



Università degli Studi di Cagliari

**DOTTORATO DI RICERCA**

in

**INGEGNERIA DEL TERRITORIO**

**XXIII CICLO**

**RAPPRESENTAZIONE TRIDIMENSIONALE E  
MUSEALIZZAZIONE DIGITALE DELLE PREESISTENZE  
ARCHEOLOGICHE INDAGATE MEDIANTE METODI GEOFISICI**

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza: GEO/11

Presentata da:

Mara Manconi

Coordinatore Dottorato

Prof. G. Querzoli

Tutor/Relatore

Prof. G. Ranieri

Esame finale anno accademico 2010 – 2011



---

## INDICE

1. INTRODUZIONE.....	4
2. STATO DELL'ARTE.....	9
2.1 Metodi Geofisici applicati all'archeologia: generalità .....	9
3. METODOLOGIE GEOFISICHE UTILIZZATE.....	13
3.1 Georadar.....	13
3.1.1 Principi di base dell'elettromagnetismo.....	14
3.1.2 Corrente elettrica che attraversa l'antenna.....	16
3.1.3 Attenuazione e profondità di penetrazione.....	21
3.1.4 Risoluzione.....	24
3.1.5 Schema di trattamento di un Radargramma.....	26
3.1.6 Time-slices.....	28
3.2 Geoelettrica.....	28
3.2.1 Generalità: a terra.....	28
3.2.2 Geoelettrica in acque poco profonde.....	30
3.2.3 Principi di base.....	31
3.2.4 Metodi di acquisizione.....	34
3.2.5 Metodi elettrici in corrente continua.....	36
3.3 Metodi di rappresentazione del dato geofisico.....	39

---

4. LA MUSEALIZZAZIONE DEI BENI CULTURALI.....	45
4.1 Nascita e breve storia del museo.....	46
4.2 Nascita e sviluppo della realtà virtuale applicata all'archeologia.....	50
4.3 Musealizzazione in realtà diversa.....	53
4.4 VrmI .....	54
4.5 Linguaggio PHP.....	57
4.5.1 Nascita e sviluppo.....	58
4.6 Software R2vrmI.....	59
CASI STUDIO	
5. 1° SITO CAMPIONE: MOTHIA.....	64
5.1 Dati a disposizione .....	67
5.2 Trattamento ed editing dei dati.....	69
5.3 Rappresentazione dei dati col Blender.....	72
6. 2° SITO CAMPIONE: POLLENTIA.....	75
6.1 La prospezione geofisica.....	78
6.2 Trattamento ed editing dei dati .....	79
6.3 Analisi e rappresentazione dei dati con la realtà diversa .....	82
7. 3° SITO CAMPIONE: BASTIONE DI SANTA CATERINA .....	87
7.1 Dati a disposizione.....	90
7.2 Analisi e rappresentazione dei dati in realtà diversa .....	95
8. CONCLUSIONI.....	98
BIBLIOGRAFIA.....	100

---

ALLEGATO 1.....	107
ALLEGATO 2.....	108
ALLEGATO 3 .....	109
RINGRAZIAMENTI .....	111

## 1. INTRODUZIONE

Le metodologie non distruttive utilizzate per la prospezione archeologica sia a terra che a mare, hanno ancora un impiego limitato nonostante le problematiche archeologiche ed ambientali abbiano stimolato negli ultimi decenni un'attenzione davvero importante. Proprio sull'uso di tali metodi utilizzati nella prospezione archeologica e sulle applicazioni pratiche dei risultati nel campo della musealizzazione si discute nella presente tesi. I principali obiettivi sono quindi sia di carattere metodologico, relativo alla diffusione delle conoscenze scientifico-tecnologiche delle metodologie non invasive per lo studio del patrimonio culturale sepolto, sia di carattere divulgativo per la creazione di percorsi virtuali dei siti archeologici.

L'utilizzo di metodologie geofisiche per la ricostruzione del sottosuolo, consentono:

- a) un'acquisizione cospicua dei dati,
- b) una elaborazione raffinata,
- c) un'analisi di dettaglio degli stessi in tempi relativamente brevi senza comprometterne la qualità e quindi l'attendibilità delle interpretazioni.

Per poter ottenere questi risultati, sono stati scelti dei siti campione, su cui sono stati applicati diversi metodi geofisici con opportune modalità.

L'organizzazione di dati in forma digitale, sia poco "densi" (mediante la metodologia geoelettrica), sia dati molto "densi" (Georadar) rese nelle tre

dimensioni, vengono discussi per la valutazione di musealizzazioni in realtà diversa e per una valorizzazione del sito in attesa di un suo completo scavo.

La grande quantità di dati digitali che possono essere raccolti infatti costituisce di per se una conoscenza del sottosuolo sia a terra che sul fondo del mare. Successivamente si opererà con una renderizzazione “efficace”, cioè vicina al vero usando programmi fotografici e adattandoli al dato numerico geofisico.

Il contributo della tesi sta nella metodologia di rappresentazione dei dati, che grazie alla nuova tecnica di visualizzazione qui descritta consentirà anche ai non addetti ai lavori di poter osservare il sottosuolo come se lo stesso fosse portato in superficie. Fino ad oggi lo stato dell'arte dimostra che l'approccio alla rappresentazione grafica dei risultati è stata condotta (considerando il campo della geofisica applicata all'archeologia) secondo tecniche di visualizzazione su mappe 2D, modelli pseudo-3D e 3D, e secondo isosuperfici (Leckebusch, 2003; Novo et al., 2010; Piro et al., 2001, 2006; Goodman et al., 2007), su cui è stata eseguita un'interpretazione dei risultati (effettuata esclusivamente da un occhio esperto) ed in cui potranno essere osservate le anomalie del terreno. Per quanto riguarda la metodologia archeologica, che si basa invece sullo scavo (in itinere o completamente effettuato), la rappresentazione grafica delle strutture sepolte si concentra soprattutto su ricostruzioni virtuali verosimili o inverosimili (Cargill, 2009; Campedelli et al., 2007; Gottarelli, 1996; Forte et Beltrami, 2000), tutte però basate su “ipotesi” ma non su dati “reali”.

E' noto in letteratura che tra il 2004 e il 2005 una società tedesca la “Eastern Atlas – geophysical prospection” ha creato un software di visualizzazione 3D detto “ZODIAC” adatto per tutte le forme di dati in input in formato ASCII (numero *n* di variabili che si basano su un sistema di coordinate x, y, e z). Tale società ha utilizzato dati in ingresso sia da GPR che da dati elettrici.

L'algoritmo alla base del software ZODIAC crea un file 3D per visualizzare i dati in ingresso in tempo reale. Può essere considerato come l'anello di congiunzione tra il data set astratto di numeri in uscita dalla strumentazione geofisica e la sua immediata presentazione. Le poche pubblicazioni al riguardo ci mostrano come il problema della visualizzazione di dati astratti sia stato affrontato, ma non risolto. Alcuni autori (Meyer et al., 2005; Ullrich et al., 2005; Meyer et al., 2004) hanno concentrato la loro attenzione sul rendering su pianta o in proiezione ortogonale. Successivamente nessun altro lavoro è stato portato avanti e in letteratura fino ad ora non sono stati rilevati altri sviluppi; generalmente ci si sofferma all'interpretazione del dato numerico e non viene affrontato il problema della visualizzazione dei dati geofisici.

In questo lavoro di tesi si è effettuato un passo in avanti rispetto alle prime attività: si è cercato di dare forma al dato ottenuto con metodi geofisici, e grazie alla visualizzazione tridimensionale walkthrough/flythrough in tempo reale e grazie agli ultimi ritrovati della computer grafica, si può ottenere un 3D navigabile che interagisca col l'utente, lasciando come sempre la ricostruzione "virtuale" vera e propria allo storico o all'archeologo.

Il sistema integrato georeferenziato, visibile a terra con quello geofisico a mare, potrà costituire un sistema di grande fruibilità sia per le persone abili che potranno godere del sito sotto aspetti nuovi sia per le persone diversamente abili che fruirebbero degli stessi beni con i loro accompagnatori.

In rete esistono numerosi siti internet all'interno dei quali è possibile visitare un'area archeologica senza recarsi direttamente. E' il caso di Machu Picchu in Perù, Tiwanaku e Samaipata in Bolivia, Ostia Antica in Italia e Amarna in Egitto, che grazie alla tecnologia della Internet Virtual Metrology Lab (InVirMet) ideata dal Center for Advanced Spatial Technologies (University



of Arkansas) ha concesso ai visitatori virtuali numerosi modelli 3D dei luoghi, ottenuti mediante il laser scanning. Questi modelli possono essere scaricati usando IMView un software di visualizzazione e analisi 3D libero da licenze commerciali, prodotto dalla InnovMetric. Tali luoghi però sono tutti siti archeologici già scavati, o che si trovano al di sopra della superficie terrestre. Utilizzando questo tipo di software e di tecnologie al momento non sono stati sfruttati luoghi, siti o parti di essi che si celano al di sotto della superficie della terra o del mare, cosa che invece si propone di fare questa ricerca.

Si approfondirà infatti lo sviluppo delle recenti ricerche innovative (Ranieri et al., 2009) che il Dipartimento di Ingegneria del Territorio porta avanti da qualche tempo nell'ambito delle indagini geofisiche non distruttive, specialmente nelle applicazioni sui beni culturali e ambientali di pregio (Ranieri et al., 2008).

Il contenuto di questa tesi è stato suddiviso in 8 Capitoli.

Il primo è dedicato all'introduzione; nel secondo Capitolo viene eseguita un'accurata analisi dello stato dell'arte per quanto riguarda le metodologie di rappresentazione dei dati geofisici che fin'ora sono state utilizzate in letteratura: mappe 2D, modelli pseudo-3D e 3D, isosuperfici etc..

Nel terzo Capitolo viene fatta una descrizione dettagliata della metodologia utilizzata in tre siti campione: il metodo elettrico e il GPR (Ground Penetrating Radar) e i principi fisici sui quali si basano.

Il quarto Capitolo è focalizzato sulla musealizzazione, sul modo in cui essa è stata intesa in passato e sui progetti attuali di presentazione, sulle tecniche utilizzate in questo lavoro per la visualizzazione dei dati e la descrizione dei software adottati, con le loro potenzialità e limiti.

Nel quinto, sesto e settimo Capitolo vengono esaminati i tre casi di studio, compresa l'acquisizione dei dati, il postprocessing, l'inversione (solo dei dati

elettrici), la loro rappresentazione nella realtà digitale e i processi di navigazione all'interno del volume indagato.

Infine, nelle conclusioni dell'ottavo Capitolo, sono descritte le potenzialità di sfruttamento dei risultati per un ulteriore proseguo del lavoro di tesi.

Seguono da ultimo 3 appendici di immagini che riproducono i render dei filmati dei siti presi in esame. In allegato alla tesi è proposto un cd con i filmati realizzati.

## **2. STATO DELL'ARTE**

Risalgono al 1930/1940 le prime applicazioni delle tecniche di indagine geofisica nel campo della ricerca archeologica, quando si iniziarono ad impiegare in questo ambito le esperienze acquisite nella ricerca geo-mineraria. Alla fine della seconda guerra mondiale si verificò un rapido ed intenso sviluppo delle tecniche di ricerca legate, soprattutto, all'impiego delle tecnologie utilizzate durante la guerra, come per esempio i metal detector, i sistemi di rilevazione elettromagnetici e il radar. Successivamente le attrezzature e le strumentazioni impiegate tra il 1950 e il 1960 erano ancora molto complesse, voluminose e richiedevano lunghi tempi per l'acquisizione dati.

### **2.1 Metodi Geofisici applicati all'archeologia: generalità**

In questi ultimi anni la geofisica ha avuto il merito di aver ottenuto risultati soddisfacenti nel campo delle prospezioni archeologiche e nella valutazione del grado di vulnerabilità di siti di interesse storico esposti a rischi naturali (Barbano et al., 2009; Dolce et Moroni, 2007). In modo altrettanto produttivo si è rivelata la prospezione geofisica per la valutazione dello stato di conservazione di strutture di interesse culturale (Ranieri, 2009; Cardarelli et al., 2002) e la determinazione di possibili cause di abbandono di un sito a seguito di calamità naturali (David et Pellegrino, 2007).

Ogni situazione archeologica in cui si deve operare ha caratteristiche particolari che comprendono sia la natura e la tipologia dell'insediamento che

il tipo di strutture sepolte. Infatti, la scelta del tipo di metodologia da impiegare è condizionata da numerosi fattori, fra cui: la costituzione geolitologica dei terreni nei quali risulta inserito l'elemento archeologico, le condizioni logistiche dell'area oggetto dell'intervento, come pure e soprattutto gli eventuali disturbi causati dalle infrastrutture dei centri abitati e industriali, dalle linee elettriche e ferroviarie (Cucarzi, 1997). Per queste ragioni risulta fondamentale procedere con ricerche realizzate mediante l'applicazione di più metodologie che si integrano e completano fra loro (Ferrara, 2009).

La prospezione geofisica, che è una delle scienze applicate all'archeologia, ha lo scopo di individuare antichi siti o oggetti sepolti nel terreno, non visibili ad occhio nudo sulla superficie. I sensori posti in superficie possono dare delle utili informazioni oltre che sulla conformazione del sottosuolo anche su quello che si cela all'interno di esso, quindi sia strutture che oggetti sepolti di una certa dimensione prima che si inizi una campagna di scavi. Infatti, in molti casi strutture, solchi, paleo-canali possono lasciare, anche dopo il completo degrado, tracce che persistono nel terreno per millenni, visibili talvolta semplicemente osservando il paesaggio (Field Walking). La prospezione geofisica può essere considerata come una fase di investigazione da eseguire prima dello scavo in quanto aiuta a definire meglio l'area da indagare e indirizzare ogni successiva operazione di sbancamento. Tutti i metodi di indagine geofisica sono basati su procedimenti non distruttivi, utilizzati normalmente anche per l'analisi della crosta terrestre (ricerca di cave, acqua, minerali) ma che permettono di individuare con buona risoluzione e accuratezza anche il profilo di strutture sepolte di differente origine non percettibili dalla superficie (Ferrara, 2009).

Le strumentazioni odierne, tutte di piccole/medie dimensioni, sono portatili e di facile impiego, e sono dotate di gestione e controllo automatico delle

operazioni di acquisizione dati e di memorie elettroniche. In maniera molto rapida e semplice i dati sono trasferiti direttamente al computer per l'elaborazione e la restituzione grafica delle informazioni raccolte, sotto forma di carte o di grafici, da cui è possibile ipotizzare la presenza di strutture archeologiche sepolte e, nel migliore dei casi, individuare l'andamento sotterraneo della struttura in modo da poterne disegnare anche se in modo approssimativo la planimetria.

L'esecuzione di indagini geofisiche costituisce elemento fondamentale della prospezione archeologica perché consente di limitare gli elevati costi di scavo e la probabilità di danneggiare i reperti.

Le tecniche di tipo non invasivo vanno sotto il nome di "Sub-surface sensing techniques". I principali metodi si possono suddividere in due gruppi:

- 1) metodi attivi: basati sull'invio di un segnale nel suolo e misurando poi la risposta. Tra questi si ricordano ad esempio le tomografie di resistività e il georadar ;
  
- 2) metodi passivi: basati sulla misura delle proprietà fisiche del terreno naturali cioè non prodotte da sollecitazioni artificiali. Tra questi si ricordano i metodi magnetici e quelli gravimetrici, termici, radioattivi e il metodo dei potenziali spontanei.

Mentre il metodo magnetico e quello elettrico in passato sono stati maggiormente utilizzati, attualmente è il Ground Penetrating Radar (Georadar o GPR) ad avere la maggiore diffusione. Poco impiegato è invece il metodo sismico, sia a riflessione che a rifrazione. Più che individuare il valore assoluto di un certo parametro fisico, i metodi geofisici determinano la

differenza delle proprietà fisiche del terreno e delle eventuali strutture o manufatti presenti o comunque sepolti in esso (Mucciarelli, 2006).

### 3. METODOLOGIE GEOFISICHE UTILIZZATE

#### 3.1 Georadar

Il Georadar o più semplicemente GPR (Ground Penetrating Radar) è uno strumento che si basa sull'immissione di impulsi di onde elettromagnetiche ad alta frequenza (10 MHz ÷ 3GHz) nel sottosuolo e nella ricezione degli echi radar riflessi da eventuali superfici di discontinuità.

Molto semplicemente il dispositivo è costituito da un'antenna che fa alternativamente da emittente e ricevente, trascinata sulla superficie del materiale da investigare. Le modalità di propagazione delle onde elettromagnetiche sono strettamente legate alle costanti dielettriche dei materiali, che derivano a loro volta dallo stato fisico degli stessi (densità, porosità, permeabilità, conducibilità, etc.), pertanto tutte le interfacce separanti mezzi con caratteristiche diverse possono essere individuate in modo tanto più certo quanto più alto è il contrasto fisico.

