



Rilievi GPR multifrequenza in un sito test controllato in Campania, Italia



A cura di:

Daniela Tarallo¹, Antimo Angelino², Giuseppe Cavuoto¹, Massimo Contiero², Michele Iavarone², Nicola Pelosi¹, Michele Punzo¹, Paolo Scotto di Vettimo³, Vincenzo Di Fiore¹

¹ISPC - CNR (Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale, Napoli)

²ISMAR - CNR (Istituto di Scienze Marine, Napoli)

³SPIN - CNR (Istituto superconduttori, materiali innovativi e dispositivi, Napoli)



Indice

1. INTRODUZIONE	1
2. GRUPPO DI LAVORO.....	3
3. METODOLOGIA GPR.....	4
4. ACQUISIZIONE DEI DATI.....	8
5. ELABORAZIONE DATI	12
6. RISULTATI.....	16



1. INTRODUZIONE

In questo report vengono presentati i risultati dell'attività geofisica svolta presso l'area test di Succivo (NA) (Fig.1).

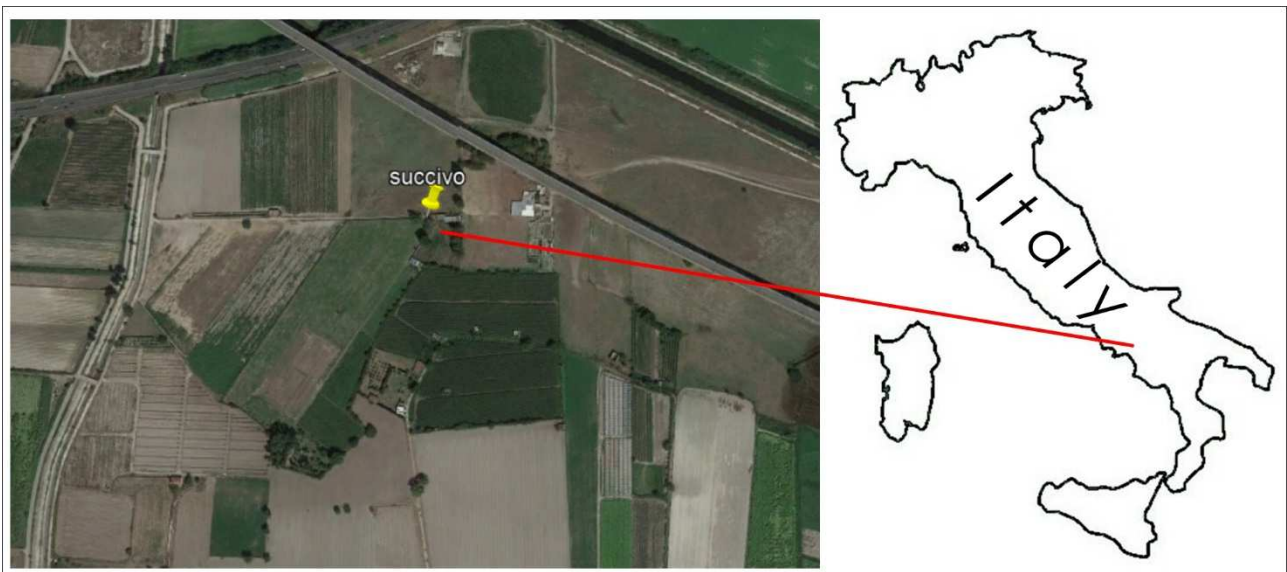


Figura 1. Localizzazione dell'area test di Succivo (NA).

Scopo del presente lavoro è verificare la risposta di antenne GPR (Ground Penetration Radar) a diversa frequenza (100 MHz – 270 MHz) in terreni di natura piroclastica dove sono stati interrati oggetti di varia natura (fusti metallici, muretti in tufo e tubi in PVC) e a diverse profondità (1m - 2m - 3m). Le immagini delle strutture sepolte sono illustrate in figura 2.



Figura 2. Posizionamento dei fusti metallici, muretti di tufo e tubo in PVC all'interno dello scavo.

Conoscendo la stratigrafia di massima del sottosuolo e la disposizione degli oggetti sepolti, sono stati ottenuti radargrammi 2D la cui analisi ed interpretazione hanno permesso di definire la risposta delle antenne GPR in termini di risoluzione e profondità.

L'attività ha permesso di conseguire importanti informazioni sulla scelta della frequenza di utilizzo delle antenne GPR in terreni piroclastici e sulla risposta che tale tecnica fornisce nell'identificazione di oggetti sepolti come fusti metallici, muretti in tufo e tubi in PVC. Tali informazioni risultano essenziali qualora venga usata la tecnica GPR per rilevare la presenza di oggetti sepolti (metallici e non) a varie profondità.



