

INDAGINI GEOFISICHE PER L'INDIVIDUAZIONE DI STRUTTURE ARCHEOLOGICHE PRESSO IL CENTRO STORICO DI PESARO

IL DIRETTORE

DOTT.SSA COSTANZA MILIANI

Costanza
Miliani
01.08.2023
13:26:58
GMT+01:00



I RESPONSABILI SCIENTIFICI

DR GIOVANNI LEUCCI LEUCCI GIOVANNI



DR SALVATORE PIRO



GIUGNO 2023



PREMESSA

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dall'indagine geofisica.

Le indagini sono state realizzate mediante metodologie non distruttive con apparecchiature in dotazione al Laboratorio di Geofisica Applicata ai Beni Archeologici e Monumentali della sede del CNR-ISPC di Lecce.

Allo scopo di individuare strutture di interesse archeologico eventualmente presenti all'interno dell'area indagata, sono state impiegate le metodologie di indagine geofisica denominate georadar e geoelettrica, quest'ultima in configurazione non standard.

E' stato impiegato il GPR Impulsato Hi Mod (IDS) dotato di antenne da 200MHz e 600MHz ed il georesistivimetro Syscal Kid.

Le indagini geofisiche sono state effettuate in data 27 e 28 Giugno 2023. Le indagini sul campo sono state realizzate dal Dr Giovanni Leucci, dalla Dott.ssa Lara De Giorgi, dal Dott. Ivan ferrari, e dalla Dott.ssa Dora Francesca Barbolla. Le elaborazioni dei dati geofisici sono a cura del Dott. Giovanni Leucci con la collaborazione della Dott.ssa Lara De Giorgi. L'interpretazione dei dati è stata effettuata integrando le differenti competenze, sia geofisiche (Dott. Giovanni Leucci, Dott. Salvatore Piro e la Dott.ssa Lara De Giorgi) che archeologiche (Dott. Ivan Ferrari).



1. PROSPEZIONI GEORADAR

La strumentazione georadar (GPR) utilizzata è un impulsato RIS HI Mod dell'IDS, in dotazione al Laboratorio di Geofisica per l'Archeologia ed i Beni Monumentali dell'ISPC-CNR di Lecce. Il georadar è una tecnica di indagine indiretta e non invasiva che consente l'individuazione di anomalie elettromagnetiche sepolte a diversa profondità. Il sistema impulsato utilizzato per queste indagini è equipaggiato con un'antenna del tipo "dual band" a frequenze centrali nominali 200 MHz e 600 MHz (Foto 1).



Foto 1: sistema georadar utilizzato nelle indagini

Per la elaborazione dei dati è stato utilizzato il software GPRSLICE. La fase di elaborazione ed interpretazione dati è principalmente basata sull'individuazione di riflettori, sul calcolo della loro posizione in profondità e delle loro dimensioni. Essa è generalmente preceduta da una fase di filtraggio durante il quale una serie di filtri applicati ai dati consente il miglioramento del rapporto segnale/rumore. Successivamente, tenendo in considerazione gli scopi dell'indagine, ogni profilo viene trattato in modo da mettere in maggior risalto le informazioni richieste.

In caso quindi di indagini finalizzate all'individuazione di target di piccole dimensioni, i dati verranno filtrati in modo da rimuovere le riflessioni a profondità costante evidenziando principalmente le variazioni laterali del segnale. Una volta ottenuta la sezione radar relativa ad ogni profilo, viene effettuata la sua conversione dalla scala verticale dei tempi alla scala delle



profondità. Quest'ultima fase richiede la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche che può essere effettuata utilizzando il metodo denominato “riflessione da un punto sorgente”.

Di seguito vengono elencate le fasi di elaborazione dei dati GPR:

1) rimozione della traccia media: questo tipo di filtro permette la rimozione della banda orizzontale visibile nelle sezioni radar, che può rappresentare riflessioni da oggetti che si mantengono a distanza costante dall'antenna. L'algoritmo, basandosi su un semplice processo aritmetico, che somma tutte le ampiezze delle riflessioni generate allo stesso tempo lungo il profilo e divide per il numero delle tracce sommate, permette di rimuovere la traccia media e di esaltare, così, gli eventi non orizzontali presenti nelle sezioni radar;

2) normalizzazione dell'ampiezza (declipping): per eliminare locali saturazioni nell'ampiezza delle tracce. Si sceglie un fattore di scala (0.6 nel nostro caso) per il quale saranno moltiplicati tutti i valori dell'ampiezza: una procedura di interpolazione che utilizza un polinomio di terzo ordine permetterà la ricostruzione delle forme d'onda saturate.

3) migrazione: una tecnica che permette di eliminare distorsioni introdotte nei dati registrati. una sezione GPR non contiene informazioni unidirezionali a causa del lobo conico di radiazione dell'energia per cui alcune riflessioni presenti possono essere generate anche da oggetti posti lateralmente rispetto alla posizione dell'antenna. Questo carattere multidirezionale della registrazione delle riflessioni GPR si manifesta nella generazione di iperboli che possono causare seri problemi nell'interpretazione. La migrazione risolve questo problema di immagine riportando l'energia al suo vero punto di riflessione.

4) filtro passa basso: consente di eliminare la componente di rumore ad alta frequenza (effetto nebbia) presente nelle sezioni radar.

La planimetria dei profili ha consentito di correlare spazialmente, in modo 3d, le anomalie presenti su ciascuna sezione utilizzando l'analisi dell'ampiezza degli eventi riflessi entro assegnati intervalli di tempo (time slices) (Fig. 1).

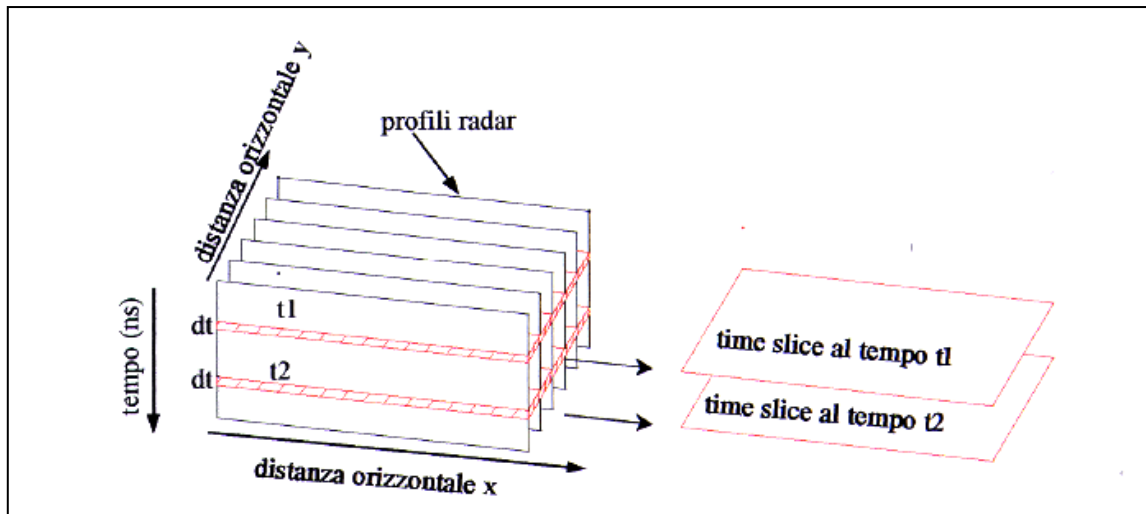


Figura 1: schema di costruzione delle time slices; l'ampiezza visualizzata nelle time slices rappresenta la media dei quadrati delle ampiezze degli eventi riflessi nella finestra temporale dt

Come è noto, l'ampiezza degli eventi riflessi è direttamente correlabile con il contrasto tra le caratteristiche elettriche dei mezzi presenti nel sottosuolo, pertanto la visualizzazione tridimensionale, per intervalli di ampiezza, della distribuzione degli eventi riflessi consente la localizzazione spaziale delle strutture che determinano le riflessioni stesse. Ogni time slice corrisponde ad uno strato di terreno la cui profondità ed il cui spessore dipendono, oltre che dai valori assunti per il tempo, dalla velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo.

Il tipo di analisi precedentemente descritto applicato alle aree in studio ha dato risultati soddisfacenti. Il colore blu indica debole ampiezza del segnale riflesso (sottosuolo costituito da materiale sostanzialmente omogeneo); i colori dal celeste al rosso più intenso indicano ampiezze via via crescenti del segnale riflesso e quindi presenza di discontinuità elettromagnetiche significative. Le variazioni di ampiezza (quindi di colore) in una stessa slice sono indice di variazioni orizzontali nelle caratteristiche elettromagnetiche del terreno.

E' stata presa in considerazione anche la visualizzazione 3D attraverso le iso superfici di ampiezza del segnale elettromagnetico



1.1 RISULTATI

Le misure georadar sono state eseguite nelle aree denominate rispettivamente Area 1, 2, 3, 4, 5, e 6 (Fig. 2).

Tutti i profili sono stati acquisiti con 512 campioni/traccia; gli altri parametri di acquisizione sono stati ottimizzati in loco e tenuti costanti per tutti i profili di ciascun rilievo.

Per tentare di eliminare una componente di rumore dovuta alla irregolarità del terreno e consentire la interpretazione, sia pure parziale, dei dati stessi, è stata realizzata un'elaborazione i cui passi sono sopra elencati.

Le caratteristiche elettromagnetiche dei materiali presenti nel sottosuolo hanno influenzato la profondità di indagine che è risultata essere di circa 3,50 m per l'antenna da 600MHz e di circa 7.0 m per quella da 200MHz. Vengono di seguito presentati i risultati relativi all'antenna da 200 MHz

1.1.1 AREA 1

Nell'area 1 sono stati acquisiti profili paralleli ad un passo di 0.5m. La planimetria dei profili ha consentito l'analisi attraverso le depth slices (Fig. 3).

