
Maxwell tra archeologia ed investigazioni forensi

Carlotta Ferrara

Dipartimento di Matematica e Fisica, Università di Roma

Pier Matteo Barone

Archaeology and Classics Program, The American University of Rome

Questo contributo si propone da un lato di introdurre uno dei principali metodi di indagine geofisica non distruttiva, il georadar, dall'altro di delineare le potenzialità che possono derivare dal suo impiego per scoprire quali misteri, antichi e moderni, si celano nel sottosuolo.

Introduzione

Nel corso degli anni, lo studio delle metodologie di diagnostica e di conservazione nel campo dei beni culturali ha permesso di applicare materie prettamente scientifiche a materie di norma considerate umanistiche. Le sperimentazioni maturate hanno portato alla consapevolezza di quanto siano necessarie le basi scientifiche per la risoluzione di problemi conservativi e per le indagini preventive su materiali di elevato pregio storico-artistico-archeologico. Il patrimonio culturale, in genere, sia esso artistico o archeologico, è soggetto all'inesorabile legge del degrado che lo avvia costantemente verso un punto di non ritorno, o meglio verso la perdita della leggibilità del manufatto e verso, quindi, la non fruibilità dell'opera stessa. Nello specifico i beni archeologici giacciono nel sottosuolo per molti anni grazie ad un sottile equilibrio che si instaura tra l'opera e il terreno che la preserva. Le ricognizioni

di scavo nascono empiricamente dall'impulso di trovare testimonianze della presenza di persone, città o popoli antichi, e dalla voglia di studiarne il comportamento attraverso la lettura dei resti archeologici. La ricerca su campo è l'espressione dell'archeologia ed è il risultato di un *"romantico entusiasmo per un idoleggiato e sempre un po' misterioso passato, al quale accostarsi con l'avventura dell'esplorazione"* [1]. Fin dal Rinascimento non esisteva una metodologia di scavo delineata e organizzata per ottenere il miglior risultato di catalogazione e di studio; i reperti venivano spesso riusati e conservati al di fuori del loro contesto storico. Nei primi decenni del XIX secolo la scienza iniziò ad avere consapevolezza del valore dell'antichità in quanto tale e, proprio per questo valore, definì il metodo di scavo stratigrafico dominato da un principio semplice ed essenziale: nella struttura stratigrafica è racchiusa la quarta dimensione, il tempo. La sovrapposizione degli strati permette di leggere il trascorrere del tempo giacché propone una successione ordinata delle vicende di un sito che ne costituisce la storia. Il pioniere di questo metodo fu Pitt Rivers, un generale dell'esercito inglese che si dedicò alla ricerca archeologica tramite la ricognizione e la documentazione grafica e fotografica, ma la vera codifica dei principi dello scavo arrivò da parte di Edward Harris [2]. L'indagine stratigrafica ha rappresentato per l'archeologia la conquista più

importante in quanto ha reso possibile ricostruire la storia dell'uomo attraverso l'osservazione delle testimonianze nel loro contesto di deposizione [3].

La stratigrafia archeologica sostanzialmente segue il principio scientifico-geologico di formazione delle rocce sedimentarie dove gli agenti naturali, quali erosione e deposizione, determinano la sovrapposizione di vari elementi su rocce e terreni a ciclo continuo, così come l'uomo ha fatto tramite interventi artificiali sull'ambiente [4].

Ma cosa determina la necessità di iniziare un'indagine archeologica? Per un archeologo è essenziale impostare uno scavo in base alle varie fonti storiche sulla zona da investigare, ossia individuare un presunto luogo tramite lo studio critico e incrociato di tutte le informazioni rilevabili sul luogo stesso, siano esse storiche o legate a rinvenimenti più o meno casuali; ciò, tuttavia, richiede tempo e spesso comporta un margine d'errore piuttosto ampio. Da molti anni ormai, le ricognizioni preliminari allo scavo, sono affiancate dall'uso di tecnologie specifiche quali prospezioni geofisiche ed analisi di fotografie aeree e satellitari per permettere una valutazione preventiva di un sito con maggior precisione.

L'interesse principale, nel campo degli studi combinati tra geofisica e archeologia, si è rivolto, in particolare, alla metodologia geofisica nota come georadar (o, con il termine anglofono, Ground Penetrating Probing Radar - GPR). Questa tecnologia si è ormai affermata come una delle migliori e più versatili applicazioni geofisiche non solo in campo archeologico, ma anche in quello della diagnostica dei beni culturali. Di seguito, dopo una parte teorica, illustreremo le potenzialità di tale tecnica riportando alcune applicazioni in siti archeologici e non solo.