2. GRUPPO DI LAVORO

In tabella 1 si riporta l'elenco del personale scientifico e tecnico impegnato nelle attività di questa campagna:

PERSONALE	QUALIFICA	COMPETENZE
Vincenzo Di Fiore	Ricercatore - Responsabile progetto	Geofisico
Giuseppe Cavuoto	Tecnologo	Rilievo geologico
Nicola Pelosi	Ricercatore	Geofisico
Michele Punzo	Tecnologo	Geofisico
Daniela Tarallo	Tecnologo	Geofisico
Antimo Angelino	CTER	Tecnico
Massimo Contiero	CTER	Tecnico
Michele Iavarone	OT	Tecnico
Paolo Scott di Vettimo	CTER	Tecnico

Tabella 1. Elenco del personale.



3. METODOLOGIA GPR

Il metodo GPR si basa sulla trasmissione di impulsi radio (radar) ad alta frequenza nel terreno e sulla misura del tempo trascorso tra la trasmissione e la ricezione in superficie. Un impulso radar è immesso nel terreno da un'antenna trasmittente che è disposta al di sopra, o vicino alla superficie del terreno. Il pacchetto d'onde elettromagnetiche si propaga verso il basso nel terreno fino ad incontrare una superficie di discontinuità che lo riflette in parte (facendolo tornare in superficie dove viene rilevata da un'antenna ricevente) e in parte lo trasmette. Le discontinuità dove si verificano riflessioni sono caratterizzate da variazioni delle proprietà elettriche del terreno, spesso correlabili a variazioni del contenuto d'acqua o a cambiamenti litologici. Riflessioni possono anche essere generate all'interfaccia tra oggetto sepolto e il terreno circostante oppure in corrispondenza di spazi vuoti nel terreno. Dalla misura dei tempi di viaggio degli impulsi, se la velocità di propagazione nel sottosuolo è nota, può essere stimata in maniera accurata la profondità.

La profondità a cui l'energia elettromagnetica può penetrare e la risoluzione che ci si può aspettare nel sottosuolo sono parzialmente controllati dalla frequenza centrale del pacchetto d'onde radar trasmesso.

Le antenne in commercio hanno un range di frequenze centrali che variano da 10 MHz a 2,5 GHz. In generale i sistemi GPR usano antenne a dipolo che hanno una larghezza di banda di due ottave, ciò significa che le frequenze variano tra $\frac{1}{2}$ e 2 volte la frequenza dominante. Nel nostro caso, con una frequenza di 100 MHz e 270 MHz di centro banda, la larghezza della banda varia da circa 50 a 200 MHz per l'antenna a 100 MHz e circa 130 MHz a 540 MHz per l'antenna con frequenza nominale di 270 MHz. Nella realtà la distribuzione di frequenza non è una curva a campana intorno ad un valore medio di frequenza, ma una distribuzione asimmetrica intorno ad una frequenza dominante. Queste variazioni della frequenza dominante possono essere causate da irregolarità della superficie dell'antenna o da altri componenti elettronici collocati all'interno del sistema antenna, e viene ulteriormente complicata quando l'energia radar si propaga nel terreno. La nuova frequenza di propagazione varierà in modo dipendente dalle proprietà elettriche del terreno, le quali determinano la velocità di propagazione. In generale, più è grande la profondità necessaria per l'investigazione, più è bassa la frequenza dell'antenna che dovrebbe essere utilizzata, ma ciò comporta una risoluzione minore. La profondità di penetrazione e la risoluzione sono quindi parametri altamente variabili e dipendono da molti fattori come la composizione del terreno di copertura (permittività dielettrica relativa (RDP)), la porosità e la quantità di umidità trattenuta. Esiste quindi una sorta di



proporzionalità inversa tra la profondità di penetrazione e la risoluzione. La scelta dell'antenna deve quindi dipendere dalla profondità e dalle dimensioni del target oltre che dalle caratteristiche del terreno "inglobante" (costante dielettrica relativa e attenuazione).

Nel metodo GPR le antenne radar vengono spostate sul terreno ed è possibile acquisire in continuo (*Time mode*) o in distanza (*Distance mode*): nel primo caso il sistema emette e riceve continuamente gli impulsi radar, nel secondo invece il sistema è capace di trasformare la velocità di trascinamento dell'antenna in distanze lineari. Se i dati vengono acquisiti lungo profili equidistanziati (griglie), la correlazione e l'analisi di riflessioni permette di costruire un'accurata immagine tridimensionale di lineamenti sepolti e quindi della stratigrafia ad essi associata.

