

CONTRIBUTI

Metodologie e Scienze Sussidiarie

INDAGINI GEOFISICHE AD ALTISSIMA RISOLUZIONE IN SITI DI INTERESSE ARCHEOLOGICO NEL COMUNE DI CAMINO AL TAGLIAMENTO

Michele PIPAN, Luca BARADELLO, Alessandro PRIZZON e Emanuele FORTE

Introduzione

Un ampio programma di indagini geofisiche ad altissima risoluzione nell'area del comune di Camino al Tagliamento è stato completato nell'estate del 1997 dal Gruppo di Geofisica d'Esplorazione (GGE) dell'Università di Trieste (Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine) nell'ambito di una collaborazione scientifica con i Civici Musei di Udine e la Società Friulana di Archeologia. Il tema dell'indagine è la localizzazione di strutture di possibile interesse archeologico legate a due obiettivi specifici:

- L'antica Pieve di Rosa: secondo fonti storiche l'odierna Pieve sorgerebbe sui resti dell'antica chiesa.
- Una strada romana: si ritiene che nei pressi dell'antica Pieve si trovi una strada romana il cui tracciato seguirebbe l'allineamento dei campanili di Pieve di Rosa, Camino al Tagliamento e Codroipo.

Nell'ambito dello studio sono state utilizzate metodologie innovative Ground Penetrating Radar (GPR) a copertura multipla appositamente sviluppate dal GGE per applicazioni ad indagini archeologiche. Tali metodologie sono oggetto dell'attività di ricerca del GGE da oltre cinque anni nell'ambito del Progetto Finalizzato Beni Culturali del CNR e con il supporto del Centro Studi e Ricerche Ligabue di Venezia per quanto concerne l'attività sperimentale all'estero. Il GPR è una tecnica geofisica che consente di ottenere immagini del sottosuolo con un livello di risoluzio-

zione non raggiungibile da altre metodologie non-distruttive. Inoltre, il GPR consente l'esplorazione di ampie aree in tempi contenuti, è una tecnica ad impatto nullo, ovvero non altera in alcun modo il sito in cui viene utilizzata, ed è quindi particolarmente indicata per le indagini archeologiche.

L'archeologia rappresenta indubbiamente uno dei settori più complessi per l'applicazione del GPR a causa delle caratteristiche degli obiettivi di indagine e delle condizioni dei terreni in cui si trovano normalmente sepolti. Le strutture di interesse archeologico sono spesso di dimensioni ridotte e profilo irregolare e si trovano in terreni di riporto o comunque modificati dall'intervento dell'uomo. Questi fattori incidono sulla qualità delle immagini GPR ottenute con metodologie convenzionali (a copertura singola, Fig. 1). Le immagini del sottosuolo ottenute con il GPR possono essere migliorate solo utilizzando adeguate procedure di trattamento del segnale. Tra queste, le più efficaci sono quelle utilizzate nel settore della sismica d'esplorazione, una disciplina geofisica tecnologicamente avanzata che è lo strumento primario per il reperimento degli idrocarburi. Tali procedure sono basate sull'acquisizione dati a copertura multipla, una tecnica che sfrutta la possibilità di propagare l'energia (sismica od elettromagnetica) nel sottosuolo lungo differenti percorsi, e quindi di illuminare gli obiettivi da diversi angoli, utilizzando sorgenti e sensori situati a differenti distanze.