Maxwell e il georadar

La teoria che sta alla base del georadar si sviluppa già nella seconda metà del XIX secolo: sono Maxwell e Hertz che ottengono le equazioni che descrivono la propagazione delle onde elettromagnetiche in un mezzo. La mancanza di supporti tecnologici adeguati ne limita lo sviluppo fino al principio del XX secolo quando si effettuano i primi esperimenti di questo tipo. Come metodo

di prospezione del terreno bisogna aspettare la metà del suddetto secolo, quando i primi esperimenti vengono realizzati con il ghiaccio polare. Durante la seconda parte dello stesso secolo, poi, con l'inarrestabile sviluppo dell'informatica e dei computer, il georadar ha i suoi anni di maggiore sviluppo ed ormai sono innumerevoli le ricerche che ogni anno si effettuano con questo strumento [5].

Le quattro equazioni di Maxwell (1867), che mettono in relazione i vettori di campo elettrico e magnetico con le proprie sorgenti, vengono riportate con le seguenti equazioni

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{M} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (4)$$

Le cosiddette equazioni costitutive mettono in relazione le intensità dei campi elettrici e magnetici, \mathbf{E} e \mathbf{H} , con i vettori di spostamento elettrico ed induzione magnetica \mathbf{D} e \mathbf{B} , rispettivamente; \mathbf{J} e \mathbf{M} , sono i vettori di densità di corrente elettrica e magnetica, ρ è la densità di carica elettrica, e t è il tempo.

In un mezzo omogeneo ed isotropo, le equazioni costitutive assumono un'espressione semplice

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (8)$$

mettendo in relazione queste grandezze mediante i quattro parametri elettromagnetici che descrivono le proprietà elettromagnetiche dei materiali e che possono caratterizzare un suolo o un terreno: la costante dielettrica ϵ , la conduttività σ , la permeabilità magnetica μ e la suscettività magnetica χ (è necessario comunque notare che alcune tra loro sono inter-relazionate).

Tenendo conto che, nella maggior parte dei terreni, i fenomeni di polarizzazione dominano sui fenomeni di conduzione elettrica, e che nella realtà è insolito trovare suoli con caratteristiche magnetiche, possiamo concentrare la nostra at-

tenzione solo sul parametro ϵ , il quale descrive la capacità di un materiale di polarizzarsi elettricamente in presenza di un campo elettrico esterno [6].

Tali proprietà sono intrinseche del metodo georadar che opera a frequenze che vanno dai pochi MHz ad alcuni GHz e la profondità di penetrazione dipende dalle proprietà elettriche del terreno. Esso produce un fascio di onde elettromagnetiche che viaggia attraverso il terreno ad una velocità

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \sim \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

che varia a seconda delle proprietà del terreno e della quantità di acqua presente [7]. L'ultima espressione della (9), nella quale appaiono, c , la velocità della luce ed ϵ_r , la costante dielettrica del materiale, è valida nel caso di materiali che siano buoni dielettrici e le proprietà magnetiche siano vicine a quelle del vuoto ($\mu = \mu_0$), ovvero la propagazione avviene essenzialmente senza dispersione.

La tecnica su cui si basa il georadar consiste nell'inviare impulsi elettromagnetici di breve durata (1-10 ns) ad alta frequenza (MHz o GHz) nel mezzo investigato. Immettendo delle onde elettromagnetiche in un mezzo non omogeneo si avranno i noti effetti di riflessione e rifrazione conosciuti in ottica. Ad ogni variazione di indice di rifrazione

$$n(\lambda) = \frac{c}{v(\lambda)} \quad (10)$$

legato alla lunghezza d'onda λ della radiazione, si avrà una riflessione parziale delle onde elettromagnetiche. Queste possono essere intercettate ed analizzate tramite apposite apparecchiature, di cui il georadar è fornito; esso infatti permette di acquisire delle forme d'onda, o tracce, sulle quali si può individuare la posizione sulla scala temporale (ascisse) e l'intensità (ordinate) degli impulsi riflessi o rifratti [8].

