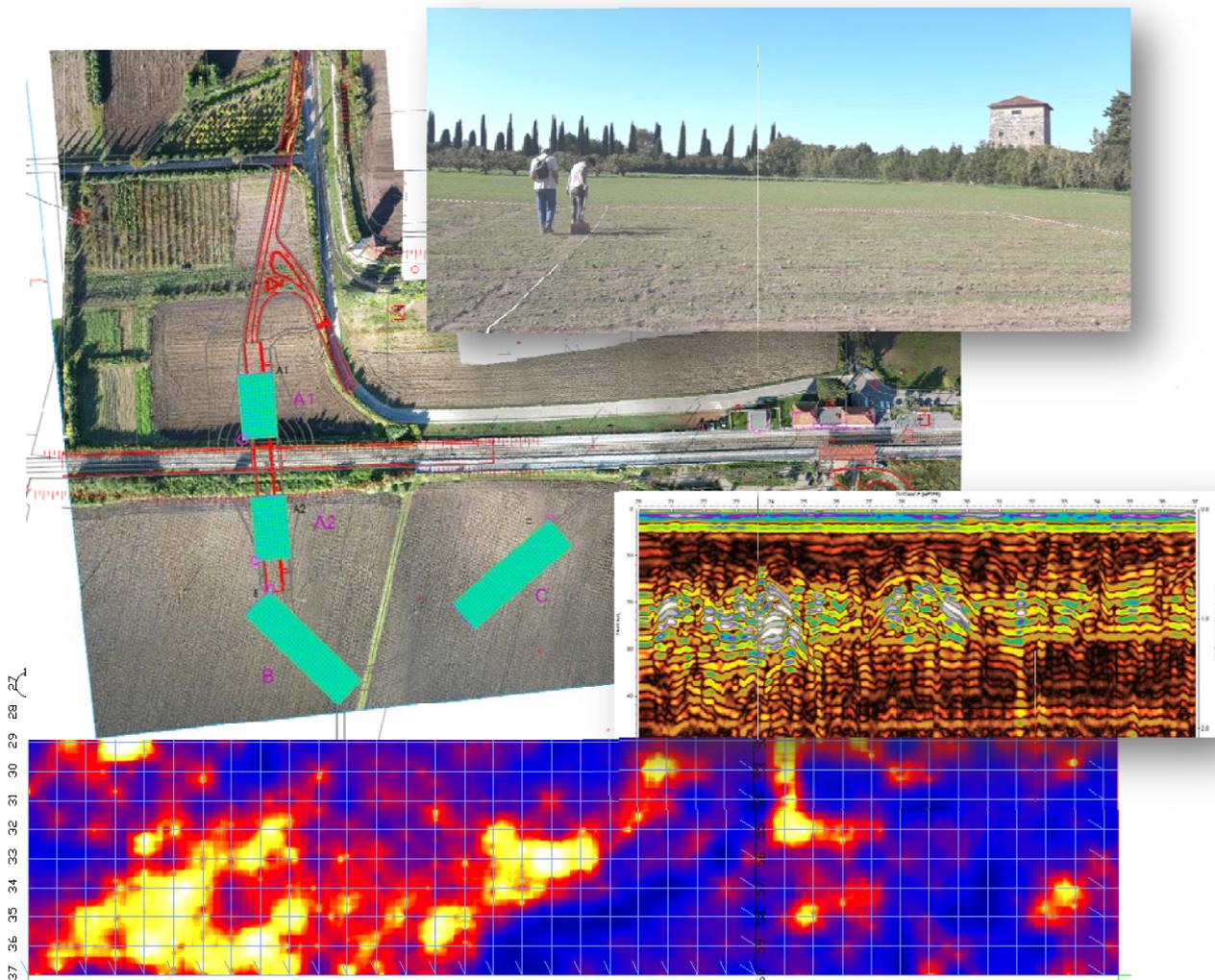


**SOPRINTENDENZA ARCHEOLOGIA BELLE ARTI E PAESAGGIO
PER LE PROVINCE DI SALERNO E AVELLINO**

COMUNE DI CAPACCIO-PAESTUM



**SERVIZIO DI ESECUZIONE INDAGINI CON TECNOLOGIA GEORADAR
RELATIVAMENTE ALLA VIABILITÀ ALTERNATIVA AL PASSAGGIO A
LIVELLO DELLA STAZIONE FERROVIARIA DI PAESTUM
CUP H41B19000 CIG 9459686BD4**

<i>Il Committente</i> Comune di Capaccio Paestum	 GEOMED S.r.l. geoarcheologia e geologia ambientale
Scafati, novembre 2022	REV. 0



Jed...



...

INDICE

PREMESSA	PAG. 1
1.0) PROSPEZIONI GEORADAR	PAG. 3
2.0) METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	PAG. 13
3.0) AREE DI INTERVENTO E STATO DEI LUOGHI	PAG. 14
4.0) RISULTATI	PAG. 15
4.1) SUB-AREA "A1"	PAG. 16
4.2) SUB-AREA "A2"	PAG. 18
4.3) AREA "B"	PAG. 20
4.4) AREA "C"	PAG. 22
5.0) ELABORAZIONE DEL MAPPING E CONCLUSIONI	PAG. 24



PREMESSA

L'Amministrazione comunale di Capaccio Paestum (SA) è impegnata nella progettazione della viabilità alternativa al passaggio a livello della Stazione Ferroviaria di Paestum. L'area di ubicazione delle opere si colloca immediatamente a est del Parco Archeologico di Paestum in prossimità del c.d. Santuario di Santa Venere. La Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per le provincie di Salerno e Avellino, al fine di chiarire il quadro complessivo e delineare un percorso stradale che fosse compatibile con l'esigenza di tutela di un'area di straordinario interesse archeologico, ha chiesto in via preventiva la realizzazione di una campagna di indagini geofisiche non distruttive.

L'Amministrazione comunale di Capaccio Paestum, attraverso la determina N. 201 del 26/10/2022, conferiva incarico alla scrivente società Geomed srl geoarcheologia e geologia ambientale di Scafati (SA) per realizzazione di una campagna di indagini Georadar finalizzate ad individuare rapidamente ed in modo non invasivo nel sottosuolo dell'area interessata, la presenza di anomalie eventualmente correlabili alla presenza di artefatti/strutture interferenti con le opere a farsi. Le prospezioni sono state eseguite con il georadar SIR SYSTEM mod.3000 L'antenna impiegata presenta una frequenza centrale di 400 MHz che consente una penetrazione massima di 4-5 metri (nelle condizioni ottimali).

Per ottimizzare la battuta delle indagini geofisiche, in corrispondenza del tracciato di progetto, la committenza ha individuato topograficamente e picchettato, N. 3 aree di forma rettangolare denominate rispettivamente A, B, C. L'area A "a cavallo" della linea ferroviaria è stata suddivisa in due sub-aree denominate A1 ed A2.

La posizione delle aree è riportata nello stralcio topografico redatto su base cartografica in scala 1:5000 della Carta Tecnica Regionale della Campania.

Sono allegati al presente referto:

- Tav. 1 - Planimetria con ubicazione profili GPR
- Tav. 2 - Planimetria con ubicazione tomografie
- N. 216 radargrammi registrati nel corso delle indagini eseguite



planimetria generale con ubicazione del Paro Archeologico di Paestum, delle opere in progetto e delle indagini GPR eseguite



particolare delle opere in progetto con ubicazione delle aree sottoposte ed indagini GPR



1.0) PROSPEZIONI GEORADAR

Il metodo georadar (conosciuto anche con il nome anglosassone Ground Penetrating Radar - GPR) è una tecnica ad elevata risoluzione che consente di raccogliere una grande quantità di informazioni su vaste aree nei primi metri del sottosuolo, riferibili alla presenza di corpi sepolti, cavità, strutture di interesse archeologico, stratificazioni del sottosuolo, ecc. Un apparato radar strumentale opera mediante la generazione di onde impulsive ad elevata frequenza (tipicamente tra 10 MHz a qualche GHz), che vengono trasmesse nel sottosuolo mediante un'opportuna " antenna trasmittente " disposta sulla superficie del terreno. Il segnale elettromagnetico si propaga nel mezzo e subisce delle riflessioni se incontra un mezzo con discontinuità dei parametri elettromagnetici. L'onda riflessa che torna in superficie viene registrata da una "antenna ricevente ". Il segnale captato viene poi trasmesso all'unità di controllo che provvede ad amplificarlo e registrarlo in formato digitale.

Misurando l'intervallo di tempo impiegato dall'impulso a radiofrequenza per

- I) arrivare alla discontinuità sepolta,
- II) riflettersi,
- III) ritornare al ricevitore,

si può risalire alla posizione della struttura riflettente se è nota la velocità di propagazione.

Le modalità d'impiego del georadar sono due:

- 1) *Monostatico*, se si utilizza una sola antenna che funziona sia da trasmittente che da ricevente (Fig. 1a), ovvero essa trasmette l'impulso radar e subito dopo si pone in ricezione per captare l'energia riflessa da un eventuale bersaglio.
- 2) *Bistatico*, se vengono adoperate due antenne distinte (una per trasmettere Tx e una per ricevere Rx) che vengono tenute ad una distanza fissa l'una dall'altra mentre si esegue il rilievo (Fig. 1b)

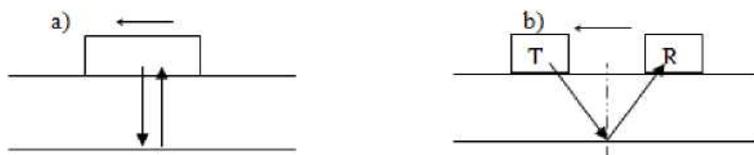
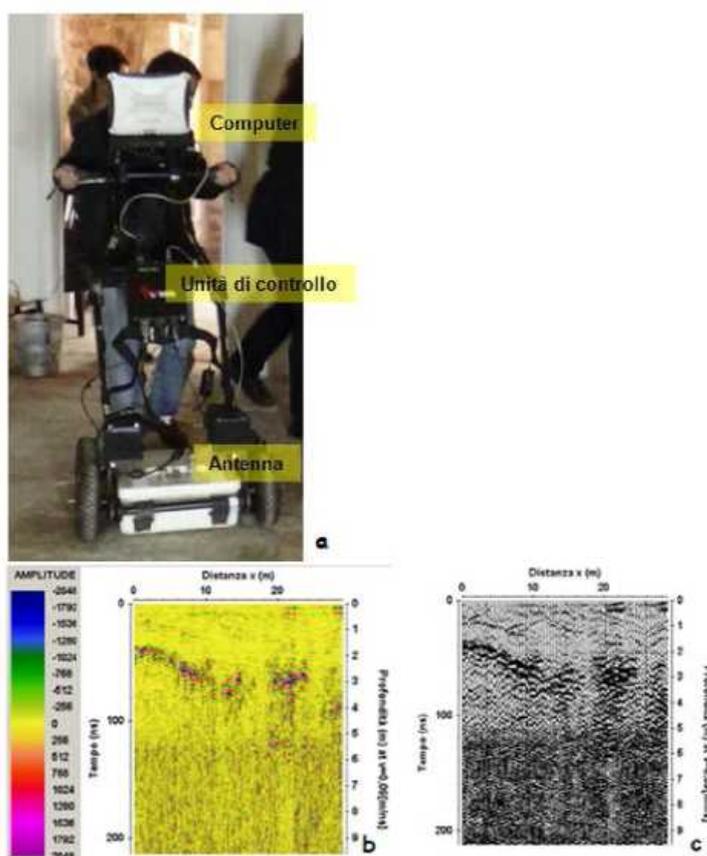


Illustrazione del sistema di sistema di acquisizione



La tecnica di acquisizione può inoltre essere “ *in continuo* ”, ovvero con il sistema di antenne è mosso in modo continuo sulla superficie del terreno lungo un profilo ben definito, oppure “ *per punti*”. Nella modalità in continuo, le antenne sono trascinate manualmente o mediante dei veicoli con velocità costante e anche l’energia radar è trasmessa nel sottosuolo costantemente e ad un ritmo fissato. Nella modalità per punti, una o entrambe le antenne vengono spostate ad intervalli spaziali discreti consentendo l’acquisizione dei dati solo in determinati punti. L’acquisizione per punti (molto più onerosa in termini di tempo) viene utilizzata solo in particolari situazioni; ad esempio quando la presenza di asperità sul terreno rende difficoltoso il trascinamento delle antenne.



