

G

round Penetrating Radar (GPR) per l'archeologia

Lawrence B. Conyers
Department of
Anthropology
University of Denver
Colorado, USA



Cap. 5.4

Introduzione

Il *Ground Penetrating Radar* (GPR) ha recentemente ottenuto una larga approvazione nella comunità archeologica nel campo della localizzazione speditiva e accurata di evidenze archeologiche sepolte, manufatti e strati antropici nei primi livelli del sottosuolo. Il metodo GPR si rivela specialmente efficace in alcuni sedimenti e suoli compresi fra 20 cm e 5 m ca. di profondità, dove i *target* presunti sono sufficientemente larghi, vuoti, lineari, o hanno proprietà fisiche e chimiche significativamente contrastanti con la matrice circostante. La comunità archeologica ha anche riconosciuto il valore dell'utilizzo del GPR nella mappatura dei livelli superficiali del sottosuolo, per identificare resti sepolti sia in vista della loro futura tutela e conservazione, sia per programmare interventi di scavo archeologico mirati.

Gli attuali sistemi GPR sono molto compatti e facili da utilizzare. L'equipaggiamento tipico consiste di un'*antenna* (o un complesso di antenne), un *sistema radar* che produce impulsi, un *computer* per elaborare e salvare i dati, un *monitor*, solitamente collegato alla *control unit*, e spesso una *ruota contagiri* (*survey wheel*), che misura le distanze percorse mentre le antenne vengono spostate lungo transetti lineari. Questo sistema può essere facilmente trasportato sul sito da un'automobile o da un'elicottero, e può essere fatto da un unico operatore con uno zaino in spalla. Il processamento dei dati può essere fatto una volta tornati in laboratorio, o sul campo utilizzando un *computer* portatile.

Gli attuali sistemi GPR sono molto compatti e facili da utilizzare. L'equipaggiamento tipico consiste di un'*antenna* (o un complesso di antenne), un *sistema radar* che produce impulsi, un *computer* per elaborare e salvare i dati, un *monitor*, solitamente collegato alla *control unit*, e spesso una *ruota contagiri* (*survey wheel*), che misura le distanze percorse mentre le antenne vengono spostate lungo transetti lineari. Questo sistema può essere facilmente trasportato sul sito da un'automobile o da un'elicottero, e può essere fatto da un unico operatore con uno zaino in spalla. Il processamento dei dati può essere fatto una volta tornati in laboratorio, o sul campo utilizzando un *computer* portatile.

Gli attuali sistemi GPR sono molto compatti e facili da utilizzare. L'equipaggiamento tipico consiste di un'*antenna* (o un complesso di antenne), un *sistema radar* che produce impulsi, un *computer* per elaborare e salvare i dati, un *monitor*, solitamente collegato alla *control unit*, e spesso una *ruota contagiri* (*survey wheel*), che misura le distanze percorse mentre le antenne vengono spostate lungo transetti lineari. Questo sistema può essere facilmente trasportato sul sito da un'automobile o da un'elicottero, e può essere fatto da un unico operatore con uno zaino in spalla. Il processamento dei dati può essere fatto una volta tornati in laboratorio, o sul campo utilizzando un *computer* portatile.



Le componenti del sistema GPR

Come lavora il GPR

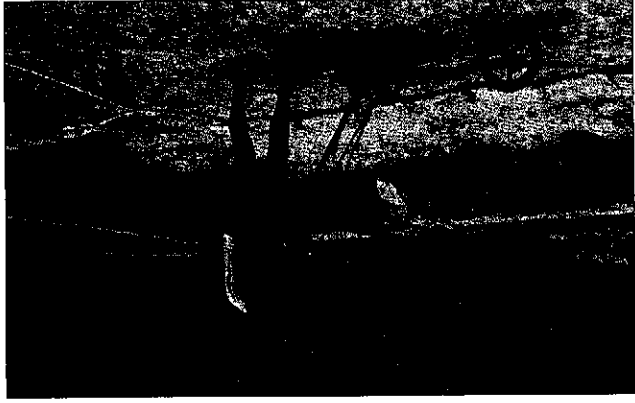
Il *Ground Penetrating Radar* (GPR) è un metodo geofisico che permette di mappare accuratamente l'estensione spaziale di oggetti e strutture archeologiche sub-superficiali o cambiamenti nel sottosuolo, arrivando a produrre immagini di questi elementi.