La posizione sulla scala temporale di un picco determina la distanza tra le antenne e l'oggetto che produce la diffusione. Nell'ipotesi che il mezzo investigato sia omogeneo, la velocità di propagazione v può essere considerata costante, cosicché la profondità del bersaglio viene calcolata come

$$P = \frac{t_b v}{2} \quad (11)$$

dove t_b è il tempo di andata ritorno del segnale

(TWT - Two Way Travel time). L'intensità della riflessione sarà influenzata sia dall'attenuazione che subiscono le onde, sia dal coefficiente di riflessione \mathcal{R} , che dipende principalmente dal contrasto tra le diverse proprietà dielettriche del un mezzo di propagazione, il terreno e l'oggetto investigato, oppure lo strato con proprietà fisiche diverse [9].

La strumentazione utilizzata per effettuare misure georadar è costituita da un'unità di controllo, che viene in genere collegata a due o più antenne. Essa contiene sia l'elettronica che genera l'impulso elettrico, che viene trasformato in oscillazione elettromagnetica nell'antenna trasmittente (Tx), sia la strumentazione atta a campionare e conservare i dati provenienti dall'antenna ricevente (Rx). Questo apparato viene spostato lungo la superficie del mezzo da indagare (che sia un terreno, un pavimento, un blocco di roccia, una parete, ecc.), lungo delle linee rette dette profili. Dalle misure si otterrà quindi un cosiddetto radargramma, ossia una ricostruzione bidimensionale del mezzo come se fosse visto a diverse radiofrequenze, frutto dell'involuppo delle singole tracce acquisite lungo il profilo che si sta investigando.

Su ogni traccia saranno individuabili le riflessioni che subisce il segnale, che possono essere dovute sia alla diversa stratificazione presente nel suolo, sia ad oggetti ben definiti. In entrambi i casi si ha una variazione dei parametri elettromagnetici, ma le riflessioni prodotte saranno diverse. Nel primo caso si otterrà un riflettore sub-orizzontale, mentre nel secondo si visualizzerà un'iperbole di riflessione. Questo è dovuto al fatto che man mano che il radar viene spostato orizzontalmente, il tempo di andata e ritorno del segnale diffuso dallo stesso riflettore ha un andamento prima decrescente, fino al vertice, quando le antenne sono sopra il bersaglio, e poi crescente (Figura 1).

Se si ipotizza che la distanza tra georadar ed oggetto diffusore sia molto più grande delle dimensioni di quest'ultimo, in modo da poter essere considerato puntiforme, sul piano (x, t) i punti dove si individua la riflessione seguiranno l'equazione

$$t = \frac{\sqrt{(x_b - x)^2 + P^2}}{v} \quad (12)$$

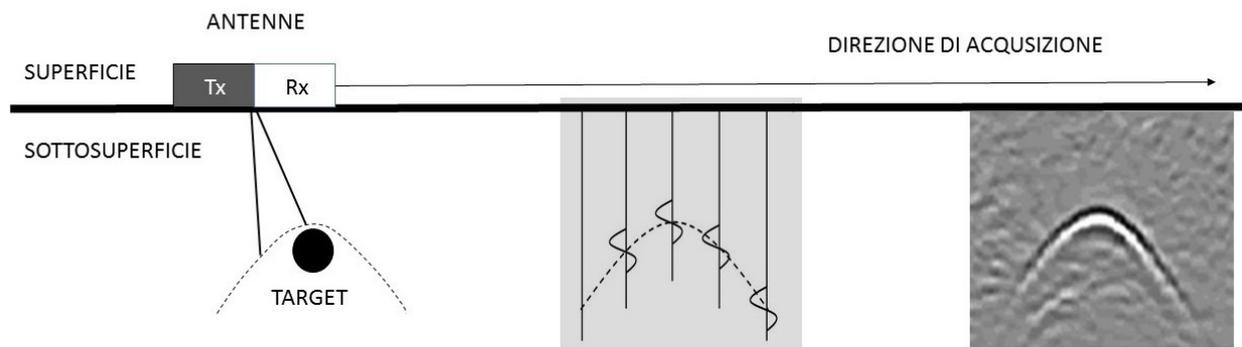


Figura 1: L'iperbole di riflessione, visibile in questa figura, deriva dalla riflessione del bersaglio intercettato. È da notare come solo l'apice dell'iperbole individui la corretta posizione dell'oggetto sepolto.

ossia

$$\frac{t^2}{P^2} - \frac{(x_b - x)^2}{P^2} = 1 \quad (13)$$

dove, come definito nelle precedenti equazioni, P è la profondità a cui è posto l'oggetto, v è la velocità di propagazione, x_b la posizione orizzontale del bersaglio sul profilo. Come si può vedere dalla seconda equazione, si ottiene un'iperbole con vertice in (x_b, t_b) , con $t_b = P/v$.