In pratica, attraverso l'antenna, dispositivo trasmittente-ricevente, collegata ad un registratore grafico, viene inviata nel mezzo di indagine una serie continua di impulsi elettromagnetici, in corrispondenza delle superfici di discontinuità, una parte dell'energia trasmessa viene riflessa e captata dalla sezione ricevente dell'antenna mentre un'altra parte penetra ulteriormente per essere riflessa da una superficie sottostante. Contemporaneamente al movimento dell'antenna il registratore grafico produce una sezione continuo spazio-tempo nella quale si osservano le tracce delle diverse riflessioni o, comunque, delle anomalie nella risposta. Il dato ottenuto dalla prova è

denominato sezione radarstratigrafica o radargramma. Quest'ultimo ha carattere qualitativo in quanto consente l'interpretazione delle caratteristiche delle diverse "riflessioni" sotto forma di geometria e di intensità del segnale ricevuto. La sezione radarstratigrafica riporta in ascissa i valori delle distanze misurate e in ordinata il tempo di riflessione degli impulsi che viene trasformato in profondità, nota la costante dielettrica, e quindi la velocità dell'onda (Cassioli et al., 2009)

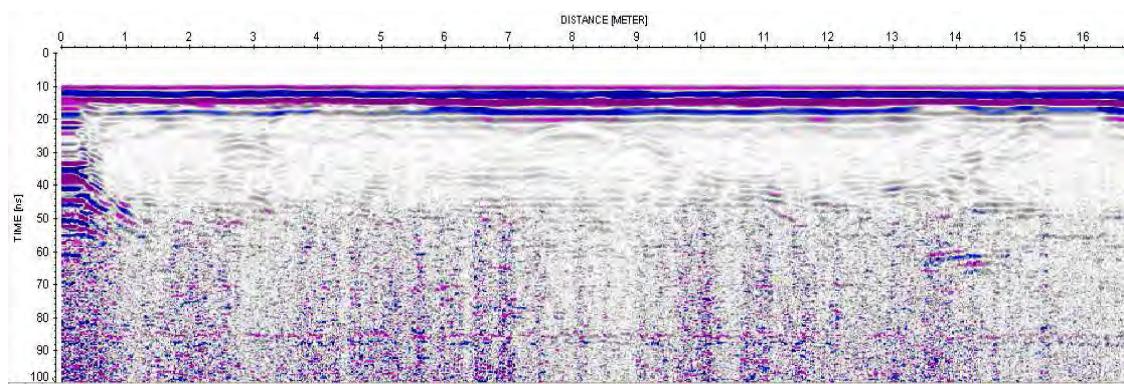


Fig. 3.1: Esempio di radargramma

### 3.1.1 Principi di base dell'elettromagnetismo

La teoria dell'elettromagnetismo è descritta da una serie di leggi basilari formulate principalmente attraverso degli esperimenti condotti sin dal diciannovesimo secolo da diversi scienziati come Faraday, Amperè, Gauss, Lenz, Coulomb, Volta e altri. Nei primi anni del diciannovesimo secolo, Maxwell ebbe l'intuizione di combinare tutti i precedenti studi sulla materia in un insieme coerente di equazioni vettoriali (Maxwell, 1873): costituiscono le "Equazioni di Maxwell":

Legge di Gauss sull'elettricità;

Legge di Gauss sul magnetismo;

Legge di Faraday sull'induzione magnetica;

Legge di Amperè-Maxwell.



La legge di Gauss sull'elettricità è conseguente al lavoro effettuato in precedenza da Coulomb. Gauss dimostrò che la divergenza del campo elettrico è proporzionale alla densità di carica elettrica. Dopo l'integrazione, la legge di Gauss prevede che il flusso elettrico attraverso una superficie chiusa  $S$  è proporzionale alla carica elettrica racchiusa all'interno della superficie stessa (Casanova Alig, 2003).

La legge di Gauss sul magnetismo prevede che il campo magnetico  $B$  sia un campo vettoriale solenoidale (divergenza uguale a zero). Questa legge interpreta il fatto che, per quanto sia attualmente conosciuto, non ci sono cariche magnetiche o densità di carica magnetica liberi, quindi il flusso magnetico totale emergente dalla superficie chiusa  $S$  è sempre nullo (Jackson, 2003).

La legge di Faraday sull'induzione magnetica dice che la forza elettromagnetica o l'integrale lineare del campo magnetico intorno al circuito chiuso  $C$  (verso sinistro) è uguale al negativo del tasso di variazione del flusso magnetico attraverso la superficie  $S$  (verso destro) chiusa in  $C$ . Il segno negativo riflette l'osservazione empirica chiamata legge di Lenz, per cui la corrente indotta dalle forze elettromagnetiche tendono a contrastare la carica elettrica nel campo magnetico (Jackson, 2003).

Sulla legge di Amperè-Maxwell nella sua forma storicamente originale, la legge circuitale di Amperè mette in relazione il campo magnetico con la sua sorgente. La correzione di Maxwell a questa legge fu particolarmente importante (Maxwell, 1861): l'inclusione dello spostamento di corrente, mostra come la variazione temporale di un campo elettrico sia sorgente di un campo magnetico e viceversa.

La teoria di Maxwell afferma che un dipolo eccitato da un voltaggio ad alta frequenza genera un campo elettrico che sarà parallelo al dipolo. Le cariche

elettriche in moto all'interno del campo elettrico generano un campo magnetico perpendicolare allo stesso dipolo.

### 3.1.2 Corrente elettrica che attraversa l'antenna

Esistono due tipologie di corrente elettrica: corrente di conduzione e corrente di spostamento. La corrente di conduzione è generata dal movimento di cariche attratte dal campo elettrico. La grandezza caratteristica che la contraddistingue è l'intensità di corrente  $J_c$ , correlata al campo elettrico dalla relazione lineare:

$$J_c = \sigma E \quad [A \ m^{-2}]$$

dove:

$\sigma [ \Omega^{-1} m^{-1} ]$  è la conduttività, cioè la capacità del materiale di condurre corrente elettrica

$E [V \ m^{-1}]$  è il campo elettrico.

La corrente di spostamento invece è dovuta alla distanza tra le cariche e risulta direttamente proporzionale al campo elettrico applicato tramite la costante dielettrica del mezzo  $\epsilon [F/m]$  secondo la relazione:

$$D = \epsilon E \quad [F \ V \ m^{-2}]$$

dove:

$D$  è lo spostamento elettrico

La costante dielettrica misura la capacità di un mezzo di immagazzinare una carica elettrica quando sottoposto ad un campo elettrico (questa capacità

risulta influenzata dalla quantità di acqua). Da questo si può dedurre l'intensità di corrente di spostamento  $J_p$ :

$$J_p = \frac{dD}{dt} = \epsilon \frac{dE}{dt} \quad [A]$$

La corrente che attraversa il mezzo durante un'indagine con GPR è la somma della corrente di conduzione e della corrente di spostamento cioè:

$$J = J_c + J_p \quad [A]$$

Tale relazione, scritta nel dominio della frequenza diventa:

$$J = (\sigma + i\omega\epsilon) E \quad [A]$$

dove:

$\omega = 2\pi f$  con  $f$  la frequenza di eccitazione.

Per cui un'antenna, sollecitata da un impulso elettrico, genera un campo elettromagnetico che si propaga attraverso il mezzo, subendo un decadimento dell'ampiezza che dipende dalla distanza coperta.

L'equazione di Maxwell che esprime la propagazione del campo elettromagnetico lungo una direzione  $z$  in un mezzo omogeneo può essere scritta:

$$E = E_x e^{-\gamma x} \quad [V m^{-1}]$$

dove:

$\chi$  è la costante di propagazione ed è uguale a:

$$\chi = \alpha + \beta i$$

dove:

$\alpha$  [Np m<sup>-1</sup>]: fattore di attenuazione (con 1 Neper = 20/ln 10 dB = 8,686 dB)

$\beta$  [rad m<sup>-1</sup>]: costante di fase;

entrambi i fattori sono dipendenti dalla conduttività, dalla costante dielettrica e dalla permeabilità del mezzo attraversato.

Nel caso in cui si potesse ritenere nulla  $\sigma$  del mezzo investigato, questo annullerebbe il fattore dell'attenuazione, in questo modo non si avrebbe decadimento di energia con la profondità di investigazione. In generale questo non è ammissibile ma tuttavia è auspicabile che la conduttività del mezzo sia sufficientemente bassa da determinare un fenomeno di assorbimento ad essa proporzionale. La velocità con la quale l'onda elettromagnetica attraversa il mezzo può essere espressa dalla formula:

$$V = \sqrt{\frac{1}{\epsilon\mu}} \quad [\text{m s}^{-1}]$$

dove:

$\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$ , dove  $\epsilon_0$  è la costante dielettrica dell'aria, e  $\epsilon_r$  è la costante dielettrica relativa;

$\mu = \mu_0\mu_r$ , dove  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica nell'aria, e  $\mu_r$  è la permeabilità relativa.

Se indichiamo con  $C$  la velocità dell'onda in aria, essa si potrà scrivere:

$$C = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0\mu_0}} \quad [\text{m s}^{-1}]$$

per cui facendo delle semplici sostituzioni:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad [\text{m s}^{-1}]$$

Potendo in generale supporre che la permeabilità magnetica relativa sia circa uguale a 1 qualunque sia il mezzo, allora la  $V$  sarà influenzata solo dalla costante dielettrica relativa (Conte 2004).

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{m s}^{-1}]$$

dove

$V$ : velocità dell'onda elettromagnetica;

$C$ : velocità della luce;

$\epsilon_r$ : costante dielettrica del mezzo attraversato dall'onda (adimensionale).

L'onda che incide una superficie di discontinuità alla velocità  $V$  sopracitata, segue la Legge di Snell: infatti parte si riflette e parte si rifrange. Conoscendo il tempo che l'onda impiega per andare dall'antenna al terreno e poi ritornare al ricevitore è possibile calcolare la profondità del riflettore:

$$d = \frac{V \cdot t}{2} \quad [\text{m}]$$

dove

$d$ : profondità del riflettore;

$V$ : velocità dell'onda;

$t$ : tempo che l'onda impiega per arrivare al riflettore e tornare indietro.

In generale il Georadar permette di rilevare le discontinuità dielettriche e restituisce immagini tridimensionali, bidimensionali orizzontali e sezioni

verticali. Per effettuare questo tipo di studio è necessario considerare altri fattori, come il coefficiente di riflessione  $R$  e il coefficiente di trasmissione  $T$ . Ogni volta che si ha un contrasto d'impedenza intrinseca si ha la riflessione delle onde elettromagnetiche. La quantità di energia riflessa e trasmessa dipende dai coefficienti  $R$  e  $T$ , che a loro volta sono legati alle impedenze magnetiche  $Z_1$  e  $Z_2$  dei 2 mezzi dalle seguenti relazioni:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad [\Omega]$$

$$T = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad [\Omega]$$

In un mezzo non conduttivo, così come terreno secco o cemento, considerando una singola frequenza di radiazione, la relazione sopra può essere semplificata e riscritta come:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r2}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}} \quad [\Omega]$$

con  $R = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$  e  $\epsilon$  permittività relativa del mezzo.

Il coefficiente di riflessione ha un valore positivo per  $\epsilon_{r2} > \epsilon_{r1}$  come nel caso di un vuoto pieno d'aria (cavità) immersa in un materiale dielettrico, negativo quando  $\epsilon_{r2} < \epsilon_{r1}$  come nel caso in cui si è in presenza di un materiale metallico. Quando si incontrano bersagli con diversa permittività rispetto al materiale ospite si visualizzano inversioni di fase del segnale trasmesso e si può così

risalire alla natura del bersaglio. La forma del segnale riflesso è condizionata dal tipo di materiale ospite, dalle caratteristiche geometriche e dai parametri dielettrici del bersaglio.

L'impedenza elettromagnetica ovviamente dipende dalla costante dielettrica, dalla permeabilità magnetica e dalla conduttività in base alla seguente relazione:

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{i\omega\epsilon + \sigma}} \quad [\Omega]$$

Ciò implica che, affinché si possa generare una riflessione, è necessario avere un contrasto di  $\mu$ ,  $\epsilon$  o  $\sigma$ ; ma per quanto già affermato riguardo l'invariabilità di  $\mu$ , saranno contrasti di  $\sigma$  o  $\epsilon$  a determinare tale fenomeno.

Materiale	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	V(m/ns)	$\alpha$ (dB/m)
aria	1	0	0.3	0
acqua distillata	80	0.01	0.033	$2 \times 10^{-3}$
acqua dolce	80	0.5	0.033	0.1
acqua salata	80	$3 \times 10^4$	0.01	$10^3$
sabbia secca	3-5	0.01	0.15	0.01
sabbia umida	20-30	0.1-1	0.06	0.03-0.3
argilla	5-40	2-1000	0.06	1-300
granito	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
ghiaccio	3-4	0.01	0.16	0.01

Tabella 1 - Caratteristiche elettromagnetiche di alcuni materiali geologici.

### 3.1.3 Attenuazione e profondità di penetrazione

Ci sono molti fattori che influenzano la forza del segnale come le onde radio propagate attraverso il sottosuolo: l'attenuazione intrinseca, l'estensione geometrica, lo scattering, la dispersione e così via. L'attenuazione è una delle più importanti cause di perdita di energia. Questa diminuzione si presenta come una trasformazione da energia elettromagnetica a termica, e le perdite si

manifestano come aumento della temperatura nel materiale per dissipazione ohmica (Annan 2001). L'attenuazione è una funzione complessa delle proprietà elettriche e dielettriche del materiale attraverso il quale il segnale radar viaggia. In particolare la parte immaginaria e la parte reale del complesso formato dalla permeabilità magnetica e dalla permittività magnetica descrive il deposito (nella parte reale) e la perdita o trasformazione (nella parte immaginaria) dell'energia.

Il coefficiente di attenuazione  $\alpha$  dipende quindi tramite le proprietà elettromagnetiche del mezzo, dal contenuto d'acqua, dai sali in soluzione, dalla composizione del materiale, ed influisce sulla profondità di penetrazione dell'onda elettromagnetica. L'equazione dell'attenuazione dipendente dalle proprietà elettriche, magnetiche e dielettriche è:

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

Per una data frequenza i mezzi umidi sono caratterizzati da perdite maggiori rispetto al materiale in condizioni asciutte. I suoli umidi argillosi possono avere attenuazione di circa 20÷30 dB m<sup>-1</sup> alla frequenza di 100 MHz e tale valore sale fino a 100 dB m<sup>-1</sup> alla frequenza di 1 GHz.



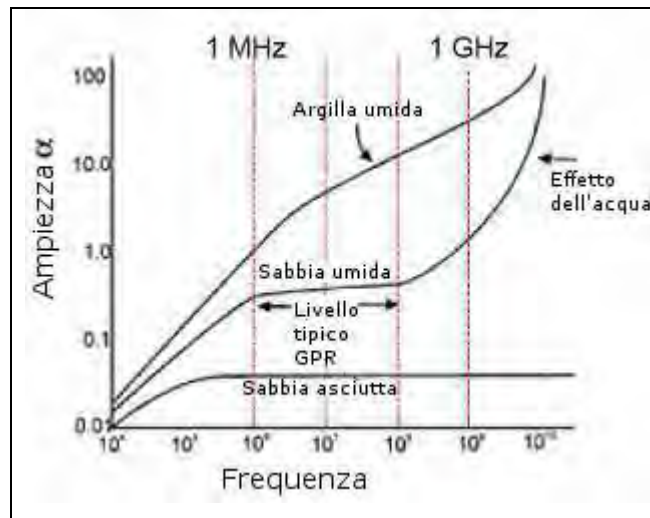


Fig. 3.2: Grafico per determinare i valori dall'attenuazione in funzione del terreno e della frequenza dell'onda

Per concludere possiamo dire che l'energia trasmessa dall'antenna viene attenuata durante il suo percorso, in particolare più un materiale è conduttore maggiore è l'attenuazione (condizioni di lavoro difficili).

Tale perdita di energia condiziona quindi la profondità di penetrazione. La profondità massima cui si può arrivare con un impulso Georadar dipende dalla frequenza del segnale e dalla resistività elettrica del terreno ma essa diminuirà nei seguenti casi:

1. con aumento della conducibilità elettrica, del contenuto d'acqua e di argilla;
2. con l'aumento dell'effetto scattering;
3. quando la banda in frequenza delle antenne è più alta;
4. se i ricevitori hanno una sensibilità minore;
5. se la potenza del trasmettitore diminuisce.

Scegliere un'antenna ad alta frequenza significa lavorare nei primi centimetri di profondità ed ottenere un'ottima risoluzione anche su oggetti notevolmente piccoli; scegliere un'antenna a bassa frequenza significa

ottenere una profondità d'indagine maggiore ma perdere risoluzione nei primi strati indagati.

L'energia emessa dalle antenne del GPR è rappresentabile mediante un cono con la base sferica. Si può definire la densità di energia  $E_d$  come l'energia per unità d'area:

$$E_d = \frac{E}{4\pi r^2} \quad [\text{J m}^{-1}]$$

Da questa relazione si può dedurre che la densità diminuisce in proporzione a  $1/r^2$  conseguentemente l'ampiezza, che è proporzionale al quadrato della densità dell'energia, varierà in proporzione a  $1/r$  (Reynolds, 1998).