(a) esempio di acquisizione dati col metodo del profilo continuo; sezioni radar in rappresentazione linescan a colori (b) e wiggle trace (c).

Il risultato è una “sezione radar” (vedi fig. sopra) in cui sull’asse delle ascisse è riportata la distanza (in metri) percorsa dall’antenna lungo il profilo e sull’asse delle ordinate è riportato il tempo doppio di viaggio dell’onda elettromagnetica nel sottosuolo, cioè il tempo che l’onda elettromagnetica impiega per andare dall’antenna trasmittente alla superficie di contatto tra due mezzi con caratteristiche elettromagnetiche distinte, essere riflessa e tornare indietro all’antenna ricevente.



Il metodo georadar: caratteristiche e limiti

La metodologia elettromagnetica impulsiva, comunemente conosciuta con il nome anglosassone Ground Penetrating Radar (GPR), utilizza impulsi elettromagnetici di breve durata per l'esplorazione del sottosuolo. Attraverso un'analisi degli impulsi riflessi da superfici di discontinuità dei parametri elettromagnetici è possibile risalire alle strutture presenti nel sottosuolo. Tale metodo ha il vantaggio di fornire in tempo reale una descrizione dettagliata del sottosuolo indagato. Il GPR trova ottimi impieghi in terreni resistivi (spazi vuoti, ghiaie, sabbie sciolte, etc.), consentendo di individuare strutture con "caratteristiche elettromagnetiche" differenti rispetto all'ambiente circostante, mentre risulta praticamente "cieco" in terreni con alta conduttività, in cui l'assorbimento dell'energia da parte del materiale stesso ne limita la profondità di indagine (ad esempio in caso di strati di argilla, falde freatiche, umidità nel sottosuolo).

I parametri fisici che influenzano la propagazione delle onde elettromagnetiche nel mezzo (in questo nel sottosuolo) sono:

- la *conducibilità elettrica* σ (s/m). Essa è una caratteristica del mezzo e rappresenta la sua capacità di veicolare una corrente elettrica. Un buon conduttore è caratterizzato da alti valori di σ .
- la *permittività dielettrica* ϵ . Essa rappresenta la capacità del materiale di polarizzarsi elettricamente in risposta all'applicazione di un campo elettrico esterno. Un dielettrico perfetto è rappresentato dallo spazio vuoto in cui $\epsilon_t = 0$. La permittività dielettrica del vuoto è $\epsilon_0 = 8,857 \times 10^{-12}$ (Farad/m). La permittività relativa al vuoto è chiamata costante dielettrica $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ed è un numero puro.
- la *permeabilità magnetica* μ . Essa rappresenta la capacità del materiale di magnetizzarsi per effetto di un campo magnetico esterno. La permeabilità magnetica del vuoto è $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/m). La permeabilità relativa al vuoto $\mu_r = \mu/\mu_0$ è un numero puro. Per materiali geologici $\mu_r = 1$ e quindi è di solito un parametro poco significativo nelle indagini GPR.

La propagazione di un campo elettromagnetico in un mezzo materiale è governata dalle equazioni di Maxwell.

L'ampiezza dell'onda elettromagnetica (EM) subisce un'attenuazione man mano che si propaga in profondità nel sottosuolo.

La prima causa è lo smorzamento geometrico: l'ampiezza dell'onda EM diminuisce infatti all'aumentare della distanza dal punto sorgente in modo proporzionale all'inverso della distanza.

La seconda causa è legata al tipo di materiale che l'onda EM attraversa, e in particolare alle sue perdite per conducibilità σ (caso più raro) per isteresi.

Se il mezzo attraversato dall'onda EM ha un'elevata conducibilità elettrica, l'ampiezza dell'onda EM viene attenuata molto rapidamente. Mezzi molto conduttivi sono quelli che contengono acqua, argilla, sali disciolti o elettroliti. Elevati valori di conducibilità si rilevano anche nei suoli agricoli saturi di azoto e potassio o nei suoli umidi impregnati di carbonato di calcio. La costante dielettrica varia in base alla composizione chimica, alla struttura fisica, alla quantità di umidità e alla temperatura del campione roccioso. Tanto più la differenza di ϵ_r tra due materiali del sottosuolo è grande, tanto più aumenta l'ampiezza delle riflessioni generate e l'ampiezza stessa è tanto più pronunciata, quanto più la distanza tra la discontinuità e le antenne è piccola. Nella tabella 1 sono riportati i valori tipici della costante dielettrica relativa ϵ_r , della conducibilità elettrica σ , della velocità v e dell'attenuazione a , osservati per diversi materiali ad una frequenza di 100 MHz:



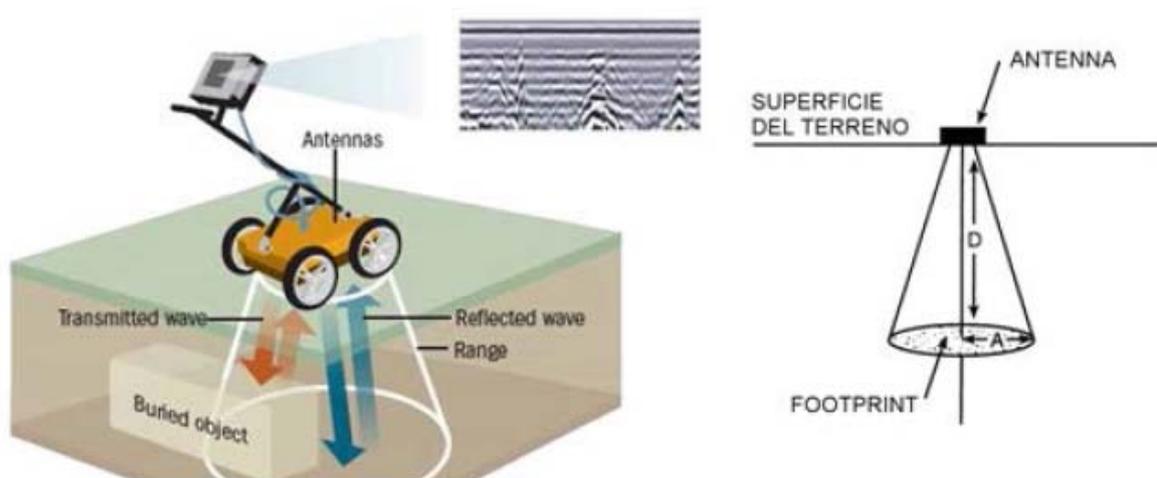
Materiale	$\epsilon_r = \square/\square 0$	\square(mS/m)	V(m/ns)	\square(dB/m)
Aria	1	0	0.30	0
Acqua distillata	80	0.01	0.033	$2 \cdot 10^{-3}$
Acqua dolce	80	0.5	0.033	0.1
Acqua salata	80	$3 \cdot 10^4$	0.01	10^3
Sabbie asciutte	3-5	0.01	0.15	0.01
Sabbie sature	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
Calcare	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
Argillite	5-15	1-100	0.09	1-100
Limo	5-30	1-100	0.07	1-100
Argilla	5-40	2-1000	0.06	1-300
Granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
Sale asciutto	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1

Tabella 1 : Valori di ϵ_r , σ , v , α per alcuni materiali

Un'altra causa di attenuazione sono i fenomeni di *riflessione e rifrazione* che si verificano quando l'onda incide su una superficie di separazione tra due mezzi con differenti proprietà elettromagnetiche. Riflessioni e trasmissioni possono inoltre manifestarsi in maniera pronunciata generando riflessioni multiple o fenomeni di *scattering* che disperdono ancora di più l'energia radar. Le antenne utilizzate nei sistemi radar hanno un "range di frequenze" che va da 10MHz a circa 3GHz. Esse hanno generalmente una larghezza di banda di due ottave, cioè le frequenze variano tra 1/2 e 2 volte la frequenza dominante o frequenza di centro banda f_0 . In realtà, anche se un'antenna radar è identificata da una segnata frequenza di centro banda, non necessariamente l'energia che si propaga nel sottosuolo è esattamente centrata su quella frequenza, poiché il suolo ha un effetto di carico sull'antenna. Inoltre nel sottosuolo le alte frequenze vengono assorbite più rapidamente delle basse e ciò provoca uno spostamento della frequenza centrale verso le basse frequenze. L'energia radar non penetra nei metalli. Un oggetto metallico largo rispetto alla lunghezza d'onda incidente rifletterà il 100% dell'energia radar che lo colpisce e oscurerà ogni cosa al di sotto di esso. La scelta delle antenne da adoperare in un rilievo va fatta in base alle dimensioni geometriche degli oggetti di interesse e della profondità a cui essi presumibilmente dovrebbero trovarsi.



Le onde elettromagnetiche prodotte dalle antenne standard, irradiano energia radar nel terreno secondo un cono ellittico il cui apice è al centro dell'antenna trasmittente. Il lobo di radiazione nel sottosuolo permette così di "guardare" non solo direttamente sotto l'antenna ma anche di fronte, in dietro e ai lati man mano che l'antenna viaggia sul terreno. Parliamo così di risoluzione orizzontale. La stima del lobo di radiazione è importante specialmente quando si progetta la spaziatura tra le linee di una griglia, in modo da rendere evidenti tutti i bersagli di una certa importanza nel sottosuolo, cioè in modo tale che questi ultimi siano colpiti dall'energia radar trasmessa e che perciò possano generare riflessioni. In generale, l'angolo del cono è definito dalla costante dielettrica relativa del materiale attraversato dalle onde e dalla frequenza centrale di emissione dell'antenna



Cono ellittico della penetrazione GPR nel terreno

Un'equazione che può essere usata per stimare la larghezza del fascio di trasmissione a varie profondità (il footprint) è la seguente (Leucci, 2015):

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon_r + 1}}$$

dove A sono le dimensioni approssimate del raggio del footprint, λ è la lunghezza d'onda dell'impulso elettromagnetico in aria, D è la profondità a cui si trova l'oggetto riflettente e ϵ_r è la costante dielettrica relativa del mezzo attraversato.

Una volta scelta la frequenza da utilizzare nell'indagine geofisica bisogna conoscere la velocità di propagazione nel mezzo che ci consente di stimare la profondità (D) delle riflessioni: questa si può misurare dagli stessi dati georadar. A parità di velocità, all'aumentare della frequenza aumenta il potere risolutivo verticale e orizzontale. È anche noto però che all'aumentare della frequenza aumenta il potere di assorbimento del mezzo e diminuisce quindi la profondità di penetrazione.

All'interfaccia aria-suolo si crea una prima rifrazione che provoca un cambiamento di direzionalità del fascio radar; la maggior parte dell'energia è incanalata al di sotto dell'antenna e si propaga in un cono.

Più alta è la costante dielettrica relativa ϵ_r del materiale di cui è costituito il terreno, più bassa è la velocità dell'onda radar trasmessa, e più focalizzato è il cono di trasmissione delle onde che si propagano nel terreno.



L'espansione del cono di energia sotto l'antenna, permette di "vedere" un bersaglio non soltanto quando l'antenna gli passa effettivamente sopra, ma anche prima e subito dopo, generando le classiche "iperboli" che spesso si notano nei tracciati radar.