La maggiore differenza del GPR con i comuni radar che si usano in atmosfera è quella di avere una o più antenne direzionali: esse difatti sono schermate in modo tale da dare una direzione privilegiata alle onde emesse, ovvero quella del terreno. Tra le caratteristiche costruttive inoltre si deve anche tenere conto degli effetti di disturbo dovute alla vicinanza della sorgente delle onde EM con l'interfaccia aria e terreno [10].

Le antenne che si adoperano hanno delle peculiarità che le distingue in base all'utilizzo che se ne deve fare. Si possono avere antenne sia in modalità monostatica che bistatica. Nella prima l'antenna incorpora Tx ed Rx in un'unica struttura, mentre nella modalità bistatica si hanno trasmettente e ricevente fisicamente separate. Con la prima configurazione si indaga di solito su aree più o meno vaste per capire la conformazione del sottosuolo, mentre la seconda, che ha una profondità minima di indagine più alta, viene utilizzata per avere informazioni più dettagliate su bersagli non superficiali. La modalità bistatica, inoltre, permette di indagare una singola zona sia con una semplice scansione (single folding) sia scansionando uno stesso punto da angolazioni diverse (multi folding). Nel secondo caso si

possono muovere le antenne Tx ed Rx della stessa distanza, a partire da un punto centrale (Common Mid-Point), oppure si può muovere solo la ricevente (Wide Angle Reflection and Refraction) [8].

La profondità e la risoluzione verticale che si possono ottenere sono direttamente dipendenti dalla frequenza a cui opera l'antenna. Ad una maggiore frequenza corrisponde una migliore risoluzione spaziale, ma anche una maggiore attenuazione delle onde, e quindi una profondità di indagine minore. La frequenza dipende dalle dimensioni dell'antenna da cui è stato generato l'impulso, e non è in ogni caso univoca. Lo spettro in frequenza degli impulsi generati è progettato per avere una forma gaussiana, centrata attorno alla frequenza centrale o dominante, ed una larghezza di banda il cui valore è confrontabile con quello della frequenza centrale.

La rappresentazione grafica dei dati georadar è un passo fondamentale per la comprensione e l'interpretazione dei risultati. La relazione finale di ogni indagine dovrebbe presentare i dati in maniera comprensibile sia per gli esperti del settore che per committenti non esperti, al fine di produrre interpretazioni solide e di facile apprendimento per tutti. Nella maggior parte dei casi, i report riportano radargrammi in differenti scale di colori ed i moderni software permettono una risoluzione visiva ed una definizione molto alte. Inoltre, se le acquisizioni hanno previsto profili paralleli all'interno di un griglia x,y , si possono ottenere e, quindi, visualizzare mappe (ovvero planimetrie) della zona investigata che rappresentano, a varie profondità, non solo geo-