A pochi metri di profondità (0.8-1.1m) si distinguono chiaramente alcune anomalie principali (S), riferibili, alla probabile presenza di sottoservizi. A profondità comprese tra 1.1 e 2.2 m si evidenzia la presenza di anomalie (A) attribuibili a probabili strutture murarie. A profondità maggiori (3.4 m-6.0 m) si evidenzia la presenza di anomalie (B) probabilmente associabili a strutture murarie. A 7.1 m-7.5 m di profondità è visibile una serie di anomalie (B1) che potrebbero essere correlate a strutture di interesse archeologico (muri).

La visualizzazione 3D tramite le isosuperfici di ampiezza (Fig. 4) individua meglio (in modo 3D) le probabili strutture di interesse archeologico.

1.1.2 AREA 2

Anche nel caso dell'area 2 la planimetria dei profili ha consentito l'analisi attraverso le depth slices (Fig. 5).

Dalla profondità di 2.2 m si distinguono chiaramente alcune anomalie principali (C e G), riferibili, a probabili strutture murarie. La visualizzazione 3D tramite le isosuperfici di



ampiezza (Fig. 6) individua meglio (in modo 3D) le probabili strutture di interesse archeologico.

1.1.3 AREA 3

Nell'area 3 l'analisi dei dati attraverso le depth slices (Fig. 7) ha dato buoni risultati. In superficie (0.4 m-0.8 m) si evidenzia la probabile presenza di sottoservizi (S). A profondità comprese tra 0.8 m e 1.1 m sono presenti anomalie (A) attribuibili a probabili strutture murarie. Alla profondità compresa tra 7.0 m e 7.5 m si distinguono chiaramente alcune anomalie principali (SA), riferibili, a probabili strutture murarie.

La visualizzazione 3D tramite le isosuperfici di ampiezza (Fig. 8) individua meglio (in modo 3D) le probabili strutture di interesse archeologico.

1.1.4 AREA 4

Nell'area 4 l'analisi dei dati attraverso le depth slices (Fig. 9) ha evidenziato a partire da 3.4 m di profondità un'anomalia (A) attribuibile alla probabile presenza di strutture murarie. A profondità comprese tra 0.8 m e 1.1 m sono presenti anomalie (A1) attribuibili a probabili strutture murarie. La visualizzazione 3D tramite le isosuperfici di ampiezza (Fig. 10) individua meglio (in modo 3D) le probabili strutture di interesse archeologico.

1.1.5 AREA 5

Nell'area 5 l'analisi dei dati attraverso le depth slices (Fig. 11) ha evidenziato a partire da 3.3 m di profondità un'anomalia (E) attribuibile alla probabile presenza di strutture murarie. A profondità comprese tra 0.8 m e 1.1 m sono presenti anomalie (A) attribuibili a probabili strutture murarie. La visualizzazione 3D tramite le isosuperfici di ampiezza (Fig. 12) individua meglio (in modo 3D) le probabili strutture di interesse archeologico.

2. PROSPEZIONE GEOELETTRICA

I metodi geoelettrici consentono di caratterizzare il sottosuolo dal punto di vista del parametro fisico resistività elettrica (ρ). 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. Tipicamente, la resistività che i litotipi,



offrono alla circolazione di corrente elettrica dipende dal contenuto d'acqua interstiziale, dalla temperatura, dal contenuto di gas disciolti nell'acqua, dalla presenza di ioni liberi.

La stima dei valori di resistività si realizza mediante un quadripolo elettrico costituito da due elettrodi A e B, detti di corrente, e due elettrodi M ed N detti di potenziale. Attraverso gli elettrodi A e B viene inviata nel sottosuolo una corrente di intensità I nota e tramite gli elettrodi M e N si misura la differenza di potenziale ΔV . I quattro elettrodi costituiscono, nel loro insieme, il dispositivo elettrodico di misura, che può presentare diverse geometrie di disposizione sul terreno, ognuna caratterizzata da un parametro K che prende il nome di "fattore geometrico".

La relazione che lega i parametri fisici corrente elettrica (I), differenza di potenziale (ΔV), resistività elettrica (ρ) è la ben nota legge di Ohm:

$$\rho = K \Delta V / I.$$

Definendo ΔV in volts, I in Amperes e K in metri, la resistività ρ viene espressa in Ohm m. In realtà quella che viene calcolata 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.

Le tecniche di misura consistono in mappe, in profili di resistività, in sondaggi elettrici verticali (SEV) e in pseudosezioni e tomografie 2D e 3D. Le mappe vengono realizzate traslando il dispositivo ortogonalmente alla sua lunghezza, ottenendo in tal modo informazioni sulle variazioni areali dei valori di resistività. Per la costruzione dei profili, invece, si trasla il dispositivo parallelamente alla sua lunghezza a partire da un punto fisso scelto come origine; questa tecnica consente di individuare variazioni laterali di resistività. Nei SEV, infine, l'array elettrodico viene progressivamente allargato rispetto ad un punto medio fisso, per ricavare informazioni circa l'andamento verticale dei valori di resistività.

La strumentazione utilizzata per le misure (Syscal Kid- swich opportunamente modificato) (Foto 2) contiene assemblati sia il sistema di 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.



Foto 2: georesistivometro utilizzato nelle indagini

La scelta del dispositivo è influenzata dalla volontà di ottenere informazioni 3D. E' stato quindi utilizzato il dispositivo dipolare assiale (dipolo-dipolo) che, tramite una particolare procedura di campagna, consente di ottenere una griglia regolare di valori di resistività apparente nella sezione verticale sotto un profilo di indagine. Eseguendo profili con geometria non standard, denominata a serpente, avremo una griglia pseudo 3D di valori di ρ a. Da questo set di dati si possono quindi estrarre sia Tomografie Geoelettriche Verticali XZ (TGV) che Orizzontali XY (TGO) a varie profondità che rendono un quadro chiaro della distribuzione di resistività nel sottosuolo.



2.1 Risultati prospezioni geoelettriche

2.1.1 AREA 6

I dati sono stati elaborati con l'utilizzo del software ErtLab. Il modello di distribuzione del parametro fisico resistività elettrica, misurata in ohm m, a varie profondità è mostrato in Fig. 13. I risultati evidenziano alcune anomalie con valori di resistività comprese tra 120 e 300 ohm m. A profondità di circa 1.5 m si evidenziano le anomalie (A) probabilmente attribuibili a strutture murarie. A profondità più elevate (4.0 m – 5.0 m) si evidenziano altre anomalie alto resistive (I e H). Alcune di queste (I) assumono forma semi ellittica. Tali strutture potrebbero essere interpretate come essere muri.

La sezione verticale (Fig. 14) mostra un'anomalia orizzontale (C) della lunghezza di circa 26 m e due anomalie sub verticali (V). Tali anomalie sono correlate a strutture di interesse archeologico che per forma e dimensioni potrebbero essere interpretate come parte dell'anfiteatro.

3. Risultati prospezioni georadar all'interno della Cattedrale

A causa degli spazi limitati è stato possibile acquisire singoli profili la cui ubicazione è mostrata nelle Figg. 15 e 17.

Per i profili denominati R1, R2 ed R3 (Fig. 16) l'analisi dei dati ha messo in evidenza un'anomalia indicata con W che potrebbe essere correlata alla presenza di strutture murarie. La linea gialla tratteggiata potrebbe essere correlata ad una pavimentazione leggermante inclinata.

Per i profili denominati R4, R5 ed R6 (Fig. 18) l'analisi dei dati ha messo in evidenza un'anomalia indicata con W che potrebbe essere correlata alla presenza di strutture murarie. La linea gialla tratteggiata potrebbe essere correlata ad una probabile struttura a gradini..

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

In tutte le aree indagate i risultati hanno consentito di individuare anomalie riferibili a strutture di interesse archeologico a diversi metri di profondità (fino a circa 7.0 m) e coperti da materiali poco coerenti. La sovrapposizione dei dati (Fig. 19) relativi alle profondità comprese tra 0.8 m e 2.2 m evidenzia la presenza di numerose strutture murarie (linee rosse tratteggiate) che conservano lo stesso allineamento NNW-SSE. In Fig. 20 sono inserite le anomalie più