Le onde radar vengono propagate nel terreno tramite impulsi emanati dall'antenna posta in superficie, e vengono riflesse da oggetti sepoliti, evidenze archeologiche, contrasti stratigrafici, o unità di suolo, per poi essere rispedite in superficie e captate alla sorgente da un'antenna ricevente. Durante il loro percorso fino al *target* archeologici sepoliti, gli impulsi radar incontrano diversi materiali e la loro velocità di propagazione cambia proprio in dipendenza delle proprietà fisiche e chimiche dei materiali che essi attraversano (per approfondimenti si vedano i volumi *Ground Penetrating Radar for Archaeology* di L.B. Conyers, edito a Walnut Creek nel 2004 e *Ground Penetrating Radar: Un'introduzione per gli archeologi*, di L.B. Conyers e D. Godman, pubblicato a Roma nel 2007).

Ogniqualvolta la velocità nel terreno cambia, le onde radar vengono riflesse verso la superficie. Maggiore è il contrasto nelle proprietà elettriche e magnetiche fra materiali e strati sepoliti, maggiore è l'amplificazione delle onde riflesse. Quando il tempo di viaggio degli impulsi radar è misurato e la loro velocità attraverso il suolo è nota, allora la distanza (o la profondità nel terreno) può essere accuratamente misurata per produrre un complesso di dati tridimensionale (come dimostrato nell'articolo di L.B. Conyers e J.E. Lucius, *Velocity analysis in archaeological ground-penetrating radar studies*, pubblicato nella rivista «Archaeological Prospection», 3, 1, alle pp. 25-38). Ogni volta in cui gli impulsi radar attraversano un materiale con differente composizione o tasso idrico, la velocità cambia e una porzione dell'energia radar viene riflessa verso la superficie, per essere captata dall'antenna ricevente. L'energia rimanente continua a trasmettersi nel terreno per essere nuovamente riflessa, fino a disperdersi completamente in profondità.

Acquisizione delle riflessioni radar
Nel metodo GPR, le antenne radar vengono solitamente trascinate sulla superficie del terreno procedendo per transeetti lineari e, da un elevato numero di riflessioni periodiche, vengono a generarsi dei profili bidimensionali che costituiscono una sezione della stratigrafia

sub-superficiale e delle evidenze sepolte lungo ciascuna linea. Quando i dati vengono acquisiti in una serie di transeetti entro una griglia e le riflessioni vengono poi corrette e processate, si può ottenere un'accurata rappresentazione tridimensionale delle evidenze sepolte e della relativa stratigrafia.



Acquisizione dati con metodo GPR

L'indagine radar consente una moderata copertura areale in un breve periodo di tempo con una eccellente risoluzione di investigazione dei materiali sepoliti e della stratigrafia geologica. Solitamente per una griglia di 50 x 50 metri i dati possono essere acquisiti in un giorno. In favorevoli condizioni di suoli e sedimenti, alcuni sistemi radar possono analizzare stratigrafie e altre evidenze poste a profondità di oltre 40 metri (vedi, ad esempio, la casistica esposta in J.L. Davis e A.R. Annan, *Applications of Ground Penetrating Radar to Mining, Groundwater, and Geotechnical Projects: Selected Case Histories*, in *Ground Penetrating Radar*, a cura di J.A. Pilon, Ottawa 1992, alle pp. 49-56). Più spesso, il GPR è utilizzato per indagare materiali sepoliti compresi fra poche decine di centimetri e 5 metri di profondità. Il *survey* radar non permette soltanto di identificare oggetti sepoliti o possibili orizzonti di scavo, ma anche di fornire elementi di integrazione e di ulteriore conoscenza per aree archeologiche già esplorate, ad esempio nel caso di settori che ancora non sono stati scavati o che mai lo saranno.

Le discontinuità sepolte, dove avvengono le riflessioni radar, sono solitamente dovute a cambiamenti nelle proprietà elettriche dei sedimenti o dei suoli, variazioni nel contenuto idrico, cambiamenti litologici o nella densità di massa delle interfacce stratigrafiche. Le

riflessioni possono anche essere prodotte dal contrasto tra le evidenze archeologiche sepolte e il terreno circostante. Gli spazi vuoti, le condutture o i tubi interrati realizzati in metallo o plastica, generano anch'essi forti riflessioni radar dovute a significativi cambiamenti nella velocità di propagazione delle onde radar.