ANTENNA 500 MHz

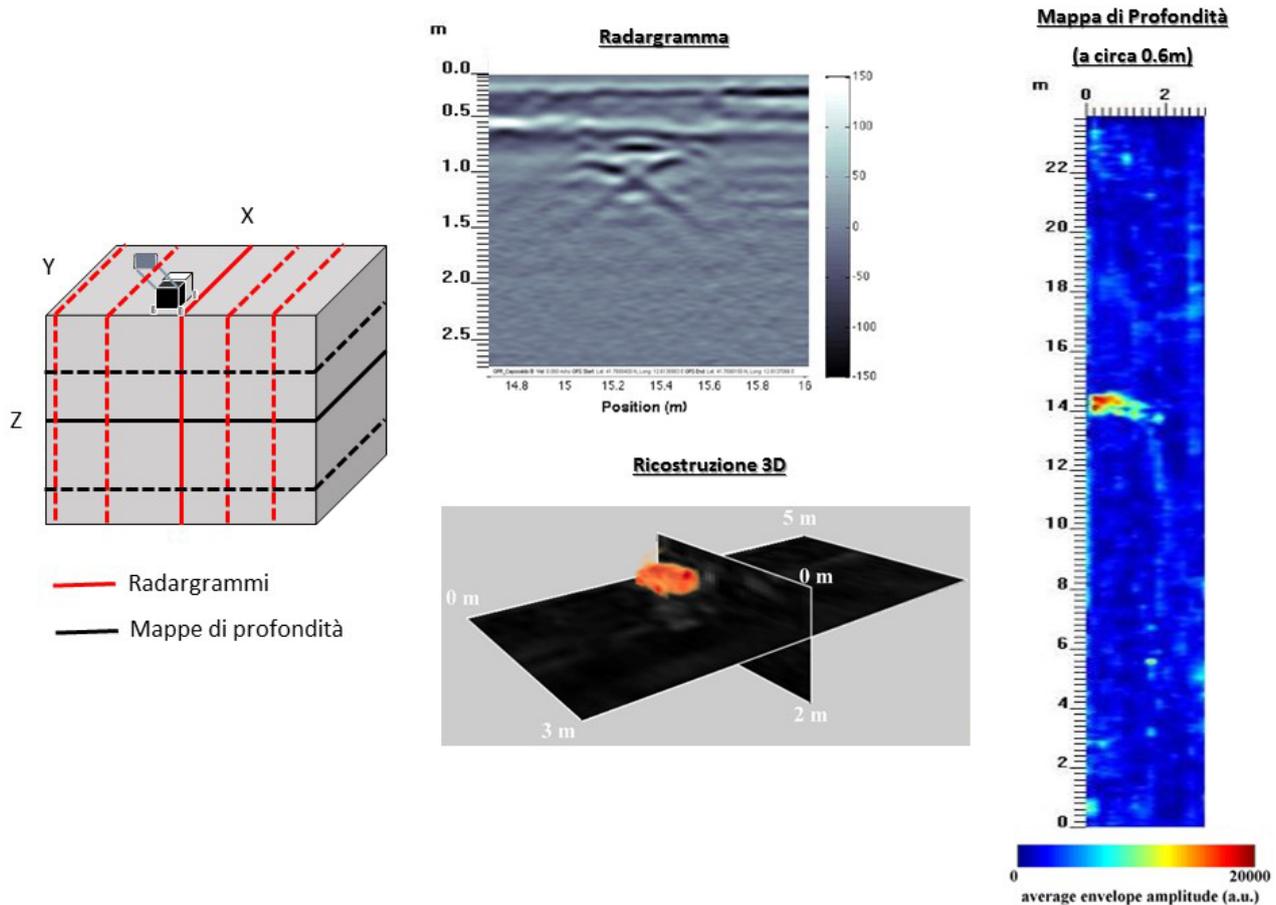


Figura 2: La schematizzazione del volume di dati che acquisisce nel sottosuolo il georadar (a sinistra) con le tre tipiche rappresentazioni di una anomalia individuata: il radargramma (in alto), la mappa di profondità (a destra) e la ricostruzione 3D (in basso)

metrie degli oggetti sepolti ma anche le dimensioni, utilizzando normalmente un algoritmo di involuppo medio, noto anche come average envelope amplitude. Infine, se la qualità dei dati lo consente, è possibile produrre una rappresentazione dei dati in 3D. Questa rappresentazione è definita anche *pseudo* in quanto è il risultato di un modello di falsa sezione prospettica (o isosuperficie, *isosurface*), in cui viene stabilito un valore di soglia sulla base dell'algoritmo di involuppo medio. Tale metodo di elaborazione dei dati georadar è tenuto in grande considerazione grazie al fatto che permette di poter interpretare meglio le relazioni spaziali tra le anomalie (Figura 2) [11].

Quando il georadar risolve enigmi antichi e moderni

Il georadar è un metodo che ben si adatta a diversi tipi di indagine in molteplici settori sia per la sua versatilità, sia per la sua maneggevolezza che per la sua rapidità di esecuzione. Tra le varie applicazioni del GPR, si riscontra l'utilizzo in molteplici campi dell'ingegneria civile, della geologia, delle scienze ambientali, forensi, agricole e forestali [12].

Lo sviluppo negli ultimi decenni di tale tecnica ha permesso un uso proficuo anche in ambito di beni culturali con particolare riguardo all'archeologia, indagini preventive, pianificazioni di scavi, ecc., ed alla diagnostica di edifici antichi per il miglioramento della loro protezione, conservazione e monitoraggio. Inoltre, il vantaggio di poter ottenere una risposta in termini di immagine del sottosuolo in tempo reale è la chiave



Figura 3: A sinistra è possibile notare come il radargramma e la mappa mettano ben in evidenza la presenza di un muro ad angolo retto alla profondità di circa 1.25 m (evidenziato in giallo); in alto, la posizione del muro (giallo tratteggiato) sulla superficie di acquisizione.

vincente in questo determinato ambito [13].