Alcune antenne non sono schermate e irradiano in tutte le direzioni. Le antenne non schermate, possono registrare riflessioni generate dallo stesso operatore che trascina l'apparecchiatura radar lungo il profilo, o da alcuni oggetti vicini, come per esempio un albero o una macchina, case e linee elettriche. Queste riflessioni rendono ovviamente più difficoltosa l'analisi dei dati, e per questo è consigliabile prendere nota degli oggetti presenti in superficie in prossimità del profilo radar eseguito qualora non si disponga di un'antenna schermata.

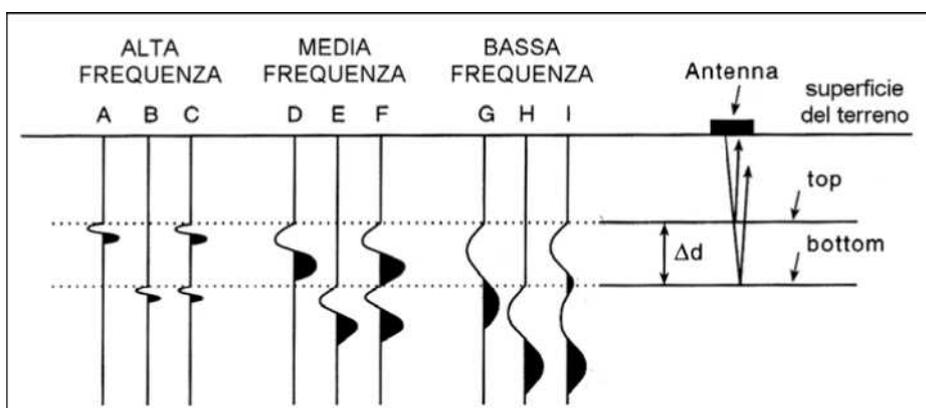
Superfici sepolte, che contengono avvallamenti o creste, possono focalizzare o diffondere l'energia radar secondo la loro orientazione rispetto all'antenna in superficie. Se per esempio una superficie ha una convessità verso l'alto, molta dell'energia radar sarà riflessa lontano dall'antenna e non sarà registrata alcuna riflessione significativa. Questo è il cosiddetto "scattering radar".

Se invece la superficie sepolta ha una concavità verso l'alto, allora l'energia sarà focalizzata verso l'antenna e sarà registrata una riflessione più intensa.

Inoltre, poiché nel vuoto non si hanno perdite per assorbimento, una discreta quantità di energia può restare intrappolata all'interno di una cavità e l'onda può "rimbalzare" più di una volta da una parete all'altra, generando ogni volta delle riflessioni, che sulla sezione radar sono *identificate come* "riflessioni multiple".

Molto importante è, dunque, la scelta dell'antenna da adoperare poiché è legata alla capacità di risolvere corpi sepolti e alla profondità che si vuole raggiungere. I fattori che devono essere considerati sono soprattutto le dimensioni e la profondità dell'oggetto che si vogliono rendere evidenti e inoltre occorre esaminare accuratamente l'area d'indagine, allo scopo di individuare la presenza di ostruzioni o impedimenti sulla superficie, linee elettriche, ripetitori, radio, ecc. che possono limitare o impedire l'utilizzo di alcune antenne.

Antenne ad alta frequenza (> 500 MHz) forniscono elevate risoluzioni spaziali, ma limitate profondità di penetrazione, quindi sono adatte per investigare spessori modesti (in genere minori di un metro). Al contrario, antenne a bassa frequenza consentono una penetrazione superiore, ma la risoluzione spaziale diminuisce. La banda di frequenza, normalmente utilizzata dai sistemi GPR, va da circa 10 MHz fino a superare 1 GHz (la profondità di penetrazione, in quest'ultimo caso, si riduce drasticamente). Inoltre le antenne a bassa frequenza sono più lunghe, più pesanti e meno maneggevoli rispetto alle antenne a frequenza maggiore



Riflessione dal top, dal bottom e riflessione totale da due strati separati da una distanza Δd , corrispondenti a impulsi di diversa lunghezza d'onda (da Leucci, 2015).



Considerando due superfici di discontinuità pressoché parallele il segnale ricevuto si relaziona grossomodo alla riflessione dalla parte superiore e dalla parte inferiore di un oggetto sepolto. Affinché le due riflessioni siano distinguibili è necessario che la distanza fra le superfici stesse, sia maggiore o uguale ad una lunghezza d'onda; infatti se la distanza è minore (caso G, H e I in Fig. 4), allora le onde riflesse risultanti dalla sommità e dal fondo dell'anomalia sepolta non saranno riconoscibili in quanto sovrapposte l'una all'altra, mentre se è maggiore si individuano due riflessioni distinte e l'oggetto può essere risolto (vedere le riflessioni A, B e C nella figura della pagina precedente).

Generalmente, nel caso del metodo radar, la risoluzione verticale si considera idealmente tra $\lambda/4$ e $\lambda/2$ dove $\lambda = v/f_0$ è la lunghezza d'onda nel terreno corrispondente alla frequenza centrale dell'antenna (Leucci, 2007a).

Freq. (MHz)	P(ns)	□ (m) a v=c	□ (m) v=(1/3)c	□ (m) v=(1/6)c
1	1000	300	100	50
10	100	30	10	5
30	33	10	3.3	1.65
100	10	3	1	0.5
300	3.3	10	3.3	1.65
500	2	0.6	0.2	0.1
1000	1	0.3	0.1	0.05
2000	0.5	0.15	0.05	0.025
3000	0.33	0.1	0.03	0.015

Valori della lunghezza d'onda X al variare della frequenza e della velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica.

La fase più delicata dell'indagine GPR è la stima della velocità media con cui l'impulso elettromagnetico si propaga all'interno del terreno oggetto dell'indagine. Una buona conoscenza di questo importantissimo parametro, permette all'operatore di stabilire approssimativamente la profondità a cui si trovano gli oggetti responsabili delle riflessioni osservate nelle sezioni radar.

Le velocità che si riscontrano nelle prospezioni GPR sono comprese tra 30 cm/ns dell'aria e circa 1 cm/ns per l'acqua salata.

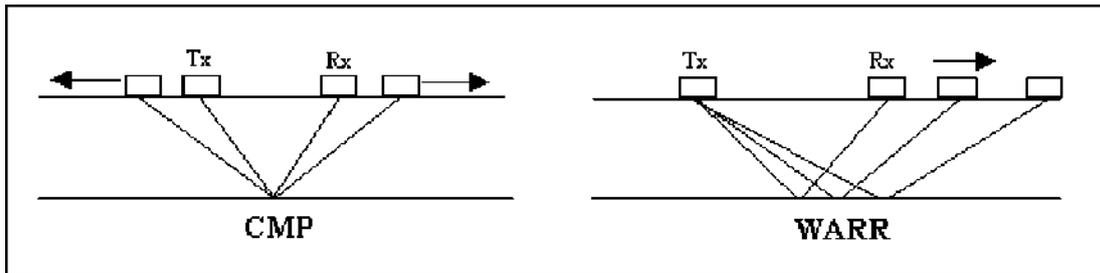
Le tecniche di acquisizione dati, per le misure di velocità, sono essenzialmente due: WARR (riflessione e rifrazione a grande angolo) e CMP o CDP (punto medio comune o punto profondo comune). Entrambe richiedono l'utilizzo di due antenne separabili fra loro.

La tecnica di acquisizione WARR prevede che un'antenna, in genere la trasmittente, sia tenuta fissa mentre l'altra si muove lungo il profilo scelto ad una velocità molto bassa e il più possibile costante. Il problema delle misure di velocità, è comune per i due metodi di prospezione GPR e sismico ed infatti il WARR si ispira concettualmente agli schemi di acquisizione dei dati sismici "common-source" o "common-receiver" a seconda se, a rimanere fissa, sia rispettivamente l'antenna trasmittente o la ricevente.



Nel CDP, le antenne devono essere spostate, di una uguale distanza, lungo versi opposti rispetto ad un punto medio che resta fermo. Entrambi i metodi prevedono che il riflettore venga individuato preliminarmente dall'analisi dei profili radar eseguiti precedentemente sul sito. La grande difficoltà di spostare entrambe le antenne alla stessa velocità, per la registrazione in continuo, porta ad eseguire il CDP soltanto per punti.

Il WARR necessita di un riflettore orizzontale mentre il CDP può essere utilizzato anche con riflettori debolmente inclinati.



Tecniche radar di acquisizione per la determinazione delle stime di velocità.

Sono disponibili diversi metodi per la stima della velocità delle onde elettromagnetiche. Ognuno di questi presenta vantaggi e svantaggi nelle applicazioni pratiche.

Metodo 1 - Localizzazione di oggetti a profondità conosciuta: Il tempo doppio di viaggio è il tempo che occorre ad un'onda EM per percorrere il tragitto, nel terreno, dall'antenna trasmittente fino all'oggetto e ritorno al ricevitore. Denotando la profondità dell'oggetto con z_{noto} e la velocità dell'onda e.m. con v , il tempo doppio di viaggio per una configurazione monostatica dell'antenna è dato da:

$$t = \frac{2z_{\text{noto}}}{v}$$

Poiché la profondità dell'oggetto è conosciuta, si può piccare il tempo doppio di viaggio da una sezione radar e esprimere la velocità dell'onda EM usando l'equazione sopra. L'accuratezza di questa velocità, dipende dall'errore t_{err} con cui conosciamo il tempo doppio di viaggio piccato.

Denotando con t_{picc} il tempo doppio di viaggio piccato, questo può essere espresso come una funzione del tempo doppio di viaggio accurato e dell'errore introdotto tramite la relazione:

$$t_{\text{picc}} = t \pm t_{\text{err}}$$

Per cui il range della velocità dell'onda EM stimata può essere espresso da

$$v = \frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} \pm t_{\text{err}}}$$

oppure

$$\frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} + t_{\text{err}}} \leq v \leq \frac{2z_{\text{noto}}}{t_{\text{picc}} - t_{\text{err}}}$$



Più è alto l'errore sul tempo doppio di viaggio e più è alta l'imprecisione sulla velocità. Assumendo la velocità dell'onda EM come costante nell'area vicino l'oggetto noto, la profondità di un oggetto sconosciuto nelle vicinanze dell'oggetto noto può essere facilmente calcolata usando la velocità ottenuta.

Metodo 2 - Riflessione da un punto sorgente: Questo è un metodo veloce per la stima della velocità e si basa sul fenomeno che un piccolo oggetto, per esempio la sezione d'urto di un tubo, riflette le onde radar in quasi tutte le direzioni (Fig. 6)

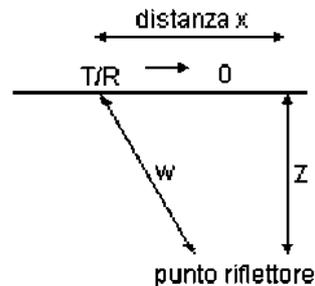


Figura 6 - Geometria del punto riflettore

Denotando la profondità dell'oggetto ancora con z e la distanza laterale dell'antenna monostatica dall'oggetto con x , la lunghezza w del cammino dell'onda può essere semplicemente espressa da

$$w^2 = 4(x^2 + z^2)$$

e dunque la funzione del tempo doppio di viaggio con

$$t(x) = \frac{w}{v} = \frac{2\sqrt{x^2 + z^2}}{v}$$

Denotando con t_0 il tempo doppio di viaggio, sulla verticale all'oggetto, si ha

$$t_0 = \frac{2z}{v}$$

L'equazione che definisce $t(x)$ può essere riscritta come:

$$t(x) = \sqrt{\frac{4x^2}{v^2} + t_0^2}$$

Che è la formula per la cosiddetta "diffrazione iperbolica".

Poiché conosciamo, dalla sezione radar, per ogni posizione x , il corrispondente tempo doppio di viaggio $t(x)$, la velocità può essere calcolata invertendo l'equazione sopra.