Il funzionamento di un GPR avviene attraverso l'utilizzo di un'antenna trasmittente che invia un segnale di tipo impulsivo elettromagnetico e un'antenna ricevente parte del pacchetto d'onda che viene riflesso in superficie una volta raggiunta una superficie di discontinuità elettromagnetica.

L'antenna di un GPR, quindi, invia nel terreno una serie di impulsi ad intervalli di tempo stabiliti dall'operatore. La registrazione delle riflessioni e la successiva digitalizzazione permette di visualizzare i cosiddetti radargrammi. La presenza di discontinuità nel sottosuolo dà luogo ad "iperboli di diffrazione o riflessione". Le antenne radar sono generalmente alloggiare su una slitta di plastica o fibra di vetro che è poi la parte che viene adagiata sulla superficie del terreno, o appoggiata su ruote a pochi centimetri dal suolo. Generalmente è possibile acquisire i segnali con un georadar in assetto monostatico e bistatico.

Nel nostro caso le antenne a 100 MHz e 270 MHz sono state utilizzate in modalità monostatica, cioè formati da un'unica antenna che prima trasmette il segnale e successivamente si abilita a ricevere.

I parametri fisici che regolano la trasmissione di un'onda elettromagnetica in un qualsiasi mezzo sono:

- ϵ costante dielettrica relativa;
- σ conducibilità;
- μ permeabilità magnetica;
-

La costante dielettrica relativa o permittività dielettrica relativa o RDP (ϵ) è il parametro che influisce maggiormente sulla velocità delle onde.

La costante dielettrica relativa rappresenta la capacità di un materiale di immagazzinare e poi permettere il passaggio di energia elettromagnetica, quando un campo elettromagnetico è sovrapposto su di esso. Per avere un'elevata penetrazione dell'energia radar, la condizione ideale è



quella di viaggiare all'interno di un mezzo altamente dielettrico. Infatti i buoni dielettrici permettono il passaggio di molta energia elettromagnetica con scarsa dissipazione.

Il valore della costante dielettrica nei diversi materiali è difficile a determinare, poiché dipende da numerosissimi parametri. Uno di questi è il contenuto d'acqua che ha un valore di ϵ molto alto rispetto agli altri materiali e quindi la sua presenza nel terreno è un fattore dominante.

La conducibilità (σ) è l'attitudine di un materiale a condurre corrente elettrica. Rappresenta quindi un parametro nemico del georadar. Maggiore è la conducibilità e maggiore è l'assorbimento, cioè più velocemente l'energia elettromagnetica verrà dissipata senza che essa possa essere riflessa indietro all'antenna ricevente. In un terreno con conducibilità alta c'è il rischio elevato che la maggior parte dei segnali immessi perda subito energia e venga completamente assorbito senza dare alcuna riflessione. Mezzi contenenti acqua salata, argilla (specialmente se umida) sono altamente conduttivi, così come i terreni o sedimenti che contengono sali sciolti o elettroliti. Inoltre l'energia radar non penetra nei metalli, quindi un oggetto metallico rifletterà il 100% dell'energia che lo colpisce oscurando ogni cosa al di sotto di esso.

La permittività o permeabilità magnetica (μ) è l'attitudine di un mezzo a magnetizzarsi in presenza di un campo elettromagnetico sovrapposto. Molti terreni e sedimenti sono scarsamente magnetici e perciò hanno bassa permeabilità magnetica. Più alto è il valore della permeabilità magnetica più alta sarà l'attenuazione dell'energia elettromagnetica durante la trasmissione. Quindi poiché i materiali geologici sono poco magnetici, la permittività magnetica viene posta uguale alla permittività magnetica nel vuoto ($\mu \approx 1$). Inoltre mezzi che contengono minerali di magnetite, ossido di ferro o terreni ricchi di ferro hanno un'alta permeabilità magnetica e perciò trasmettono poca energia radar. Quindi la permittività dielettrica, la conduttività elettrica e la permeabilità magnetica del materiale in cui l'energia radar si propaga attenuano il segnale radar con la profondità. L'attenuazione di energia elettromagnetica aumenta al crescere del contenuto di acqua nel terreno. Nei suoli l'attenuazione per frequenze al di sopra dei 100 MHz aumenta notevolmente in conseguenza all'avvicinamento della frequenza di rilassamento dell'acqua (10 GHz). L'attenuazione α si misura in decibel per metro (dB/m).

Empiricamente si osserva che α è direttamente proporzionale alla conducibilità ed inversamente proporzionale alla radice della permittività.