Per questo sono numerosi gli obiettivi archeologici sepolti che possono essere individuati dal georadar. I tre più importanti e rilevanti sono sicuramente le strutture murarie, le strade e le sepolture.

Le strutture murarie, sono evidentemente cruciali se si ricercano insediamenti e si vuole ricostruire la frequentazione di un paesaggio antico. La capacità risolutiva del GPR permette non solo di riportare in pianta con corretta orientazione tali strutture (siano esse parzialmente o interamente conservate), ma anche, e soprattutto, ricostruire, grazie alle mappe a differenti profondità, una cronologia relativa delle diverse unità murarie che si sono eventualmente succedute in un'area. In Figura 3, per esempio, è evidente come tale metodologia geofisica definisca con estrema precisione geometria e localizzazione nello spazio di un muro ad angolo retto di una chiesa paleocristiana (V secolo d.C. circa).

La seconda tipologia archeologica sepolta molto studiata nelle investigazioni georadar è l'individuazione delle antiche strade. In particolare, le strade basolate costruite dai Romani avevano una struttura ben precisa e pressoché comune. Elementi fondamentali erano i cosiddetti umbones

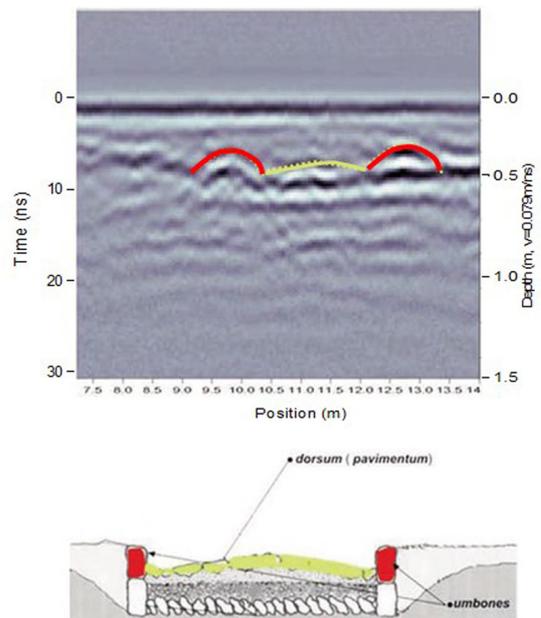


Figura 4: Le anomalie visibili sul radargramma (in alto) mostrano, ad una profondità di circa 0.35m, come le due iperboli (in rosso) ed il riflettore orizzontale (in giallo) possano essere facilmente correlate agli umbones (in rosso) ed al dorsum (in giallo) tipici della struttura della strada basolata romana (in basso).

ed il dorsum (o pavimentum), essi erano costituiti da basoli posti rispettivamente in verticale ed orizzontale. Tale conformazione, una volta obliterata dal tempo e dal suolo, risulta di facile determinazione mediante indagine GPR. Infatti, come si evince in Figura 4, il radargramma ci dà una serie di informazioni non solo in merito all'orientamento del profilo perpendicolarmente alla strada sepolta, ma anche, e soprattutto, alle caratteristiche intrinseche dello stesso bersaglio sepolto che ci permettono di interpretarlo come una strada romana. Difatti, i due eventi iperbolici presenti a destra e a sinistra della riflessione sub-orizzontale sono chiaramente riconducibili agli umbones ed al dorsum della strada sepolta. Ciò che, poi, rende la prospezione georadar molto peculiare è la possibilità di avere un'ottima risoluzione ed una elevata precisione nel determinare la profondità del bersaglio individuato nel sottosuolo.

Lo studio delle capacità del georadar, non solo di individuare ma anche di definire in maniera univoca la presenza di sepolture non ancora riportate alla luce, è un altro aspetto da non sottovalutare in ambito archeologico, ma non solo.

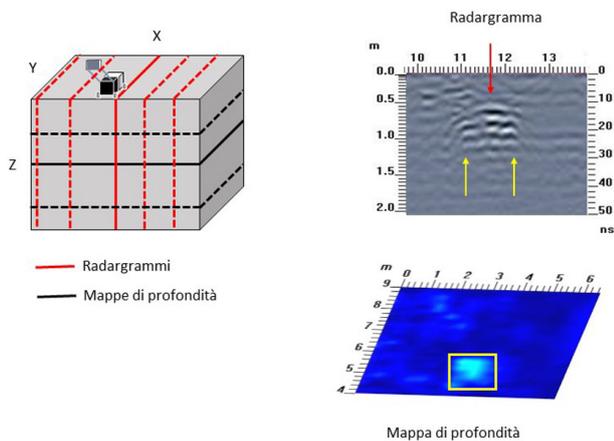


Figura 5: Il volume di dati 3D prodotti dall'acquisizione di radargrammi paralleli (e relative mappe di profondità) permette di visualizzare, in questo caso, i resti di una sepoltura romana a circa 0.6 m di profondità. Nel radargramma, in particolare, si può vedere come le frecce gialle indichino iperboli legate al taglio effettuato nel suolo per ricavare la sepoltura; mentre la freccia rossa indica il riempimento successivo al taglio e con caratteristiche chimico-fisiche diverse dal terreno circostante.