Metodi a copertura multipla appositamente

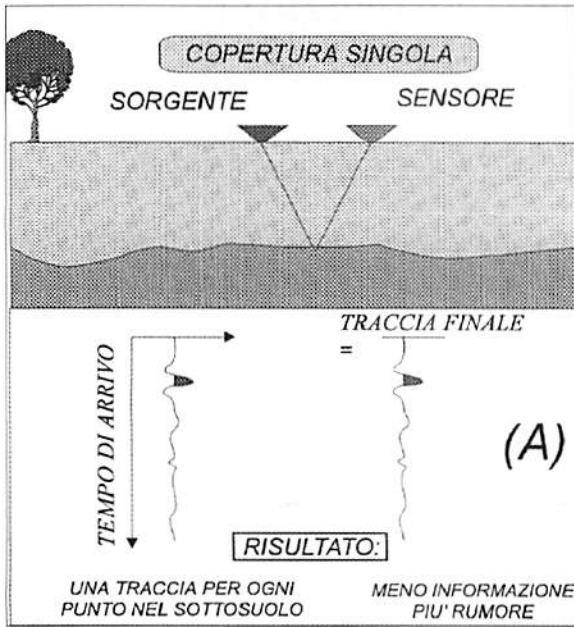
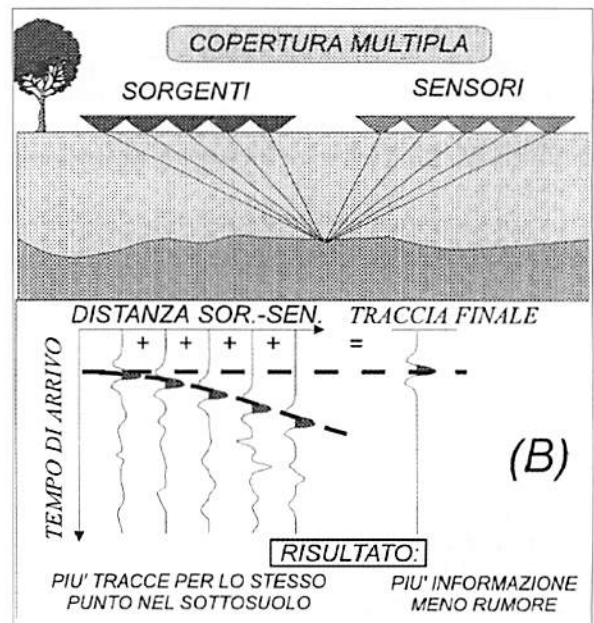


Figura 1. Schema di acquisizione dati georadar:

- A) Metodologie convenzionali a copertura singola;
 B) Metodologie innovative a copertura multipla.



mente sviluppati dal GGE per le indagini georadar in siti archeologici sono stati utilizzati nell'area di Camino al Tagliamento per identificare le aree di maggiore interesse dal punto di vista archeologico e localizzare gli obiettivi primari dello studio (rovine e livelli di terreno compattati dal passaggio di uomini e veicoli).

Cenni sul metodo GPR

Il termine Ground Penetrating Radar (GPR) viene utilizzato per un'ampia gamma di tecniche elettromagnetiche finalizzate all'individuazione di oggetti o superfici di discontinuità sepolte a profondità di norma non superiore ai 50 metri (per indagini in terreni o masse rocciose). Tecniche elettromagnetiche sono state utilizzate fin dall'inizio di questo secolo per la localizzazione di oggetti metallici nel sottosuolo, ma è solo con gli anni '70 che il GPR si afferma come strumento di indagine geofisica ad alta risoluzione in seguito alla realizzazione di strumenti portatili. Nei primi anni '80 vengono sviluppati i primi strumenti GPR digitali che consentono l'applicazione di sofisticate tecniche di trattamento del segnale ed aprono nuove prospettive per le indagini ad alta risoluzione. Il GPR viene oggi impiegato con successo nella ricostruzione di immagini del sottosuolo a profondità variabili dai primi 50 cm, come nel caso dell'individuazione di ordigni inesplosi o degli studi sulle pavimentazioni stradali ed aeroportuali, fino a diverse decine di metri, per studi nel campo dell'archeologia, la geologia, l'ingegneria civile e la tutela ambientale.