$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left[\frac{1}{2} \left(\left(1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Fattore fondamentale nei suoli è quindi la presenza dell'acqua, che disciogliendo i sali presenti, fa aumentare il valore della conducibilità. Quindi, riassumendo, materiali con bassa conduttività elettrica (alta resistività) permettono una migliore propagazione dell'onda elettromagnetica. Materiali che hanno un'alta conduttività elettrica (alta RDP), come le argille sature, impediscono la propagazione dell'onda elettromagnetica attenuando fortemente l'energia radar.

Altro fattore fondamentale è la risoluzione del segnale radar. La risoluzione è determinata dalla frequenza e quindi dalla lunghezza d'onda, dall'energia radar trasmessa nel terreno, dal contrasto delle proprietà elettromagnetiche, dalla forma, dimensioni e orientazione dell'obiettivo.

La risoluzione è controllata quindi dalla quantità di energia riflessa da un corpo sepolto che a sua volta dipende dal rapporto tra le dimensioni dell'oggetto e lunghezza d'onda dell'onda radar nel terreno. Segnali a piccola lunghezza d'onda (alta frequenza) consentono di risolvere piccoli lineamenti, ma non penetreranno a grande profondità. Viceversa faglie a grande lunghezza d'onda (bassa frequenza) implicano bassa risoluzione e alta penetrazione. Alcuni lineamenti nel sottosuolo possono essere ben evidenziati se hanno sufficiente contrasto con le proprietà del corpo incassante. Gli oggetti che sono allungati in una dimensione (tunnel, canali, tubi, etc.), dovrebbero preferibilmente coincidere con il verso normale ai profili, in modo da essere facilmente visibili nei radargrammi. Per superfici piane che possono essere associate alla stratigrafia o a larghi lineamenti archeologici piani (come il pavimento di una casa), la risoluzione è funzione della geometria, dell'inclinazione, del loro spessore (preferibilmente $> 1/10$ della lunghezza d'onda), e della rugosità della superficie.



4. ACQUISIZIONE DEI DATI

Nella zona di Succivo (NA) è stata progettata e realizzata un'area test costituita da un riempimento con terreni di natura piroclastica di uno scavo delle dimensioni di 7,8 m x 9,9 m. All'interno dello scavo sono stati sepolti, a profondità di 1 m, 2m e 3 m, fusti metallici, muretti di tufo e un tubo in PVC.

Le posizioni degli oggetti sepolti sono illustrati in figura 3. In particolare i fusti hanno una lunghezza di 0,9 m e un diametro di 0,60 m; i muretti hanno una lunghezza di 2,15 m; mentre la tubazione in PVC ha una lunghezza di 1,60 m e un diametro di 0,20 m.

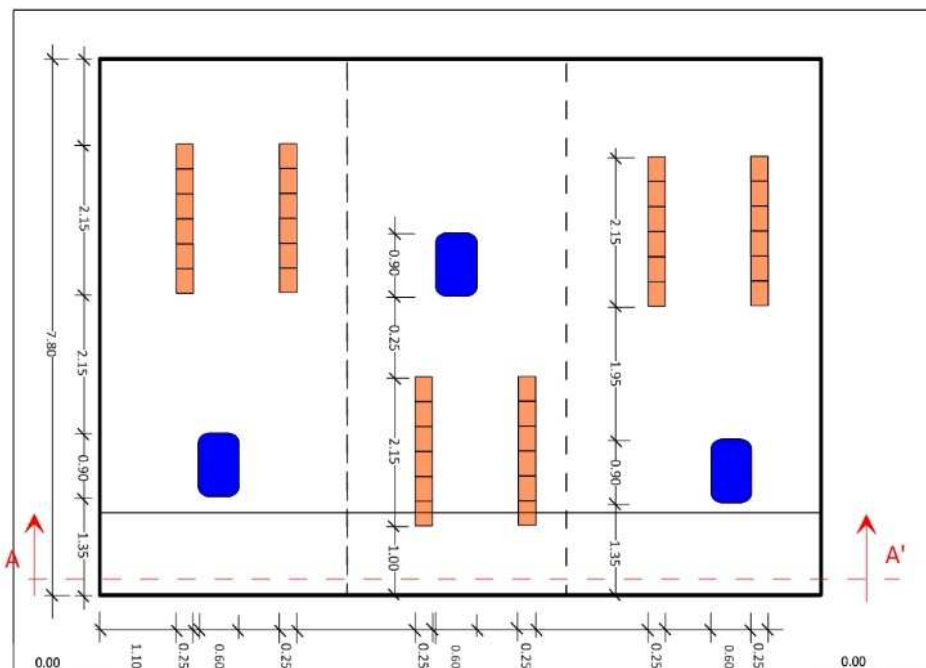


Figura 3. Schema del posizionamento dei fusti metallici, muretti di tufo e tubo in pvc all'interno dello scavo.