Il buon esito dell'indagine GPR dipende in gran parte dal suolo e dai sedimenti mineralogici, dal contenuto di argilla, dall'umidità del terreno, dalla profondità dei *target* sepolti, dalla superficie topografica e dalla vegetazione. Non è un sistema geofisico che può essere immediatamente applicato a qualsiasi situazione, sebbene con modifiche apportabili in fase di acquisizione e di processamento dei dati, il GPR possa essere adattato a siti con le più differenti condizioni.

Benché la penetrazione delle onde radar e la loro riflessione in superficie sia maggiore in un contesto arido e asciutto, suoli umidi possono comunque trasmettere e riflettere l'energia radar e il *survey* GPR può restituire dati eloquenti.

Le riflessioni radar sono sempre registrate in un tempo doppio di viaggio (*two-way time*), ovvero il tempo impiegato da ciascun impulso per andare dall'antenna in superficie nel sottosuolo, essere riflesso da una discontinuità e tornare in superficie per essere registrato.

Uno dei vantaggi del sistema GPR rispetto agli altri metodi geofisici è che è possibile risalire alla profondità reale della stratigrafia sub-superficiale delle evidenze archeologiche e dei livelli di suolo presenti in un sito. Questo è possibile perché la misura del tempo di ricezione degli impulsi radar può essere convertita in profondità se la velocità di viaggio delle onde radar attraverso il terreno è nota, vedi anche, per approfondire, il già citato volume di L.B. CONVERS (2004).

Per produrre profili di riflessione il tempo doppio di viaggio, l'ampiezza e la lunghezza d'onda delle onde radar riflesse devono essere amplificati e registrati dall'antenna, sono poi amplificati, elaborati e registrati per una immediata visualizzazione o per un'analisi ed elaborazione successiva. Durante l'acquisizione dei dati sul campo, il processo di registrazione radar e rispetto molte volte al secondo mentre l'antenna viene spostata lungo la superficie del terreno o trainata al passo, la distanza lungo ciascun profilo è registrata, solitamente per mezzo di una *wheel*, per il corretto posizionamento di tutte le riflessioni entro la griglia di acquisizione. L'insieme di tutte le onde riflesse lungo ogni *transect* genera una visualizzazione in sezione delle riflessioni sub-superficiali nel sottosuolo investigato (vedi la figura nella pagina seguente). In questo modo vengono creati lungo ogni profilo della griglia di indagine, dei profili bidimensionali, ovvero *slices verticali*, attraverso il terreno.

profondità dei target

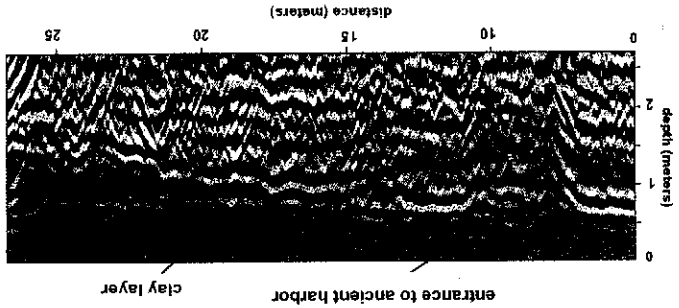
Profondità di Penetrazione e Risoluzione

La profondità che l'energia radar può raggiungere e il tipo di definizione che si può ottenere della realtà sepolta è parzialmente controllata dalla frequenza dell'energia radar trasmessa. Dalla frequenza dipendono la lunghezza d'onda nella propagazione delle onde radar, la quantità di segnale emesso e l'attenuazione dell'energia nel terreno.

Una delle principali variabili nel *survey* georadar è la scelta dell'antenna, che consente di operare con la frequenza più corretta a seconda della profondità e della risoluzione del target da raggiungere.