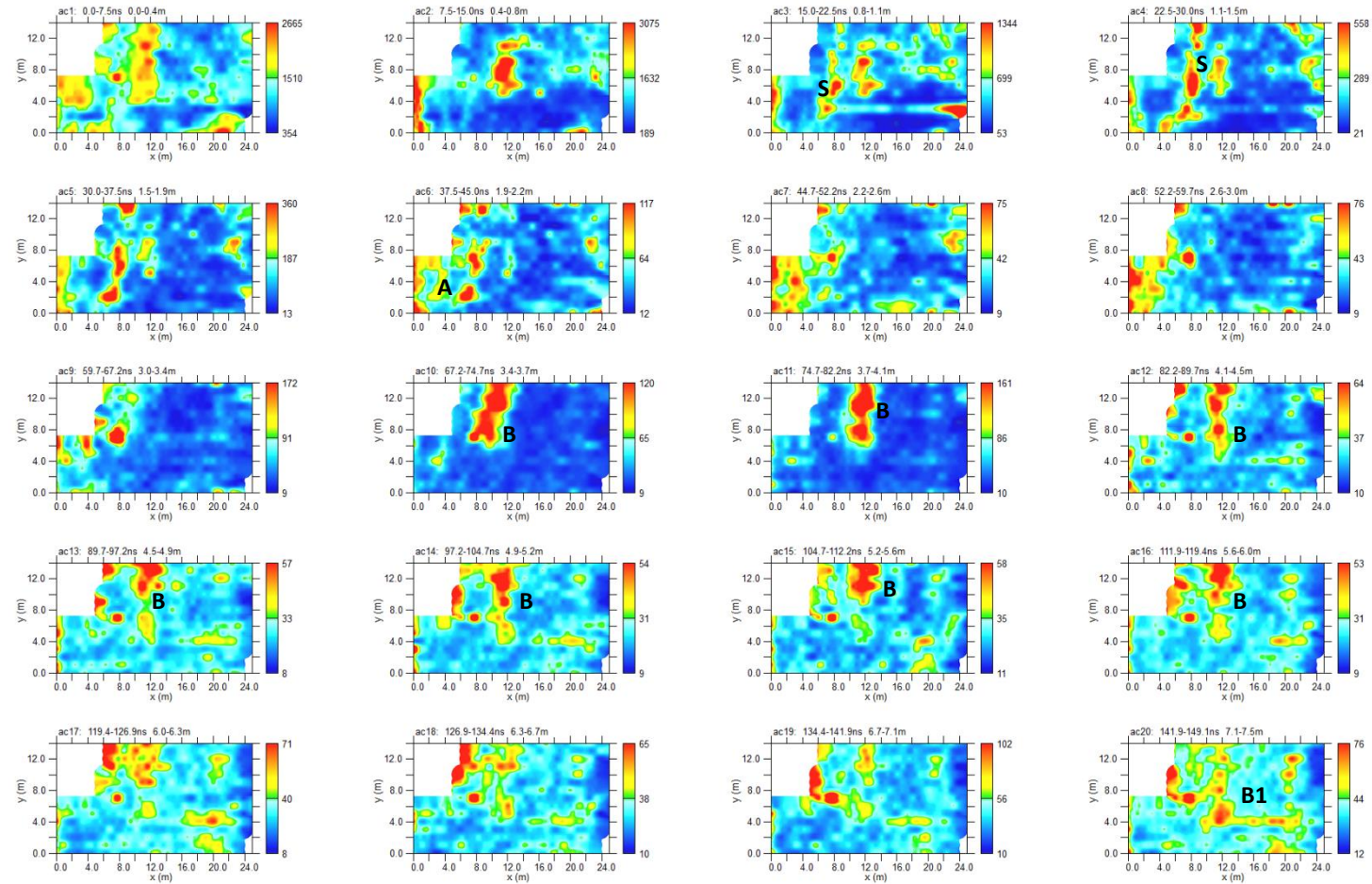


profonde. Essa consente di comprendere meglio la natura delle anomalie e di interpretare (quelle più profonde) come dovute alla probabile presenza di setti murari (probabile anfiteatro).

L'ulteriore analisi geostatistica dei dati (Fig. 21 e 22) consente di poter meglio correlare le anomalie presenti nei dati acquisiti. La correlazione è stata realizzata per le anomalie presenti a 4 m di profondità. Inoltre, per meglio comprendere i risultati, è stato realizzato una sorta di scavo virtuale con all'interno posizionati i risultati delle prospezioni geofisiche (Fig. 23).



FIGURE



**FIG. 3: Area 1: antenna da 200MHz: depth slices:
S: sottoservizi; A, B e B1: probabili strutture di interesse archeologico**

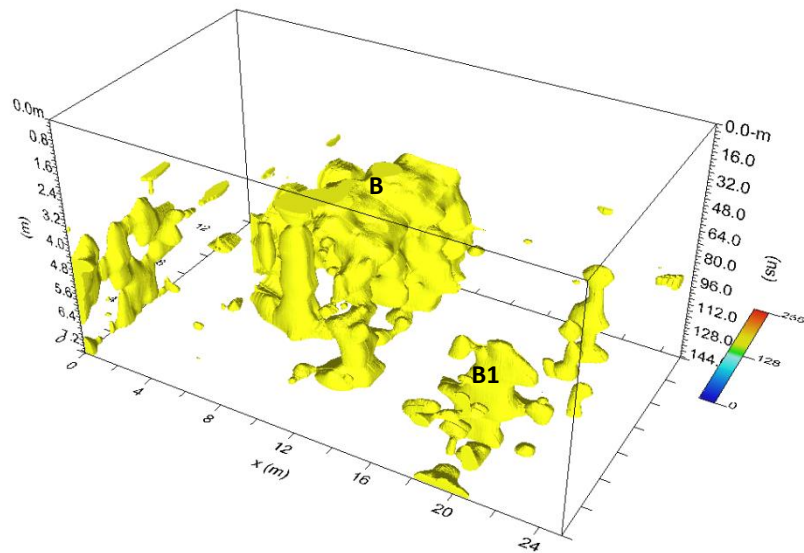
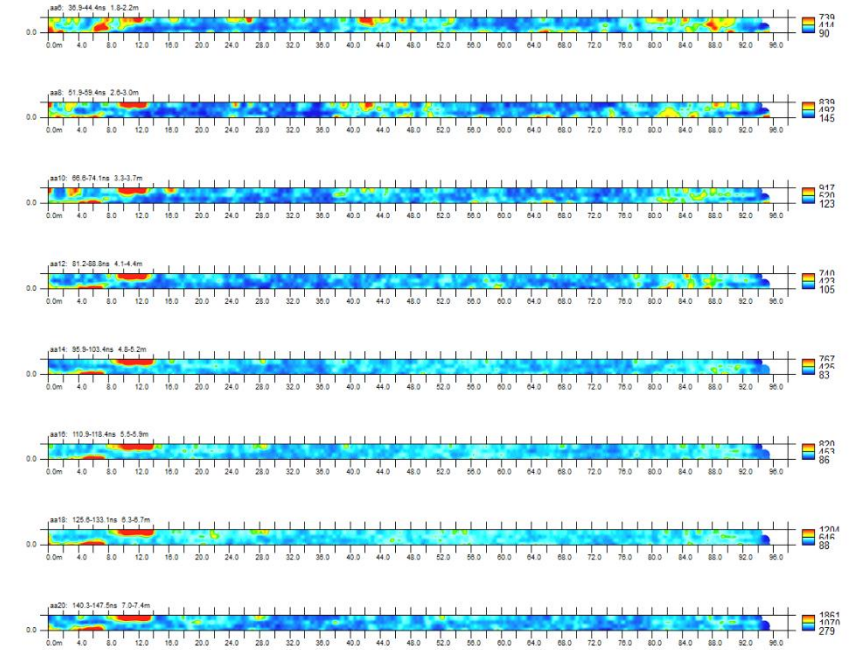
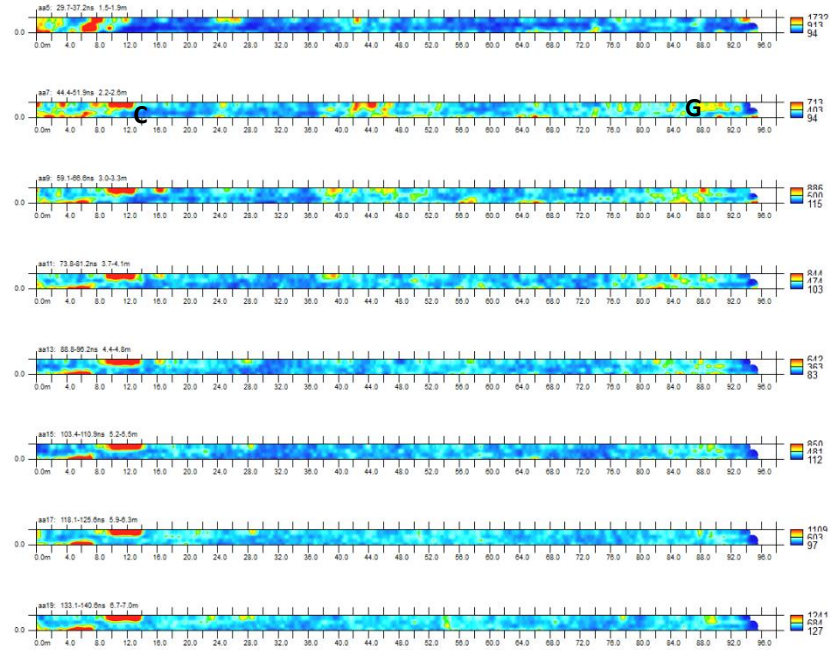


FIG. 4: Area 1: antenna da 200MHz: isosuperfici di ampiezza B e B1: probabili strutture di interesse archeologico



**FIG. 5: Area 2: antenna da 200MHz: depth slices
 C e G: probabili strutture di interesse archeologico**

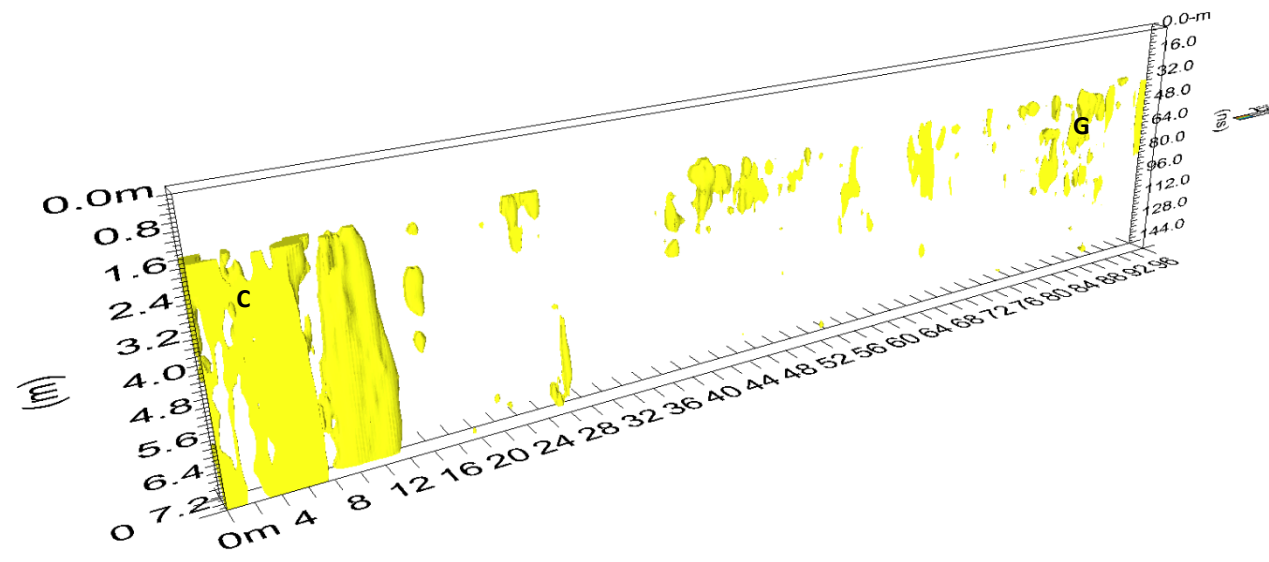


FIG. 6: Area 2: antenna da 200MHz: isosuperfici di ampiezza
C e G: probabili strutture di interesse archeologico