La forma dell'iperbole è governata dalla velocità dell'onda nel terreno e dalla geometria dell'oggetto sepolto. L'inclinazione dei suoi asintoti è una funzione solo della velocità media. Il tempo di viaggio al suo vertice è funzione sia della profondità dell'oggetto che della velocità dell'onda nel terreno.

Se l'oggetto riflettore è più allungato e di diametro circolare, come per esempio un cilindro, il vertice dell'iperbole rappresenta il top del cilindro, mentre la forma è identica a quella di un punto diffrattore sepolto al centro del cilindro.



Metodo 3 - Registrazione di un semplice CDP: Il percorso di un'onda EM dal trasmettitore al riflettore e da questo al ricevitore, può essere espresso come una funzione della distanza x tra il trasmettitore e il ricevitore (Fig. 7) nella forma:

$$w^2 = x^2/4 + z^2$$

e la funzione del tempo doppio di viaggio come

$$t(x) = \frac{2w}{v} = \frac{2\sqrt{\frac{x^2}{4} + z^2}}{v}$$

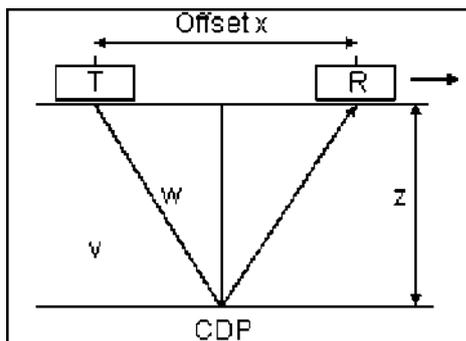
Denotando la distanza zero del tempo doppio (distanza nulla tra le antenne) di viaggio con t_0 , allora

$$t_0 = t(x = 0) = \frac{2z}{v}$$

L'equazione di $t(x)$ può essere riscritta come

$$t(x) = \sqrt{\frac{x^2}{v^2} + t_0^2}$$

Può essere stimata la velocità di propagazione dell'onda e.m. nel mezzo.



Configurazione Trasmettitore / Ricevitore per una semplice registrazione CDP.



2.0) METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Nell'area di realizzazione delle opere alternative al passaggio a livello nel comune di Capaccio Paestum è stata utilizzata una strumentazione georadar mod. SIR3000 GSSI., equipaggiata con trasduttore monostatico con frequenza centrale di impulso di 400 MHz.

Lo strumento usato è in grado di eseguire, mediante trasmissione di microonde, un'esplorazione non distruttiva di rocce, terreni, strade, strutture e in genere di ogni materiale purchè non conduttivo, onde individuare fattori di interesse o rischio quali, reperti archeologici, sottoservizi, scavernamenti etc.



la strumentazione radar SIR 3000 - GSSI

Condizione da rispettare per l'applicazione della metodologia è l'assenza di acqua, che determina la riduzione o l'annullamento (a seconda del grado di saturazione, della porosità e della conduttività dei materiali coinvolti) della efficienza di prospezione, ossia della capacità di restituire informazioni di effettivo interesse. Come in tutte le metodiche di indagine indiretta, che si basano sulla misura di grandezza collegate alle proprietà elettriche dei mezzi, è quindi indispensabile che il rapporto segnale/rumore assuma un valore significativo in quanto tale parametro risulta molto importante per il corretto funzionamento del sistema di trasmissione in generale, in quanto strettamente collegato alla capacità del sistema ricevente di rilevare il flusso informativo originario senza incorrere in alterazioni, a distorsioni ed errori dovuti essenzialmente all'azione disturbante del rumore generato dal mezzo nel quale gli impulsi si propagano.



3.0) AREE DI INTERVENTO E STATO DEI LUOGHI

Le aree assegnate risultano costituite da tre superfici di forma rettangolare ubicate in corrispondenza del tracciato di progetto. In tali condizioni le prospezioni vengono affrontate con le modalità di acquisizione tipiche della prospezione geofisica in generale, che prevedono il rilievo di quadranti di più limitata ampiezza per poi ricomporre il mosaico complessivo all'interno di un telaio opportunamente geolocalizzato.

Sono quindi state rilevate n. 3 aree di forma rettangolare di dimensioni 75 m x 20 m, denominate A, B e C. L'area A "a cavallo" della linea ferroviaria è stata suddivisa in due sub-aree A1 e A2 di dimensioni 37,5 m x 20 m

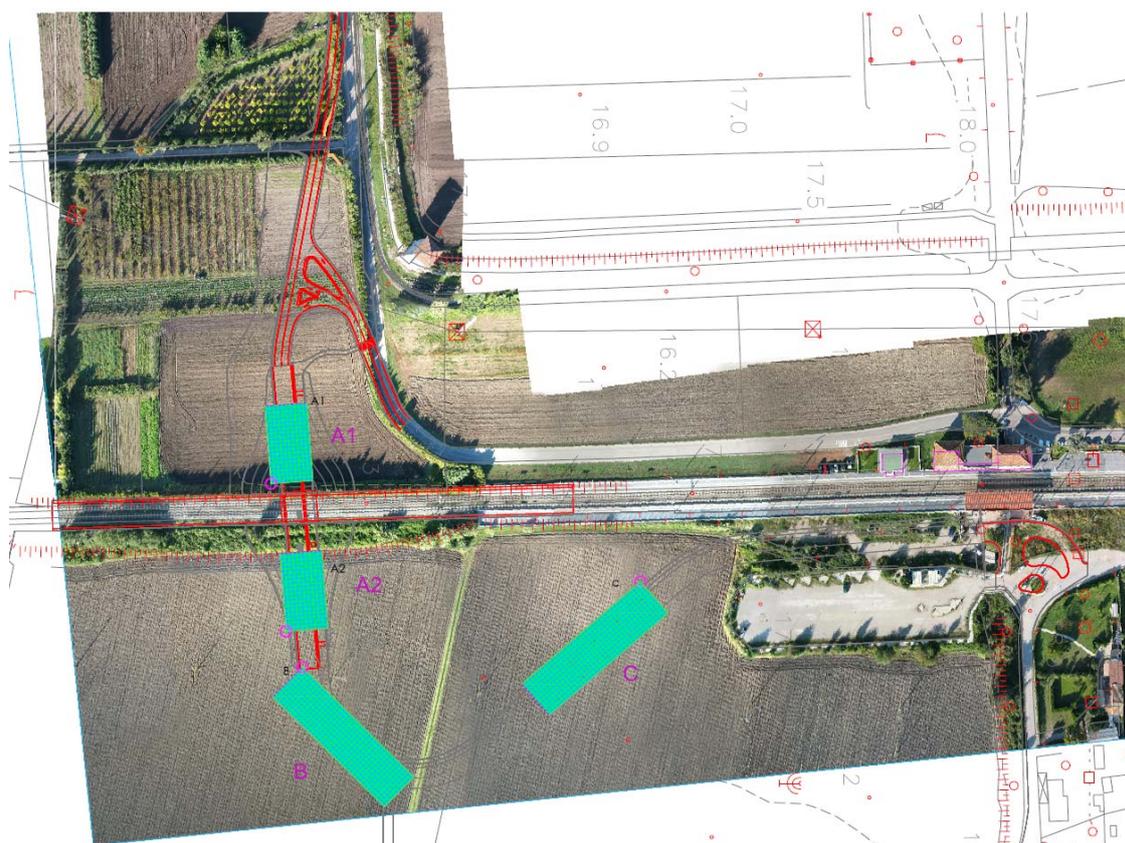


immagine da drone delle aree sottoposte a indagine GPR

In funzione delle condizioni locali, e della problematica assegnata, il passo dei profili all'interno di ogni maglia è pari a 2.0 m, come si può riscontrare dallo schema sopra riportato, nel quale il punto evidenziato, collocato su uno spigolo di ogni area e sub-area, ne rappresenta lo zero di riferimento dal quale prendono origine gli assi ortogonali di riferimento X-Y da ciascuno dei quali sono poi stati spiccati i profili georadar.

L'interesse dei profili ha consentito di realizzare una maglia GPR a media risoluzione e sufficiente, in linea teorica, ad intercettare eventuali preesistenze dotate di uno sviluppo allungato (strutture murarie, argini, strade etc.) nonchè di procedere a una raccolta statisticamente significativa di eventuali strutture di più limitata estensione (es. sepolture, ambienti etc.).



4.0) RISULTATI

I risultati ottenuti sono raggruppati per aree, seguendo la siglatura assegnata. L'ordine cronologico di acquisizione delle varie sub-aree è differente ma per ogni area viene fornito l'elenco dei profili che ad essa afferiscono. La sottostante tabella contiene tutti i riscontri del caso.

Si sottolinea che per tutte le aree è stato necessario spezzare la lunghezza della traversa lunga, onde facilitare le operazioni di appoggio della battuta di campagna. Pertanto la numerazione progressiva dei file-profilo (colonna 4 nella tabella) non segue la naturale successione spaziale ma l'ora di acquisizione. Il range temporale applicato è stato lievemente modulato dopo l'acquisizione della prima area ("C") in quanto al fondo scala erano state segnalate diverse anomalie che si è inteso comprendere al meglio nella porzione utile della scansione. La velocità di propagazione degli impulsi non è risulta semplice a causa dell'assenza di veri e propri bersagli puntiformi. In media è compresa nel range 8 ~ 8,5 cm/nsec.

area	estensione (m)	range (nsec ~ m)	profili (n.file)
A1	37.5 x 20	55 ~ 2.0	178 - 219
A2	37.5 x 20	55 ~ 2.0	63 - 105
B	75 x 20	55 ~ 2.0	106 - 177
C	75 x 20	45 ~ 1.8	1 - 60

Nel seguito vengono elencati i risultati salienti ottenuti per ciascuna area, facendo riferimento alla di seguito riportata.

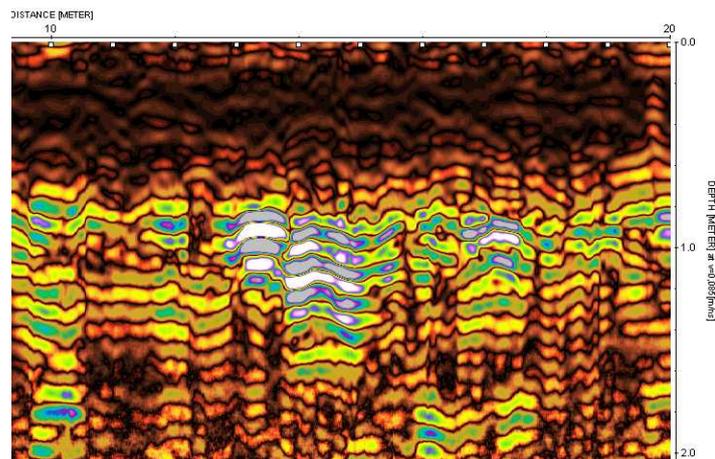




4.1) SUB-AREA "A1"



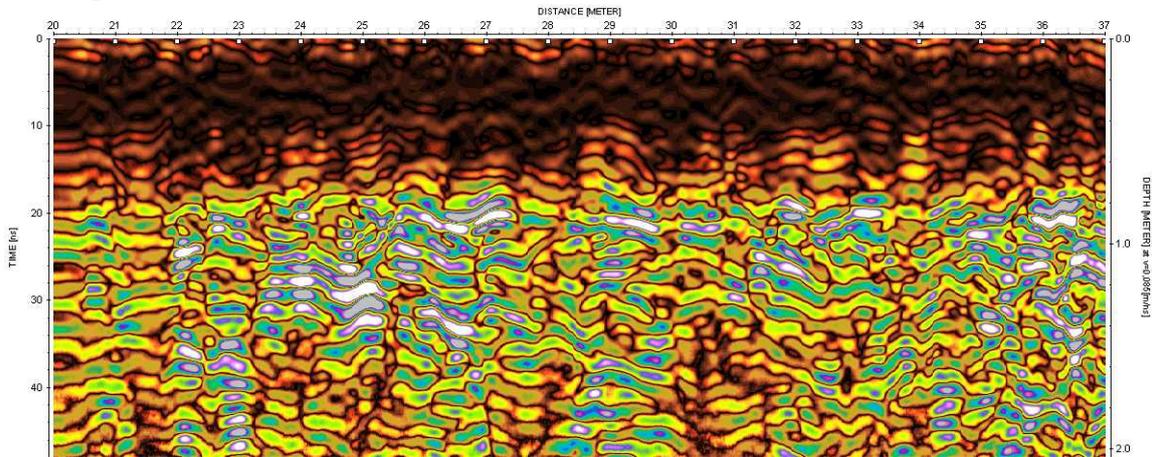
Oltre alla solita porzione superficiale, sostanzialmente priva di riflessioni e corrispondente al terreno agrario, è presente qualche anomalia a circa 1 m di profondità (prof. 184).



pr. 199



Tali anomalie diventano molto intense procedendo verso la parte sud della maglia. Nelle sezioni trasversali le anomalie sembrano meglio definite anche in profondità e lasciano ipotizzare una buona correlazione spaziale.