Il GPR rileva l'energia riflessa da un bersaglio illuminato da una sorgente di onde elettromagnetiche. L'antenna trasmittente genera un impulso di breve durata (circa 10 nanosecondi) e frequenza ben definita e com-

presa tra i 10 ed i 2000 MHz. L'onda elettromagnetica si propaga nel sottosuolo e può essere riflessa, rifratta e diffratta da discontinuità nell'impedenza elettromagnetica, legate a contatti tra materiali con diverse proprietà elettriche o alla presenza di variabili percentuali di acqua in uno stesso materiale. L'onda raggiunge quindi l'antenna ricevente e viene registrata in forma digitale come traccia radar (Fig. 2a). La sezione radar (Fig. 2b) corrisponde all'insieme di tracce che si ottengono facendo scivolare la coppia di antenne (trasmittente/ricevente) sulla superficie del terreno ed effettuando misurazioni ad intervalli regolari. È opportuno osservare che la sezione radar deve essere sottoposta ad una complessa sequenza di elaborazione per ottenere un'immagine del sottosuolo ad un livello di dettaglio sufficiente per gli scopi dell'indagine.

Il terreno assorbe l'energia elettromagnetica e provoca un'attenuazione del segnale radar tanto più forte quanto più elevata è la frequenza. Utilizzando alte frequenze si possono quindi raggiungere obiettivi situati a profondità più ridotta. D'altra parte, le alte frequenze forniscono immagini più dettagliate del sottosuolo. È perciò necessario trovare un compromesso tra la massima profondità di indagine ed il livello di dettaglio che si desidera ottenere in funzione della profondità e delle caratteristiche degli obiettivi dello studio. La massima penetrazione del segnale radar si ottiene in terreni sabbiosi asciutti o in rocce con scarsa porosità e fratturazione, mentre i valori minimi si rilevano in terreni argillosi umidi.

I parametri fondamentali per la realizzazione di una valida indagine GPR sono:

1. *Accoppiamento delle antenne col terreno:* una superficie eccessivamente irregolare provoca una dispersione di larga parte dell'energia elettromagnetica in aria.