La scelta di posizionare all'interno dello scavo oggetti di diverse dimensioni e materiali nasce allo scopo di comprendere il comportamento delle antenne radar a frequenza di 100 MHz e 270 MHz in terreni di natura piroclastica.

Il GPR è infatti utilizzato nel campo della tutela ambientale per rilevare sostanze liquide contaminanti o tossiche; in ambito urbano per la sua elevata risoluzione, velocità di acquisizione e non invasività,



rilevando sottoservizi; in applicazioni forensi per individuare corpi, armi, stupefacenti nascosti ed eventuali ordigni bellici; in ambito archeologico per individuare speditamente strutture al di sotto di una potenziale area di scavo.

All'interno dell'area test sono state acquisite 6 linee radar con antenna a 100 MHz (Fig. 4) ed equidistanza delle linee è di m.



Figura 4. Grid del GPR survey con antenna a 100 MHz.

Con antenna a 270 MHz sono state acquisite 18 linee radar ortogonali fra loro. L'equidistanza è di 1 m per le linee longitudinali e 0,5 m per la direzione ortogonale (Fig 5).



Figura 5. Grid del GPR survey con antenna a 270 MHz.

I dati acquisiti in questo modo hanno permesso di avere informazioni geofisiche lungo una griglia regolare costituita da maglie rettangolari ed ottenere così un'immagine del sottosuolo a profondità differenti a seconda dell'antenna utilizzata.

I parametri di setup inseriti sono:

- Sample per scan: è il numero di samples (punti campione) per ogni scan (segnale registrato) e dà una misura della qualità del dato. Infatti un campione è un valore digitale che definisce istantaneamente l'onda riflessa sulla traccia. Più elevato è il numero di campioni digitali, più accurata è la ricostruzione della forma dell'onda.
- Numero di Scan/Unità: questo parametro rappresenta il numero di impulsi registrati dal sistema e deve essere impostato tenendo presente che il target deve essere "coperto" da almeno 5-6 scan.
- Gain function: la scelta della funzione di gain viene fatta in base alla necessità di amplificare o deamplificare determinate frequenze nel segnale, in maniera tale da recuperare anche i segnali ad



ampiezze più basse. Inoltre, diminuendo il gain per gli ultimi arrivi è possibile attenuare l'ampiezza del rumore del sistema.

- Filtri: il filtraggio dei segnali durante l'acquisizione in campagna consente di escludere determinate frequenze dai segnali stessi. Tuttavia è bene ricordare che il filtraggio preliminare dei segnali potrebbe in alcune occasioni generare una "perdita di informazioni".

- Stacking: consiste in una sommatoria sincrona del segnale che serve a ridurre il rumore associato alle onde riflesse. La riduzione del rumore si ottiene mediando aritmicamente più tracce consecutive e registrando la traccia media.



5. ELABORAZIONE DATI

Le tracce registrate nell'unità di controllo vanno a costituire un radargramma che rappresenta un profilo bidimensionale verticale lungo ogni linea della griglia. In ascissa di questo grafico è raffigurata la distanza percorsa dall'antenna sulla sezione e in ordinata il tempo in ns. Le riflessioni radar sono sempre registrate in TWT, Two-Way Time (Tempo doppio di viaggio) che è il tempo impiegato da un'onda radar a viaggiare dalla superficie dell'antenna trasmittente al bersaglio e tornare indietro sulla superficie dell'antenna ricevente. Il tempo di andata e ritorno degli impulsi è ovviamente importantissimo per la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo. Se la velocità media V dell'onda radar attraverso il terreno è nota, è possibile convertire i tempi di viaggio in profondità tramite la semplice relazione $V = d/t$ (dove d è la distanza percorsa dall'onda e t è il tempo).

I radargrammi dopo l'acquisizione contengono generalmente del "rumore" di fondo che, deve essere eliminato affinché l'interpretazione risulti più agevole. Per eliminare il noise e correggere le scale orizzontale e verticale dei dati grezzi, è necessario che essi vengano trattati prima dell'interpretazione. Le diverse tracce possono essere visualizzate nel formato wiggle-trace, dove le tracce sono disposte le une accanto alle altre, o in linescan, in cui ad ogni ampiezza è associato un colore o un tono di grigio (Fig. 6). In questo modo le riflessioni significative, che possono rappresentare importanti interfacce nel sottosuolo, sono prontamente visibili. Solitamente la forma delle bande anomale è collegata alla forma del riflettore.