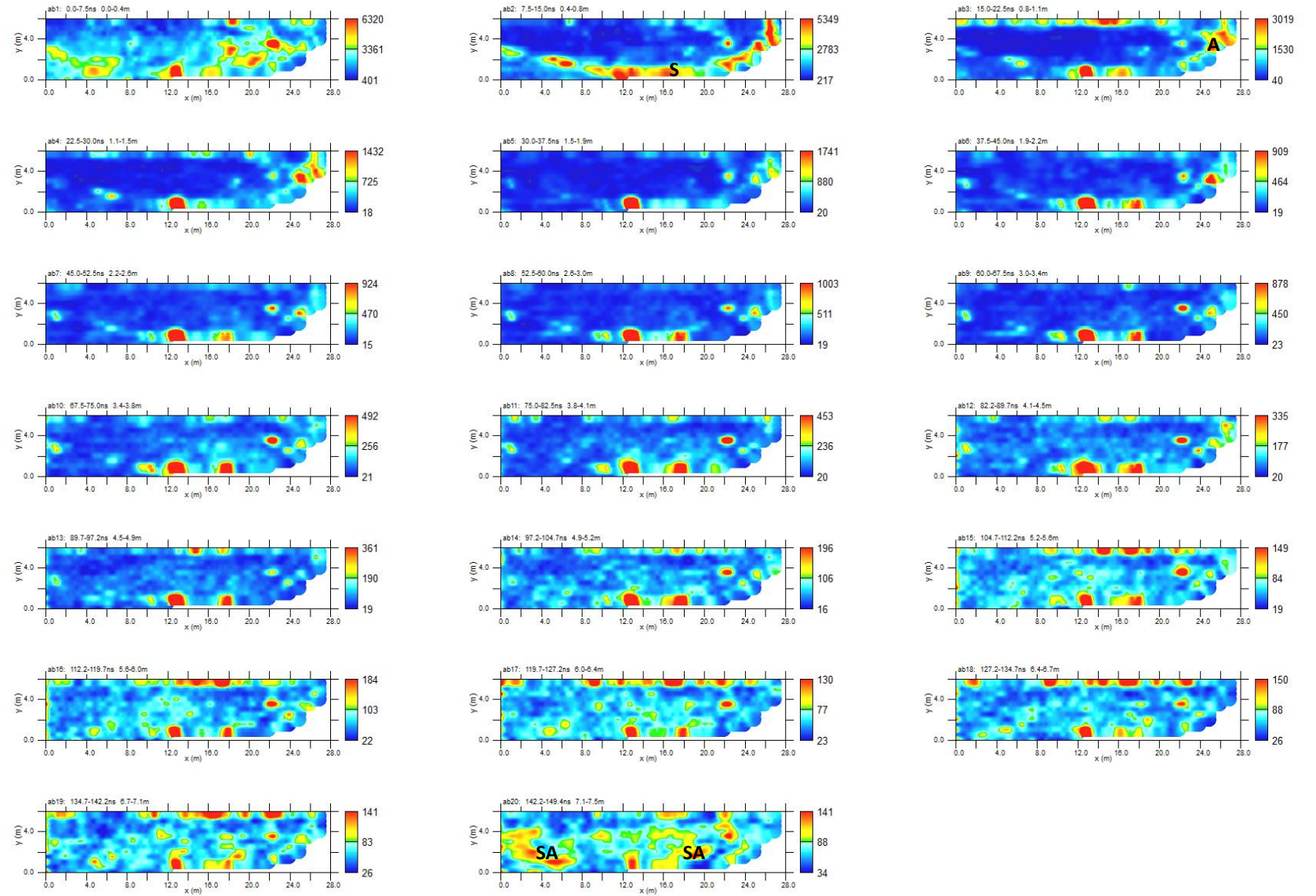
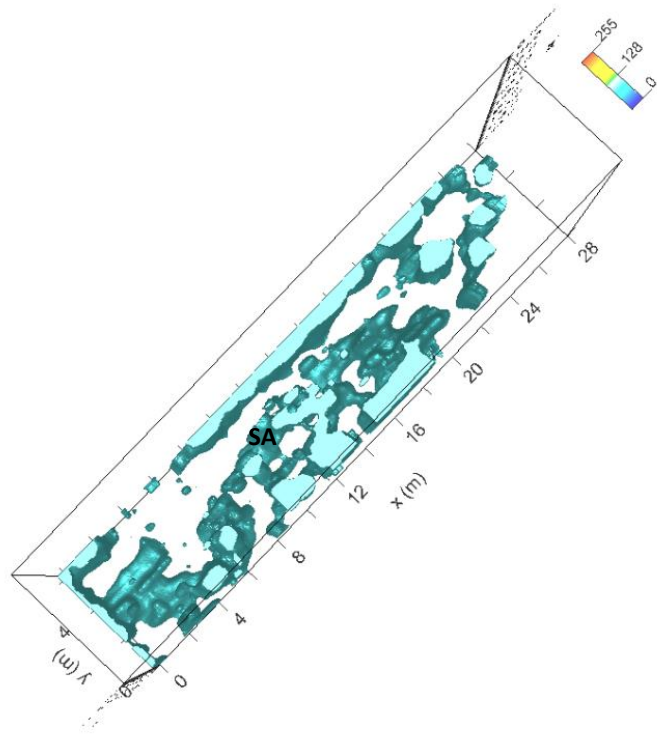


FIG. 7: Area 3: antenna da 200MHz: depth slices
S: sottoservizi; SA: probabili strutture di interesse archeologico



**FIG. 8: Area 3: antenna da 200MHz: isosuperfici di ampiezza
SA: probabili strutture di interesse archeologico**

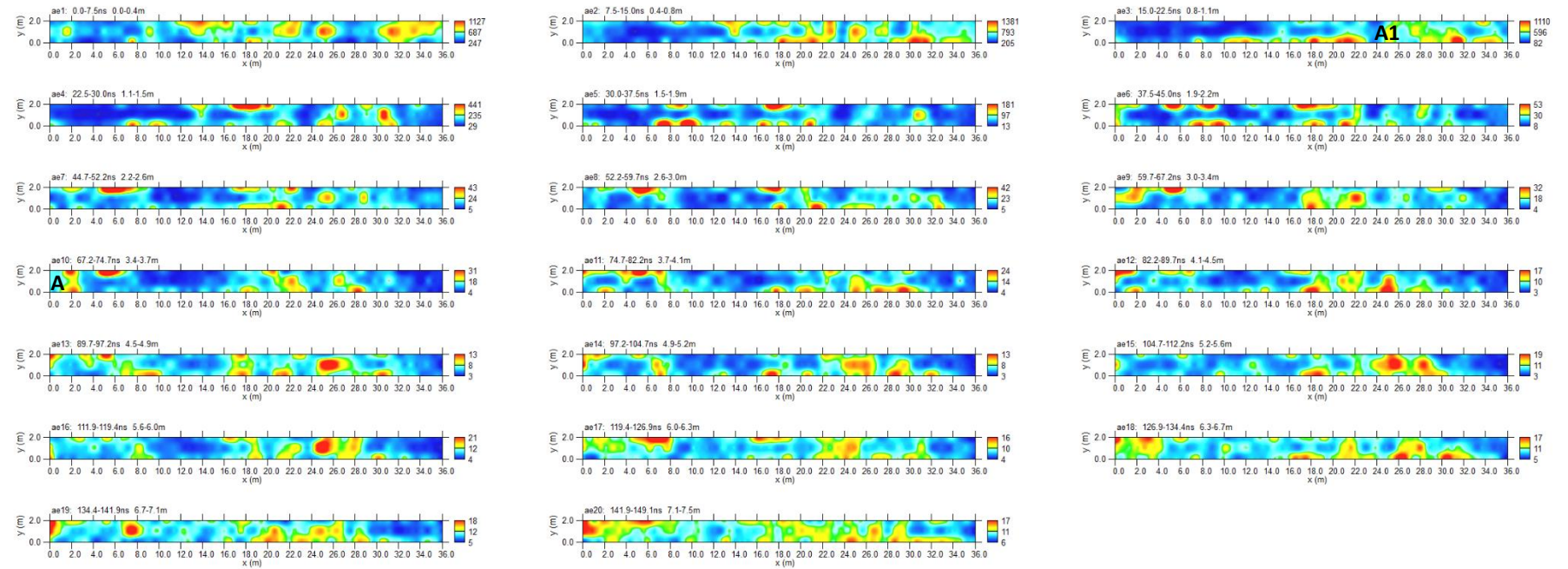


FIG. 9: Area 4: antenna da 200MHz: depth slices
A: probabili strutture di interesse archeologico