### 3.1.4 Risoluzione

La profondità di risoluzione è una misura della capacità di distinguere tra due riflettori molto vicini tra loro. Tale risoluzione si può distinguere in verticale e orizzontale. Questa caratteristica è funzione della lunghezza d'onda del segnale, che a sua volta dipende dalla velocità e quindi dalla costante dielettrica del mezzo e dalla frequenza, secondo la legge:

$$\lambda = \frac{2\pi \cdot r}{f} \quad [\text{m}]$$

La risoluzione *verticale* è la minima distanza misurata lungo la verticale tra due oggetti riflettenti per la quale è possibile distinguere le singole riflessioni.

Benché in generale per valutare tale grandezza debbano intervenire considerazioni circa le caratteristiche strumentali ed alcuni parametri relativi al rapporto segnale-rumore, il problema viene ridotto nella valutazione della

durata dell'impulso o del contenuto spettrale dell'onda riflessa. Per sistemi radar commerciali la maggior parte dei quali sono di tipo pulsato ed impulsato, si verifica che per una durata  $\tau$  dell'impulso, la minima separazione spaziale tra gli oggetti che può ancora essere risolta e rappresentata con due distinti eventi è:

$$\Delta x = \frac{v \cdot \tau}{2} \quad [\text{m}]$$

dove:

$v$  è la velocità di propagazione nel mezzo.

In mezzi con elevato contenuto d'acqua, la risoluzione verticale risulta ottimale a discapito della profondità di indagine che risulta in generale limitata dall'aumento della conducibilità del mezzo.

La risoluzione *orizzontale*, cioè la capacità di discriminare due oggetti riflettenti posti alla stessa profondità, è funzione di molteplici fattori tra cui principalmente: le caratteristiche di apertura delle antenne (funzione delle proprietà elettromagnetiche del sottosuolo), la separazione tra antenna trasmittente e ricevente e le caratteristiche del mezzo (Roberts et Daniels, 1996):

$$\Delta x = 4d \sqrt{\frac{\ln 2}{2 + \alpha \cdot d}} \quad [\text{m}]$$

dove:

$d$  è la profondità dell'oggetto,

$\alpha$  è il coefficiente di attenuazione visto nella pagina precedente.

Perciò la risoluzione orizzontale migliora al crescere dell'attenuazione. In mezzi a bassa attenuazione (sabbia asciutta, mezzi lapidei, etc.) la risoluzione ottenibile con tecniche di “scanning” orizzontale (ad esempio tecniche a riflessione semplice con common offset) risulta spesso molto degradata. In genere i segnali Georadar alle alte frequenze sono caratterizzati da elevata risoluzione e da limitata profondità di penetrazione.

### **3.1.5 Schema di trattamento di un radargramma**

Esamineremo ora brevemente il trattamento dei dati che sono stati acquisiti nei siti campione.

- ✓ *Normalization*: la normalizzazione delle tracce consente di stabilire una scala costante orizzontale tra i markers. Tale metodo è utile a definire un numero uguale di scansioni per unità di distanza (Jol, 2009);
- ✓ *Static corrections*: esso è applicato ai segnali per compensare l'effetto delle variazioni di quota. L'obiettivo è quello di determinare i tempi di arrivo delle riflessioni che si sarebbero osservate se tutte le misure fossero state effettuate su una superficie piana;
- ✓ *Zero time correction*: si rimuove il tempo di ritardo che si è creato durante l'acquisizione della prima scansione, in maniera tale da avere il tempo “zero” coincidente con l'inizio della traccia;
- ✓ *Background removal Filter*: è un filtro passa-alto che prende la media di tutte le tracce in una sezione e la sottrae da ogni traccia. Rimuove inoltre il rumore di fondo ed è ottimo per la rimozione del fenomeno del “ringing”, ma può rimuovere dalla traccia riflettori continui e piatti. Il

ricorso a filtri di rimozione del background è un passo fondamentale nella trasformazione e nella interpretazione dei dati GPR in materiali relativamente dissipativi (ad esempio, terreni umidi). In questi ambienti, con forte accoppiamento antenna-terra e negli strati superficiali del sottosuolo può causare un riverbero significativo nel segnale che può mascherare i segnali più lenti (Jol, 2009);

- ✓ *Subtracting average Filter*: filtro che prende la media di un numero di tracce di una finestra e la sottrae da ogni singola traccia in sequenza. Elimina i riflettori piatti ma sottolinea le diffrazioni. Funziona meglio con una finestra di traccia abbastanza piccola ed è buona per sottolineare riflettori inclinati (ad esempio, fratture e strati obliqui) (Jol, 2009);
- ✓ *Gain*: visto che il segnale viene attenuato con la profondità, si ricorre alla equalizzazione delle ampiezze, attraverso l'applicazione di una amplificazione variabile in funzione del tempo al fine di compensare la caduta del segnale alle maggiori profondità. Migliorando il range delle ampiezze si può raggiungere un livello ottimale nell'analisi dei segnali (Jol, 2009);
- ✓ *Migration*: è un processo che ricostruisce una sessione GPR in modo che le riflessioni siano ricollocate all'interno della loro posizione di superficie corretta e in un tempo regolare di riflessione verticale. La migrazione restituisce tre effetti: le diffrazioni in più punti vengono ricondotte ad un unico punto; la posizione e l'inclinazione degli strati vengono corretti; migliora la risoluzione concentrando l'energia (Jol, 2009) .

### 3.1.6 Time slice

La tecnica delle time-slices o depth-slices è utilizzata in molte applicazioni per avere una rappresentazione grafica dei profili (Goodman et Nishimura, 1993; Goodman et al., 1995, 2007; Piro, 2001, 2006). Le time-slices consentono alle riflessioni planimetriche che sono prodotte da discontinuità sepolte, di essere ricostruite attraverso sezioni orizzontali. La tecnica ha dimostrato di essere altamente valutabile nello scoprire cavità sepolte e manufatti archeologici (Orlando, 2007; Berard et Maillol, 2008; Piro et al., 2007, 2011). La costruzione delle time-slices consente l'implementazione di modelli 3D, questo facilitando l'identificazione della localizzazione delle principali anomalie rilevate.

## 3.2 Geoelettrica

### 3.2.1 Generalità: a terra

Il metodo elettrico è utilizzato in genere come supporto ad altri metodi geofisici nell'investigazione delle strutture sepolte e nella ricerca di acque sotterranee. Questa tecnica permette di indagare la struttura resistiva del terreno, mettendo in evidenza i contrasti di resistività elettrica connessi alla natura dei terreni e al loro contenuto in acqua. In pratica, il metodo tomografico in corrente continua consente di ricostruire sezioni bidimensionali di resistività (ERT). Un profilo tomografico viene realizzato tramite lo stendimento di un cavo che collega una serie di elettrodi, i quali vengono utilizzati sia per l'immissione della corrente  $I$  che per la misura della differenza di potenziale  $V$ . Tramite queste due grandezze fisiche è possibile calcolare la resistività elettrica apparente  $\rho_a$  relativa alla configurazione elettroidica utilizzata (Tullo et Apilongo, 2007)

$$\rho_{\alpha} = \frac{\Delta V}{I} K \quad [\Omega \text{ m}]$$

dove K è una costante detta “fattore geometrico” che dipende dalla disposizione degli elettrodi.

L'indagine si basa sull'acquisizione di un elevato numero di misure elettriche effettuate lungo un certo numero di elettrodi posizionati sul terreno (o nel terreno). In generale, il numero di misure è di  $n(n-3)/2$  dove n è il numero di elettrodi utilizzati (in genere da 12 a 32).

La ricostruzione tomografica viene effettuata mediante l'applicazione del Metodo degli Elementi Finiti (FEM). Tralasciando la trattazione matematica del problema, possiamo dire che nella ricostruzione tomografica la distribuzione della resistività è l'incognita, mentre le misure elettriche effettuate sul terreno rappresentano i termini noti. Il problema viene affrontato discretizzando il terreno al disotto degli elettrodi in un numero finito di maglie o celle (elementi finiti, appunto), ciascuna di resistività omogenea e incognita. La forma degli elementi è generalmente quadrata o rettangolare e le dimensioni sono determinate in base alla distanza tra gli elettrodi (1/2 della spaziatura tra due elettrodi contigui).

I valori di resistività da determinare sono quindi quelli che caratterizzano ciascun elemento della maglia. Il problema della determinazione della resistività di ciascun elemento non è lineare. E' quindi possibile che l'errore da minimizzare possieda molti minimi locali e che, definita una soglia di errore nei dati sperimentali, esista di conseguenza più di una soluzione. Al fine di individuare il minimo assoluto (quello che contiene la soluzione più vicina alla realtà) si utilizzano in genere altre metodologie, al fine di fissare il campo di variazione della resistività degli elementi finiti. La conoscenza della stratigrafia di massima del terreno su cui viene effettuata la tomografia elettrica permette di fissare a priori alcune condizioni al contorno; in assenza

di essa, si effettua in genere una coppia di sondaggi elettrici verticali, ottenendo così una buona indicazione sull'elettrostratigrafia di massima del sito.

L'interpretazione del modello di resistività, ovvero l'attribuzione di un determinato materiale ad un particolare valore della resistività, produrrà un modello tanto più reale e preciso quanto maggiore sarà il numero di informazioni al contorno. La conoscenza, ad esempio, della stratigrafia di massima, del livello di falda, dei valori di resistività dei materiali presenti o di quant'altro, può concorrere a migliorare la risoluzione del modello finale (<http://www.ingesrl.it> 2010).

### **3.2.2 Geoelettrica in acque poco profonde**

L'utilizzo dei metodi elettrici in ambiente terrestre è una attività molto diffusa e consolidata ma altrettanto non si può dire per le indagini in acqua, in ambiente fluviale, lacustre e marino. L'idea di estendere l'utilizzo dei metodi elettrici in ambiente acquatico è stato introdotto da Taylor nel 1992. Sebbene infatti fino a poco tempo fa era opinione comune che fosse impossibile riuscire a far propagare campi elettrici nell'acqua, soprattutto in ambiente marino, di recente alcuni esperimenti hanno dimostrato che questo è invece possibile (Loddo, 2010; Orlando et Tramonti, 2007). Rispetto alle applicazioni terrestri, le peculiarità metodologiche riguardano sia la strumentazione, sia l'acquisizione che il trattamento dati. Un'ovvia, ma fondamentale innovazione è stata la realizzazione di cavi dotati di takeout in materiale resistente alla corrosione, quale la grafite. Il numero degli elettrodi può variare da circa 9 a 16 ma anche più, con spaziature comprese tra 2÷10 m. L'acquisizione dei dati può essere eseguita secondo due modalità operative: elettrodi galleggianti o posti sul fondo. Nel primo caso le misure possono essere eseguite in maniera statica oppure in movimento e in tempo



reale mentre, nel secondo, l'acquisizione avviene solo staticamente per profili anche in roll long. Nei primi sistemi utilizzati per l'acquisizione in continuo la prima e fondamentale fase del trattamento dei dati consisteva principalmente nell'integrazione delle coordinate GPS con i dati di resistività. Poiché il sistema GPS era infatti posizionato sull'imbarcazione era necessario il calcolo della distanza, e quindi delle coordinate, per tutti i takeout utilizzati durante le misure per una corretta georeferenziazione dei dati di resistività. Tali sistemi inoltre non consentivano la correzione batimetrica dei dati. Oggi questa fase è stata automatizzata tramite il collegamento di un'unità di controllo che gestisce l'integrazione delle coordinate GPS con i dati di resistività e con i dati batimetrici provenienti da un echosounder installato sullo scafo dell'imbarcazione. In fase di trattamento dei dati il vincolo dello spessore e della resistività della colonna d'acqua migliora il modello inverso. Un'ulteriore miglioria è rappresentata dall'isolamento dei tratti rettilinei dei profili per l'interpretazione 2D dei dati. L'acquisizione di dati con configurazione degli elettrodi sul fondo è invece analoga alle prospezioni eseguite sulla superficie del terreno. La fase di modellazione e inversione dei dati viene implementata con metodi numerici agli elementi o alle differenze finite in cui viene utilizzata una griglia distorta per la modellizzazione. Gli elementi più superficiali della mesh sono utilizzati per discretizzare lo strato d'acqua, mentre quelli inferiori per la distribuzione delle resistività del fondo (Loke et Lane, 2004).

### **3.2.3. Principi di base**

Immettendo nel terreno, attraverso due elettrodi, corrente continua o alternata a bassa frequenza, è possibile stimare la resistività elettrica presente nel sottosuolo misurando la differenza di potenziale che si determina ai capi di altri due elettrodi a causa della corrente immessa (metodo della resistività).

$$\rho = R \frac{A}{l} \quad \text{dove } R = \frac{dV}{I}$$

La legge Ohm descrive la resistenza  $R$  che un corpo, di lunghezza  $l$  e area  $A$ , contrappone al passaggio della corrente elettrica  $I$  generata dalla differenza di potenziale  $dV$ . L'unità di misura in cui si esprime tale resistenza è  $\Omega \cdot m$ .

Il valore di resistività che si misura, è una resistività apparente perché le linee di corrente che consentono di valutare tale parametro, hanno attraversato più formazioni rocciose: misuriamo cioè un valore anomalo rispetto al valore che si misurerebbe in un sottosuolo omogeneo ed isotropo. Questo dato non è semplicemente il valore medio delle resistività degli elettrostrati incontrati, ma è definito da una funzione più complessa in quanto dipende sia dalle resistività dei vari litotipi attraversati che dai loro spessori.

Astier (Astier, 1971) negli anni '70 del secolo scorso (continuando gli studi di Schlumberger degli anni '20) aveva notato durante i suoi studi e ricerche che la distribuzione della resistività apparente è legata allo spessore, alla localizzazione, alla forma e alla resistività degli strati che la corrente ha oltrepassato, e che da questa misura si possono ottenere informazioni sulle discontinuità presenti nel sottosuolo. Per cui la resistività apparente può essere definita come la resistività vera di una roccia immaginaria (omogenea ed isotropa) equivalente ad una reale eterogenea ed anisotropa. Tutte le rocce naturali possono condurre elettricità se sottoposte ad un campo elettrico. La misura con la quale le rocce si lasciano attraversare dalla corrente dipende dal tipo di resistività che esse presentano. Questo dipende anche alla quantità di ioni e sali disciolti in acqua. Il primo a studiare la funzione dell'acqua all'interno dei litotipi (ricerca petrolifera) è stato Archie (Archie, 1942) nel 1942.

I valori di resistività decrescono all'aumentare del contenuto d'acqua, mentre i suoi valori nelle rocce hanno ampia variabilità in un grande intervallo di valori:

<b>Roccia/ Materiale</b>	<b>Resistività (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
Argille, marne grasse	3 - 30
Argille, marne magre	10 - 40
Argille sabbiose, silt	25 - 105
Sabbie con argille	50 - 300
Sabbia, ghiaia in falda	200 - 400
Sabbia, ghiaia asciutta	800 - 5000
Calcere, gesso	500 - 3500
Arenaria	300 - 3000
Granito	2000 - 10 000
Gneiss	400 - 6000
Rifiuti domestici	12 - 30
Fanghi industriali	40 - 200
Plume contaminato da rifiuti domestici	1 - 10
Olio esausto	150 - 700

Fig. 3.3: Valori di resistività per rocce comuni

La resistività dei vari materiali è funzione della temperatura alla quale essi si trovano. Precisamente detta  $\rho$  la resistività alla temperatura  $T$  e  $\rho_0$  la resistività a  $0^\circ\text{C}$ , la relazione riportata di seguito, valida se l'intervallo di temperatura non sia molto ampio (alcune centinaia di gradi), consente di definire il valore di resistività al variare della temperatura:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_0 T) \quad [\Omega \cdot m]$$

dove  $\alpha_0$  è il coefficiente di temperatura della resistività riferito alla temperatura di  $0^\circ\text{C}$  (esperimenti di Campbell et al., 1948; Colman et Hendrix,

1949, Schlumberger, 1989). Questo accade perché all'aumentare della temperatura aumenta l'agitazione degli ioni e si riduce la viscosità dei fluidi (esperimenti di Scollar et al., 1990). Non tutti i materiali sono caratterizzati da un coefficiente di temperatura della resistività positivo. Infatti, a seconda che tale coefficiente sia positivo o negativo, il materiale presenterà, rispettivamente, una relazione con la temperatura diretta o inversa. Quando il mezzo in cui passa la corrente, è la roccia, la relazione con la temperatura è ancora più complessa. Infatti, essendo la roccia un aggregato di più minerali, per definire il comportamento elettrico delle rocce in funzione delle variazioni di temperatura, è necessario studiare non solo le relazioni di ogni minerale in essa presente, ma anche le relazioni tra i vari comportamenti. Infatti, i minerali possono presentare una conducibilità metallica, possono essere dei semiconduttori o, come nella maggior parte dei casi, essere degli elettroliti solidi. La minima conduzione elettrica che può avvenire negli elettroliti solidi, è causata dalle imperfezioni reticolari per temperature inferiori a 500-600°C, o può essere causata dalla temperatura per valori più elevati di 600°C (Carrara et al., 1973)

### **3.2.4 Metodi di acquisizione**

La misura della resistività elettrica del sottosuolo può essere ottenuta posizionando in superficie un dispositivo quadripolare costituito da una coppia di elettrodi (detti di energizzazione), solitamente indicati con C1 e C2, e da una seconda coppia di elettrodi (detti di potenziale), indicati con P1 ed P2. Attraverso la misura della corrente elettrica che circola nel terreno e immessa nello stesso mediante gli elettrodi di corrente e misurando il potenziale che si viene a determinare ai capi degli elettrodi di potenziale a causa della corrente immessa, è possibile stimare la resistività elettrica apparente ( $\rho_a$ ). In relazione alla posizione reciproca degli elettrodi di corrente rispetto a quelli di potenziale, è possibile realizzare varie tipologie di

configurazioni elettrodiche (array). Naturalmente, per agevolare le acquisizioni in campagna si preferisce utilizzare degli array che consentano di realizzare delle configurazioni piuttosto semplici e poste lungo lo stesso azimut. In questo lavoro si è utilizzato solamente il metodo Dipolo-Dipolo Assiale.