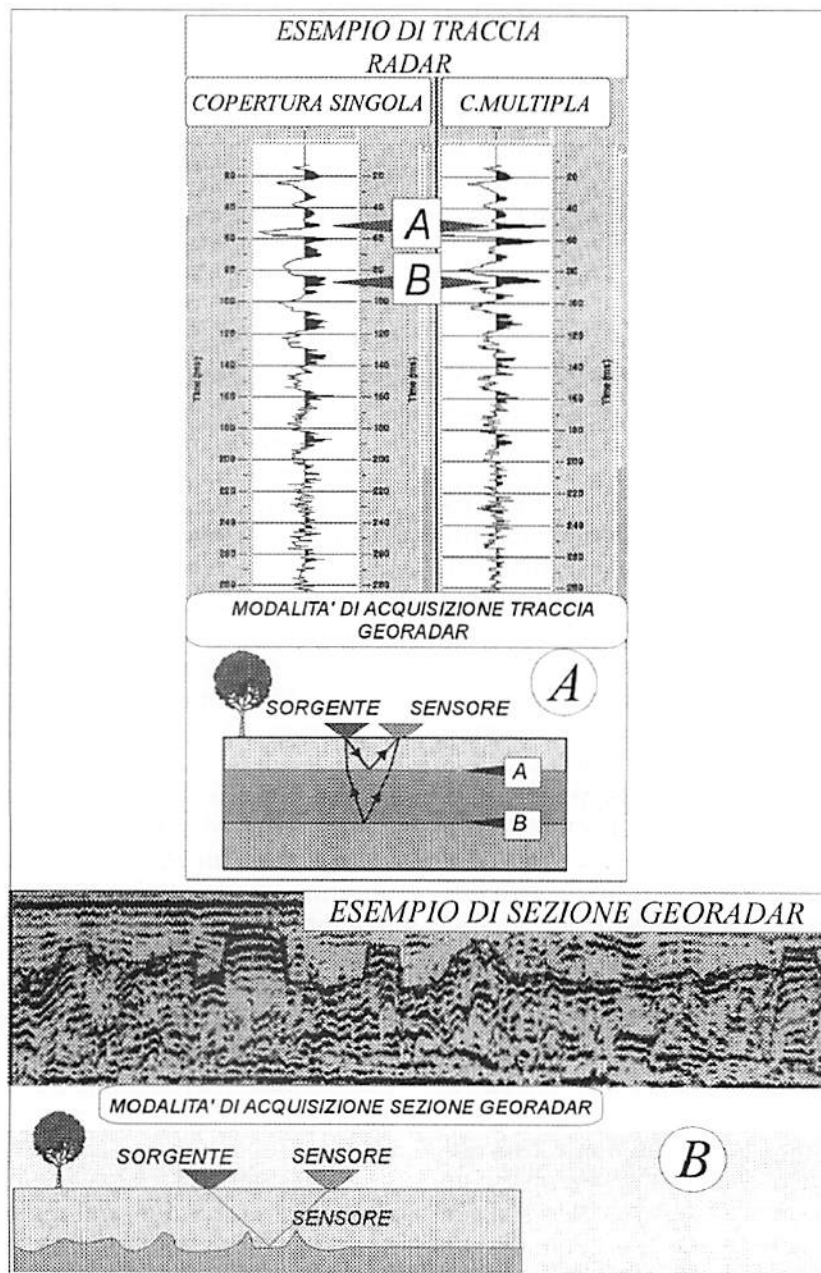


Figura 2. Esempio di registrazioni georadar:
A) Traccia georadar; B) Sezione georadar.

2. *Penetrazione dell'onda nel terreno*: le caratteristiche elettriche del terreno devono consentire la penetrazione dell'onda radar fino alla profondità di interesse per l'indagine.

3. *Ampiezza del segnale riflesso*: gli obiettivi dell'indagine devono fornire una risposta di ampiezza sufficiente per consentirne l'individuazione all'interno della sezione radar.

4. *Ampiezza della banda di frequenza del segnale*: l'attenuazione del segnale radar da parte del terreno nell'intervallo di frequenze utilizzato non deve compromettere il livello di dettaglio richiesto dagli obiettivi di indagine.

Le tecniche innovative a copertura multipla, sviluppate nell'ambito della sismica d'esplorazione per gli idrocarburi, consentono di migliorare notevolmente la qualità delle immagini radar. La denominazione "copertura multipla" sta ad indicare che ogni punto del sottosuolo è virtualmente illuminato ripetute volte da energia elettromagnetica proveniente da diverse direzioni. Per ottenere questo risultato vengono utilizzate sorgenti e ricevitori separati da differenti distanze. Il segnale riflesso da uno stesso punto nel sottosuolo viene ricevuto con un ritardo crescente all'aumentare della distanza sorgente-ricevitore. La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche può essere calcolata misurando il ritardo nel tempo di arrivo della riflessione. Una volta nota la velocità è possibile risalire con precisione alla posizione degli obiettivi subsuperficiali. È inoltre possibile migliorare notevolmente la qualità delle immagini GPR sommando le tracce radar che illuminano i medesimi punti del sottosuolo.

Le prime applicazioni dei metodi a copertura multipla nel campo del GPR risalgono ai primi anni '70, ma solo nell'ultimo decennio gli sviluppi nella tecnologia georadar e la crescente complessità degli obiettivi di inda-

gine ha incoraggiato una più diffusa applicazione di tali metodologie. La maggior parte degli studi realizzati con tecniche a copertura multipla riguarda discontinuità di notevole estensione areale in suoli ben stratificati, di interesse per problemi geologici o geotecnici. Le indagini archeologiche richiedono invece lo studio di obiettivi di dimensioni spesso limitate e profilo molto irregolare che si trovano all'interno di suoli non stratificati e comunque ricchi di detriti. L'applicazione di tecniche a copertura multipla a questo tipo di problemi richiede lo sviluppo di tecniche di acquisizione, elaborazione ed interpretazione innovative e specifiche, in grado di risolvere le problematiche legate alla particolare complessità degli obiettivi e delle condizioni del terreno.