Come la Figura 3, anche la Figura 5 mostra come radargrammi e mappe di profondità formano un volume di dati 3D (cfr. Figura 2) che può essere suddiviso ed analizzato anche in 2D. In particolare, il radargramma mette in evidenza l'esistenza nel sottosuolo di un'anomalia perpendicolare al piano di acquisizione dati, che presenta due elementi caratteristici di ogni sepoltura: il taglio della fossa ed il riempimento. Il taglio è un'operazione che una volta effettuata rimane indelebile nel tempo poiché va ad alterare in maniera decisiva e permanente la stratigrafia e le caratteristiche chimico-fisiche del terreno. Il riempimento, dal canto suo, svolge un ruolo fondamentale, in quanto, porta con sé una serie di informazioni che vanno dalla diversa compattazione del suolo alla presenza di materiali organici e inorganici all'interno.

È importante sottolineare come la capacità risolutiva di individuare sepolture in ambito archeologico abbia ancora più importanza se viene traslata in un contesto di indagini forensi moderne. Le investigazioni scientifiche sulla scena del crimine, infatti, hanno portato alla ribalta le doti del georadar per la localizzazione e l'individuazione di persone scomparse e sepolte nel terreno, e non solo. Recentemente, infatti, tale metodo è

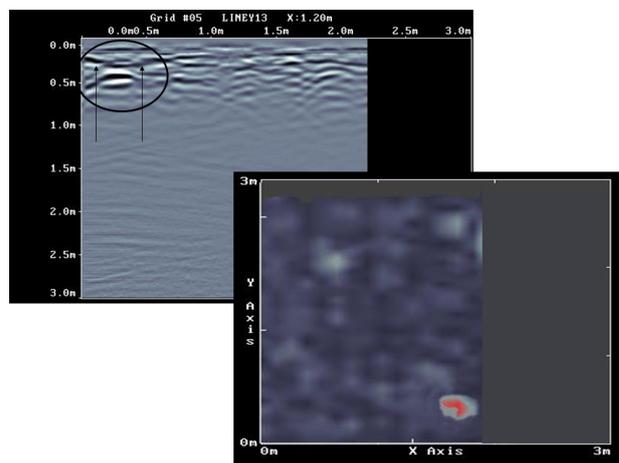


Figura 6: Il radargramma (a sinistra) e la mappa di profondità (a destra) mostrano chiaramente come il georadar abbia individuato la presenza di una pistola sepolta a circa 0.40 m di profondità nel suolo. In particolare, se il radargramma mostra sia le anomalie esterne legate al taglio nel suolo per effettuare lo scavo (evidenziato dalle frecce), sia il riempimento costituito dal terreno di riporto e dalla pistola, la mappa di profondità, invece, permette una buona approssimazione della forma della pistola stessa.

stato testato per capire con quanta accuratezza potesse risolvere un oggetto, anche di piccole dimensioni, sepolto nel sottosuolo [14]. La Figura 6 mostra i risultati a seguito di un'indagine di investigazione scientifica alla ricerca di una pistola oblitterata clandestinamente a poca profondità nel terreno. Si nota come, nonostante l'oggetto fosse di piccole dimensioni, la risposta finale in termini di radargramma e mappa di profondità, permetta non solo la chiara localizzazione dell'oggetto, ma anche la sua geometria.

Sia che il georadar venga utilizzato per scopi culturali che per scopi legali, sicuramente è importante sottolineare come solo una corretta, esauriente ed esaustiva conoscenza della metodologia porti ad un'interpretazione ragionevole di ciò che si trova nel sottosuolo, svelando misteri ed enigmi, antichi e moderni, in tempo reale ed in maniera assolutamente non invasiva, non distruttiva e soprattutto rapida ed efficiente.