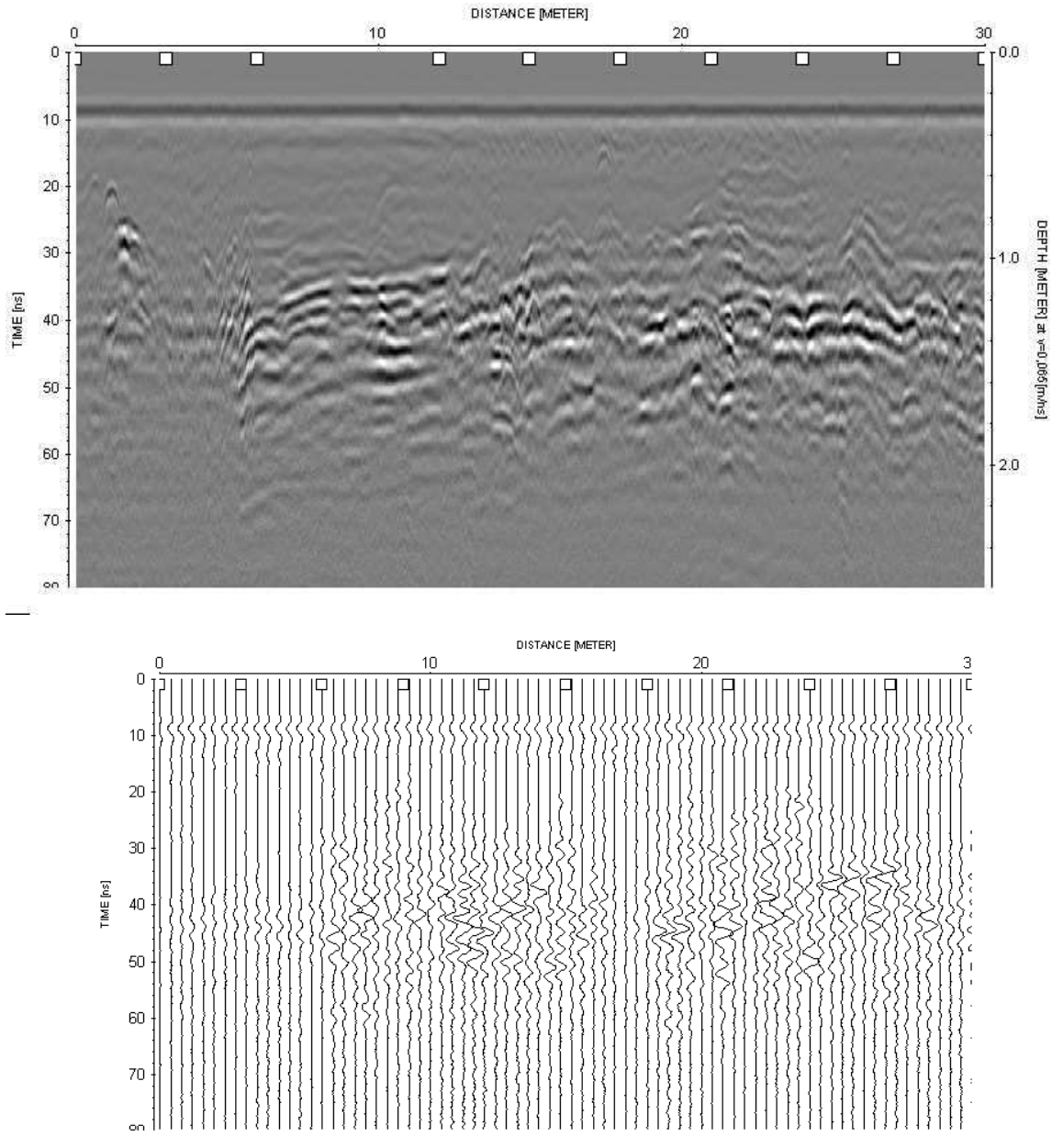


Figura 6. Registrazione dei segnali riflessi relativi ad un profilo GPR. In alto il radargramma in modalità line scan, in basso lo stesso radargramma in modalità wiggle-trace.

I profili acquisiti in modo regolare all'interno della superficie da investigare, sono stati poi elaborati al fine di posizionare le tracce radar registrate ai nodi di una griglia regolare.