Il dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale è caratterizzato dal fatto che il dipolo di corrente ed il dipolo di potenziale presentano la stessa distanza  $e$ , a differenza degli altri dispositivi, i due dipoli sono separati, così come riportato in figura 3.4. Tale dispositivo si definisce assiale in quanto i due dipoli si spostano lungo lo stesso profilo. Questa tipologia di dispositivo, dato che i dipoli di corrente sono separati da quelli di potenziale, presenta il più basso valore di noise E.M. Pertanto è il dispositivo più utilizzato in letteratura sia per le misure di resistività che di polarizzazione indotta. Le distanze tra gli elettrodi di corrente e quelli di potenziali aumentano seguendo multipli interi di  $n$ . Per questo dispositivo il parametro  $n$  è pari al rapporto tra la distanza fra gli elettrodi  $C_1-P_1$  e la distanza tra gli elettrodi di corrente  $C_2-C_1$  oppure tra gli elettrodi di potenziale  $P_1-P_2$  (pari alla distanza elettrodica definita come  $a$ ).

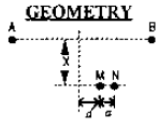
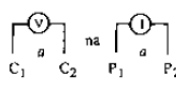
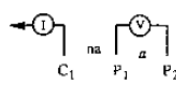
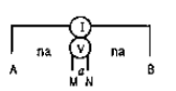
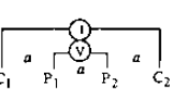
ARRAY	GEOMETRY	K	DISPLAY	USE
GRADIENT		See Fig. 31	Plan contours of $\rho_a$	Profiling
DIPOLE-DIPOLE		$\pi n(n+1)/(n+2)a$	$\rho_a$ vs $n$	Sounding-Profiling
POLE-DIPOLE		$2\pi n(n+1)a$	$\rho_a$ vs $n$	Sounding-Profiling
SCHLUMBERGER		$\pi n(n+1)a$	$\rho_a$ vs $(n+1/2)a = AB/2$	Sounding
WENNER		$2\pi a$	$\rho_a$ vs $a$	Sounding

Fig. 3.4 Le configurazioni elettrodiche più utilizzate nei rilievi di misura di resistività e di caricabilità del terreno (a sinistra), (Ward, 1990).

Il fattore  $n$ , in questo dispositivo, può assumere dei valori da 1 fino ad un massimo di 6. Infatti, lo svantaggio che presenta questo tipo di dispositivo è legato al fatto che l'intensità del segnale diminuisce secondo il cubo di  $n$  e quindi passando da  $n$  pari a 1 a  $n$  pari a 6 la differenza di potenziale misurata da un resistivimetro crolla di circa 56 volte nel passare dal valore di  $n$  pari ad 1 al valore di  $n$  pari a 6. Per ovviare a questo inconveniente e cercare di raggiungere una maggiore profondità di investigazione senza compromettere la qualità del dato, è sufficiente aumentare il passo di campionatura.

La funzione sensitivity per questa tipologia di stendimento presenta degli andamenti che variano significativamente in relazione ai valori del parametro  $n$ . Considerando le variazioni dei valori di sensitività in relazione all'aumentare del parametro  $n$ , il Dipolo-Dipolo assiale risulta esser maggiormente adatto per l'individuazione di dicchi e cavità e poco adatto per la ricostruzione di strutture orizzontali quali ad esempio livelli sedimentari.

### 3.2.5 Metodi elettrici in corrente continua

Tali metodi attivi si differenziano da quelli passivi poiché questi non sfruttano le correnti che naturalmente circolano nel sottosuolo, ma impiegano tecniche di generazione del segnale in modo da energizzare il terreno. Tale immissione del segnale nel terreno può avvenire attraverso contatti galvanici o attraverso l'induzione di campi elettromagnetici. Quindi immettendo nel terreno corrente continua si genera un campo elettrico  $E$  conservativo e per questo definito pari a:

$$\vec{E} = - \text{grad } U$$

dove  $U$  è una funzione definita a meno di una costante, nota come potenziale elettrico (misurato in Volt). Detta  $\rho$  la resistività elettrica del mezzo in ogni

punto all'interno del semispazio considerato e  $J$  la densità di corrente (che rappresenta la quantità di corrente che si distribuisce su una superficie infinitesima di terreno ortogonale al movimento delle cariche), dall'espressione della legge di Ohm è possibile definire il campo elettrico  $E$ . Infatti, la legge di Ohm lega le tre variabili suddette nel seguente modo:

$$\bar{J} = \frac{1}{\rho} \bar{E} = - \frac{1}{\rho} \text{grad } U$$

In un mezzo isotropo, infinitamente esteso la  $\text{div } J = 0$ , per cui l'equazione precedente diventa:

$$\text{div} \left( - \frac{1}{\rho} \text{grad } U \right) = 0$$

che possiamo anche scrivere come:

$$\text{grad} \left( \frac{1}{\rho} \right) \text{grad } U + \frac{1}{\rho} (\nabla^2 U) = 0$$

ed è definita come equazione di Poisson alla quale deve soddisfare il potenziale  $U$  in tutto il semispazio isotropo. Se alla condizione di isotropia si aggiunge quella di omogeneità  $\text{grad} \frac{1}{\rho} = 0$ .

Per cui l'equazione di Poisson diventa:

$$\nabla^2 U = 0$$

Quest'ultima equazione è definita equazione differenziale di Laplace e se  $\rho$  è costante, il potenziale elettrico rispetta tale relazione. Poiché siamo di fronte ad un problema di simmetria sferica possiamo cercare la soluzione dell'equazione precedente, scegliendo un sistema di coordinate polari con origine nella sorgente di erogazione della corrente. L'equazione sarà dunque:

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U}{\partial r} = 0$$

la cui soluzione generale è  $U = \frac{A}{r} + C$ .

Tale equazione dipende dalle due costanti di integrazione da definire in base alle condizioni al contorno. Se ipotizziamo che l'effetto della sorgente energizzante deve scomparire per  $r$  che tende a infinito:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} U(r) = 0$$

per cui avremo che  $C=0$ ;

Per quanto riguarda la costante  $A$ , osserviamo che la densità di corrente è

$$|J(r)| = \frac{I}{4\pi r^2}$$

Tenendo conto che il campo elettrico è:

$$E = \rho J = - \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{A}{r^2}$$



si avrà infine che

$$\frac{A}{r^2} = \varrho \frac{I}{4\pi r^2}$$

con soluzioni:

$$A = \varrho \frac{I}{4\pi} \quad U = \frac{I}{4\pi r}.$$

### 3.3 Metodi di rappresentazione del dato geofisico

Dopo la lunga fase di trattamento dei dati tesa ad enfatizzare le anomalie e a caratterizzarle al meglio, seguono:

- il controllo delle anomalie,
- la verifica della loro continuità,
- la verifica dell'andamento profilo per profilo.

Ultimata quest'ultima fase si possono già elaborare le prime ipotesi interpretative sulla tipologia delle strutture presenti nel sottosuolo. Si tratta di una fase dipendente dall'abilità dell'operatore cioè dall'esperienza acquisita trattando molti casi diversi. Per esempio le caratteristiche di riflessione dell'onda (GPR) dipendono prevalentemente dal terreno che attraversa e dal tipo di strutture che essa incontra, ma incidono anche altre variabili quali per esempio le variazioni di compattezza laterale, il contenuto salino, le variazioni di umidità e molte altre che, combinate tra loro, possono creare notevoli difficoltà interpretative. L'analisi del singolo radargramma è perciò fondamentale nella fase di trattamento, ma diviene assai limitativa in sede di interpretazione delle strutture e della loro localizzazione in pianta (Goodman et al., 1995; Goodman et Nishimura, 1993).

Normalmente i dati sono rappresentati in 1D, 2D, e 3D e l'interpretazione viene eseguita sulla base della distribuzione fisica o lungo un profilo, una sezione o un volume. Se le prospezioni geofisiche sono condotte lungo "profili", in punti in genere equispaziati parliamo di rilievi 1D. L'elaborazione in questo caso è la più semplice.

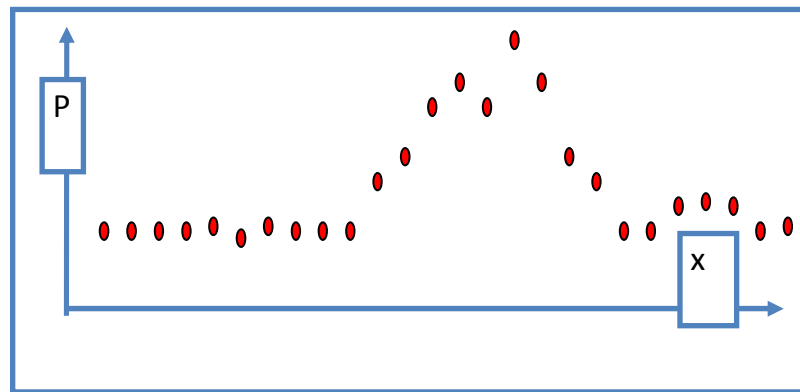


Fig. 3.5: Mappa 1D

Lungo un profilo però si possono eseguire misure in modo che il parametro fisico misurato possa essere considerato rappresentativo di porzioni di sottosuolo a diversa profondità (rilievi 2D): si parla in questo caso di metodi tomografici (cioè di metodi che riproducono il parametro fisico in diverse porzioni del sottosuolo). Si possono avere tomografie elettriche di resistività e di polarizzazione indotta così come tomografie radar o sismiche (figura 2.1). In genere i valori dei parametri fisici ottenuti dall'inversione sono riportati con colori diversi.

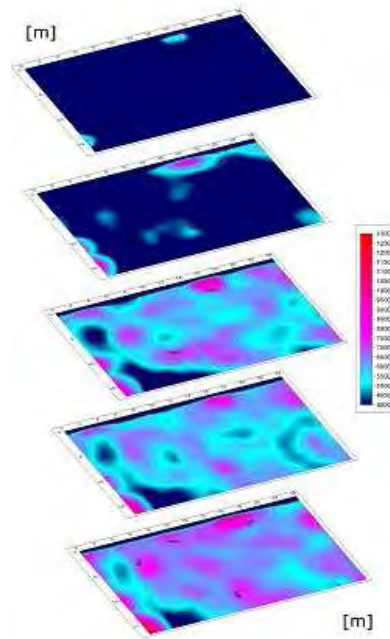


Fig. 3.6: Mappe 2D

Eseguendo tanti profili paralleli, tutti invertiti e georeferenziati si possono ottenere rappresentazioni 3D mediante interpolazione tra profilo e profilo (rilievi 2D con rappresentazione pseudo3D).

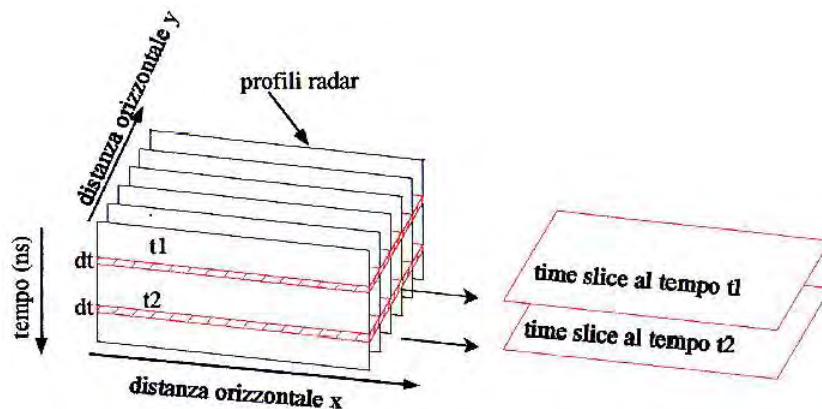


Fig. 3.7: Costruzione delle time slices orizzontali dai profili GPR bidimensionali standard in una griglia di profili equispaziati. Da questo tipo di mappe è possibile ottenere un modello pseudo 3D

Se invece energizzazioni e ricevitori sono distribuiti all'intorno del corpo da esaminare si parla (in verità erroneamente) di tomografie 3D di cui si

possono avere rappresentazioni in sezioni particolari o, con programmi particolari, in 3 dimensioni.

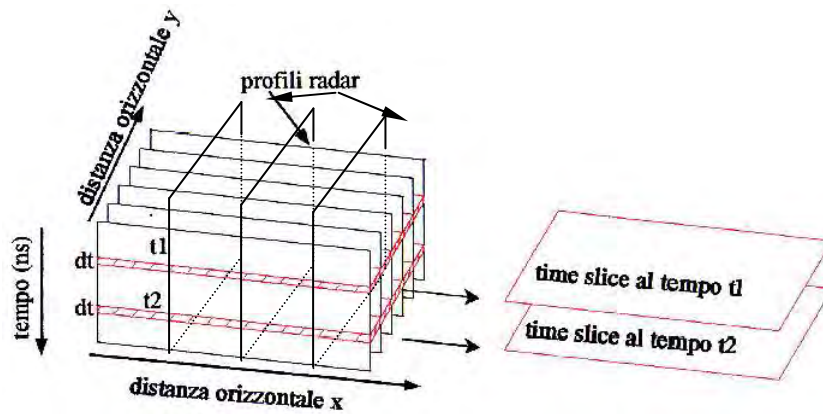


Fig. 3.8: Costruzione delle time slice orizzontali dai profili GPR bidimensionali in direzione sia x che y in una griglia di profili equispaziati. Da questo tipo di mappe è possibile ricostruire un modello 3D.

Nelle figure 3.9 e 3.10 altri metodi di visualizzazione 3D.

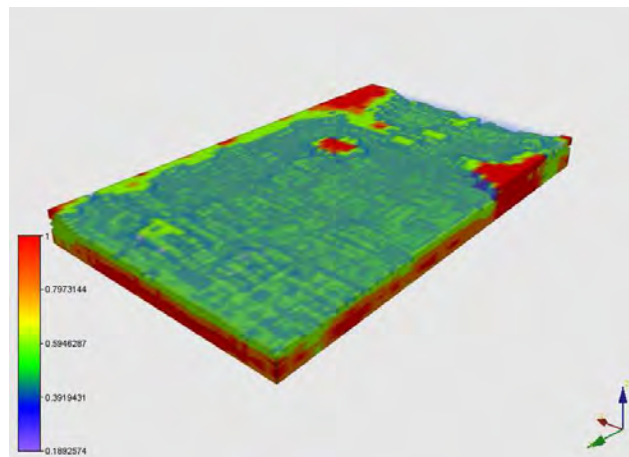


Fig. 3.9: Voxler: rappresentazione volumetrica tridimensionale di dati input che simula la trasmissione o l'assorbimento di una certa incognita. Voxler è l'abbreviazione di pixel di volume

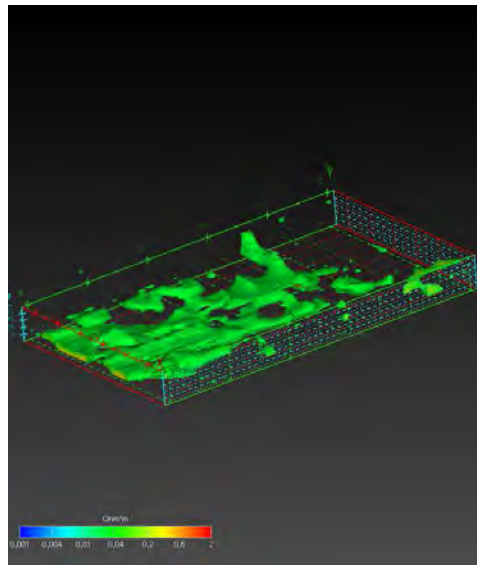


Fig. 3.10: Superficie 3D di equi-resistività di valori compresi tra 0 e 2 Ohm\*m

La peculiarità della prospezione geofisica è quella di avere una grande quantità di dati in formato digitale. Basti pensare che nel solo georadar (ma anche in altri sistemi con la modalità working) il numero di misure è di gran lunga superiore a qualsiasi altra tecnica di rilievo. Il grande sviluppo dell'elettronica ha consentito infatti di avere in tempo quasi reale una grande quantità di dati riferibile a diverse profondità e distanze dalla superficie di operazione e, d'altra parte, lo sviluppo degli strumenti di calcolo conseguenti ha consentito di ottenere elaborazioni numeriche veloci e ripetibili. Proprio sfruttando questa caratteristica dei metodi geofisici si è voluto tentare di eseguire una musealizzazione dei dati. In quasi tutti gli aspetti dell'archeologia infatti si ha a che fare con operazioni lente, costose ed invasive. Il passaggio dalla prospezione archeologica alla conseguente fruibilità del trovato impiega un notevole numero di anni, con un consistente impiego di risorse e l'archeologia stessa diventa scienza fine a se stessa piuttosto che essere fruibile alla grande massa dei cittadini.