Le antenne radar in commercio hanno una frequenza che va da circa 10 a 1.200 Megahertz (MHz). Le variazioni nella frequenza dominante di ogni antenna sono causate da irregolarità nella superficie dell'antenna o di altre componenti elettroniche poste all'interno del sistema antenna. Questi tipi di variazioni sono comuni in tutte le antenne e ognuna ha sue proprie irregolarità che producono una differente emissione di impulsi e una diversa frequenza dominante. Proprio la scelta della frequenza dell'antenna può in molti casi fare la differenza tra successo o fallimento dell'indagine georadar e deve essere pianificata fin dall'inizio.

In generale più si necessita di scendere in profondità con l'indagine, più deve essere utilizzata un'antenna radar a bassa frequenza. Le antenne a bassa frequenza sono più grandi, pesanti e più difficili da trasportare e trascinare sul terreno rispetto alle antenne ad alta frequenza. Un'antenna da 400 MHz è piuttosto piccola e può essere facilmente inserita e trasportata dentro una valigia (vedi la figura a pag. 361).



Profilo radar. Sull'asse delle x sono indicate le progressive metriche, sull'asse delle y la profondità di indagine (in questo caso espressa in metri)

loro amplificazione. Per enfatizzare questi cambiamenti, in modo che possano essere mappati, devono essere applicate all'insieme dei dati riflessi sofisticate procedure di amplificazione (discusse in seguito).

La velocità di propagazione delle onde radar nel terreno dipende da numerosi fattori, il più importante dei quali risiede nelle proprietà elettriche e chimiche dei materiali che esse attraversano. Le onde radar viaggiano nell'aria alla velocità della luce, che è di circa 30 centimetri per nanosecondo (un nanosecondo è un milionesimo di secondo). Quando l'energia radar viaggia attraverso sabbia asciutta, la sua velocità rallenta di circa 15 centimetri per nanosecondo. Se l'energia radar passa attraverso sabbia umida la sua velocità può rallentare ulteriormente di 5 centimetri per nanosecondo o poco meno. In corrispondenza di ognuna di queste interfacce dove cambia la velocità, sono generate delle riflessioni.

L'energia radar mentre si irradia nel sottosuolo viene dispersa e

attenuata. Quando una parte del segnale trasmesso in origine viene riflessa e rimandata in superficie, essa subisce un'attenuazione addizionale a causa dei materiali che attraversa prima di ritornare verso la sorgente e di essere finalmente ricapata in superficie. Dunque, per essere captate come riflessioni, le interfacce sub-superficiali non devono soltanto avere un sufficiente contrasto elettrico (o magnetico) nella loro demarcazione, ma essere anche localizzate a una profondità adeguata in modo che l'energia radar possa ancora essere disponibile per la riflessione. Mentre l'energia radar propagata scende in profondità, il segnale diventa debole e si diffonde su una superficie di estensione maggiore. Risulta così utilizzabile un'energia minore per la riflessione e probabilmente sarà registrata solo un'amplificazione molto bassa delle onde. Di solito è necessario aumentare le riflessioni che vengono da profondità maggiori, usando un sistema di ag-giustamento dell'amplificazione chiamato *range gating*. I fattori di guadagno da applicare alle riflessioni sono generalmente regolati in maniera specifica per ciascun sito e sono unici per suoli e condizioni in cui il survey viene condotto.

Processamento dei dati e rappresentazione delle evidenze

nel sottosuolo

L'immagine standard della maggior parte dei dati di riflessione dei sistemi radar è un profilo bidimensionale, con l'indicazione della profondità di indagine sull'asse delle x e della distanza lungo la su-

La risoluzione delle evidenze sub-superficiali varia con la frequenza dell'energia radar. Antenne a bassa frequenza (10-120 MHz) generano lunghe onde radar che possono penetrare fino a 50 metri di profondità in determinate condizioni, ma sono in grado di intercettare e analizzare soltanto evidenze sepolte molto grandi. Per esempio sabbia asciutta e ghiaia o materiale vulcanico, cenere e pomice sono mezzi che permettono la trasmissione delle onde radar fino a profondità di 8-10 metri, quando sono ripresentate attorno a bassa frequenza. Al contrario, la profondità massima di penetrazione di un'antenna di 900 MHz (antenna ad alta frequenza) di lunghezza è di circa 1 metro o meno in terreni tipici, ma le riflessioni da essa generate possono captare e analizzare evidenze di dimensioni inferiori a pochi centimetri.