Nel corso degli ultimi cinque anni, il GGE dell'Università di Trieste ha lavorato allo sviluppo, la sperimentazione e l'applicazione di metodi GPR a copertura multipla per le indagini archeologiche ed è tra i pochi gruppi a livello mondiale impegnati su questo tema di ricerca. Le esperienze maturate nell'ambito di approfonditi programmi di studio nell'Italia settentrionale, in Kazakistan ed in Perù sono state utilizzate dal GGE per lo studio ad alta risoluzione nell'area di Camino al Tagliamento.

Area di indagine ed acquisizione dati

L'acquisizione dei dati GPR è stata effettuata in sei aree principali su indicazione degli esperti dei Civici Musei di Udine e della Società Friulana di Archeologia:

1. Interno della Pieve di Rosa.
2. Esterno della Pieve di Rosa e vigneto adiacente.
3. Vigneto e campo di erba medica ad est dell'abitato di Pieve di Rosa.

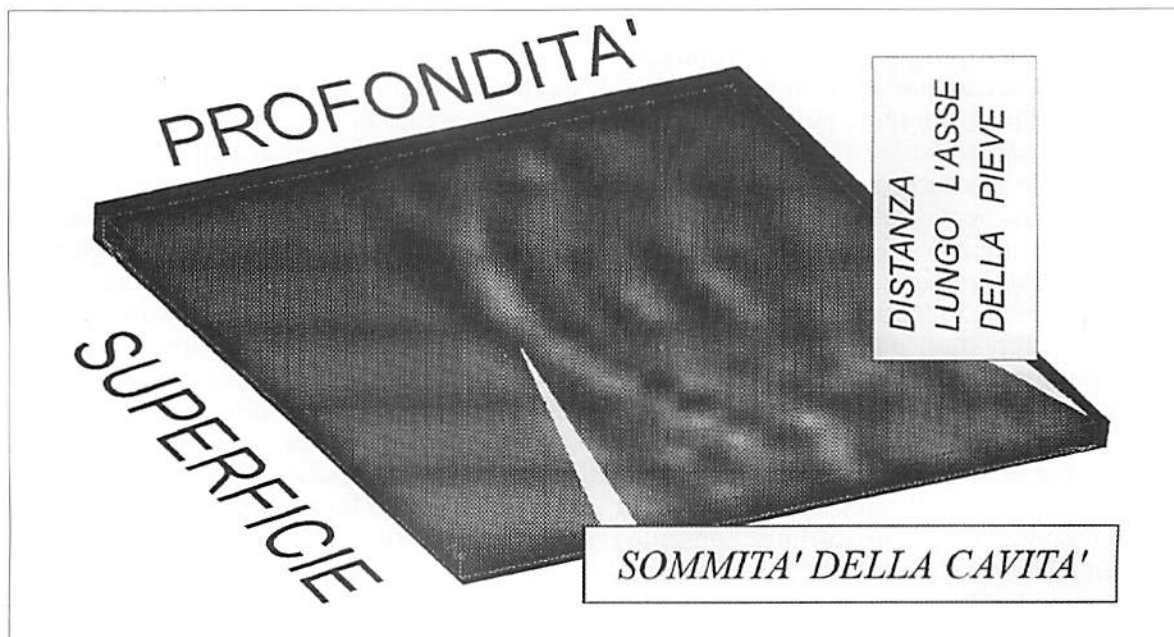


Figura 3. Esempio di immagine georadar ottenuta con metodologie tridimensionali: l'immagine consente l'identificazione della sommità di una cavità situata sotto la pavimentazione della Pieve di Rosa.