L'utilizzo della geofisica come sistema museale non deve fare perdere di vista la necessità di vedere e godere degli oggetti e delle strutture che vengono

ritrovati. Nell'accezione comune si intende per bene qualcosa che è sfruttabile e che produce ricchezza almeno culturale e che quindi sia fruibile dai comuni cittadini.

Nella presente tesi si sono cercate (Coiana M. e Ranieri, 2000; Marchisio e Ranieri, 2000) soluzioni per poter ricostruire il sottosuolo in modo così dettagliato da produrre un ausilio anzitutto di grande interesse per il successivo scavo, ma anche immediatamente supportando le evidenze visibili e quelle in attesa di essere poste in luce e renderle così velocemente fruibili al pubblico.

E' da tenere presente che in molti casi l'archeologia non produce nessuna (o limitata) fruibilità: è il caso delle strutture a mare nei punti dove normalmente non è possibile neppure avvicinarsi e dove è praticamente impossibile (o molto costoso) realizzare dei musei subacquei. Questo tipo di musealizzazione fondata su dati digitali opportunamente organizzati ha il vantaggio di poter essere fruito a distanza anche da persone disabili o comunque impedite a "vedere" le strutture archeologiche. In questo senso la disabilità è non solo riferita alle persone diversamente abili, ma anche alle normodotate che non possono vedere sottoterra o sotto il fondo del mare. E' implicito comunque che quanto più densa (quanto maggiori sono i dati acquisiti) tanto più fedele è la ricostruzione sempre che siano stati scelti metodi e modalità idonei (o più appropriati). Come abbiamo visto nella trattazione a proposito delle metodologie geofisiche, esistono limiti di penetrazione del segnale, risoluzione verticale o laterale. Una moneta romana non potrà mai essere riconoscibile ad un metro di profondità se si eseguono profili distanti 1 metro o con frequenze di antenna (GPR) non appropriate.

#### 4. LA MUSEALIZZAZIONE DEI BENI CULTURALI

Nel vocabolario della lingua italiana, sotto la voce “musealizzare” si legge:

<Musealizzare: verbo transitivo. 1) Ricoverare, accogliere, conservare opere d'arte in un museo. 2) Trasformare in museo un luogo, un ambiente originariamente destinato ad altro uso> (Hoepli, 2011).

I “dati” geofisici non sono altro che la rappresentazione numerica delle anomalie (effetti della presenza/assenza delle strutture) sepolte, misurati dagli strumenti disponibili, quali GPR, geoelettrica, sismica, gravimetria etc. Si può affermare dunque che “musealizzazione” dei dati significa proprio esporre tali “dati” come se fossero in un museo o anche per dirla in parole differenti, trattarli alla stregua museale rendendoli più visibili/accessibili al pubblico. L'obiettivo di questa tesi è quello di rendere fruibile ciò che per diversi motivi non può essere visitato o addirittura neppure osservato ad occhio nudo, ed è qui che subentra la “virtualità”. Da definizione è come se stessimo creando un vero e proprio museo virtuale.

Un museo virtuale, che sia on-line o no non fa differenza (un museo on-line è comunque sempre virtuale), non ha oggetti, è un insieme di immagini e di testi inseriti su un supporto informatico (ma potrebbe essere anche cartaceo, ed ecco quindi un libro!) in modo tale da costruire un percorso o una serie di percorsi interconnessi in forma ipertestuale, una forma la cui paternità è reclamata dai cinesi, grazie alle loro scatole, e dai russi che si fanno forti dell'invenzione delle matrioske. È fin troppo facile mettere a confronto la guida cartacea a un museo con un museo virtuale on-line, sostenere che ciò

che rende diversi questi due sistemi di comunicazione è solo il tipo di supporto, e concludere che la guida cartacea, come il museo on-line, non è un museo. Tuttavia l'aberrazione di sostituire un museo con un CD o con un portale internet mostra tutta la sua evidenza nel confronto fra una vera visita a un vero museo, fisicamente reale, e la visita virtuale on-line alle sue sale e alle sue collezioni. Nel primo caso il visitatore diviene parte di uno spazio fisico, si confronta con oggetti materiali e dialoga con i loro significati simbolici. Egli ha in questo dialogo un'esperienza fisica, reale e tangibile. Nel secondo caso il rapporto del visitatore è con uno schermo piatto su cui può far scorrere le immagini degli oggetti e le relative didascalie. Lo schermo è tuttavia una superficie che non mostra realtà ma solo rappresentazioni, ne deriva che la visita virtuale on-line a un museo non è un'esperienza, ma solo la rappresentazione di un'esperienza (Pinna, 2005).

#### **4.1 Nascita e breve storia del museo**

Nel diciassettesimo libro della "Geografia" Strabone (64 a.C. 19 d.C.) traccia un quadro di Alessandria d'Egitto e descrive l'immensità dei palazzi reali costruiti per la dinastia dei Tolomei sin dalla fine del IV secolo a. C.. All'interno di queste mura Strabone colloca il MUSEION con:<i suoi portici, la sala dei simposi e il casto cenacolo dove vengono serviti i pasti che i dotti membri del Museo consumano insieme>.





Il testo è la prima testimonianza diretta di ciò che fu il museo di Alessandria d'Egitto: una comunità di eruditi dediti allo studio, perché dispensati dalle preoccupazioni materiali dell'esistenza grazie al mecenatismo regio, che aveva conservato il carattere religioso delle origini. E' probabile che la famosa biblioteca, così come i giardini botanici e zoologici, l'osservatorio astronomico e il laboratorio di anatomia, fosse uno strumento regio a disposizione dei convittori del museo.

Probabilmente i primi Tolomei avevano tratto l'idea del museo dalla scuola di Aristotele. Si narra che Demetrio Falceo (principale fautore del Liceo, la scuola fondata da Aristotele) rifugiatosi in Egitto da Atene, divenne il consigliere di re Tolomeo Soter. Lo stesso re dopo qualche anno chiama da Atene il fisico Stratone di Lampasco, anch'egli discepolo di Aristotele. Ispiratori del museo e della biblioteca, Demetrio e Stratone portano ad Alessandria i principi che animano il Liceo di Aristotele e l'Accademia di Platone: una comunità esclusivamente dedita alla ricerca del vero, ossia del culto delle Muse. Secondo gli storici greci Pausania e Strabone, la nascita

delle Muse avvenne in Pieria, ai confini della Tessalia con la Macedonia, dove venivano onorate sotto le loro originarie sembianze di ninfe delle montagne e delle fonti. I Beoti consacrarono loro una zona presso il bosco sacro del monte Elicona. Qui, dal III al I secolo a.C., ogni cinque anni si celebravano le feste della Museia, concorsi di musica e poesia apprezzati in tutto il mondo ellenico. Altre città resero omaggio alle Muse: Delfi, dove il culto di Apollo Musagète era associato a quello delle sue compagne e Atene, dove a due colline furono dati i nomi di Elicona (sorgente sacra delle Muse) e Museion (tempio delle Muse).

Tra il XV e il XVIII secolo, si sviluppa il così detto “collezionismo” cioè la ricerca di tesori antichi, coinvolgendo: principi, prelati, cortigiani, medici, giuristi, studiosi, artisti e ovviamente monarchi. Inizialmente erano le vestigia dell'antichità romana le opere più ambite. Infatti le tracce dei materiali lasciate dalla Roma classica acquistano un immenso valore (è proprio di questo periodo il divieto del papa Pio II nel 1462 del riutilizzo dei materiali ricavati dai monumenti antichi per le nuove costruzioni). Ci si adopera per la loro conservazione, si moltiplicano le attività archeologiche, gli scavi e i rilievi topografici. In breve tempo in città come Firenze e Roma e tante altre diventa comune la passione per il collezionismo, soprattutto il culto per le statue restituite dal suolo di Roma.

La passione per la scultura antica varca rapidamente le Alpi. Nel 1528 Francesco I avvia i lavori per l'allestimento di un padiglione di caccia a Fontainebleau: intende farne una “Roma del Nord”. Ben presto il sovrano si avvale della collaborazione di vari artisti italiani incaricati di procurare al re statue antiche. La maggior parte delle corti europee, come quelle di Baviera, Inghilterra e di Spagna seguiranno entro breve l'esempio del re di Francia. Fin dal 1520 Paolo Giovio ecclesiastico storico umanista, comincia a collezionare ritratti su tela, alcuni originali, busti, medaglie e altri documenti.

La collezione conta infine di ben quattrocento pezzi repertoriati in quattro diverse categorie. Dal 1537 al 1543 fa inoltre costruire a Borgo Vico, vicino a Como, sua città natale, una casa destinata a custodire l'insieme delle sue collezioni, composte essenzialmente di medaglie e antichità. E per amore di quell'epoca remota, dedica alle divinità romane le varie sale della sua dimora; naturalmente ne intitola una alle Muse e ad Apollo e lo chiamerà Museo. La parola in quel periodo era in uso fra gli umanisti per designare in ricordo di Alessandria d'Egitto, un luogo consacrato allo studio e alle discussioni fra eruditi. Giovio vi dispone i suoi ritratti integrando la collezione del "museo". Nel Maggio del 1683, in occasione della visita del duca di York, il futuro re d'Inghilterra Giacomo II, si inaugura in pompa magna all'università di Oxford un nuovo edificio. Costruito in prossimità dello Sheldonian Theatre reca iscritto sul frontone un triplice nome: Musaeum Ashmoleanum, Schola Naturalis Historiae, Officina Chimica. E' la raccolta della collezione di un ricco appassionato di arti (dalla storia alla matematica) donata dallo stesso Ashmole all'università di Oxford dove aveva studiato. Grazie a lui viene istituito anche un nuovo corso sperimentale di storia naturale il cui docente diventerà il primo custode del museo (dottor Robert Plot). Fin dagli inizi l'Ashmolean Museum è molto frequentato e lo è a maggior ragione in quanto il personale è stipendiato esclusivamente dal ricavato dei biglietti d'entrata. E non tutti i visitatori sono degli studiosi, sono ammesse persino le donne per "sei pence". A quest'epoca si percepisce la divulgazione del sapere come una responsabilità pubblica. Città quali Bologna, Basilea, Besanson danno l'esempio creando musei e biblioteche pubbliche. Convinti che la trasmissione del sapere sia condizione essenziale del progresso, alcuni sovrani aderiscono al movimento: Pietro il Grande, Anna Maria Ludovica Dè Medici, e il Parlamento inglese che nel 1753 acquista la collezione a la biblioteca del dottor Hans Sloane, medico della famiglia reale, che le aveva offerte alla

nazione, per la manifestazione della gloria di Dio, la confutazione dell'ateismo e delle sue conseguenze, la pratica e il progresso della medicina, e il beneficio dell'umanità>. Nel giro di sei anni il British Museum apre le porte al pubblico. Così come in Inghilterra il fenomeno si accelera anche nel resto d'Europa e si diffondono i primi musei pubblici costituiti da collezioni principesche.

Nel 1789 la Rivoluzione Francese innesca il grande processo di appropriazione dei "beni nazionali", ma incorre al tempo stesso nelle proprie tentazioni di "vandalismo" e distruzione ai danni di tutto ciò che richiama l'Ancien Regime. Per garantire la salvaguardia di tali ricchezze si creerà uno spazio neutro che ne faccia dimenticare il significato religioso, monarchico o feudale: il museo. L'alba del XIX secolo è l'età d'oro per i musei, dove la scultura antica si eleva a sommo valore nell'arte. Testimonianza delle origini e del modello per gli artisti, le opere riportate dalla Grecia e dall'Egitto sono oggetto di un vero e proprio "culto dell'arte" di cui i musei diventano i templi, e ogni nazione è fiera di detenere la sua parte di tesoro (Schaer, 1996).

#### **4.2 Nascita e sviluppo della realtà virtuale applicata all'archeologia**

Il museo virtuale è una delle forme più esplicite con cui un museo cerca di promuoversi e rinnovare l'interesse per le opere d'arte poste al suo interno, in un contesto sempre più competitivo. La definizione di museo virtuale per alcuni è semplicemente il sito internet di un museo, per altri è un sito culturale sganciato da ogni forma di museo reale, e per altri infine è una visita virtuale al museo reale (ad esempio in 3D o tramite panoramiche a 360°).

L'Italia insieme ad altri paesi, racchiude al suo interno un ragguardevole patrimonio storico, artistico e culturale. Le riviste d'arte più importanti affermano che tale patrimonio italiano costituisce la quasi totalità di quello

mondiale. Questa ricchezza non ha però impedito, nel corso del tempo, distruzioni, saccheggi, sperperi e depauperamenti a causa delle numerose guerre o ad opera di collezionisti senza scrupoli. Bisogna attendere molto (intorno al 1800) per una compiuta definizione del concetto di bene culturale, così come di patrimonio. Si parla di una tradizione molto lunga che ha visto la formazione progressiva di una coscienza civile, di un sentimento di protezione e custodia di quel patrimonio che concorre a formare la storia, la cultura e l'identità dell'Italia. È essenziale porre l'attenzione pubblica sulla fruibilità del patrimonio: i beni che lo compongono devono essere in ogni caso destinati al grande pubblico, solo così si spiega la tutela anche nei confronti dei patrimoni privati. Uno studioso d'arte contemporanea, Francesco Antinucci, particolarmente interessato ai musei virtuali, ci illustra il motivo per il quale il patrimonio italiano è tanto importante nel mondo, infatti <In Italia si è elaborata negli ultimi secoli una cultura della conservazione molto attenta e molto sofisticata, che ha valorizzato i singoli monumenti, grandi e piccoli, come parte di un insieme incardinato nel territorio, di una rete ricca di significati identitari, nella quale il valore di ogni singolo monumento od oggetto d'arte risulta non dal suo isolamento, ma dal suo innestarsi in un vitale contesto. È questa cultura che ha in primo luogo garantito in Italia la conservazione dei monumenti in misura maggiore che altrove>.

Il dato è inserito all'interno di una tabella che evidenzia i primi dodici paesi per numero di siti iscritti nella lista del patrimonio culturale mondiale dell'UNESCO.

Nazioni con almeno 10 patrimoni riconosciuti dall'UNESCO.

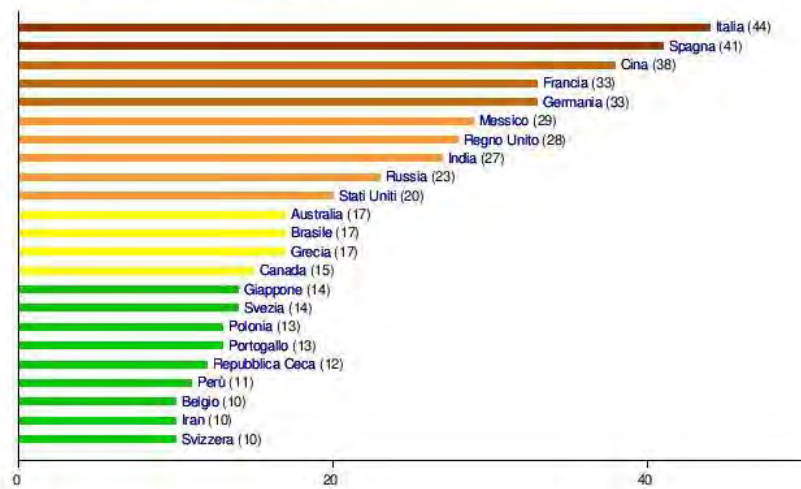


Tabella secondo l'aggiornamento effettuato nella riunione del Comitato per il Patrimonio dell'Umanità a Siviglia il 30 giugno 2009

Inoltre continua Antinucci <le regole della tutela, ossia quelle regole generali di conservazione, non sarebbero mai nate senza un forte senso civico innestato da una conservazione tanto intensa, tanto capillare, tanto continuativa del nostro patrimonio culturale; né questa conservazione sarebbe tanto densa e duratura, se non fosse stata garantita da regole efficaci nel lungo corso dei secoli> (Antinucci, 2007). Si sente perciò la necessità di dare vita ai musei, utilizzando apparecchiature sempre più sofisticate. Infatti nei musei, in particolare all'interno di una mostra, i collegamenti video possono essere intesi come pannelli che rimandano immagini delle opere, immagini dell'autore o degli autori coinvolti nell'evento. Spesso sono coadiuvate da musica ed effetti sonori, creati per l'occasione o raccolti tra gli esistenti, che creano una particolare e studiata atmosfera e favoriscono l'immersione dell'utente nell'ambiente (<http://it.wikipedia.org>, 2010).