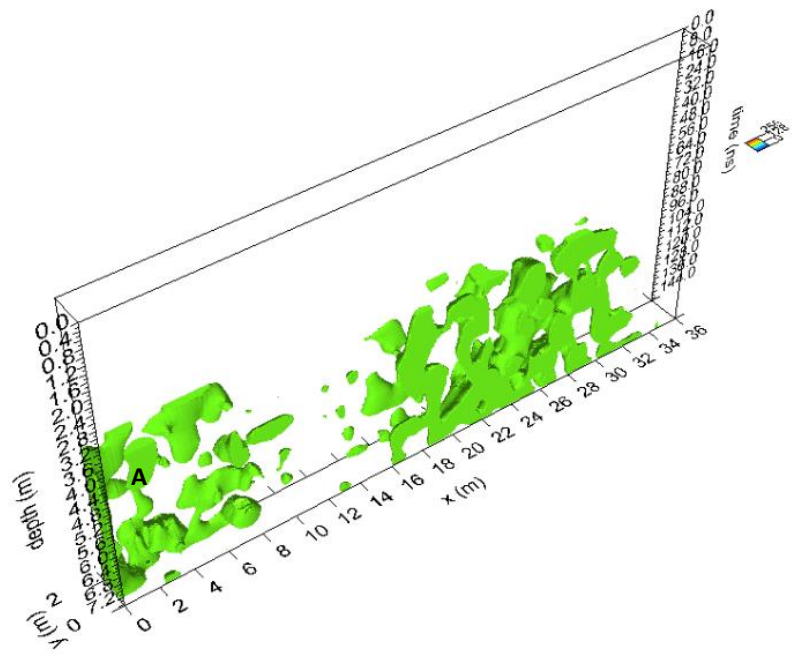
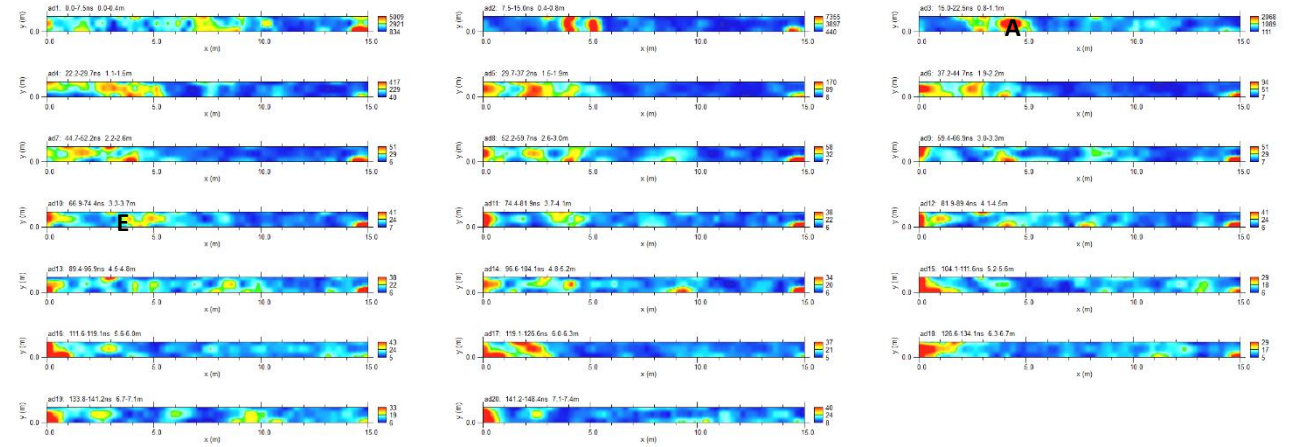
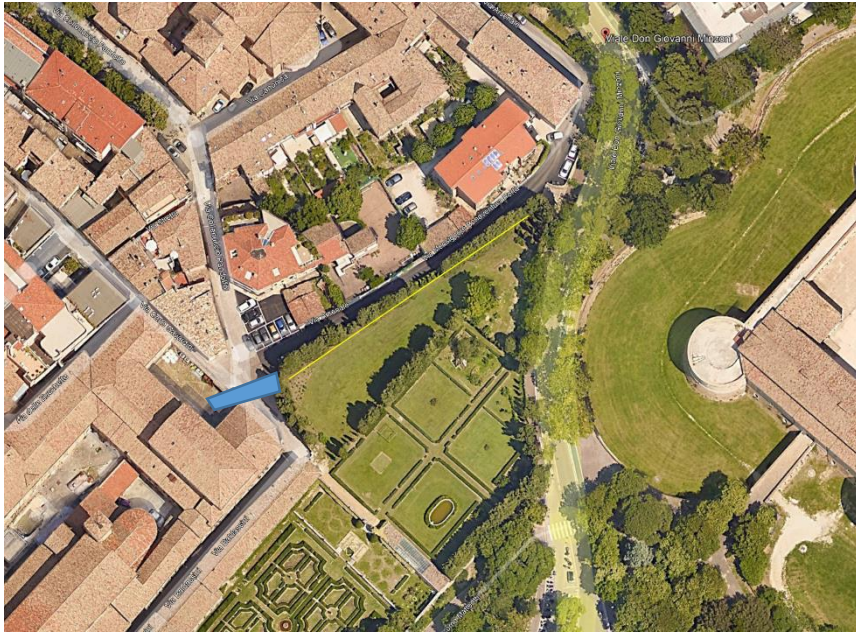


FIG. 10: Area 4: antenna da 200MHz: isosuperfici di ampiezza
A: probabili strutture di interesse archeologico



**FIG. 11: Area 5: antenna da 200MHz: depth slices
E: probabili strutture di interesse archeologico**

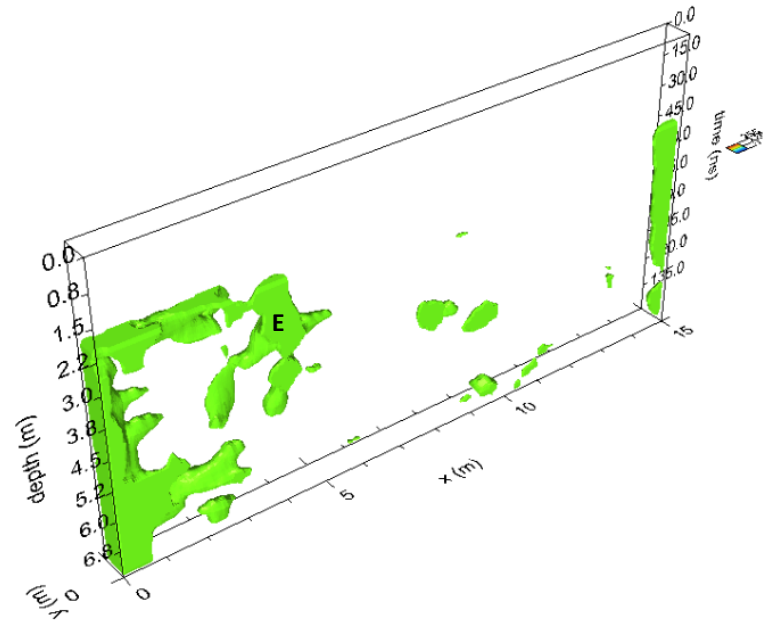


FIG. 12: Area 5: antenna da 200MHz: isosuperfici di ampiezza
E: probabili strutture di interesse archeologico

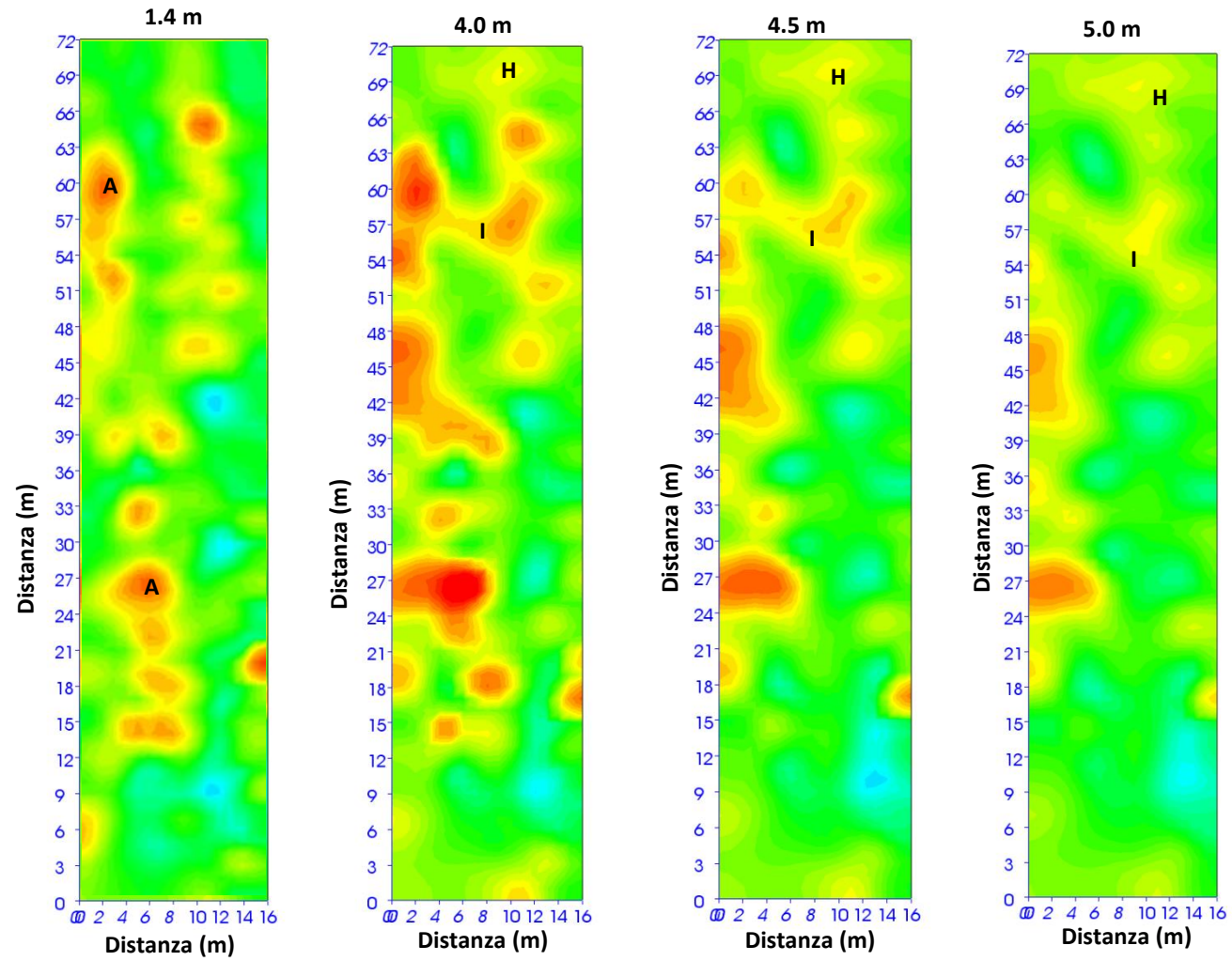


FIG. 13: Area 6: distribuzione della resistività a varie profondità
A, H e I: probabili strutture di interesse archeologico