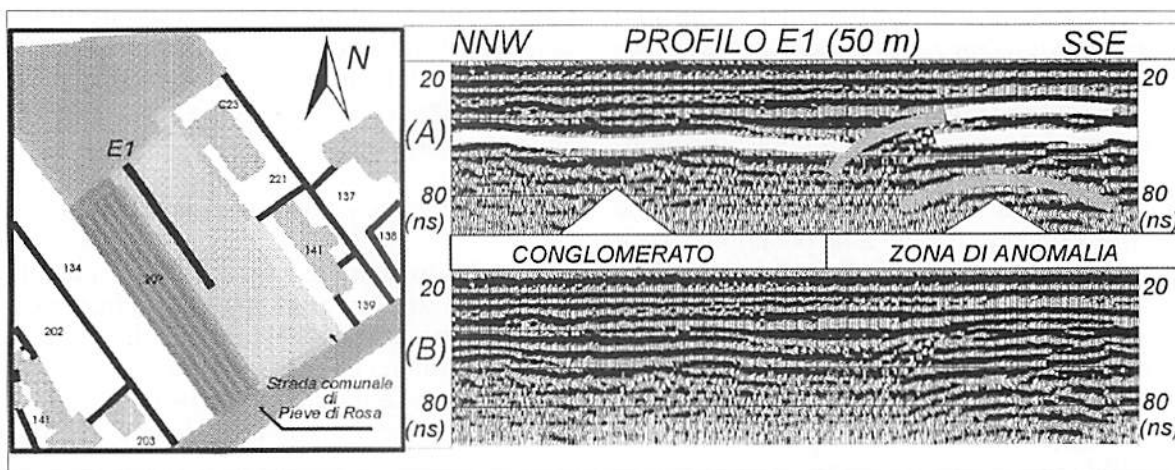


Figura 4. Esempio di profilo georadar nell'area di Camino al Tagliamento: A) Profilo georadar elaborato; B) Profilo georadar interpretato.

4. Vigneti presso Camino al Tagliamento.
5. Campi presso il cimitero di Camino al Tagliamento.
6. Campi coltivati a sud della Pieve di Rosa.

Le aree di indagine si trovano in zona di piana alluvionale ad una distanza non superiore ai 2000 m dall'argine del fiume Tagliamento. In un terreno caratterizzato da depositi alluvionali con granulometrie variabili da argille a sabbie grossolane, è segnalata la presenza di livelli di conglomerato e lenti di ghiaia. Ad eccezione dell'interno della Pieve, dove i rilievi sono stati effettuati sulla pavimentazione della Chiesa, l'acquisizione dei dati è avvenuta su superfici erbose. Il lavoro di campagna è stato completato nell'arco di sei giornate con l'acquisizione di oltre 12 km di profili radar.

I dati sono stati quindi elaborati ed interpretati nel Centro Processing del GGE, utilizzando una rete di moderne workstations per il trattamento del segnale sismico e georadar. Sono state applicate metodologie di elaborazione ed interpretazione dati che rappresentano lo stato dell'arte nel settore delle indagini georadar per l'archeologia e sono il frutto dell'attività di ricerca finora svolta dall'Università di Trieste in questo campo.

Risultati delle indagini

All'interno della Pieve è stato realizzato un rilievo ad altissima risoluzione che ha consentito la ricostruzione di immagini tridimensionali del sottosuolo fino ad una profondità di indagine di circa due metri. È stata identificata una forte anomalia localizzata nella parte nord-orientale della chiesa, nella zona antistante i due altari laterali. Le caratteristiche della risposta georadar indicano la presenza di una cavità che in pianta ha una

estensione stimata intorno ai tre metri quadri. La cavità è allungata nella direzione dell'asse della chiesa e la sua sommità si trova ad una profondità minima di circa 40 cm. Una ricostruzione tridimensionale della sommità della cavità è riportata in Fig. 3. L'immagine è stata ottenuta attraverso l'elaborazione di una griglia di oltre 30 profili georadar ottenuti effettuando misure a copertura multipla ogni 2,5 cm. All'interno della chiesa sono state inoltre identificate anomalie di ampiezza variabile situate a profondità comprese tra i 50 cm ed i 180 cm. La disposizione e le caratteristiche di tali anomalie sono attualmente in corso di studio per risalire alla loro possibile origine. I risultati finora ottenuti dalle analisi ed il confronto con dati georadar ottenuti nell'ambito di indagini condotte nella Basilica di Aquileia indicano che tali anomalie potrebbero essere collegate alla presenza di opere murarie sepolte.