Il museo contemporaneo non può non fare uso delle nuove tecnologie per diffondere il proprio messaggio culturale, inserendosi appieno nel contesto della digitalizzazione e facendo convergere in un unico formato, le molteplicità di attività e processi.

### 4.3 Musealizzazione in realtà diversa

Ma cosa è esattamente un museo digitale e come si presenta?

Il ricorso ai dati digitali ottenuti dalla geofisica permette di realizzare un museo digitale in realtà diversa. Non una ricostruzione ipotetica ma una ricostruzione numerica di come esattamente si presenta una struttura o un oggetto. Un museo in realtà diversa può essere in generale una collezione di risorse digitali in ambito artistico-culturale accessibile mediante strumenti telematici. Rientrano sia i sistemi informativi accessibili in modo locale o ristretto, sia le risorse realizzate per essere accessibili pubblicamente mediante la rete Internet. In quest'ultimo caso si parla di “museo virtuale on-line” o di “Web museum”. Un museo digitale permette di visualizzare, salvaguardare, ricostruire, comunicare e diffondere le collezioni d'arte: ceramiche, dipinti, sculture, fotografie, oggetti di antiquariato, prodotti tessili, come artefatti digitali e database numerici, che sono nella memoria del server del museo virtuale. Nella maggior parte dei casi di museo virtuale on-line, ci si trova davanti a siti che forniscono una rappresentazione digitale del museo reale. Tra questi si possono individuare delle peculiarità comuni, come:

- Informazioni pratiche relative all'accesso, alla collocazione, agli orari, e ai servizi che vengono forniti;
- Informazioni relative al museo stesso, dal punto di vista storico, istituzionale, logistico e spaziale;
- Informazioni relative alle collezioni permanenti (per esempio cataloghi, inventari telematici o cataloghi logistici);
- Informazioni relative alle mostre non permanenti, di norma dotate delle stesse caratteristiche di quelle relative alle collezioni permanenti;
- Strumenti didattici pensati a fini divulgativi ed educativi;

- Sezioni dedicate alle attività di merchandising, talvolta dotate di sistemi di commercio elettronico.

La maggior parte dei siti museali utilizza delle tecnologie Web standard (immagini in formato \*.Jpeg) che comportano un calo della qualità delle opere visive; esistono tuttavia siti più complessi che sperimentano soluzioni di realtà virtuale con VRML o visualizzazione fotografica 3D. Una cosa importante da sottolineare, e che non sempre risulta chiara, è che il museo virtuale on-line non si pone in alcun modo come alternativa al museo reale, ma piuttosto esso affianca le tradizionali istituzioni museali nello svolgimento dei loro compiti didattici ed espositivi, oltre che porsi come mezzo di promozione del museo stesso (<http://www.marginalia.it>, 2011).

#### **4.4 Vrm1**

VRML è l'acronimo di "Virtual Reality Modeling Language". E' un formato di file per descrivere oggetti e "mondi" interattivi e tridimensionali nel Web, così come HTML è usato per rappresentare pagine di testo. Il concetto infatti è molto simile a quello dell'HTML, ma diciamo che questo non significa poter scrivere con un normale editor oggetti o mondi 3D, poichè la difficoltà di descrizione di tali oggetti è infinitamente più alta che contornare di attributi una riga di testo. Insomma: è possibile creare il mondo scrivendo riga per riga tutti gli oggetti, ma è sicuramente un lavoro immenso per chiunque.

La prima stesura delle specifiche di VRML 1.0 è stata realizzata dalla Silicon Graphics a metà degli anni '90. La seconda stesura di VRML, che ha aggiunto significative capacità, permettendo in parte di interagire con l'ambiente, è



stata realizzata dalla sempre Silicon Graphics con contributi della Sony Research e della Mitra.

Il linguaggio VRML introduce nel Web il concetto di Oggetto 3D e di Mondo 3D interattivo. Un Oggetto 3D può essere ruotato, allontanato e avvicinato al punto di visione. Un Mondo 3D è invece un ambiente tridimensionale complesso, all'interno del quale è possibile muoversi. Anche il Mondo 3D può essere ruotato per variare il punto di ingresso o per averne una visione "aerea". Proprio questa caratteristica è una delle più importanti: il punto di vista infatti permette di avere un'idea sempre più realistica dell'ambiente, e permette di "camminare" nel mondo in modo estremamente semplice.

Per poter accedere al mondo VRML occorre avere a disposizione un opportuno programma di visualizzazione che interpreta il file di descrizione e lo visualizza coerentemente, consentendo anche la navigazione da parte dell'utente. Così come è necessario disporre di un browser come Netscape o Internet Explorer per accedere a pagine HTML, allo stesso modo è indispensabile disporre di un browser VRML per poter visualizzare i vari ambienti tridimensionali. Un browser VRML può operare come applicativo a se stante o come plug-in di un browser HTML.

I Plug-in VRML, di pubblico dominio, sono stati sviluppati da molte Software House indipendenti o dalla stessa Sony e Silicon Graphics. Cosmo Player, della Silicon Graphics, è oggi uno dei browser VRML 2.0 più usati, è di pubblico dominio, e può essere installato come Plug-in sia di Netscape che di Explorer. In questo lavoro di tesi si è scelto per la visualizzazione del file di output il plugin Cortona, della Parallel Graphics.

Tale Plug-in deve offrire un meccanismo di navigazione che permetta all'utente di cambiare continuamente posizione. Questo comporta un aggravio computazionale perché il browser dovrà ricalcolare e ricreare il

rendering della scena molte volte al secondo ed è proprio per questo motivo che la qualità del rendering non è comparabile a quella ottenibile da un programma di ray tracing.

Tutti i browser analizzati implementano le seguenti modalità di navigazione:

- WALK: l'utente è ancorato al suolo e ha a disposizione comandi che gli permettono di avanzare e retrocedere per raggiungere qualsiasi punto del mondo.
- EXAMINE: l'utente è fermo e tramite alcuni comandi può ruotare l'oggetto, avvicinarlo e allontanarlo.
- FLY: l'utente può volare e quindi non è costretto a seguire l'andamento del terreno.

Invece per realizzare oggetti o mondi VRML servono programmi chiamati "Authoring Tools". Questi programmi sono in grado sia di costruire l'oggetto o il mondo, di includere immagini, suoni, animazioni, di stabilire i punti di luce, la densità dell'oggetto, la sua attraversabilità o meno etc. Sono in grado di stabilire link HTML a pagine Web o ad altri files VRML e non. Sono inoltre in grado di creare relazioni con programmi Java e ActiveX per aumentarne l'interattività o lo stile di presentazione. Questi "Authoring Tools" possono normalmente salvare il mondo virtuale anche in un formato proprietario. Questi formati possono poi essere, tramite dei plug-in, letti da normali browser. Questi file, con i rispettivi plug-in, diventano leggibili come dei normali file VRML (<http://library.thinkquest.org>, 2011).

## 4.5 Linguaggio PHP

PhP sta per PHP Hypertext Preprocessor, ed è un linguaggio di programmazione che può essere ospitato entro una pagina Html; a differenza di Javascript, PhP è un linguaggio server-side nel senso che viene eseguito sul server (computer remoto) non sul client (computer dell'utente). PhP è un preprocessore nel senso che quando l'utente chiede una pagina PhP dal server, la pagina originale viene elaborata sul server da PhP e tradotta in una normale pagina Html che viene inviata all'utente. L'utente non è quindi in grado di vedere il codice sorgente PhP ([www.liceofoscarini.it](http://www.liceofoscarini.it)).

Vediamo come avviene la richiesta di una pagina Web secondo i due diversi linguaggi. L'utente apre il suo browser e digita un indirizzo Internet, ad esempio [www.unica/pagina1.html](http://www.unica/pagina1.html): a questo punto il browser si collega al server [www.unica.it](http://www.unica.it) e gli chiede la pagina [pagina1.html](http://www.unica/pagina1.html). Tale pagina contiene esclusivamente codice Html: il server la prende e la spedisce al browser, così com'è (insieme ad eventuali file allegati, ad esempio immagini). Il nostro utente quindi avrà la possibilità di visualizzare questa pagina.

Supponiamo ora che l'utente richieda invece la pagina [pagina2.php](http://www.unica/pagina2.php): questa, contrariamente a quella di prima, non contiene solo codice Html, ma anche PHP. In questo caso il server, prima di spedire la pagina, esegue il codice PhP, che in genere produce altro codice Html: ad esempio, PhP potrebbe controllare che ore sono e generare un messaggio di questo tipo: "Benvenuti nel sito dell'Università di Cagliari, sono le 12.15!". Dopo l'esecuzione, la pagina non conterrà più codice PhP, ma solo Html. A questo punto è pronta per essere spedita al browser. (Ovviamente, il file che non contiene più codice PhP non è quello "originale", ma la "copia" che viene spedita al browser. L'originale rimane disponibile per le prossime richieste.) Quindi l'utente vede solo il codice Html, e non ha accesso al codice PhP che ha generato la pagina (<http://php.html.it>, 2011).

### 4.5.1 Nascita e sviluppo

A metà degli anni Novanta il Web era ancora formato in gran parte da pagine statiche, cioè da documenti Html il cui contenuto non poteva cambiare fino a quando qualcuno non interveniva manualmente a modificarlo. PhP nasce nel 1994, ad opera di Rasmus Lerdorf, come una serie di macro la cui funzione era quella di facilitare ai programmatori l'amministrazione delle homepage personali: da qui trae origine il suo nome, che allora significava appunto Personal Home Page. Essendo un progetto di tipo open source (cioè "codice aperto", quindi disponibile e modificabile da tutti), ben presto si formò una ricca comunità di sviluppatori che portò alla creazione di PhP 3: la versione del linguaggio che diede il via alla crescita esponenziale della sua popolarità. Tale popolarità era dovuta anche alla forte integrazione di PhP con il Web server Apache (il più diffuso in rete), e con il database MySQL. Tale combinazione di prodotti, integralmente ispirata alla filosofia del free software, diventò ben presto vincente in un mondo in continua evoluzione come quello di Internet. Lo sviluppo di PhP procede comunque con due progetti paralleli che supportano ed evolvono sia la versione 4 che la versione 5. Questa scelta è stata fatta poichè tuttora sono pochi i fornitori di hosting che hanno deciso di fare il porting dei propri server alla nuova versione del linguaggio. Oggi PhP è conosciuto come PhP: Hypertext Preprocessor, ed è un linguaggio completo di scripting, sofisticato e flessibile, che può girare praticamente su qualsiasi server Web, su qualsiasi sistema operativo (Windows o Unix/Linux, ma anche Mac, AS/400, Novell, OS/2 e altri), e consente di interagire praticamente con qualsiasi tipo di database (SQLite, MySQL, PostgreSQL, SQL Server, Oracle, SyBase, Access e altri). Si può utilizzare per i più svariati tipi di progetti, dalla semplice home page dinamica fino al grande portale o al sito di e-commerce (<http://php.html.it>, 2011).

Per la precisione è bene ricordare che il PHP non è l'unico linguaggio lato server disponibile per chi si appresta a sviluppare pagine web. Sono disponibili varie alternative, sia proprietarie che open source, ed ognuna di queste ha i suoi pregi ed i suoi difetti.

#### **4.6 Software R2vrm1**

Questo software già proposto nell'ambito di una ricerca del Dipartimento di Ingegneria del Territorio (progetto FIRB) e successivamente implementato per questa tesi, consente una visualizzazione tridimensionale ed esplorabile dei dati di resistività o di altri parametri fisici provenienti da prospezioni geofisiche con l'utilizzo di software standard e non proprietari.

Per la realizzazione del software di elaborazione si è scelto di usare il linguaggio di scripting PHP in quanto di tipo open source e largamente utilizzato dalla comunità di sviluppatori.

Per poter essere eseguito deve quindi (come detto nel paragrafo 4.4.1) essere caricato su un server Apache con la possibilità di eseguire codice PHP o in locale con un ambiente di emulazione. L'esecuzione avviene richiamando l'interfaccia del software attraverso un browser web. Attraverso una serie di variabili parametrizzate all'interno del codice PHP è possibile definire i valori numerici di soglia da utilizzare per la rappresentazione del modello.

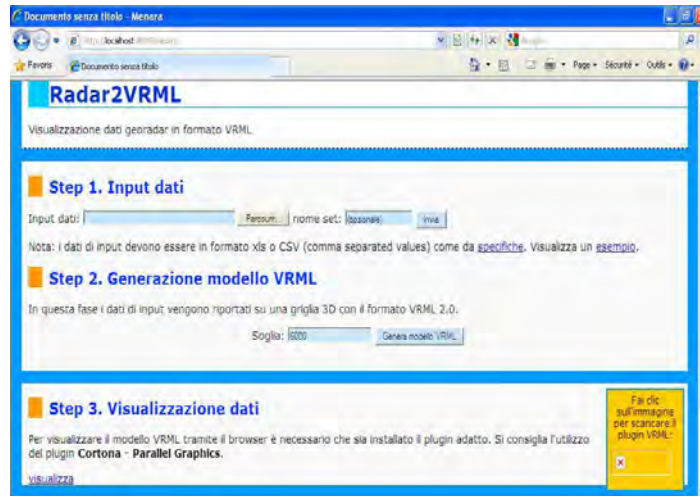


Fig. 4.1: Maschera di input dei dati del software R2vrml

### a. Dati di input

I dati di input sono rappresentati dai valori rilevati dagli strumenti sul campo, importati all'interno di software per la creazione di files tridimensionali e poi esportati in formato ASCII. Per comodità e semplicità di editing i dati di input possono essere ulteriormente elaborati su un foglio di calcolo SURFER o semplicemente visionati su un editor di testo tipo Blocco Note o WordPad MCF: nelle colonne sono riportati i valori delle coordinate x,y,z di ciascun punto e quindi il valore fisico rilevato (es.: ampiezza del segnale).

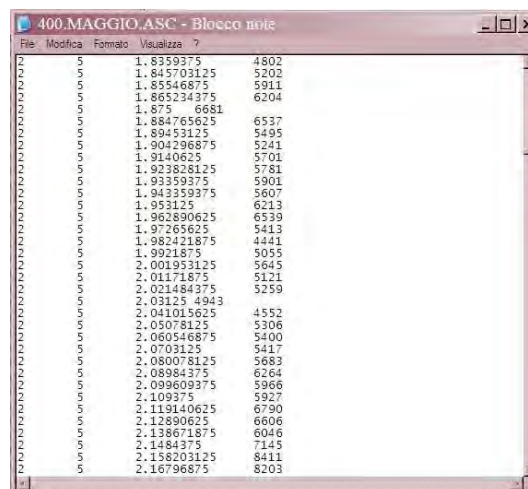


Fig. 4.2: Formato del file ASCII esportato dal file tridimensionale

Oltre ai dati numerici sono state messe a disposizione le mappe a colori prodotte dai software di elaborazione dei dati provenienti dagli strumenti di rilievo. Tali mappe sono molto utili poiché danno l'orientazione esatta dei dati (N-S), la corretta posizione delle anomalie e il valore del dato fisico a determinate profondità. Un file di output errato potrà essere facilmente individuato anche da un semplice confronto “a vista” con queste mappe 2D.

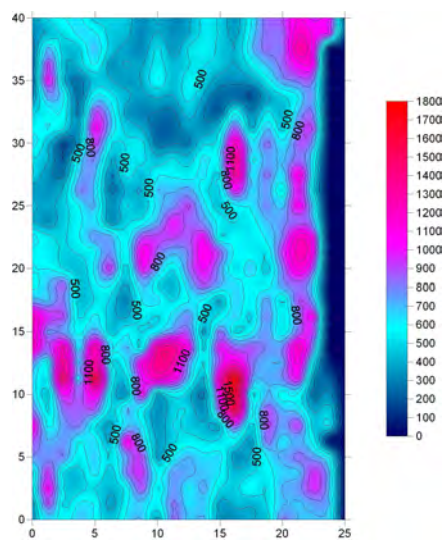


Fig. 4.3: Una delle time slices su cui ricostruire il file vrml

### b. Dati di output

L'output generato dal programma è un file in formato Virtual Reality Modeling Language (VRML) (ISO/IEC 14772-1:1997 e ISO/IEC 14772-2:2004 <http://www.web3d.org/x3d/specifications/vrml/>), il linguaggio definito dal W3D Consortium per la descrizione e la visualizzazione di oggetti 3D sul web tramite un comune browser. Per la visualizzazione del file di output deve essere utilizzato un browser web con installato l'apposito plugin VRML, come Cortona della Parallel Graphics.