Esiste dunque una stretta relazione tra profondità di penetrazione e risoluzione di indagine. Questi fattori sono estremamente variabili e dipendono da molti fattori e dalle caratteristiche specifiche del sito, come la composizione, la porosità, il tasso di umidità del suolo.

Come i materiali nel terreno influenzano il segnale radar

Il primo obiettivo di molte indagini GPR è l'individuazione di interfacce sub-superficiali. Tutti i sedimenti e gli strati di terreno hanno particolari proprietà elettriche e magnetiche che influenzano la velocità, la riflessione e l'attenuazione dell'energia elettromagnetica nel sottosuolo. La riflessione dell'energia radar da parte di un'interfaccia è funzione primaria della differenza nelle proprietà elettriche tra i materiali su ambedue i lati di quella interfaccia. Questo perché ciascun significativo cambiamento di velocità produrrà il ritorno in superficie di una certa quantità di energia. Le più forti riflessioni del segnale vengono prodotte quando aumenta il contrasto nelle proprietà elettriche tra due materiali. Le riflessioni radar meglio leggibili sono generate dall'interfaccia tra due strati sottili ma con proprietà elettriche differenti.

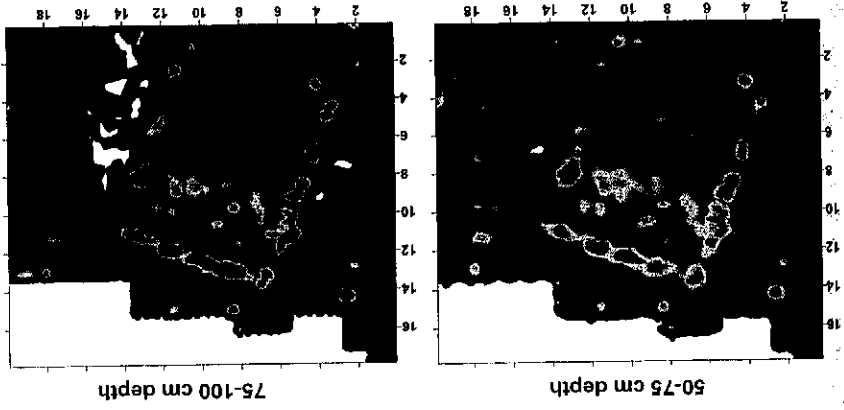
La capacità di distinguere le riflessioni radar nei dati è relativa all'amplificazione delle onde riflesse. Le più alte amplificazioni delle onde radar producono riflessioni più visibili. Le più basse amplificazioni di riflessione, come ad esempio nel caso di sottili cambiamenti di suolo, avvengono solitamente quando ci sono solo piccole differenze nelle proprietà elettriche degli strati di terreno. Queste piccole differenze nella natura dei suoli sepolti o dei livelli di sedimentazione sono spesso invisibili all'occhio umano, ma nei profili radar vengono registrate onde molto sottili per tutti i sensibili cambiamenti nella

età dell'antenna da rilevare in base all'ev-

perficie sull'asse y (vedi la figura a pag. 363). Questo tipo di rappresentazione è composto dall'insieme di tutte le numerose tracce di riflessione ottenute mentre l'antenna viene spostata lungo un tratto. La profondità dei profili è generalmente espressa nel doppio tempo di viaggio del segnale radar, ma il tempo può essere convertito in profondità se la velocità di viaggio delle onde radar nel terreno è misurata e nota, per approfondimenti vedi il contributo già citato di L.B. Conyers e J.E. Lucius (1996). I profili di riflessione sono spesso visualizzati in scala di grigio, con le variazioni di amplificazione nelle riflessioni determinate dall'intensità dei toni di grigio. In questo formato, le scale di colore applicate all'amplificazione possono comunque essere cambiate.

In molti casi i profili bidimensionali devono essere corretti per riflettere i cambiamenti di quota del suolo. Solitamente dopo questa correzione le immagini rappresenteranno fedelmente la realtà. Tale processo, che in genere assume importanza quando il cambiamento topografico è significativo, richiede una mappatura dettagliata della superficie lungo ciascun trasetto della griglia di indagine e in seguito il ri-processamento di ogni trasetto tramite l'aggiustamento di tutte le tracce di riflessione in rapporto alle quote di superficie.

