad alta risoluzione delle strutture sommerse.

A tale fine, per l'analisi integrata dei dati acquisiti, è stato impiegato il seguente approccio. All'interno di ogni set di misure, definito come funzione di distribuzione dei dati sperimentali, è stato scelto un livello di riferimento rispetto al quale delineare le anomalie ed è stata operata la loro normalizzazione. Questa operazione fa sì che i dati sperimentali risultino privati della dimensionalità fisica e la loro variabilità venga ricondotta all'interno dell'intervallo compreso tra 0 e 1. Lo stesso concetto si estende al risultato della cross-correlazione operato sui dati magnetici, che di per sé rappresenta già una mappa di distribuzione della occorrenza o meno della sorgente di anomalie. Tutte le mappe normalizzate, relative ai diversi metodi geofisici impiegati, possono pertanto essere considerate come distribuzione spaziale della occorrenza della sorgente di anomalia.

Tenendo in considerazione che per ogni singolo metodo avremo una mappa di occorrenza che rappresenta l'influenza determinata dalla sorgente sullo specifico parametro fisico considerato, la complementarità delle informazioni, cioè l'occorrenza totale, si otterrà sommando insieme tutte le singole mappe normalizzate.¹³

Nella FIG. 5 *d* è riportata questa immagine ottenuta dalla combinazione dei contributi dei singoli metodi, magnetometrico, georadar e geoelettrico. Questa porzione di terreno risulta caratterizzata dalla presenza di porzioni di mura, perpendicolari fra loro, adiacenti all'asse viario principale, con blocchi disposti in modo disomogeneo; aspetto questo particolarmente evidente sia sulla 'time-slice' del georadar che sulla mappa magnetica.

L'analisi di questa figura, dopo il confronto con quelle relative ai singoli metodi (FIGG. 3 e 5), permette di verificare l'effettivo aumento della risoluzione geometrica dei corpi che hanno generato le anomalie, della loro distribuzione planimetrica e della loro profondità.

13. S. PIRO, P. MAURIELLO, F. CAMMARANO, *Quantitative integration of geophysical methods for archaeological prospection*, in *Archaeological Prospection* VII, 2000, pp. 203-213.

6. CONCLUSIONI

L'analisi della FIG. 5 *d* mostra una forte corrispondenza tra i dati dei tre diversi metodi impiegati. Nel caso di Piazza d'Armi l'integrazione delle risposte di un metodo passivo, che studia le variazioni di un campo potenziale stazionario (metodo magnetico), con le 'time-slices' del Georadar, che rispecchiano la forma della struttura individuata e con le tomografie geoelettriche orizzontali (TGO), che rappresentano anch'esse la sagoma della struttura, è stato possibile ricostruire in modo netto la geometria dei corpi presenti nel sottosuolo.

Lo scavo archeologico effettuato in questa porzione dell'area a cura del gruppo della professoressa Gilda Bartoloni e della dottoressa Francesca Boitani, ha messo in luce strutture murarie in blocchi di tufo e porzioni di strade perpendicolari all'asse viario principale, i cui andamenti planimetrici coincidono con la disposizione e la geometria delle strutture individuate, FIG. 6.

Questa esperienza di studio ha contribuito a verificare che l'approfondimento delle tecniche di elaborazione e rappresentazione attraverso l'integrazione di differenti metodi geofisici, permette di definire meglio la posizione, l'estensione, la profondità, lo spessore e le caratteristiche fisiche di ogni corpo anomalo all'interno del contesto geologico che lo contiene.