Nell'area del vigneto e del campo di erba medica ad est dell'abitato di Pieve di Rosa (area 3) sono stati registrati oltre 40 profili per un totale di circa 2 km. In questa zona sono stati effettuati dei sondaggi dagli esperti della Società Friulana di Archeologia e dei Civici Musei di Udine sulla base delle indicazioni fornite dai rilievi georadar. Nella zona è chiaramente visibile la riflessione proveniente da un livello di conglomerati ad una profondità media di circa 120 cm. Ulteriori riflessioni sono chiaramente identificabili a profondità maggiore. In base alle loro caratteristiche, parte di queste possono essere attribuite a discontinuità pedologiche legate alla sedimentazione in ambiente di piana alluvionale. In fase di interpretazione dei dati si è pertanto tenuto conto delle caratteristiche presunte dell'obiettivo (strada romana) e sono state pertanto identificate le anomalie legate a riflettori di limitata estensione laterale ed alle

loro interruzioni. Date le caratteristiche della zona e della sedimentazione, tali interruzioni sono probabilmente da collegare all'intervento dell'uomo. Gli scavi effettuati in corrispondenza di una di tali anomalie (Fig. 4) hanno dato come esito la scoperta di una struttura il cui interesse dal punto di vista archeologico è attualmente al vaglio degli esperti. Lo scavo ha individuato, in perfetto accordo con l'interpretazione dei dati georadar, la sommità di un livello di sedimenti grossolani fortemente compattati di limitata estensione (circa 8 metri) ad una profondità di circa 40 cm. Il livello presenta un'interruzione, ben identificabile sulle sezioni radar, all'interno della quale sono stati rinvenuti resti di vasellame.

Nei vigneti presso Camino al Tagliamento (area 4) sono stati realizzati oltre 3 km di profili georadar che hanno portato all'individuazione di una forte anomalia a profondità ridotta (circa 50 cm). Tale anomalia può essere collegata alla presenza di un livello di sedimenti compattati con caratteristiche analoghe a quelli individuati nell'area precedente (area 3) e con estensione laterale variabile dai 10 ai 15 metri.

Nei campi presso il cimitero di Camino al Tagliamento, lo scavo effettuato sulla base delle identificazioni di chiare anomalie nelle sezioni georadar ha portato al ritrovamento di resti di vasellame.

Conclusioni e prospettive future

Le aree esaminate nell'ambito del presente studio sono caratterizzate da un'ottima risposta alle indagini con metodi elettromagnetici in alta frequenza (Ground Penetrating Radar). Questo è dovuto alla composizione del terreno ed alle caratteristiche superficiali che garantiscono una buona penetrazione dell'energia ed un'elevata qualità delle registrazioni. L'applicazione delle tecnologie innovative Ground Penetrating Radar a copertura multipla ha consentito la ricostruzione di immagini del sottosuolo di notevole dettaglio in tutte le aree indagate. Gli scavi effettuati dagli esperti del settore archeologico sulla base delle indicazioni fornite dai rilievi georadar hanno consentito una immediata verifica dei risultati delle indagini geofisiche ad alta risoluzione ed hanno fornito le indicazioni necessarie per una taratura dei profili georadar nella prospettiva di una prosecuzione dello studio dell'area. La prima campagna di indagine ha quindi potuto individuare diversi obiettivi di interesse, non tutti menzionati in questa nota per motivi di sintesi, ma che potranno essere considerati per il futuro sviluppo di indagini archeologiche nell'area. La cooperazione scientifica avviata dai Civici Musei di Udine e dall'Università di Trieste per lo studio di aree di interesse archeologico rappresenta un importante esempio a livello nazionale di applicazione di tecnologie avanzate per il reperimento e la tutela del patrimonio culturale sepolto.

PIPAN Michele, BARADELLO Luca,
PRIZZON Alessandro e FORTE Emanuele
Università di Trieste, Dipartimento di Scienze
Geologiche, Ambientali e Marine.