Le rappresentazioni bidimensionali standard possono essere usate per la maggior parte delle interpretazioni dei dati, ma l'analisi può risultare difficile nel caso vi siano numerosi profili. Inoltre, la fonte di ogni riflessione su ciascun profilo deve essere a volte definita a priori per poter produrre comprensibili mappe sub-superficiali. Spesso la definizione di immagini dettagliate si consegue soltanto con una grande esperienza interpretativa. Il primo scopo di molte indagini GPR è identificare dimensioni, forma, profondità e localizzazione di resti sepolti e della relativa stratigrafia. La via più diretta per realizzare ciò è attraverso l'identificazione e la correlazione di apprezzabili riflessioni all'interno dei profili bidimensionali. Queste riflessioni possono poi essere correlate di profilo in profilo da un capo all'altro di una griglia, secondo una procedura che può richiedere molto tempo. Un altro tipo di trattamento più sofisticato dei dati radar è il processo di elaborazione delle *slice-map* che permette di ottenere mappe delle differenze di amplificazione delle onde riflesse all'interno di una griglia. Il risultato può essere una serie di mappe che illustrano la localizzazione tridimensionale delle anomalie riflesse derivate dall'interpolazione tramite computer dei profili bidimensionali (vedi la figura nella pagina seguente). Questo



metodo di elaborazione dei dati può essere realizzato soltanto mediante *computer* usando i dati radar immagazzinati su supporto digitale.

I dati radar grezzi collezionati dal GPR non sono nulla più che una raccolta di molte tracce individuali lungo i trasetti bidimensionali di una griglia. Ognuna di queste tracce di riflessione contiene una serie di onde che varia di amplificazione a seconda dell'intensità dell'energia di riflessione prodotta dall'interfaccia sepolta. Quando queste tracce sono rappresentate consecutivamente nei classici profili bidimensionali, le specifiche amplificazioni all'interno di singole tracce che contengono importanti informazioni di riflessione, sono generalmente difficili da visualizzare e interpretare.

L'interpretazione standard dei dati radar, che consiste nella visualizzazione di ogni profilo e poi nella mappatura manuale delle principali riflessioni e di altre anomalie, può essere sufficiente quando le evidenze sepolte sono semplici e l'interpretazione è diretta. In aree dove la stratigrafia è complessa e i materiali sepolti sono di difficile distinzione, devono essere utilizzati differenti metodi di elaborazione e interpretazione, uno dei quali è noto come *amplitude analysis*.

Nel passato, quando i dati radar venivano acquisiti senza riflessioni distinguibili o anomalie riconoscibili, l'indagine era solitamente dichiarata un fallimento e non veniva effettuata alcuna interpretazione, se non molto limitata. Con l'avvento di più potenti *personal computer* e di sofisticati programmi in grado di manipolare grandi quantità di dati digitali, si è iniziato a estrarre dai dati radar importanti informazioni sub-superficiali sotto forma di cambiamenti di amplificazione del segnale radar.

L'analisi della distribuzione spaziale dell'amplificazione delle onde riflesse è importante perché è un indicatore potenzialmente eloquente dei cambiamenti nella litologia o nelle altre proprietà fisiche del sottosuolo. Se i cambiamenti di amplificazione possono essere relazionati a importanti evidenze e stratigrafie nel terreno, la localizzazione di queste variazioni può essere utilizzata per ricostruire la realtà sepolta in tre-dimensioni. Le aree di bassa amplificazione del segnale indicano solitamente una matrice di materiale o di suolo uniforme mentre quelle di alta amplificazione denotano zone di elevato contrasto sub-superficiale come nel caso di strutture archeologiche sepolte, vuoti o rilevanti cambiamenti stratigrafici. Per essere interpretate, le differenze di amplificazione devono essere scomposte in *time-slice* che analizzano solo le variazioni comprese entro specifici che profondità del sottosuolo. Ogni *time-slice* consiste in una distribuzione spaziale di tutte le amplificazioni riflesse che sono indicative dei cambiamenti nei sedimenti, nei suoli e nei materiali sepolti. Le *time-slice* non devono necessariamente essere costruite orizzontalmente o in eguali intervalli di tempo. Esse possono variare in spessore e orientamento, a seconda delle domande o delle esigenze. La topografia di superficie e l'orientamento di evidenze e di stratigrafie nel sottosuolo di un sito possono a volte richiedere la creazione di *slices* né uniformi nello spessore né orizzontali.