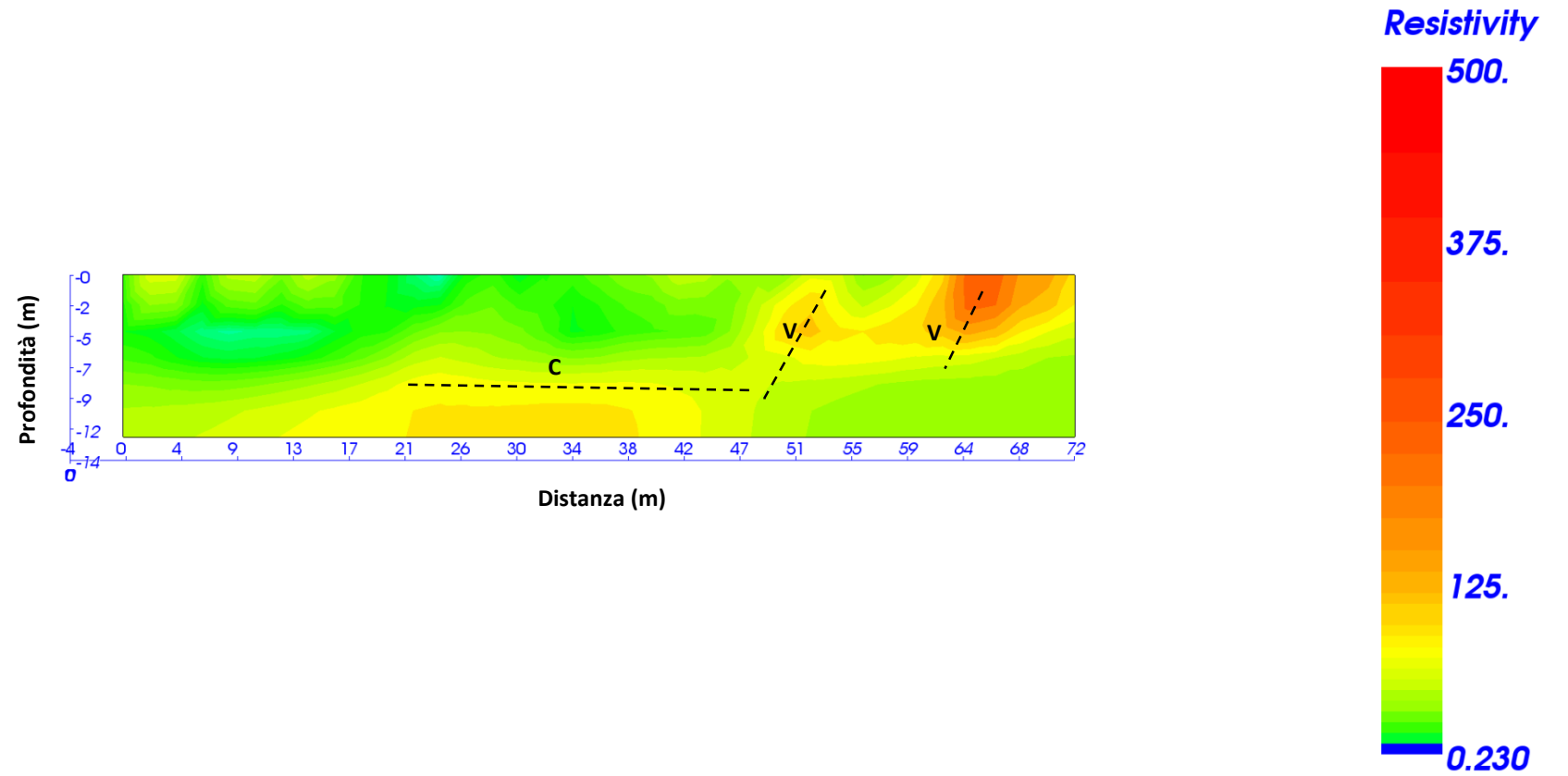


FIG. 14: Area 6: profilo verticale della distribuzione della resistività
C: struttura piatta; , V: strutture sub-verticali

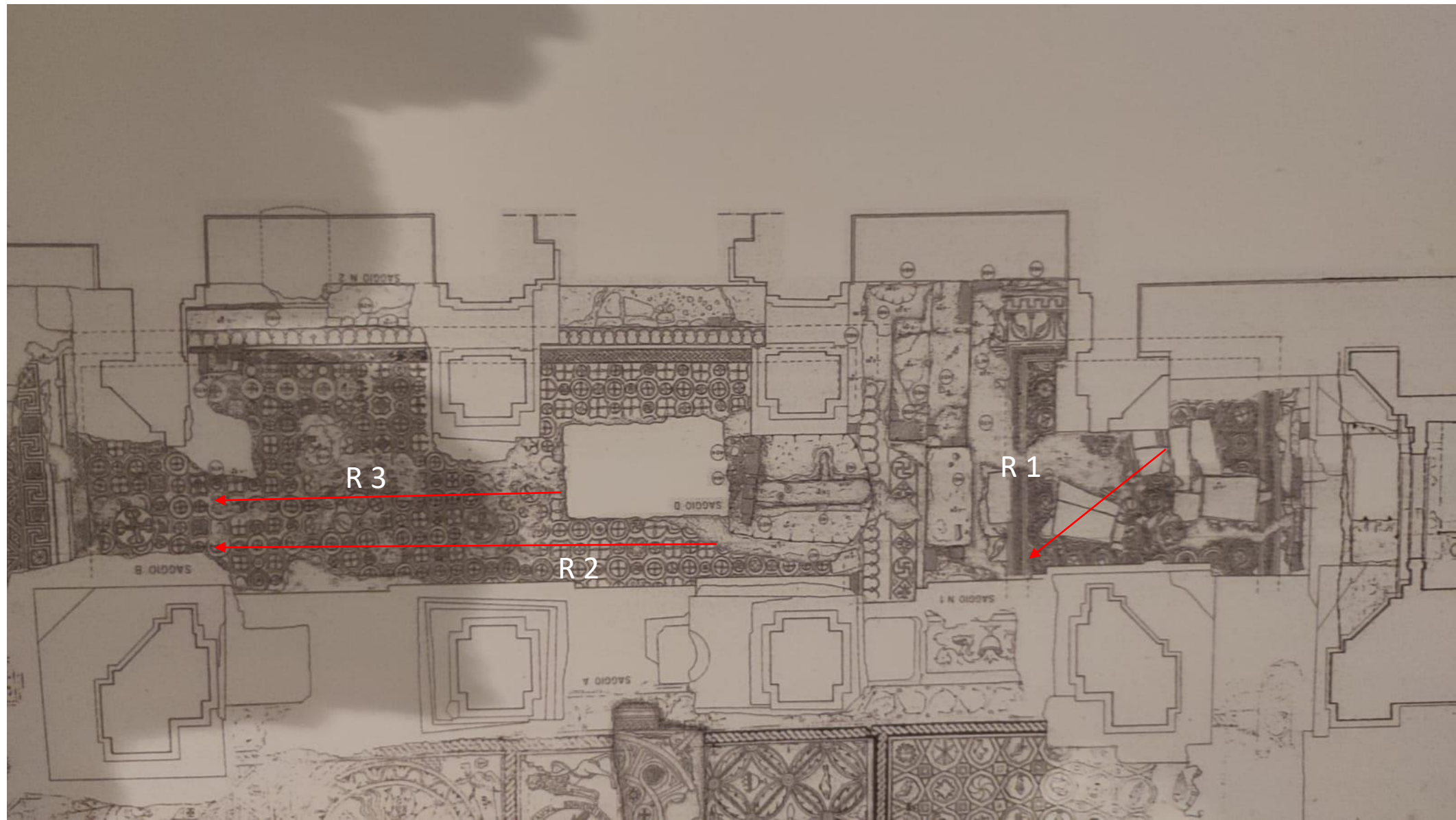
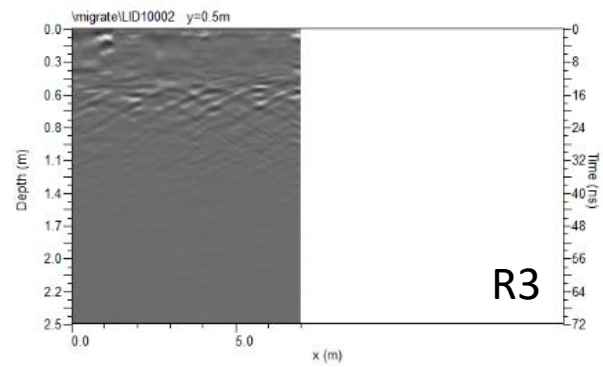
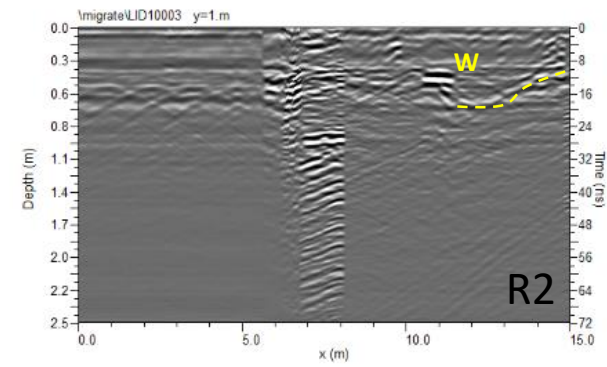
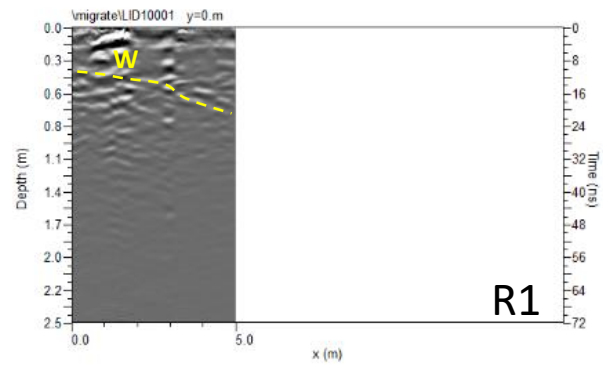