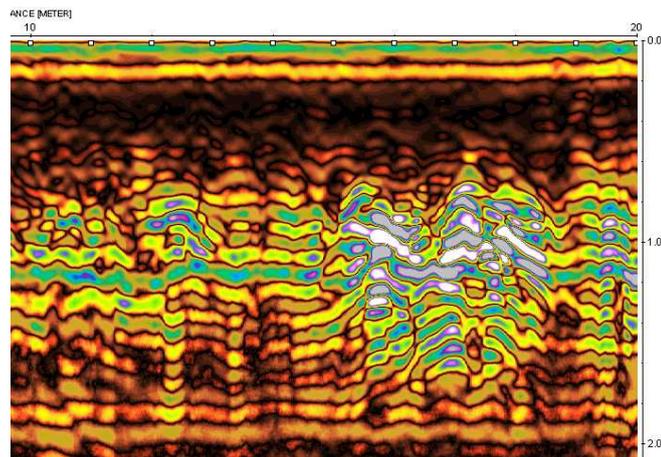
pr. 210



4.2) SUB-AREA "A2"

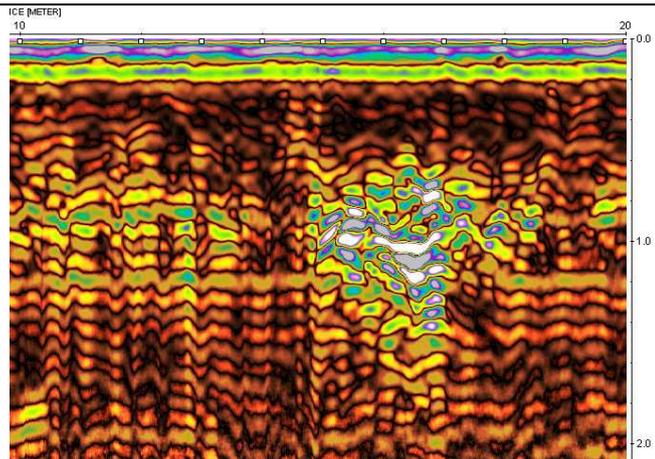


In questo settore le anomalie ricalcano in larga massima quelle della sub-area A1. Esse sembrano addirittura meglio definite, mostrando una distribuzione spaziale che va da 80cm a 150 cm di profondità.



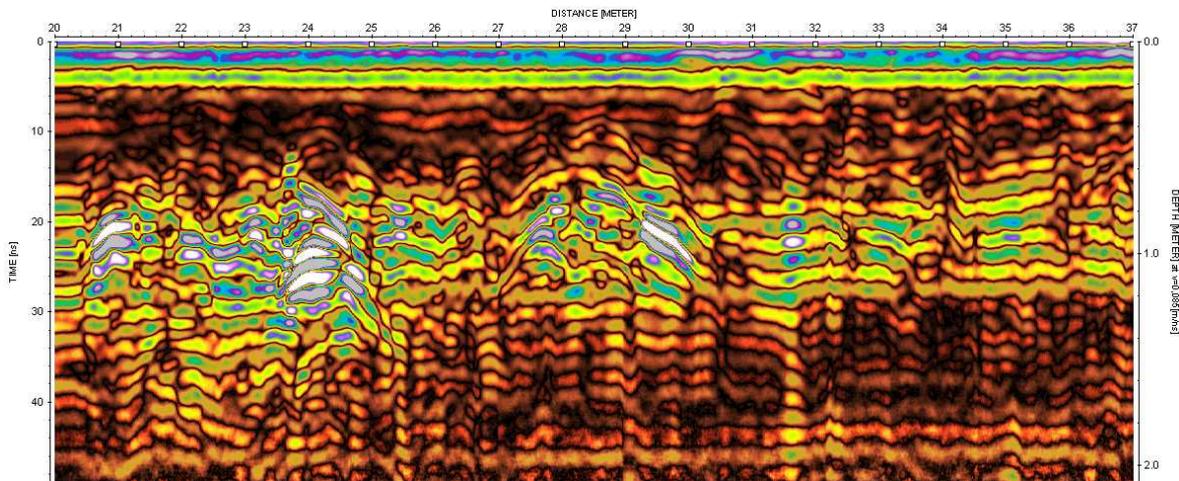
pr. 73

Procedendo verso est, le anomalie diventano meno frequenti, ma più concentrate, conservando un rilevante livello di significatività.



pr. 87

In particolare tra le sezioni trasversali, il pr. 103, evidenzia anomalie molto interessanti alla profondità di 60-100 cm, dunque parzialmente invadenti lo strato humico più superficiale.



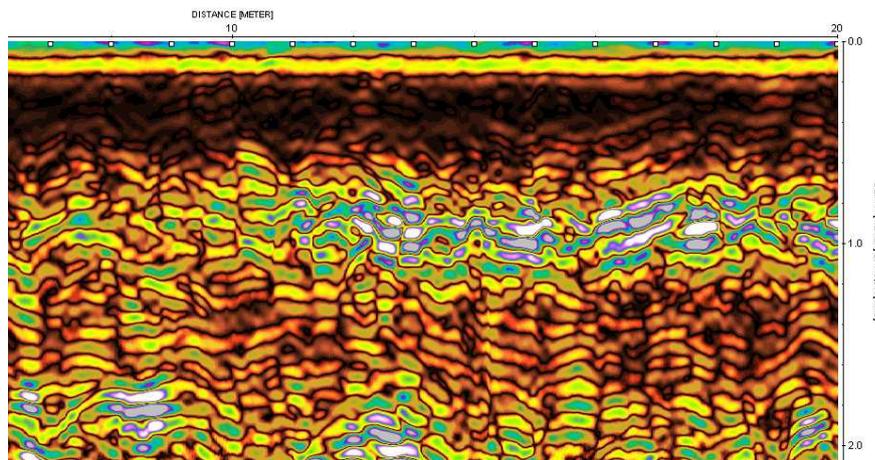
pr. 103



4.3) AREA "B"

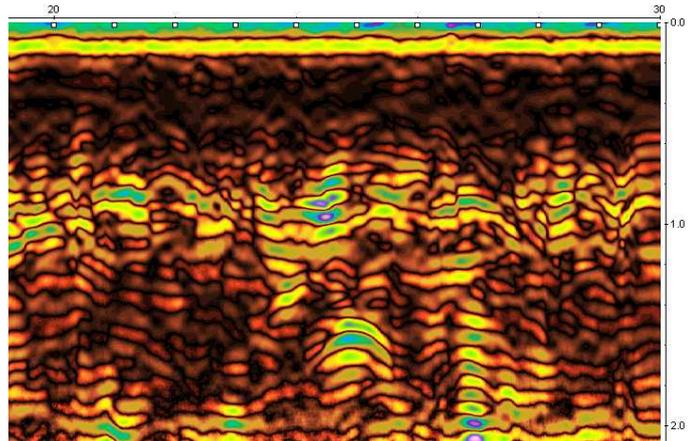


In questo settore le anomalie appaiono distribuite su due livelli differenti: quello più superficiale, modulante la base del livello humico e localmente invadendolo, e quello basale, a profondità di 170-200 cm.

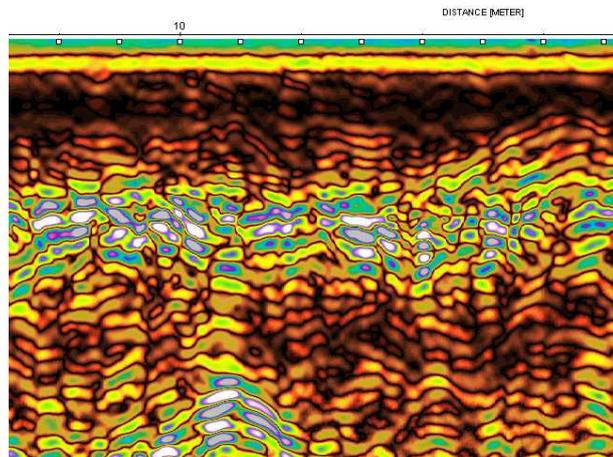


pr. 111

Non raramente (es. pr. 122) si osservano anomalie concentrate anche nella fascia di raccordo (prof. circa 140 cm). Nel profilo 128 si notano forme intensamente anomale ma molto concentrate, a fondo scala. Anche in questo caso la diffusione e la distribuzione delle anomalie lasciano dedurre un risultato interessante per le elaborazioni appresso discusse, soprattutto come sia indispensabile procedere ad un sezionamento verticale della profondità per differenziare il contributo "profondo" da quello sub-superficiale.



pr. 122



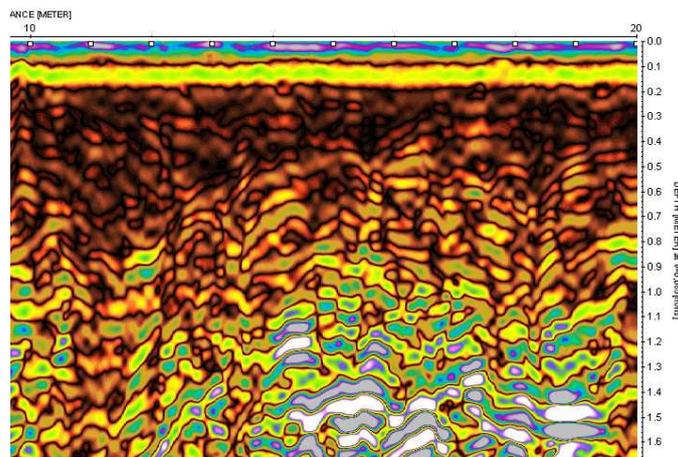
pr. 128



4.4) AREA "C"

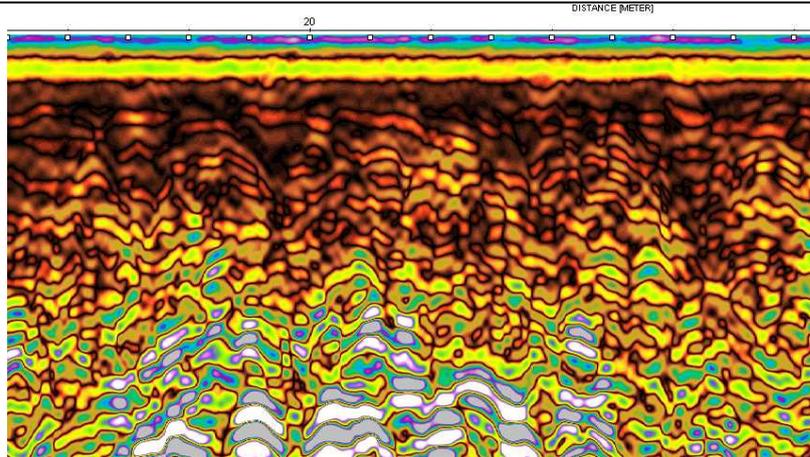


In questo settore, che è quello più settentrionale tra quelli assegnati, salta all'attenzione la sostanziale assenza della riflessione associabile alla base livello agrario. Questo fatto evidentemente permette agli impulsi di propagarsi più profondamente ed in effetti a fondo scala risalta la presenza di forme molto interessanti (es. pr. 12)



pr. 12

Nel pr.34 queste anomalie relativamente profonde, tendono a definire fronti molto sviluppati, anche fin oltre 10 metri, che raggiungono il fondo scala il quale per quest'area vale circa 180 cm dal p. campagna.