I dati sono stati elaborati seguendo i seguenti step:



- Editing: eliminazione di alcune tracce, o per troppo noise o perché realizzate con una velocità di trascinarsi anomala (ostacoli imprevisti). Il risultato finale consiste nel normalizzare lungo l'asse orizzontale (ossia rispetto alle distanze).
- Interpolazione dei dati relativi a posizioni intermedie rispetto ai markers
- Correzione della direzione e delle coordinate dei profili
- Correzione statica (effettuata per eliminare il disturbo provocato dall'accoppiamento dell'antenna col terreno)
- Gain: amplificazione preventiva del segnale che può essere successivamente variato o eliminato.
- Filtraggio 1D (filtro passa banda)
- Filtraggio 2D (background removal che rimuove il noise rappresentato da una banda orizzontale)
- Stacking a 10, 25 e 50 (cioè ad esempio in un pacchetto di tracce ne sono state considerate 10 e poi sommate così da riportarne una sola semplificativa su quella data distanza)
- Determinazione della velocità media di propagazione

Nell'analisi di un radargramma le anomalie sono rappresentate dalla presenza di "iperboli" date da fasi generate da punti sorgente. Queste forme si generano a causa dell'ampio angolo di trasmissione del raggio radar, per cui l'antenna vedrà il punto sorgente anche quando esso non è ubicato sulla sua verticale.

Le iperboli di riflessione si generano in presenza di discontinuità geometriche ed elettriche nel sottosuolo. E' proprio in base ad esse che si può risalire ad eventuali strutture sepolte, definirne la velocità e quindi associarla al terreno o alla discontinuità.

Le più forti riflessioni radar si generano ovviamente all'interfaccia tra due spessi strati con proprietà elettriche molto differenti. Riflessioni di ampiezza più piccola si verificano generalmente quando sono presenti solo piccole differenze nelle proprietà elettriche tra gli strati.

Quindi più grande è la differenza di RDP tra i materiali del sottosuolo, più grande è l'ampiezza delle riflessioni generate. L'ampiezza dell'onda riflessa generata lungo l'interfaccia può essere quantificata usando l'equazione sottostante se la RDP dei due materiali è nota:



$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$

dove: R = coeff. di riflessione per incidenza normale;

ϵ_1 = RDP del materiale sovrastante;

ϵ_2 = RDP del materiale sottostante.

Di seguito verranno analizzati e descritti i risultati ottenuti.



6. RISULTATI E CONCLUSIONI

Sono state analizzate due delle linee acquisite, una ottenuta con frequenza dell'antenna di 270 MHz e una con frequenza di 100 MHz. La posizione delle linee è illustrata nelle figure 7 e 8. Entrambi i radargrammi sono stati confrontati con delle linee acquisite con la medesima antenna ma precedentemente lo scavo e l'inserimento degli oggetti.

Per il radargramma acquisito con antenna GPR da 270 MHz si osserva (Fig. 7) la presenza di diffrazioni laddove sono posizionati i muretti. Il primo bidone posizionato ad 1 m di profondità non crea nessun tipo di segnale dato che la linea acquisita non passa al di sopra dell'oggetto, mentre il fusto posizionato a 3 m, ampliando la sua azione il cono del 'foot print' seppur a bassa risoluzione, investe in fusto metallico creando noise nel segnale.