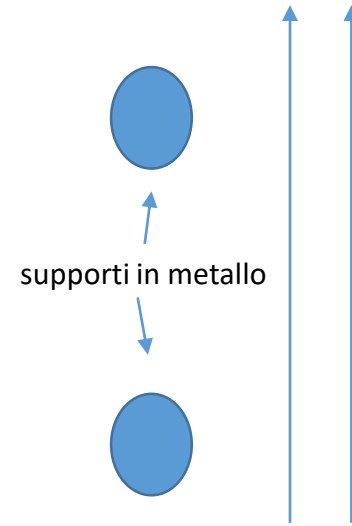
FIG. 15: Ubicazione dei profili georadar acquisiti in Cattedrale



**FIG. 16: Cattedrale: antenna da 600 MHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R1, R2 ed R3
W: probabile struttura muraria; linea gialla tratteggiata: probabile base.**



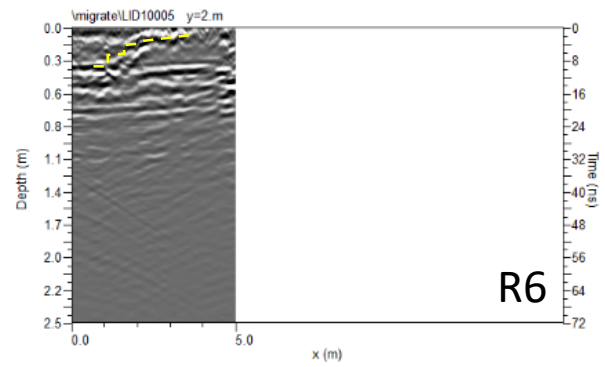
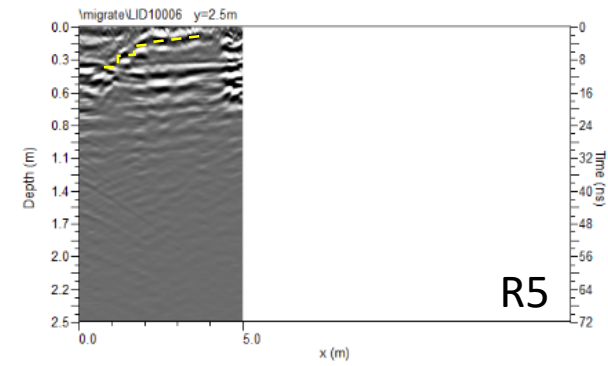
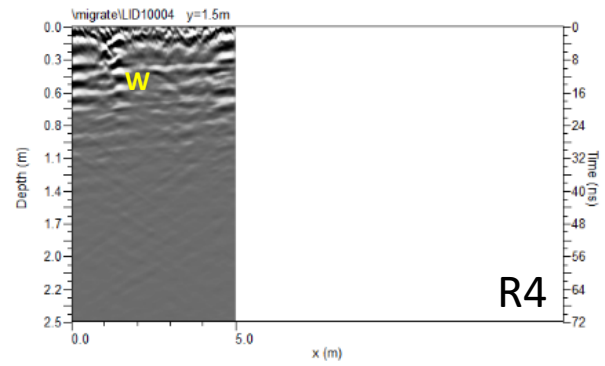
R 4
su mosaico



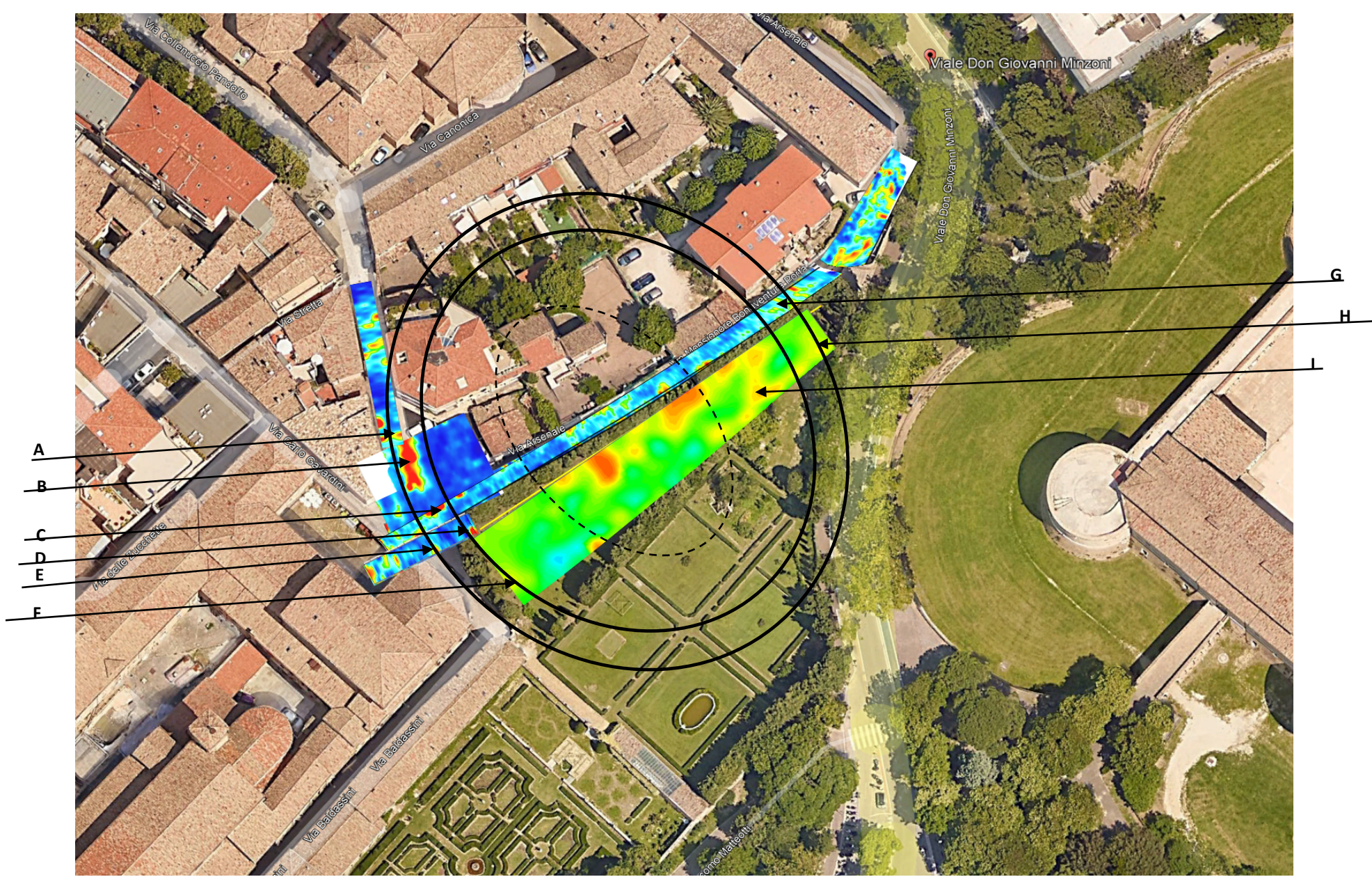
R 5-6
su pavimento grezzo



FIG. 17: Cattedrale: Ubicazione dei profili R4, R5 ed R6

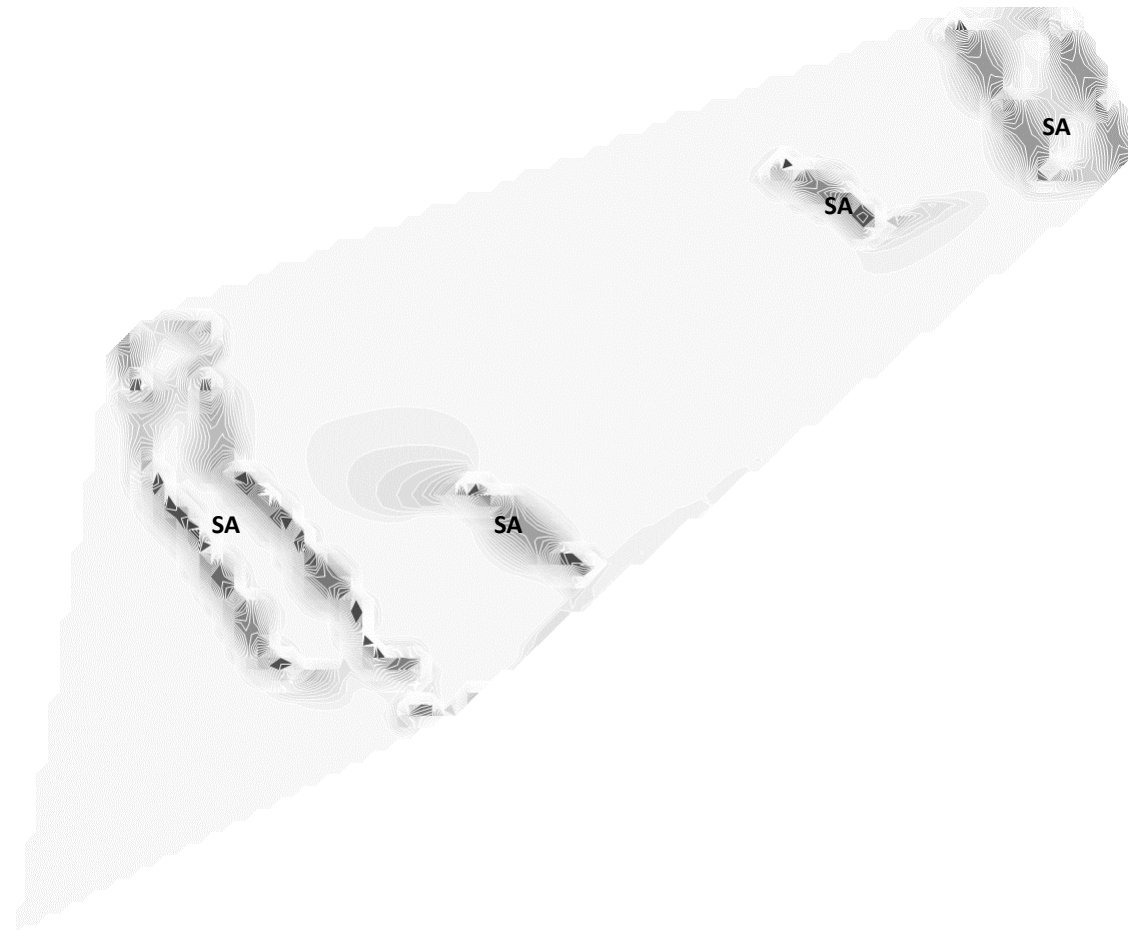


**FIG. 18: Cattedrale: antenna da 600 MHz: sezioni radar elaborate relative ai profili R4, R5 ed R6
W: probabile struttura muraria; linea gialla tratteggiata: probabile struttura a gradini.**