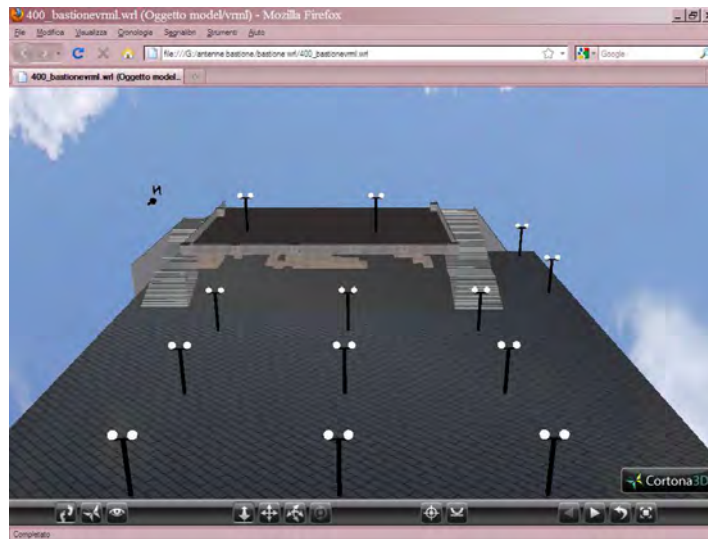


Fig. 4.4: Render nella realtà diversa con il R2vrml

Il modus operandi del software è il seguente: il sottosuolo viene diviso in piani il cui numero e il cui spessore viene definito dall'utente. Per esempio se abbiamo dei dati riferibili a profondità massime di 5 metri, possiamo scegliere di dividere il sottosuolo in 10 piani da 50 cm di spessore. All'interno di questi piani il software sistemerà alcuni "cubi" rappresentativi del valore delle anomalie le cui dimensioni spaziali saranno sempre definite dall'utente: la z sarà data dallo spessore dei piani menzionati in precedenza, mentre le altre due direzioni saranno arbitrarie. In genere nelle normali prospezioni conviene scegliere 1 metro per la x e 1 metro per la y. Oltre alle dimensioni spaziali è necessario definire il valore soglia del parametro fisico che vogliamo rappresentare (in questa tesi si è considerato sempre l'ampiezza del segnale riflesso nel GPR), per esempio 6000: in questo caso il software rappresenterà solo i valori di ampiezza maggiori di 6000. I cubi così definiti saranno rappresentati con lo stesso colore e quindi con valori di ampiezza del segnale riflesso uguali. Per questo motivo è di fondamentale importanza la scelta del valore di soglia e il raffronto con le time slices ottenute con i soliti metodi



descritti in letteratura, per ottenere una rappresentazione che sia il più possibile vicina al vero.

Il colore del “cubo” potrà essere variato con il valore dell’anomalia, con toni più chiari per ampiezze minori.

Nel sovrapporre i “cubi” occorre mettere un nuovo parametro, la trasparenza che consente di vedere anche i cubi posti a profondità maggiore e a colori differenti. Ciò è necessario soprattutto se si usano scale differenti per le diverse slices o se non si normalizzano le scale al valore massimo di ciascuna slices.

## 5. 1° SITO CAMPIONE: MOTHIA

Uno dei siti campione prescelto è la strada sommersa dello Stagnone di Marsala che collegava l'isola di Mothia (oggi S. Pantaleo) a ovest della Sicilia con la località Birgi. Tale strada sommersa è una delle attrattive maggiori nella visita dell'isola di Mothia, sede di una delle più note colonie fenicio - puniche del Mediterraneo che, seguendo un percorso pressoché rettilineo verso nord,

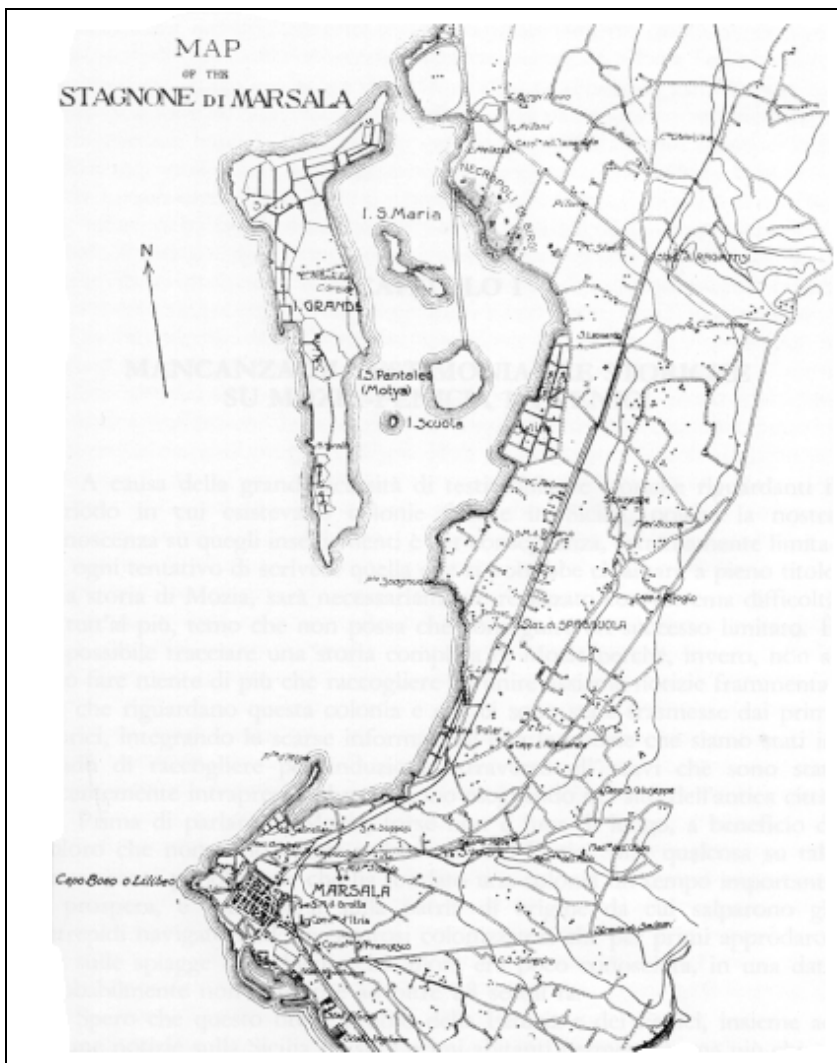


Fig. 5.1: Mappa dello Stagnone di Marsala, fine XIX sec

attraversa il tratto settentrionale dello Stagnone di Marsala e collega la Porta Nord del circuito murario cittadino con l'antistante costa in prossimità della contrada di Birgi. La strada è famosa per due differenti motivi. Da un lato la sua presunta antichità che ne

farebbe risalire la costruzione all'epoca nella metà del VI sec. a.C. e dall'altro la sua speculare "modernità" dovuta alla sua utilizzazione fino ad epoche recenti per il trasporto dell'uva e del sale dall'isola ai palmenti di Birgi con i tipici carretti siciliani, nella variante marsalese dalle altissime ruote, tirati da poderosi muli (Foto 5.2).

Le indagini archeologiche recentemente intraprese hanno rilevato che la strada, è impostata su un argine o terrapieno artificiale, a sezione trapezoidale, generalmente largo circa 12,5 m alla base e 7-8 m alla sommità e lunga circa 7 Km. E' interessante notare che tale dimensione corrisponde a quella della strada che dalla Porta Nord conduceva verso l'interno dell'isola. La strada sommersa ne rappresenta, quindi, la continuazione naturale permettendo, il transito di due carri affiancati (SYS Soc. Coop. a r. l, 2000)

La storia della colonia fenicia è un po' quella tipica che si è potuta osservare nelle altre colonie del Mediterraneo. L'isola era una stazione commerciale e doveva fungere da punto di attracco per le navi fenicie in rotta nel Mediterraneo. Nel VIII Secolo a.C. inizia la colonizzazione greca, che si concentra soprattutto nella parte orientale della Sicilia, per questo i Fenici ripiegano sulla parte occidentale e Mothia accresce la sua importanza divenendo una vera e propria cittadina. Nel VI Secolo a.C. si acuiscono i contrasti tra Greci e Cartaginesi per il predominio sulla Sicilia e Mothia ne viene coinvolta; si arriva a cingerla di mura che ne permettano una difesa migliore. Ma nel 397 a.C. Dionisio il Vecchio, tiranno di Siracusa, assedia la città e pone fine alla sua esistenza. Gli abitanti si rifugiano sulla terraferma nella colonia di Lilibeo, l'attuale Marsala.

La prima volta che se ne sente parlare di nuovo, quasi mille anni dopo la sua caduta e scomparsa dalla storia, sarà col nome moresco di Zizareth e Zezebus, come anche quello di Gisira-Malbugi; ma ad eccezione dei suoi nomi si sa ben poco sull'isola durante quel periodo. Nell'undicesimo secolo,

quando i Normanni presero il posto dei Saraceni in Sicilia, se ne risente parlare, questa volta con il nome greco di Pantaleimon. Sotto il dominio normanno, pare che l'isola sia passata in mano ai privati, due ammiragli di nome Christodulos e Theodulos, da cui fu in seguito lasciata, per donazione, all'abbazia di Santa Maria della Grotta, dell'Ordine religioso di San Basilio a Marsala. Nel 1199, per decreto dell'Imperatore Enrico VI, l'abbazia di Marsala con tutte le sue proprietà, quindi anche l'isola, passò nelle mani del monastero di Palermo. Pare che i monaci Basiliani ebbero il possesso di San Pantaleo, come veniva chiamata l'isola in quel periodo, sino alla seconda metà del sedicesimo secolo, quando venne istituito a Palermo l'Ordine dei Gesuiti, e l'imperatore Carlo V concesse in dono entrambi i monasteri di Palermo e Marsala al nuovo Ordine. Quando i Gesuiti furono espulsi dalla Sicilia nel diciottesimo secolo, San Pantaleo venne in possesso della città di Marsala, che avanzò pretese sull'isola perché questa era stata originariamente di proprietà del monastero di Santa Maria della Grotta. Pare comunque che San Pantaleo sia stata divisa o venduta dalla città di Marsala a diversi piccoli proprietari, dai quali venne infine acquistata, pezzo per pezzo, dopo molti anni di paziente attesa, dall'attuale proprietario.

Le prime ricerche archeologiche eseguite sull'isola furono eseguite dall'inglese J.I.S. Whitaker tra il 1906 e il 1919, prima della pubblicazione di "Mothia. Un città fenicia in Sicilia", pubblicato a Londra nel 1921 (<http://web.tiscali.it/fondazionewhitaker.it>, 2010). La città di Mothia è oggi in buona parte sott'acqua e occupa un'isola che si è evidentemente formata dal sollevamento del mare che ha oggi occupato parte dell'istmo.



Foto 5.2: Un carro agricolo - scrive G. Whitaker sul retro della fotografia, in lingua inglese - in procinto di tornare da Mothia sulla terraferma lungo l'antica strada sommersa, le cui fondamenta si trovano ora sotto la superficie della laguna. La strada è lunga 1200 m., l'acqua raggiunge una profondità massima di tre piedi.

### **5.1 Dati a disposizione:**

I dati sono stati acquisiti da una spedizione effettuata dal Dipartimento di Ingegneria del Territorio nell'ambito del progetto FIRB 2003 (Ranieri et al., 2009; Loddo, 2010). La strumentazione era costituita da:

Georesistivimetro Syscal Switch Pro della Iris Instruments a 48 uscite e 10 canali;

Cavo multipolare a 24 uscite in acciaio inossidabile con spaziatura 2 m;

Elettrodi (24) a tenuta stagna;

Camera d'aria del diametro di 150 mm e lunghezza 30 m;

Cavi di raccordo e batterie.

Grazie a test a mare preliminari si è appurato che l'utilizzo di una sequenza di acquisizione con configurazione Dipolo-Dipolo fosse da preferire alle altre, cioè al Wenner e al Reciprocal Wenner di solito utilizzate per le applicazioni archeologiche.

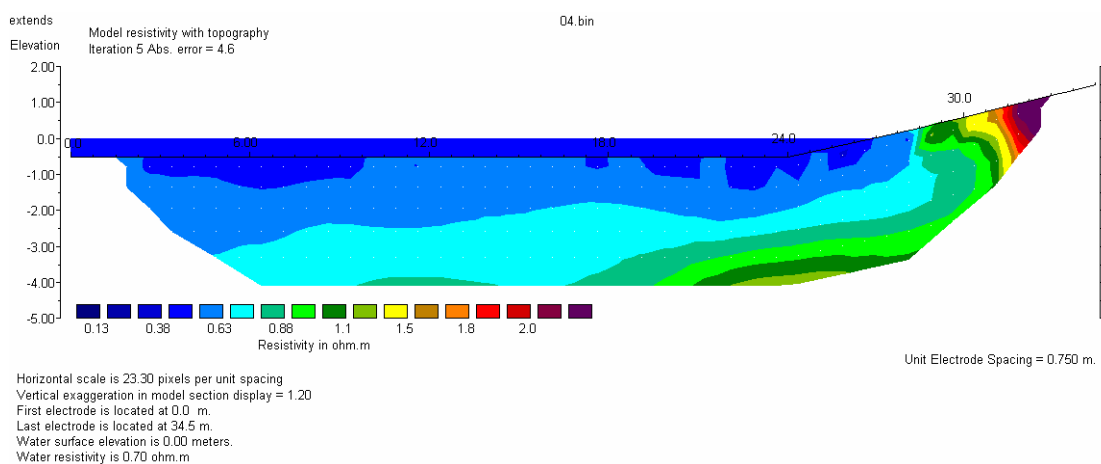
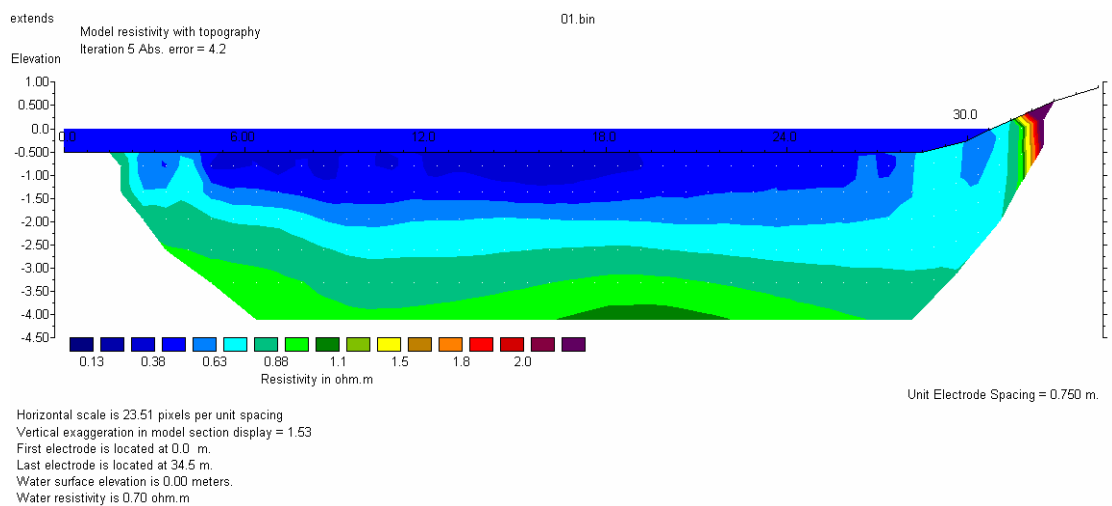
E' stato posizionato il cavo tenuto in galleggiamento dalla camera d'aria e di seguito infissi gli elettrodi in corrispondenza di ciascuna uscita (vedi Fig. 5.3). Lo stendimento è stato traslato parallelamente spostando in una prima fase gli elettrodi in corrispondenza dei nuovi punti e successivamente il cavo galleggiante. Ciascun elettrodo è stato assemblato con un singolo modulo tubolare per poter garantire la funzionalità per una profondità di utilizzo di circa 1,50 m considerando lo strato d'acqua e una penetrazione di circa 10–20 cm all'interno dei sedimenti. I 24 elettrodi hanno una spaziatura pari a 1,50 m per una lunghezza totale dello stendimento di 34,5 m. E' stata prevista una griglia rettangolare di punti di dimensioni 2,00 x 1,50 m che è stata realizzata traslando parallelamente gli stendimenti rettilinei procedendo da est verso ovest, con il primo elettrodo posto verso il mare e l'ultimo verso la costa. Il numero di stack è compreso tra un minimo di 4 e un massimo di 8, con errore massimo del 5%. La tensione tra gli elettrodi è stata tenuta costante a 50 V per misure di 1 s.



Fig. 5.3: Vista dello stendimento e degli elettrodi

## 5.2 Trattamento ed editing dei dati

E' stato effettuato il filtraggio dei valori anomali elaborando i dati con il software Prosys II versione 2.36 della IRIS Intrument. Successivamente i dati, importati nel Res2Dinv versione 3.4 della Geotomo Software Sdn.Bhd., sono stati invertiti utilizzando gli stessi parametri di robustezza, dumping, mesh e smoothing e tenendo conto dello strato conduttivo superficiale. Le tomografie ottenute (in tutto 26) hanno un errore RMS ottimale, in un intervallo compreso tra 0,80% e 4,8%. In un solo caso si è ottenuto il valore di 10,1%.