pr. 35

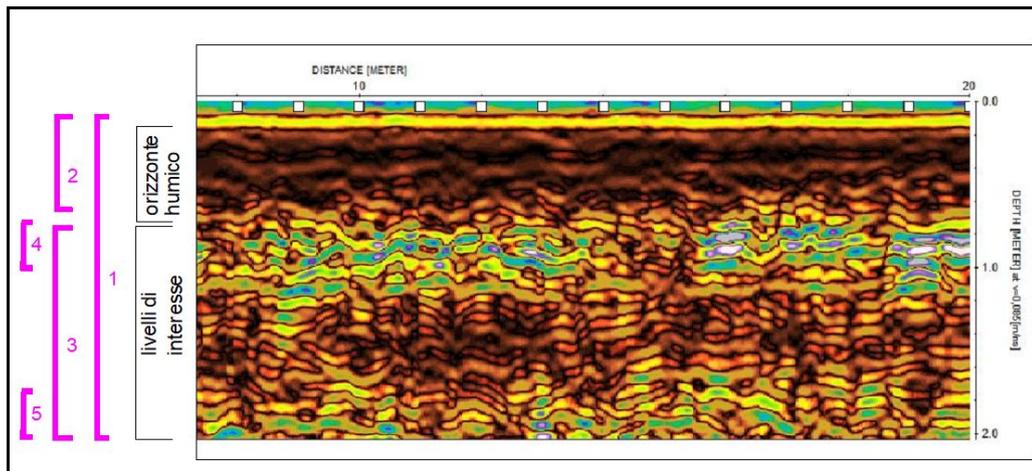
Questa caratteristica suggerisce l'esistenza di una sorta di "bedrock" abbastanza articolato che, pur prospettando una buona correlabilità spaziale, non consente allo stato attuale di stabilire se si tratta di livelli naturali o di preesistenze antropiche.



5.0) ELABORAZIONE DEL MAPPING E CONCLUSIONI

L'elaborazione in questione consiste nell'estrazione delle cosiddette "sezioni orizzontali di riflettività" dedotte per interpolazione di un set di sezioni verticali, inerenti una data area, che vengono inserite in un algoritmo dedicato. Sostanzialmente, una mappa di riflettività restituisce in forma grafica (ossia in colori convenzionali) e con maggiore accuratezza, quanto un operatore esegue tracciando le singole anomalie riscontrabili in un radargramma. Ha anche il pregio di sommare i contributi coerenti e sottrarre, fino ad a liminarli, quelli circoscritti, casuali o provenienti da "artefatti" strumentali. Tuttavia essa non è una vera sezione del terreno, per i motivi appresso elencati, nei quali basilaramente si deve inserire il concetto di "zona d'ombra", ossia l'impossibilità di attraversare bersagli importanti quando l'irraggiamento degli impulsi avviene esclusivamente dalla superficie. In virtù di questo effetto, si sottolinea che, ai fini della lettura della mappe che verranno presentate, sarebbe concettualmente errato pensare di ottenere una sezione orizzontale a qualsivoglia profondità se sulla verticale esistono bersagli che arrestano la propagazione degli impulsi.

Nel radargramma soprastante compaiono gli orizzonti riflettivi più significativi a livello di sezione verticale. Essi, pur con piccole variazioni locali, accomunano tutte le aree investigate le quali, d'altra parte, sono inscrivibili in un cerchio di raggio pari a soli 120m, per cui, stante la morfologia e la natura del terreno, è possibile ipotizzare che non esistano variazioni sostanziali della caratteristiche, e del terreno e del substrato. Come si osserva, ad un primo orizzonte definito dallo strato agrario, spesso circa 80 cm, segue una porzione inferiore che è da considerarsi quella nella quale è più probabile la presenza di preesistenze archeologiche.



radargramma-tipo e criteri di sezionamento del blocco-dati

Mentre il primo orizzonte, corrispondente al livello areato, è quasi completamente privo di riflessioni interessanti, è nella parte inferiore che si concentrano tutte le zone anomale segnalate dal georadar. Per meglio capire il senso delle suddette mappe di riflettività, inserite nell'allegata planimetria tematica, occorre configurare il risultato di una sessione di acquisizione (es. "area A1") come un blocco tridimensionale di dati che vengono combinati in tutte le direzioni spaziali (Z-Y-Z). Ottenuto tale blocco, una sezione orizzontale di riflettività può essere ricavata o come sezione ad un ritardo definito (es. 30 nsec) oppure come sezione risultante *media*, definita dai due estremi (es. tra 25 e 40 nsec). E' evidente che al primo caso si è portati ad attribuire una maggiore precisione mentre operando nel secondo modo verranno accorpate caratteristiche situate a profondità differenti, quindi afferenti possibilmente a sorgenti non omogenee. Tuttavia è sconsigliato eseguire un sezionamento ad una determinata profondità in quanto ogni anomalia presenta una propria altezza, sicchè si tende comunque a definire un range, che di solito non è inferiore ai 5-10 nsec.



I numeri che compaiono sulla parte sinistra dell'immagine soprastante corrispondono ai vari orizzonti che l'operatore deve considerare per ottenere la massima significatività del dato acquisito. Ad essi si fa solitamente riferimento con la seguente terminologia:

- “1” full range: L'intero scan acquisito;
- “2” humus: La porzione superficiale del terreno (solitamente non considerata);
- “3” layer2: la porzione basale dello scan (massimamente significativa);
- “4” top: la porzione sommitale dello strato 3;
- “5” bottom: la porzione basale dello strato 3

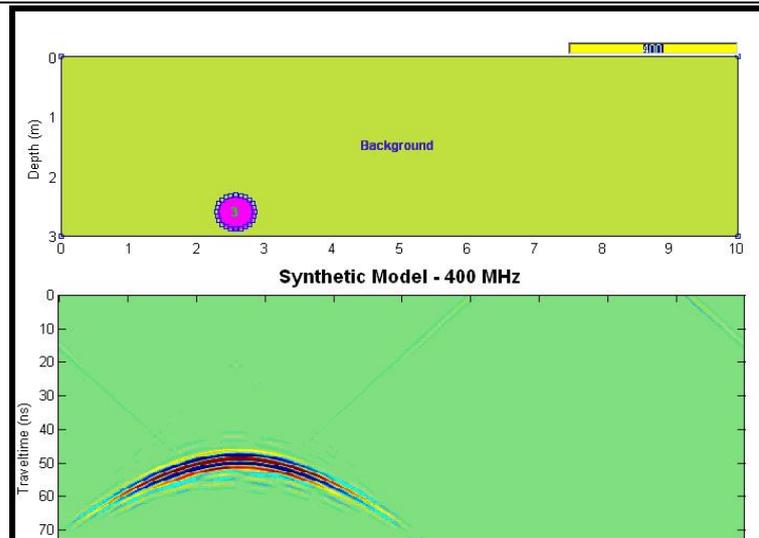
Per ognuno di questi intervalli è stata ricavata una mappa di riflettività. Si segnala che il confronto tra la mappa di cui al punto “1” e quella di cui al punto “3” rende conto di eventuali schermature che possono occorrere a livello di superficie, ad es. dovute ad esempio al ruscellamento a condizioni locali di impregnazione. Queste ultime sono evidenziate dalla mappa “2”.

Per quanto detto, si comprende che da un singolo set di dati è possibile dedurre un numero infinito di sezioni orizzontali, ma in tutti i casi è da sottolineare che il blocco che si va a sezionare non è un campo topografico ma la matrice numerica di un *parametro fisico*. Infatti il summenzionato “set di dati” è caratterizzato dall'aver le seguenti dimensioni:

- 1) un'asse X che corrisponde alla *larghezza* dell'area assegnata (es. 75 m);
- 2) un'asse Y che corrisponde all'*altezza* dell'area assegnata (es. 20m);
- 3) un'asse Z che corrisponde al *ritardo* di impulso riflesso (es. 50 nsec);

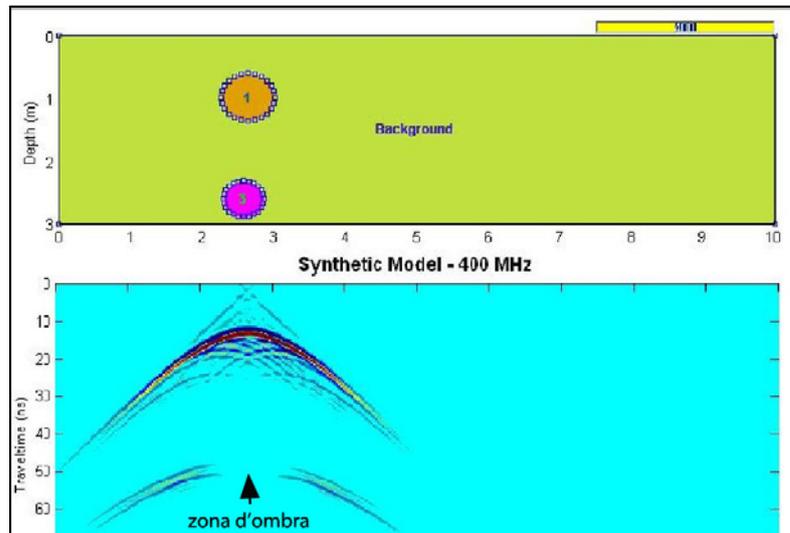
Anche se l'asse Z viene facilmente convertito in profondità attraverso il calcolo della vel. di propagazione media degli impulsi e.m., nel terreno, è bene sottolineare che il blocco che si va a sezionare non è una porzione di spazio, quindi i risultati di questo sezionamento risentiranno delle caratteristiche fisiche del terreno e soprattutto delle leggi di propagazione e riflessione degli impulsi sui bersagli in esso presenti, che sono limiti invalicabili del metodo georadar. All'uopo alleghiamo il seguente esempio che costituisce la base per capire la differenza tra una *sezione fisica* del terreno (quale ad es. quella che emergerebbe da uno scavo su vasta scala) e una *sezione georadar orizzontale*, che come detto è delineata dal parametro “riflettività”. Operando col GPR dalla superficie è ovviamente possibile disporre solo della seconda, laddove solo una serie di sezioni del primo tipo, via via più profonde, potrebbero discriminare il reale andamento di eventuali strutture-sorgenti (ad. es. la testa di un muro o tombe). E' anche evidente che più si può ipotizzare la presenza di diversi livelli archeologicamente “fertili”, più si possono riscontrare bersagli sovrapposti e più è necessario applicare quanto finora sottolineato.

Nell'esempio 1, in alto si vede la sezione di un bersaglio profondo circa 2.5 metri e largo circa 50 cm. Il radargramma sintetico sottostante indica che esso è perfettamente individuabile sicchè, quando si combineranno diversi radargrammi paralleli, l'iperbole (da immaginarsi concentrata nel suo punto apicale in quanto le sue code, nei processi numerici, vengono obliterate per “stacking” allo scopo di aumentare la risoluzione del tracciamento) verrà intercettata su ognuno di essi e successivamente, la sezione orizzontale potrà definire una traccia precisa in grado di seguire lo sviluppo del bersaglio nella planimetria. Operando ad es. col metodo di cui al punto (b), si potrà imporre un intervallo 50-60 nsec e la mappa restituirà il percorso dell'oggetto sorgente, che può essere tanto una condotta quanto la testa di un muro antico.