Per realizzare *time-slice* orizzontali il computer associa le variazioni di amplificazione tra le tracce registrate entro una determinata finestra temporale. Quando questo è fatto, sia le amplificazioni positive che negative delle riflessioni vengono unite al modello di tutte le amplificazioni comprese in quella finestra. Solitamente non c'è alcuna differenziazione tra amplificazioni positive o negative in queste analisi; viene evidenziato solo il valore di deviazione dell'amplificazione dalla norma.

Variazioni di bassa amplificazione all'interno di una *slice* denotano una piccola sub-superficie di riflessione e a volte la presenza di materiale abbastanza omogeneo. Altre amplificazioni indicano significative sub-superfici di discontinuità e in molti casi individuano la presenza di elementi sepolti. In una determinata area, un brusco cambiamento da una bassa a una alta amplificazione può essere molto significativo e indicare la presenza di una più importante interfaccia sepolta tra due mezzi. Il grado di variazione dell'amplificazione

In ogni *time-slice* può essere assegnato arbitrariamente a colori o toni di grigio lungo una scala simbolica. In linea di massima non ci sono specifiche unità di amplificazione assegnate a colori o a cambiamenti di tono.

L'analisi della distribuzione spaziale delle amplificazioni nella forma delle *time-slice*, come mostrato nel già citato volume di L. B. Connors (2004) può spesso produrre mappe del sottosuolo ad alta risoluzione (vedi la figura a pag. 367). Le mappe di amplificazione che contengono certe informazioni di profondità sono specialmente utili nella geofisica archeologica perché le amplificazioni delle onde radar riflesse sono un indicatore dei cambiamenti sub-superficiali nella litologia, nelle proprietà chimiche o fisiche del suolo. Più e alto il contrasto nella velocità di propagazione in corrispondenza di interfacce sepolte, maggiore è l'amplificazione delle onde riflesse. Il cambiamento di amplificazione può essere dovuto alla presenza o all'assenza di significative evidenze e stratigrafie sepolte. La localizzazione a specifiche profondità delle amplificazioni più alte o più basse può essere utilizzata per ricostruire la sub-superficie in tre-dimensioni.

Mappe di amplificazione (time-slice)

È spesso difficile identificare evidenze e stratigrafie sepolte durante le operazioni di acquisizione dei dati, tuttavia la maggior parte dei moderni sistemi digitali permette la visualizzazione immediata dei profili bidimensionali sul monitor del computer mentre essi vengono acquisiti. Questi *field profile* sono solitamente grezzi, contengono ancora il rumore di fondo (*background noise*) e in genere informazioni non corrette di profondità e distanza lungo i trasecchi.

Con l'esperienza, comunque, le principali evidenze sepolte possono non essere visualizzate e amplificate quasi tanto velocemente quanto l'antenna viene spostata lungo di essi. Questa analisi in tempo reale dei dati può fornire a volte importanti informazioni sul sottosuolo, consentendo rapidamente di apportare modifiche o cambiamenti alla pianificazione delle indagini. Inoltre, se vengono scoperte importanti evidenze in maniera istantanea, esse possono essere anche velocemente verificate tramite scavi, sondaggi o carotaggi, in modo da confermare l'origine delle riflessioni prevalenti.

Riflessioni radar da sorgenti localizzate

Le riflessioni più facili da distinguere e immediatamente visibili sullo schermo del computer in fase di acquisizione dei dati, sono le riflessioni a iperbole (vedi la figura nella pagina seguente). Queste riflessioni sono prodotte da sorgenti localizzate nel sottosuolo che possono essere i tubi