- Legenda**
- A: anomalia a 3.7m di profondità
 - B: anomalia a 3.7m di profondità
 - C: anomalia a 3.7m di profondità
 - D: anomalia a 3.7m di profondità
 - E: anomalia a 3.7m di profondità
 - F: anomalia a 4.5m di profondità
 - G: anomalia a 3.3m di profondità
 - H: anomalia a 4.5m di profondità
 - I: anomalia a 4.5m di profondità

FIG. 20: interpretazione dei dati



**FIG. 21: Analisi geostatistica dei dati geofisici a 4 m di profondità
SA: probabili strutture di interesse archeologico**

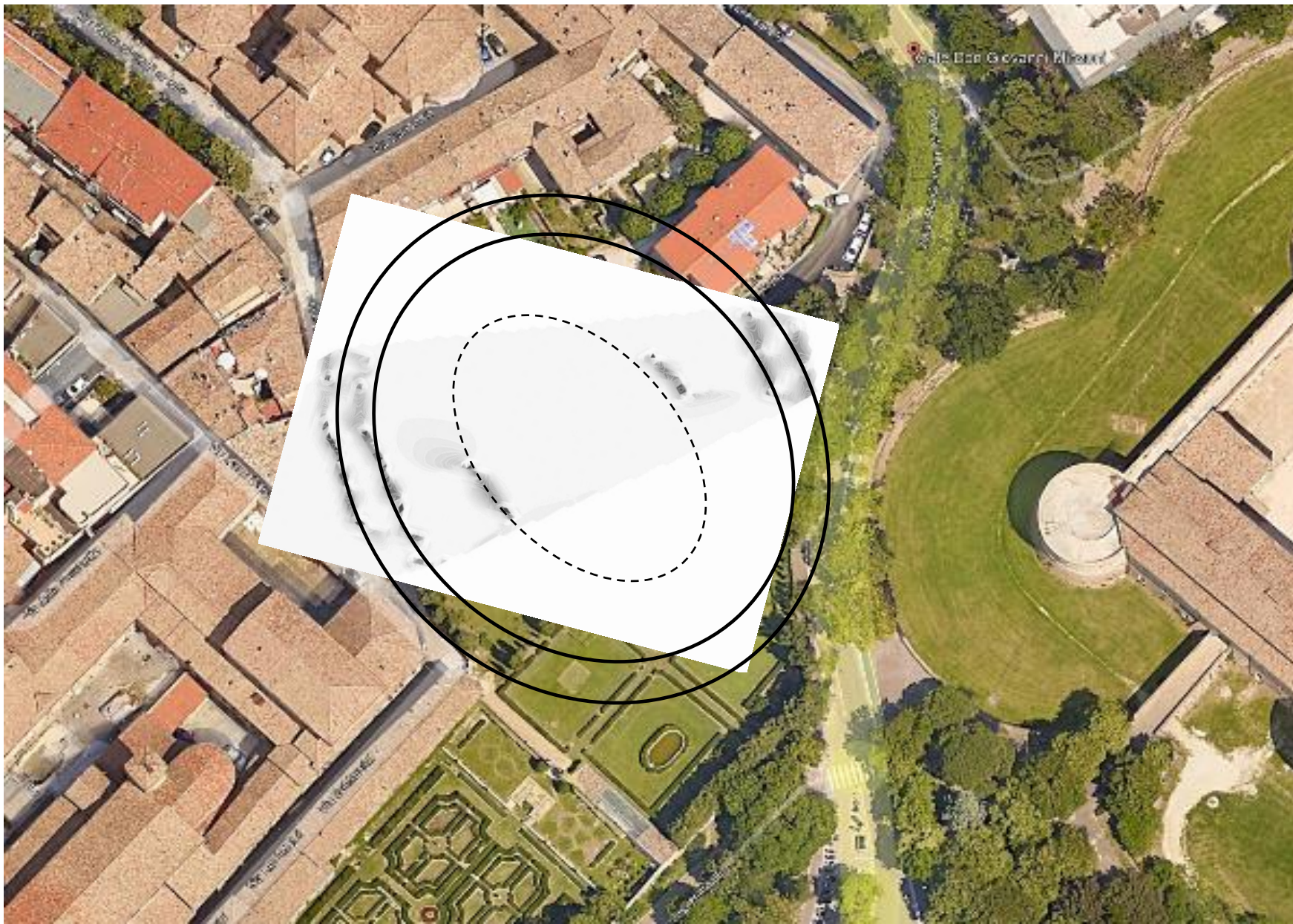


FIG. 22: Analisi geostatistica dei dati geofisici a 4 m di profondità sovrapposta all'immagine di Google Earth con interpretazione

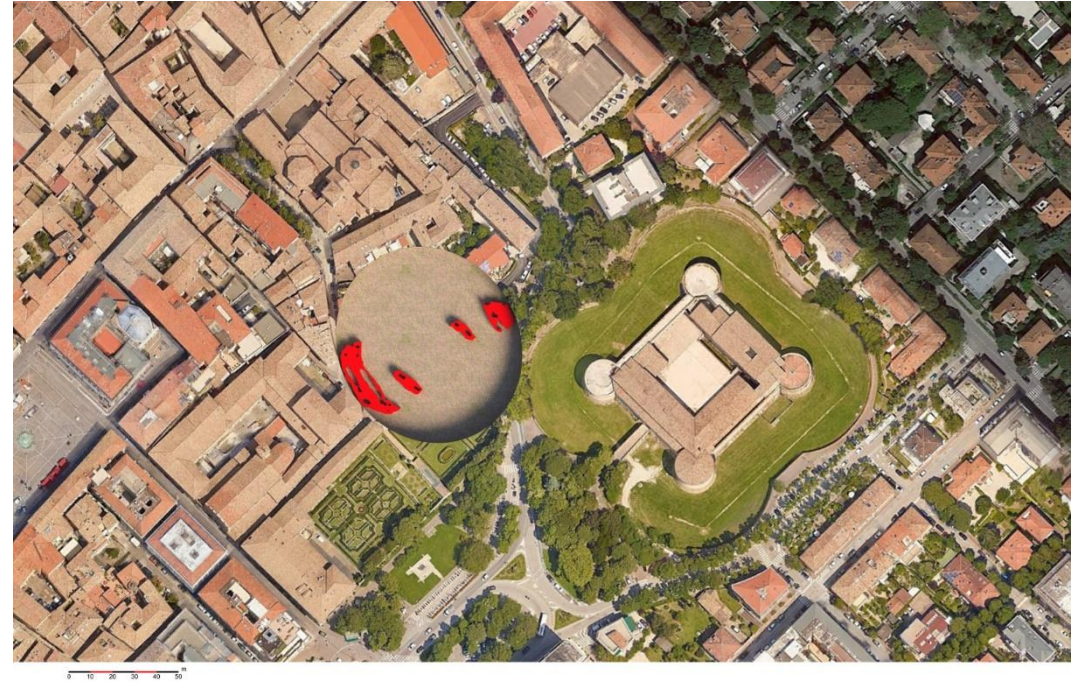
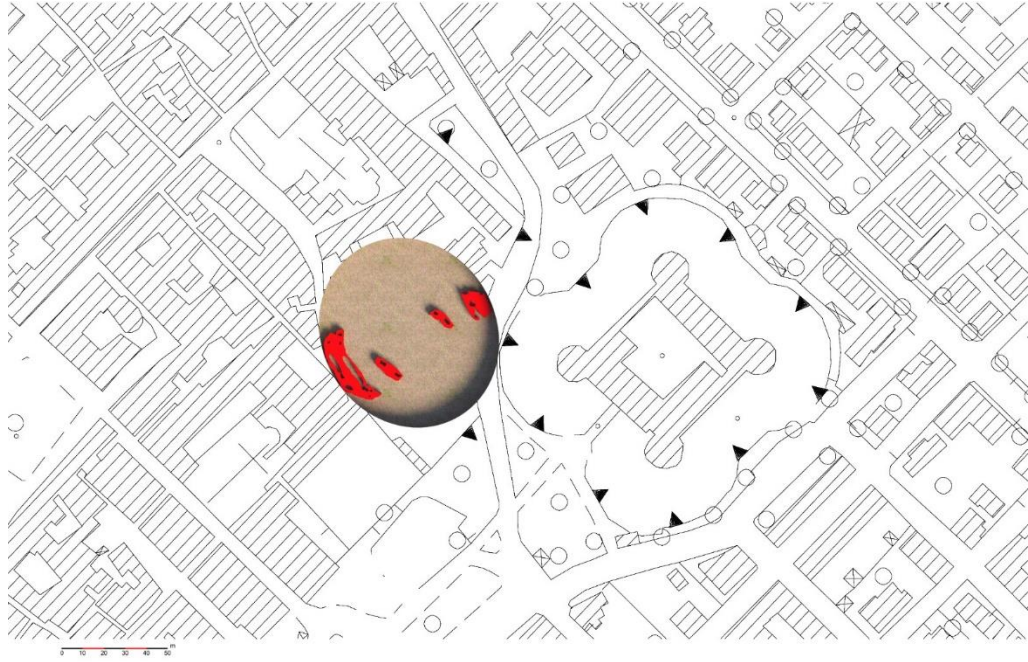


FIG. 23: scavo virtuale con ubicazione dei risultati della geofisica