Esempio 1 - un solo bersaglio

Nell'esempio 2 invece, nelle medesime condizioni sono invece presenti due bersagli sovrapposti. Il bersaglio superficiale oscura in buona parte quello sottostante ed il risultato si vede dall'iperbole inferiore, assolutamente priva del suo apice. In altre parole, imponendo alla sezione orizzontale un intervallo tra 10 e 60 nsec, verrà graficato soltanto il bersaglio superiore, mentre imponendo un intervallo più stretto (ad es. 50-60 nsec) come sembrerebbe logico al profano per evidenziare solo quello più profondo, non verrà restituito alcun andamento planimetrico, in quanto la prospezione viene eseguita dalla superficie, quindi gli impulsi non arrivano al livello desiderato, essendo fermati dal bersaglio superiore, che oscura quasi completamente quello sottostante. Mancando la parte apicale (punto interrogativo nello schema) vengono raccolte solo i deboli rami iperbolicici i quali - come già esposto - sono sempre filtrati dal calcolo delle mappe orizzontali di riflettività, in quanto esse tenderebbero a slabrarsi l'asse della sorgente reale, che è materializzata solo dall'apice iperbolico.



Esempio 2 -- due bersagli sovrapposti

Sottolineiamo che, al di là di qualsiasi interpretazione, le forme che vengono disegnate dal processo di mappatura orizzontale vanno identificate sicuramente come "aree anomale" dal punto di vista dielettrico,

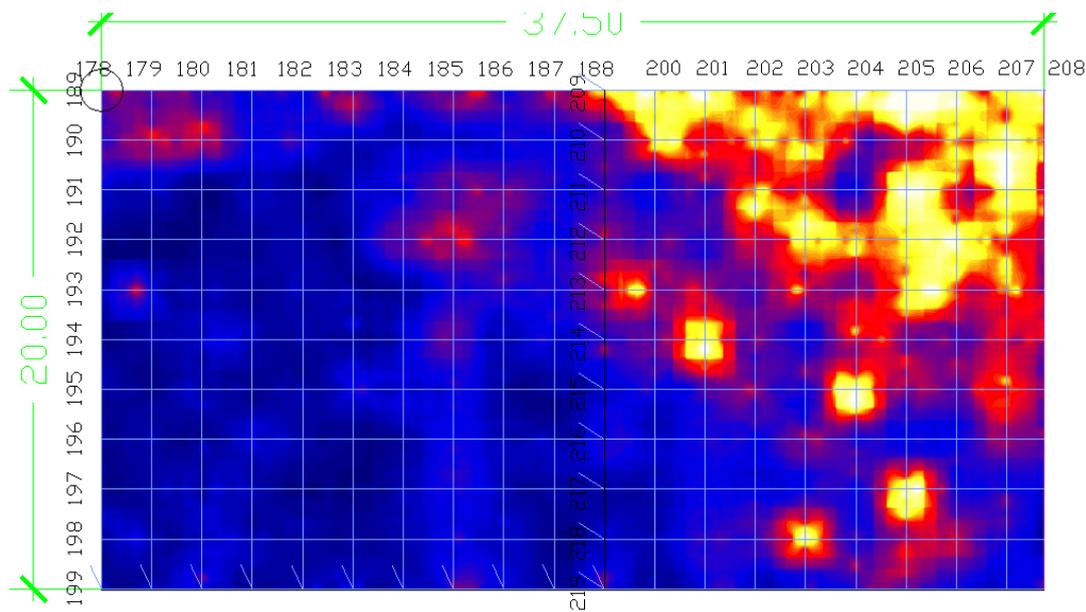


indipendentemente dall'origine delle sorgenti, quindi possono comprendere sia caratteristiche naturali (es. canali, vie d'acqua preferenziali, caratteristiche del substrato) che eventuali preesistenze archeologiche. In quest'ultimo caso, evidentemente, il riscontro di andamenti rettilinei o di angoli ben definiti (improbabili da realizzarsi in condizioni naturali) nonchè di riflessioni "spot", costituiscono fattori di interesse ai fini di una associazione con settori di rilevanza archeologica quali muri, crolli antichi, sepolture isolate o disposte in linea etc.

Detto ciò si presenta un commento schematico per ciascuna delle aree precedentemente elencate. Si fa presente che in ciascuna delle aree assegnate (cfr. planimetria allegata) è stato inserito almeno un "punto di attenzione" ("#1", "#2" etc.) che rappresenta quello nel quale i radargrammi evidenziano anomalie rappresentative dell'intera area, fermo restando che la fascia anomala è esattamente quella evidenziata dai colori convenzionali.

MAPPING SUB-AREA "A1"

La mappa è significativa sia per la presenza di una concentrazione di anomalie sullo spigolo NW che per la diffusione di aree "spot" che la bordano.



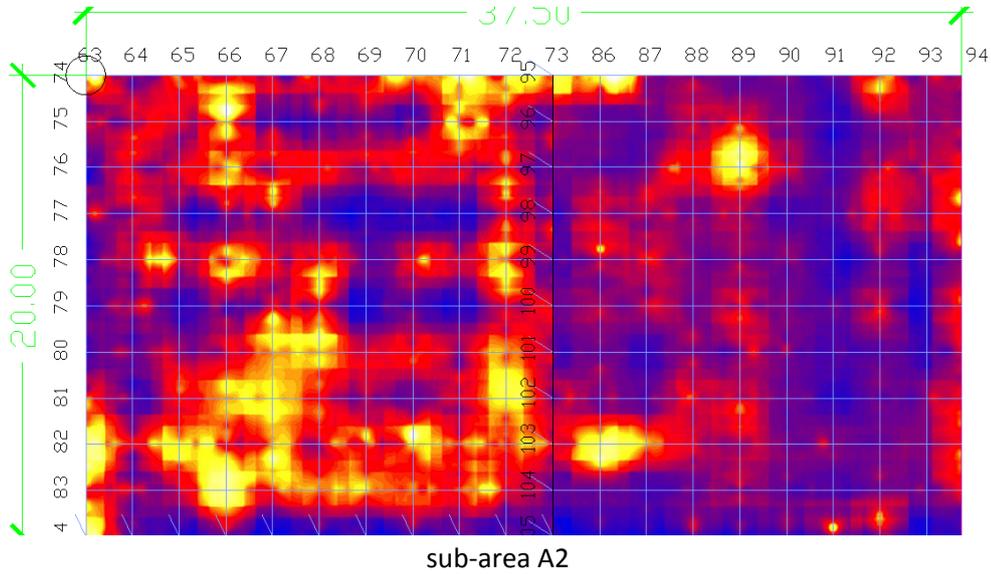
sub-area A1

Queste ultime aree mostrano di avere dimensioni inferiori alla maglia imposta (m. 2) quindi anche le dimensioni devono ritenersi dell'ordine di grandezza di circa 1-1.5 metri, considerando anche l'inevitabile errore di ortogonalità della maglia dei profili. Proprio per il fatto che le dimensioni della sorgente sono inferiori a quelle della maglia, le anomalie riscontrate rappresentano una raccolta "a campione" di strutture sorgenti che nulla esclude possano presentare una diffusione areale ancora maggiore.



MAPPING SUB-AREA "A2"

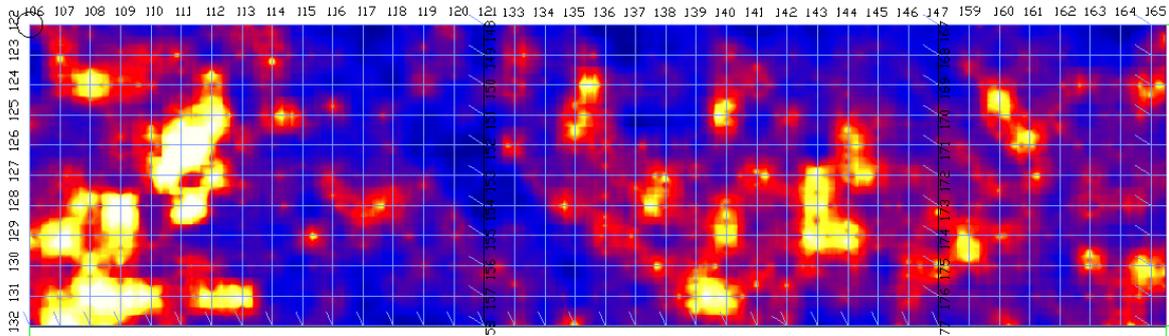
L'area è caratterizzata da anomalie la cui distribuzione "a scacchiera" è apparentemente concorde con le direzioni principali della maglia assegnata. In altre parole, mentre le bande di anomalie sembrano disegnare interessanti "spazi chiusi" con angoli retti, di dimensioni grossolanamente 6 x 10 metri, la consistenza delle suddette rimane tutta da verificare con gli accertamenti del caso.



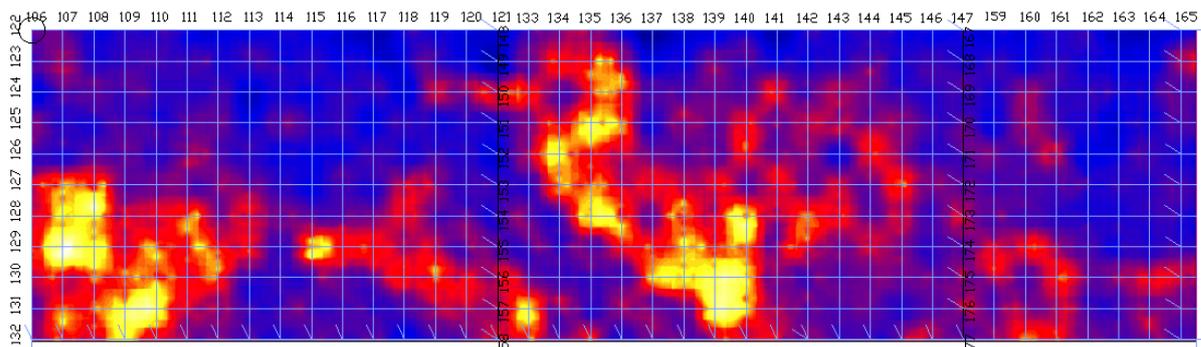


MAPPING AREA " B "

Anche l'area B è caratterizzata da anomalie con una distribuzione ben lontana dallo "scattering" casuale, il che lascia pensare alla presenza di settori del substrato fisicamente anomali. In particolare si osserva un allineamento inclinato e diversi punti nei quali le anomalie disegnano nuovamente angoli retti, ancora una volta apparentemente condizionati dalle direzioni principali del rilievo



area B - substrato



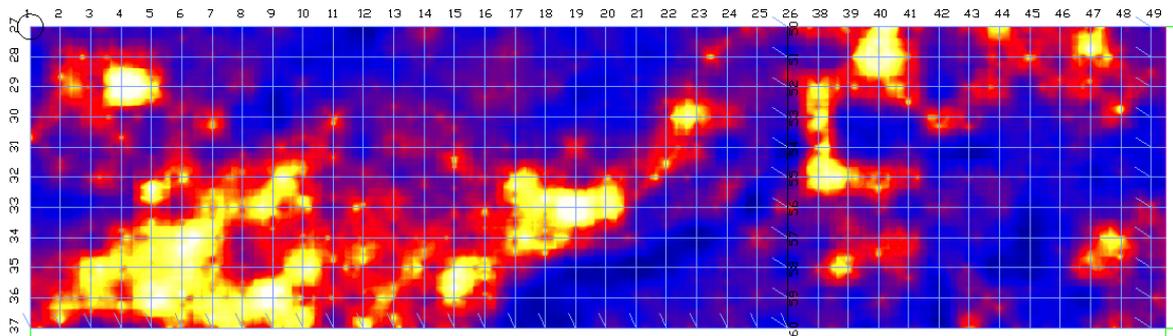
area B - full range

Per quest'area il calcolo a "full range" evidenzia (come si evince dal confronto tra le due mappe sovrastanti) un contributo da parte degli orizzonti superficiali, indizio che parte delle sorgenti possono avere profondità inferiore agli 80 cm. Osservazione da applicare segnatamente al suddetto allineamento inclinato che taglia la parte centrale dell'area con angolo prossimo ai 45° .