confine di livelli distinti, creando un'immagine confusa del sottosuolo. La comprensione della complessità dei profili radar viene con l'esperienza, così come comparando direttamente i profili al "mondo reale", ricorrendo a sistemi di scavo e confrontando così le restituzioni geofisiche con quanto si scopre essere nel sottosuolo. Gli stessi controlli valgono per le mappe tridimensionali prodotte dalle analisi spaziali di amplificazione delle riflessioni del GPR. Queste mappe sono prodotte da diverse migliaia di riflessioni elaborate simultaneamente. Spesso per verificare le mappe è prima necessario comparare le mappe ai profili bidimensionali, in maniera da accertare che l'origine delle immagini mappate sia nota. A questo punto se si ottiene conferma di almeno alcune delle riflessioni sub-superficiali, la fiducia generale nei confronti delle porzioni rimanenti delle mappe può aumentare. Ma in tutti i casi, è preferibile la conferma effettiva delle evidenze rintracciate con il GPR. Questo tipo di verifica compiuta attraverso scavi archeologici tradizionali inclusi l'escavazione di fosse con pala, lo scavo di saggi o di trincee. Se le evidenze individuate sono strati di interesse antropico (ad esempio nel caso di un livello che conservi i resti di un suolo coltivato) può essere prelevato un campione del suolo mediante trivellazione e la sua profondità confrontata alle riflessioni radar sui profili o sulle *slice-map*. A volte, se le evidenze mappate sono abbastanza vicine alla superficie, le sonde possono permettere di distinguere i livelli duri (forse livelli rocciosi o muri sepolcrali); esse danno conferme meno dirette ma sono facili da usare e molto veloci da impiegare.

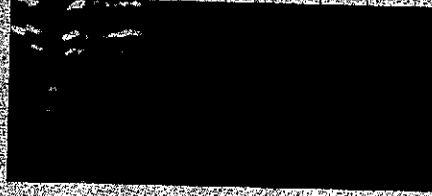
In tutti i casi, interpretare i dati GPR basandosi soltanto sulle riflessioni radar può condurre a errori. Mentre evidenze molto diverse, come muri o superfici stratigrafiche fortemente compatte sono facilmente riconoscibili e possono essere interpretate con una certa fiducia, le più numerose evidenze sottili frequenti in botanica sono spesso difficili da scoprire e interpretare.

Per questa ragione, l'integrazione di informazioni valide sul sottosuolo derivabili da carotaggi, scavi, sonde o trivelle, con le mappe e i profili delle riflessioni radar è sempre una necessità.

Metodi di scavo usando le mappe GPR

tunnel, muri o ciottoli di grosse dimensioni. Esse sono causate da un largo angolo di incidenza del raggio radar trasmesso, che permette all'antenna di "vedere" il punto di sorgente prima di arrivare direttamente sopra esso e di continuare a "vedere" anche dopo averlo sorpassato. La riflessione risultante sarà dunque la creazione di un'iperbole mentre l'antenna passa attraverso l'oggetto, registrandolo mentre viene e va. Spesso gruppi di queste iperbole indicano una grande quantità di sorgenti localizzate, come nel caso di un muro collassato o di evidenze simili.

Durante l'acquisizione dei dati, l'attento operatore GPR può vedere, in questo tipo di oggetti nel terreno, visualizzandoli prima sul monitor del computer e poi osservandone la localizzazione nel punto in cui l'antenna ha registrato le riflessioni notate. Sebbene questa tecnica sia suscettibile di errori, può dare agli archeologi un'idea generale e una visione immediata di cosa giace sepolto sotto la superficie. Solitamente il sistema migliore e realizzare interpretazioni spiccate e dettagliate dopo il processamento dei dati, dove essi possono essere filtrati e corretti in senso spaziale. Ma se è necessaria un'analisi immediata, una qualche sorta di interpretazione sul campo può essere formulata, a condizione che errori potenziali siano contemplati e compresi.



I profili di riflessione bidimensionali, una volta elaborati e corretti in senso spaziale, danno un'accurata rappresentazione di cosa giace nel sottosuolo. Comunque, è sempre importante riconoscere che le riflessioni registrate non riproducono necessariamente con esattezza la realtà sub-superficiale. Questo perché solitamente l'energia radar non viaggia in linea verticale dall'antenna in superficie all'oggetto o alla superficie di interesse, per poi tornare direttamente all'antenna ricevente. Si diffonde invece fuori dall'antenna e le riflessioni vengono registrate oltre il piano del transetto, di fronte e dietro l'antenna in superficie. Inoltre, le onde radar vengono spesso riflesse molte volte dagli oggetti sepolcrali, come se rimbalzassero fra i livelli nel terreno e altri grandi oggetti prima di essere rinviiati in superficie e captati dall'antenna ricevente. Le onde radar possono anche infrangersi al