In conclusione, di certo Maxwell non si sarebbe mai aspettato che i suoi sforzi nello studio dell'elettromagnetismo avrebbero portato a risvolti così rilevanti e disparati. Ed è certamente grazie a lui che, oggi, uno strumento come il georadar permette un ausilio determinante nel conoscere meglio il nostro passato, antico e recente.



- [1] RANUCCIO BIANCHI BANDINELLI: *Introduzione all'archeologia*. Laterza, Bari (1976).
- [2] EDWARD. C. HARRIS: *Principi di stratigrafia archeologica*. Carocci, Roma (1983).
- [3] ANDREA CARANDINI: *Storie della Terra*. Laterza, Bari (1981).
- [4] PAUL GOLDBERG, RICHARD I. MACPHAIL: *Practical and theoretical Geoarchaeology*. Blackwell, Oxford (2009).
- [5] RICHARD P. FEYNMAN: *The Feynman Lectures on Physics: 2. II edition*, Addison Wesley, New York (2005).
- [6] MATTHEW N.O. SADIKU: *Elements of Electromagnetics*. 5th edition, Oxford University Press, Oxford (2010).
- [7] JAMES S. WALKER: *Physics*. Prentice Hall, Upper Side River, NJ, USA (2001).
- [8] PETER A. ANNAN: *Ground Penetrating Radar: principles, procedures and applications*. Sensors and Software, Elsevier Science, Amsterdam (2004).
- [9] HENRY M. JOL: *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, Amsterdam (2009).
- [10] DAVID J. DANIELS: *Ground Penetrating Radar*. Peter Peregrinus Ltd., 2nd edition (2004).
- [11] PETER A. ANNAN: "Ground Penetrating Radar: Near Surface Geophysics", in *Near-Surface Geophysics, Society of Exploration Geophysicists (Ed. Donald Butler)* (2006) 357-438.
- [12] RAFFAELE PERSICO: *Introduction to Ground Penetrating Radar: Inverse Scattering and Data Processing*. Wiley-IEEE Press (2014).
- [13] ELENA PETTINELLI, PIER MATTEO BARONE, ANDREA DI MATTEO A., ELISABETTA MATTEI, SEBASTIAN E. LAURO: "Radio waves technique for non-destructive archaeological investigations", *Contemporary Physics* **52** (2011) 121-130.
- [14] PIER MATTEO BARONE, CARLOTTA FERRARA: *Lo studio integrato*, in "Geologia Forense. Introduzione alle geoscienze applicate alle indagini giudiziarie", Rosa Maria Di Maggio, Pier Matteo Barone, Elena Pettinelli, Elisabetta Mattei, Sebastian E. Lauro, Andrea Banchelli eds., Flaccovio Editore, (2013), 217-287.



Carlotta Ferrara: Laureata con lode in Fisica presso l'Università di Roma Tre, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Geofisica presso l'Università di Bologna. Docente a contratto presso la sede di Cittaducale dell'Università della Tuscia per il corso di Matematica ed Elementi di Fisica, ha al suo attivo diverse attività di insegnamento e didattica integrativa per i corsi di Fisica Generale I e II presso l'Università di Roma Tre. Occupandosi di tematiche legate alla geofisica applicata all'ambiente, all'agricoltura, alle foreste, all'idrogeologia, alla archeologia ed al forense, con particolare riguardo al georadar, ha avuto modo di collaborare con diverse università ed enti di ricerca italiani e stranieri (come CNR, CRA, University of Waterloo - Canada, etc.). Ha al suo attivo diverse partecipazioni a convegni internazionali e numerose pubblicazioni inerenti le suddette tematiche su riviste nazionali ed internazionali.

Pier Matteo Barone: Adjunct Professor presso The American University of Rome, responsabile dell'Unità di Ricerca IGAG - CNR in un progetto FIRB 2012, ha al suo attivo varie campagne di prospezioni geofisiche e scavo archeologico in Italia ed all'estero. Si occupa di metodologia della ricerca archeologica, geoarcheologia, geoscienze forensi e geofisica applicata. Ha collaborato con numerose università e con vari centri di ricerca, italiani ed esteri. Come co - fondatore del team di esperti Geoscienze Forensi Italia - Forensic Geoscience Italy ®, ha al suo attivo collaborazioni anche con Carabinieri e Polizia di Stato sia in ambito investigativo che didattico. Organizzatore di vari seminari e convegni, ha partecipato a diverse conferenze nazionali ed internazionali, avendo al suo attivo più di 50 pubblicazioni peer-reviewed sulle suddette tematiche.