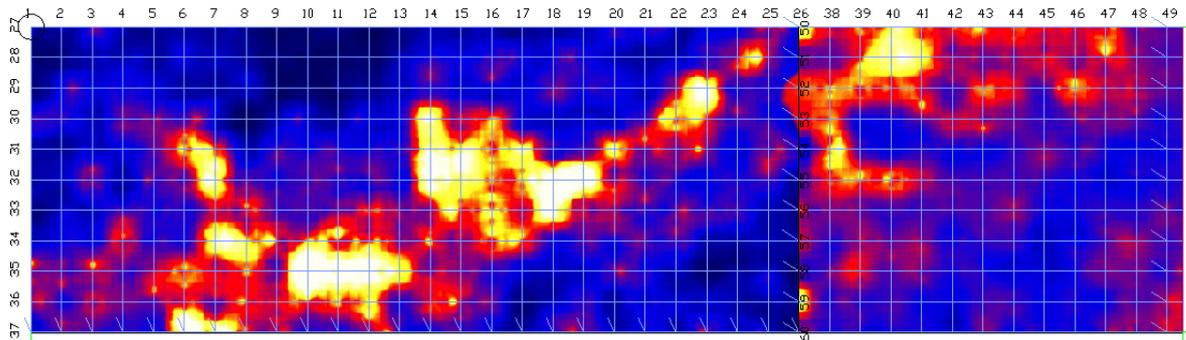


MAPPING AREA " C "

L'area è sicuramente la più interessante della campagna eseguita. In essa si osserva un allineamento inclinato, simile a quello dell'area B e anche in questo caso sviluppato grosso modo nella porzione centrale del rettangolo assegnato, più due aree anomale posizionate rispettivamente verso lo spigolo NE e verso quello opposto, a SW. Si noti che estendendo il calcolo all'intera porzione basale ("layer 2") ossia a tutta quella che insiste al di sotto del livello agrario, le anomalie di SW tendono ad affievolirsi, il che indica anche in questo caso che esse hanno profondità minore. Molto suggestiva è un "path" di forma quasi perfettamente quadrata, con un lato mancante, quindi delineante una sorta di C di dimensioni circa 6 x 6 metri, delimitata dai profili 26-38-40-41-29-30-31-32.



area C - top del basamento



area C - "layer 2"

Ciò evidentemente va considerato in funzione della precedentemente discusse "zone d'ombra" che affliggono le aree più profonde. Il che significa che la loro assenza nella sezione più profonda non indica necessariamente che esse non sono presenti ma solo che in quel determinato settore insiste una maggiore articolazione sulla verticale.

Scafati, novembre 2022

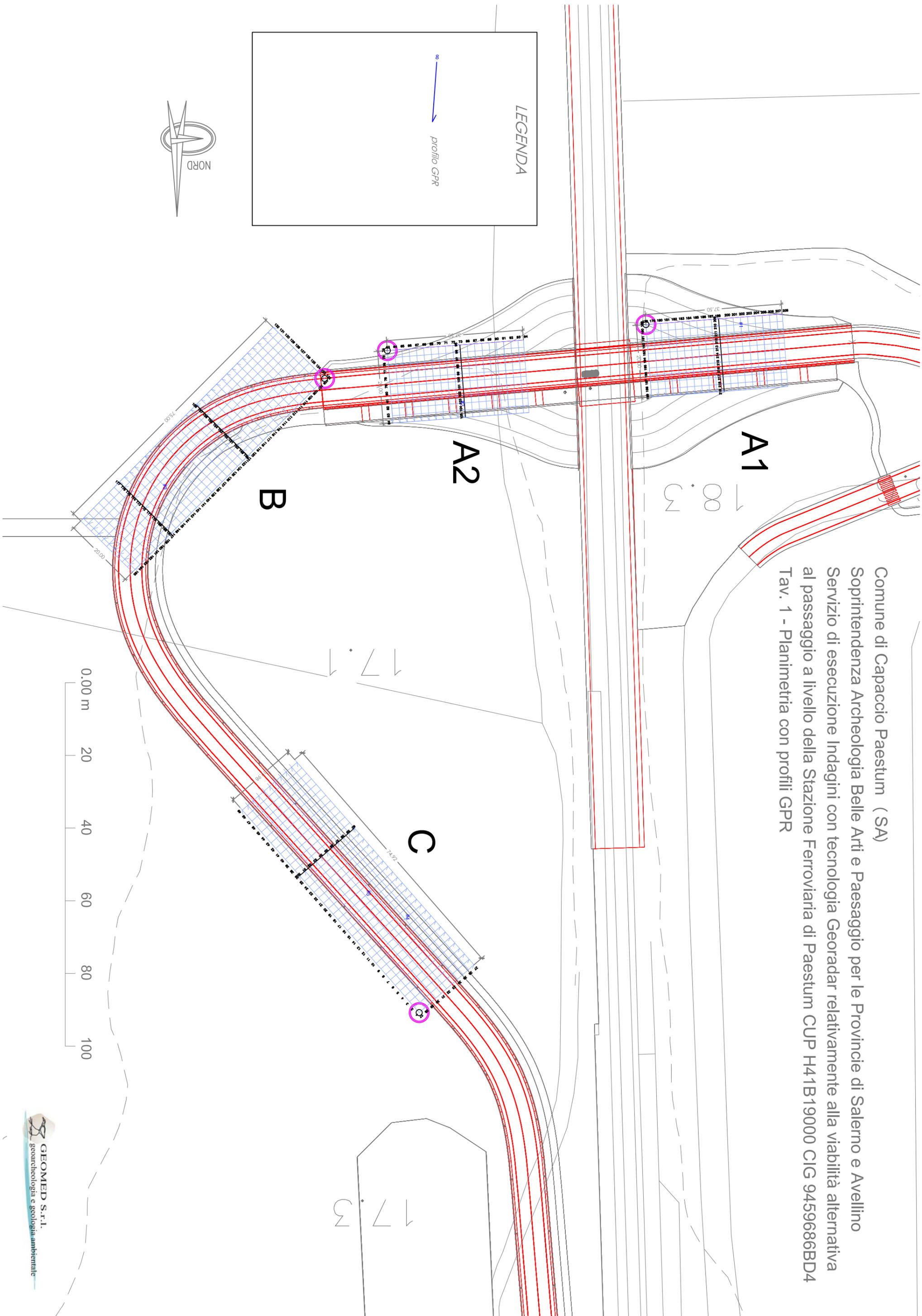
Geomed srl

dott. geol. G. Sperandeo
GEOMED S.r.l.
Geoarcheologia e Geologia Ambientale
Via L. Sicignano, 48 - Tel. e Fax 081 850 81 72
84018 SCAFATI (SA)
Per: geomed.srl@pecimpresa.it
Codice Fiscale 06182100633
Partita IVA 03300830654



ALLEGATI

Comune di Capaccio Paestum (SA)
Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per le Province di Salerno e Avellino
Servizio di esecuzione Indagini con tecnologia Georadar relativamente alla viabilità alternativa
al passaggio a livello della Stazione Ferroviaria di Paestum CUP H41B19000 CIG 9459686BD4
Tav. 1 - Planimetria con profili GPR



LEGENDA

profilo GPR

NORD

A2

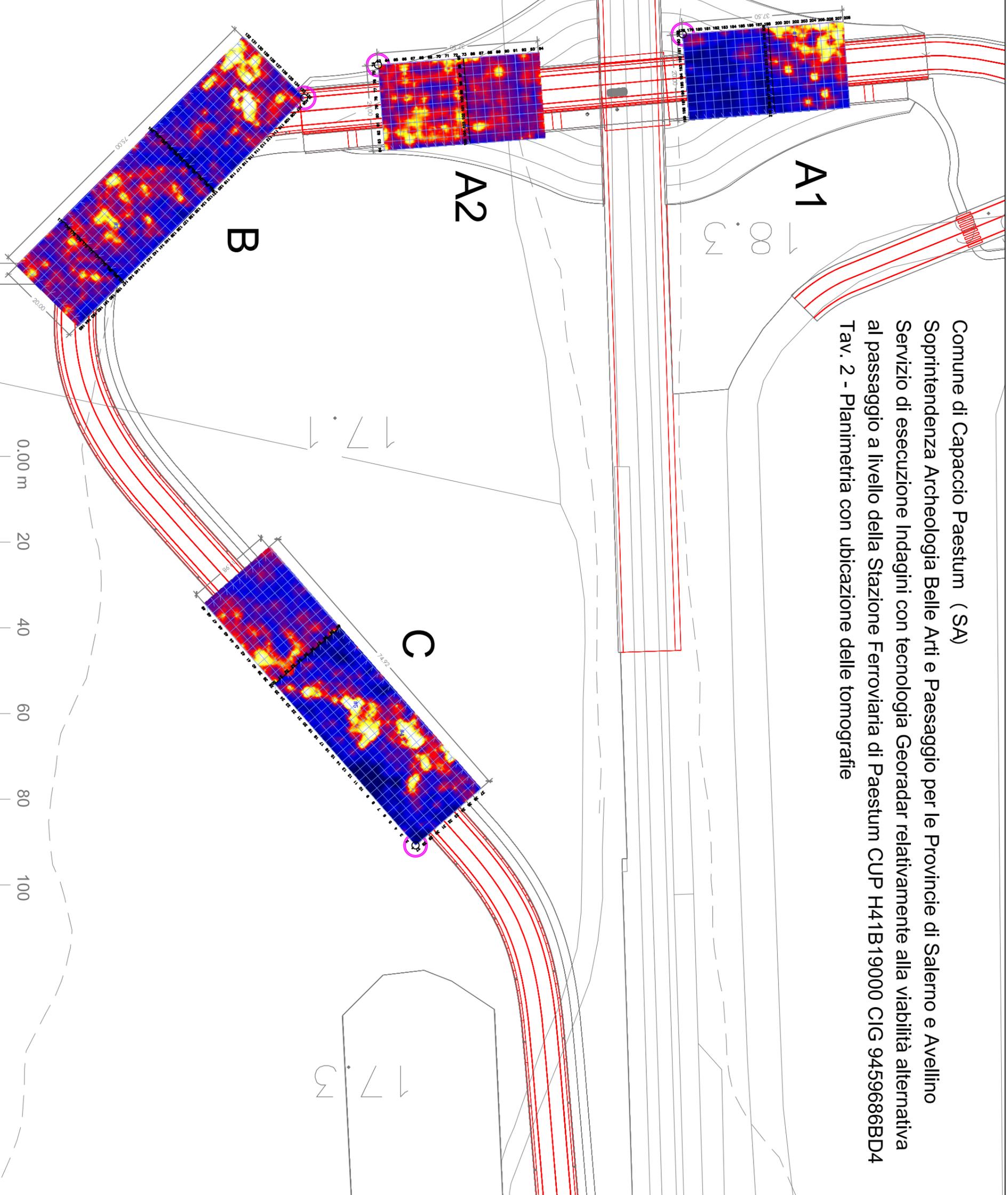
A1

B

C

0.00 m 20 40 60 80 100

Comune di Capaccio Paestum (SA)
Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per le Province di Salerno e Avellino
Servizio di esecuzione Indagini con tecnologia Georadar relativamente alla viabilità alternativa
al passaggio a livello della Stazione Ferroviaria di Paestum CUP H41B19000 CIG 9459686BD4
Tav. 2 - Planimetria con ubicazione delle tomografie



LEGENDA

Intensità di riflessione

0
1136
2267
3397
4528
5658
6789
7919
9050

bassa

media

alta

80

profilo GPR

#1

area di attenzione