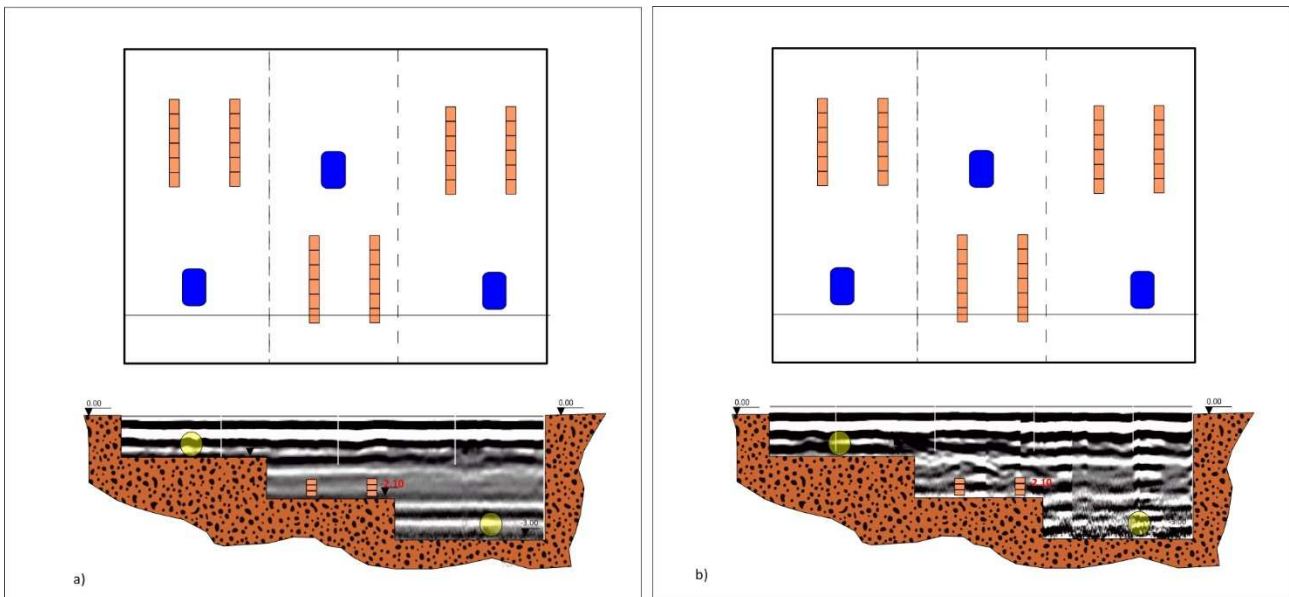


Figura 7. Sovrapposizione del radargramma del profilo P02_270 acquisito con antenna a 270 MHz con la sezione del terreno congruente. A) Prima dello scavo; b) Dopo lo scavo.

Nel radargramma acquisito con antenna a 100MHz (Fig. 8) non sono invece visibili i risultati presenti con l'acquisizione a 270 MHz. Questo perché una frequenza nominale più bassa fa sì che il segnale arrivi a maggiore profondità ma non abbia la stessa risoluzione laterale e verticale.

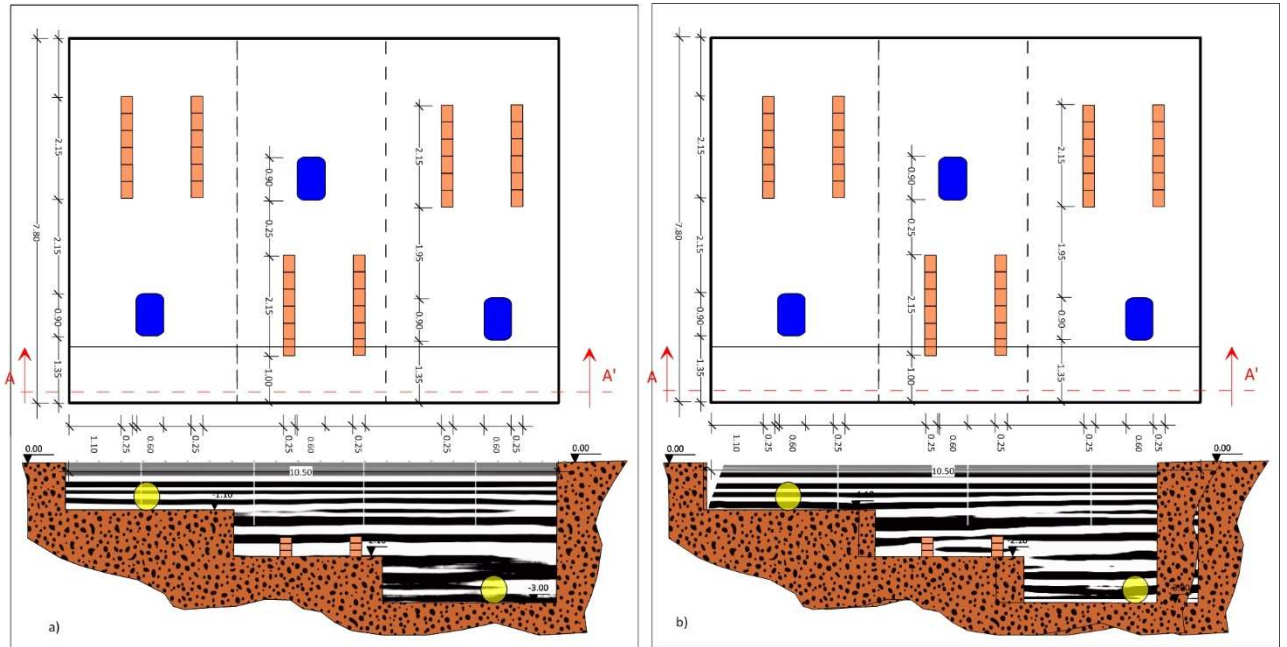


Figura 8. Sovrapposizione del radargramma del profilo P02_100 acquisito con antenna a 100 MHz con la sezione del terreno congruente. A) Prima dello scavo; b) Dopo lo scavo.

In definitiva, è possibile osservare come in terreni di natura piroclastica e a profondità non superiori a 3 m nell'esecuzione di un'indagine GPR la scelta ottimale ricade nell'utilizzo di un'antenna con frequenza nominale di 270 MHz.