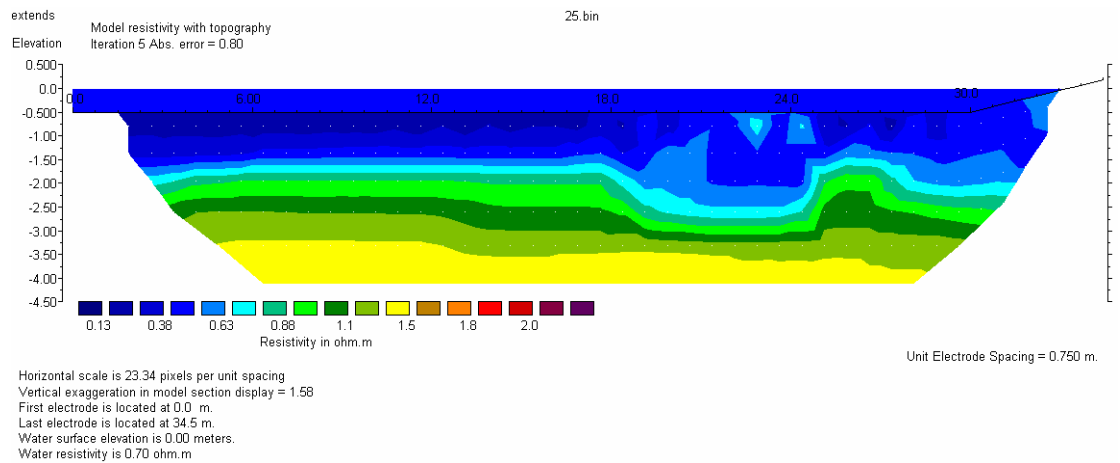
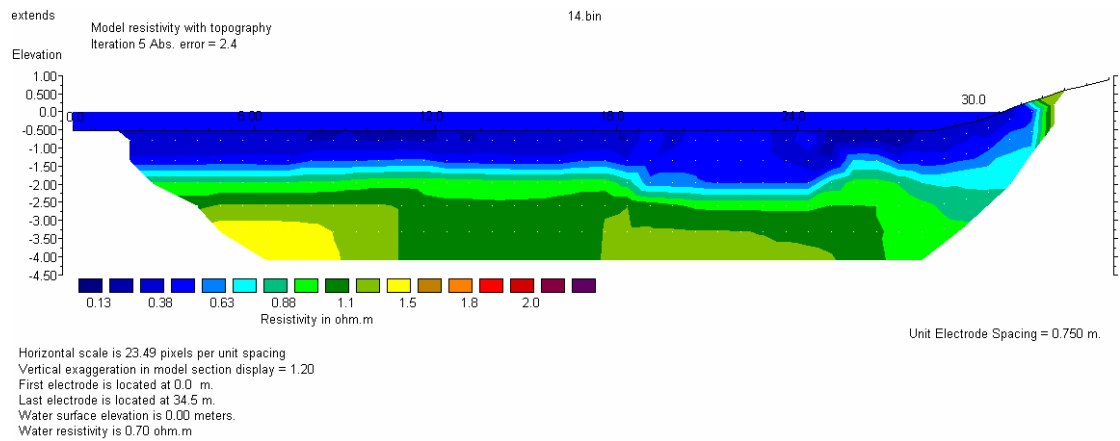
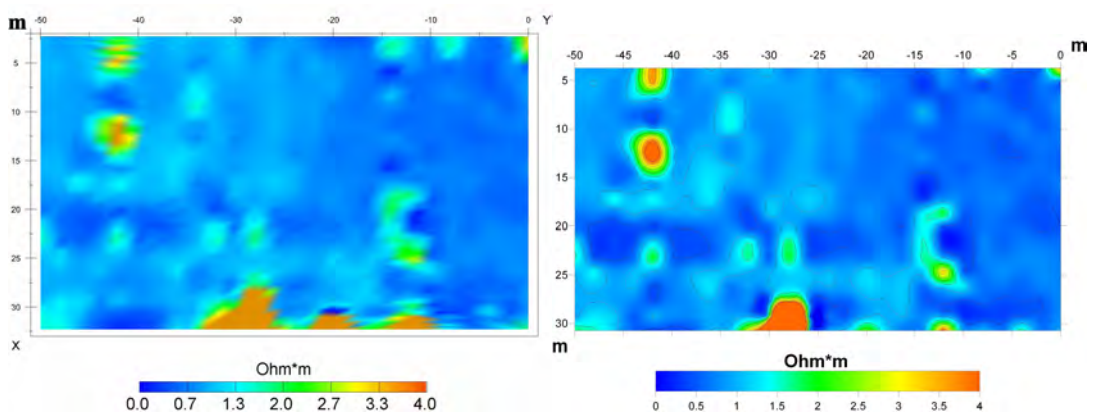
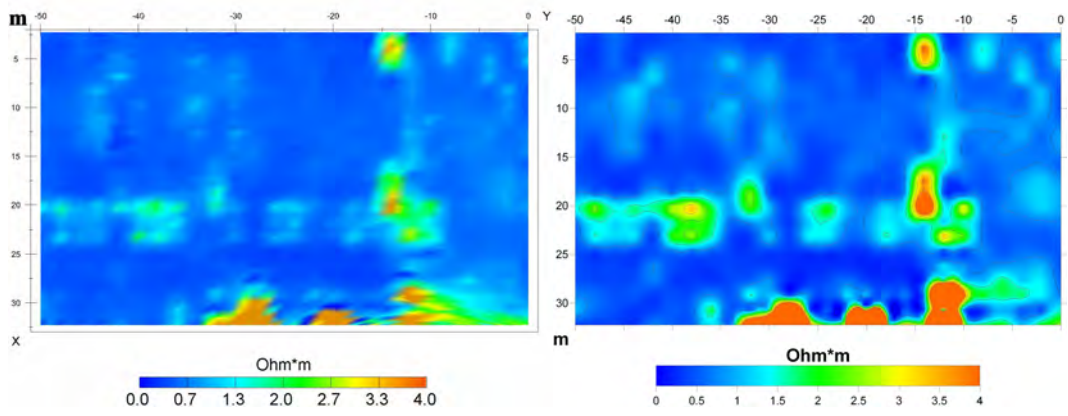
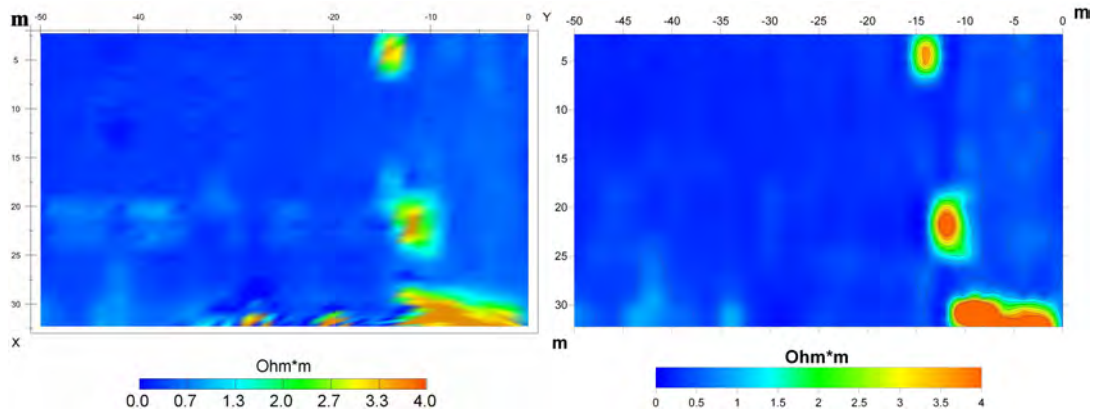


Fig 5.4: Tomografie ottenute col Res2Dinv. Da notare come il metodo sia capace di definire le strutture al di sotto del fondo del mare anche con battente d'acqua salata naturale (< 1,5 m).

Con i dati ottenuti sono state ricostruite delle mappe a diversa profondità utilizzando i programmi di contouring EVS-PRO e Surfer 8.





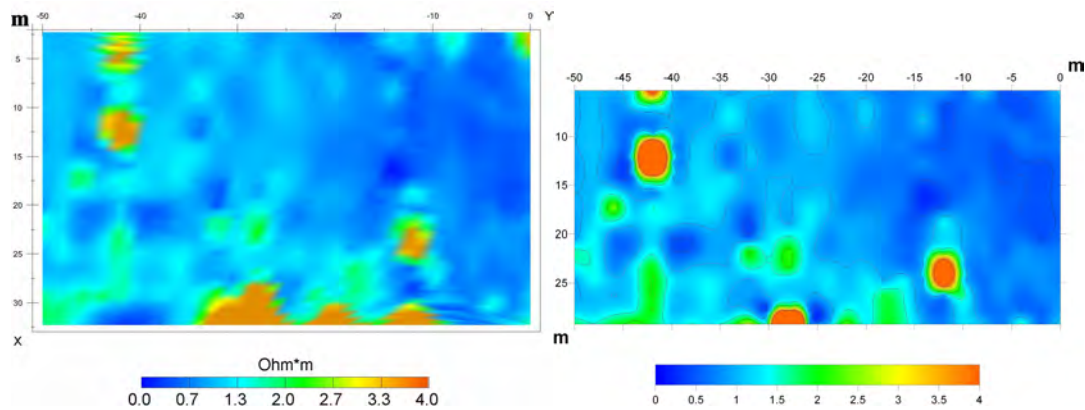


Fig 5.5: Mappe ottenute col EVS-PRO a sx confrontate con quelle ottenute con SURFER a dx. Partendo dall'alto le profondità sono  $z=-0,2$  m,  $z=-0,8$  m,  $z=-1,9$  m,  $z=-2,6$ .

L'interpolazione tra le mappe ottenute per le diverse profondità ha fornito una rappresentazione della resistività pseudo 3D.

### 5.3 Rappresentazione dei dati col Blender

Il file 3D formato ASCII che si è ottenuto con i metodi classici (export dal file di inversione `res2Dinv`) si è rivelato come ovvio poco “denso” e il numero dei dati non è stato sufficiente per realizzare una rappresentazione nella realtà digitale col software `R2vrml`. Si è comunque voluto eseguire una musealizzazione anche di tali dati presi a mare che diversamente non potevano essere rappresentati in maniera digitale.

Per ottenere un modello 3D che poteva essere importato da un software di visualizzazione abbiamo costruito un file `*.csv` partendo dai dati invertiti, e utilizzando EVS-PRO versione 9.22 (2010) della C.Tech abbiamo ottenuto una maglia mesh in 3D chiamata in gergo “plume”. Tale maglia per essere pulita sia da elementi che avrebbero “sporcato” la visualizzazione che da elementi sovrabbondanti è stata importata in Autocad 2005.

Infine dopo la pulitura sotto il formato `*.dxf` il volume che rappresenta la parte di strada sommersa è stato importato in Blender 2.49 (software open

source), all'interno del quale è stata eseguita un tipo di visualizzazione piuttosto comune (render e filmati) per renderlo esportabile nei più diffusi formati per la successiva musealizzazione.

All'interno del Blender si è ricreato il paesaggio in cui la strada era inserita: stagno, isola di Mothia, isola di S. Maria e la Sicilia. Nel filmato in allegato di cui si possono vedere alcuni render nell'Allegato 1, si è utilizzato la visuale cosiddetta a volo di uccello (rappresentazione prospettica dall'alto, che ricorda la vista che hanno gli uccelli – o gli aerei – in volo) non solo al di sotto del pelo dell'acqua ma anche al di sotto della superficie del fondo del mare, per mostrare ciò che diversamente sarebbe celato da uno spesso strato di fango.



Fig 5.6: Due delle immagini del filmato estrapolato dal render eseguito col Blender

Oltre a costituire una rappresentazione “particolare” della parte sommersa della strada con una certa valenza museale, quindi godibile da un vasto pubblico anche a distanza, l'identificazione e individualizzazione precisa di parti sommerse potrebbe essere utilizzata dagli archeologi come punto di partenza di un nuovo scavo. Infatti all'interno del Blender navigando in modo opportuno nel 3D è possibile osservare la porzione di strada indicata dalle anomalie in modo digitale.

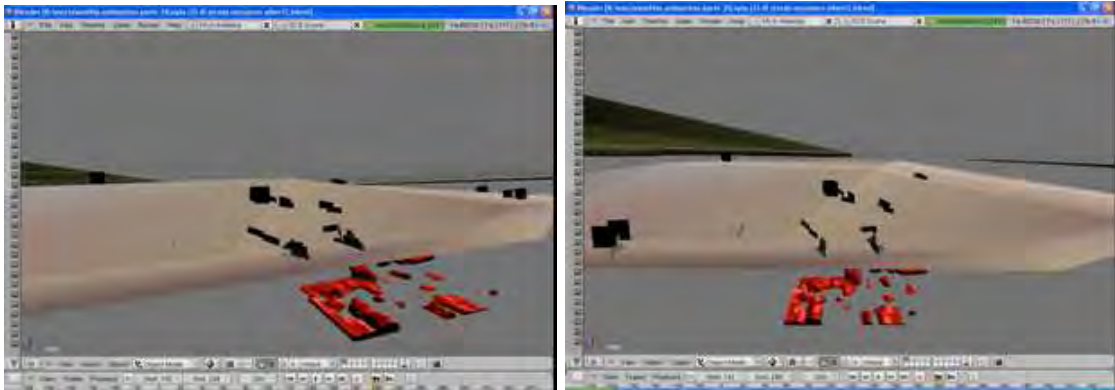


Fig 5.7: Due immagini tratte dal file Blender. Consente la visualizzazione in 3D della strada nel suo contesto, con la Porta Nord, l'isola di S. Pantaleo etc. Si noti la differenza con la rappresentazione delle isosuperfici nella figura 2.5.

## 6. 2° SITO CAMPIONE: POLLENTIA



Fig. 6.1: Posizione nel Mediterraneo dell'isola di Maiorca. A Nord-Est si trova la città romana di Pollentia

La città romana di Pollentia è situata sulla costa settentrionale dell'isola di Maiorca, a 53 km al Nord-Est di Palma. E' collocata su un leggero pendio ricoperto da alberi e dalla tipica vegetazione mediterranea, proprio a Sud della moderna città di Alcudia. Come la città moderna, l'antica Pollentia fu strategicamente situata su un istmo tra le due grandi baie: la baia di Alcudia e di Pollensa. Entrambe le baie sono protette, dai venti che soffiano soprattutto da Nord-Ovest, dal roccioso Cape Formentor e, inoltre, costituiscono un eccellente riparo per le navi.

Pollentia fu fondata con Palma da Q.Caecilius Metellus Balearicus durante una campagna contro i pirati del Mediterraneo condotta dalle isole Baleari di

Mallorca e Minorca. Metellus aveva intrapreso la campagna antipirata nel 123 a.C. Nel 121 a.C. celebrò la sua vittoria contro i pirati e l'annessione delle Baleari all'impero romano. Ciò fa supporre che le due città, Palma e Pollentia, furono fondate dopo la pace di Mallorca, avvenuta nel 122 a.C.. Però i resti archeologici indicano che Pollentia, come pure Palma, furono strutturate come unità romane non prima del secondo quarto del primo secolo a.C. e che non furono completate fino all'epoca di Augusto; inoltre, probabilmente, Metellus Balearicus fece spostare 3000 romani che si erano stabiliti in Spagna sistemandone 1500 a Palma e 1500 a Pollentia facendoli convivere insieme agli abitanti del posto o in campi militari. La missione più importante era portare la pace sull'isola. Sembra che Q. Caecilius Metellus Pius, pronipote di Metellus Balearicus, abbia fondato proprio la città di Pollentia introducendo altri romani, i veterani, dopo la vittoria contro Sertorius (nel 70 a.C.). In quell'epoca può darsi che egli abbia creato una colonia latina. Infine, l'imperatore Augusto sembra che abbia inviato un altro gruppo di coloni sull'isola e, in questo modo, Pollentia, insieme a Palma, ebbe lo status di "colonia civium romanorum" o colonia romana.

Ma fu Pollentia e non Palma ad essere la principale città romana di Mallorca e il centro amministrativo dell'isola. Fu il console romano Q. Caecilio Metello che fondò la città di Pollentia, ad abbellirla come se fosse stata la sua Roma costruendo templi, edifici pubblici, domus, ville urbane e un teatro. Anche la vitale cittadina di Pollentia però iniziò il proprio declino nel corso del V secolo con l'ondata dei barbari, per cui la città subisce un processo di decadenza e distruzione. Nell'anno 902 i mussulmani conquistano Mallorca e il nome di Alcudia deriva proprio dall'arabo: Al Cudia, l'altura.

Nel 1593 un antiquario locale e studioso di storia, J. B. Binimelis, suggerì che l'antica città di Pollentia giaceva sotto i campi circostanti la cappella di Santa Ana, a sud di Alcudia. Ma nonostante la scoperta di un bel busto

dell'imperatore Augusto, di numerose iscrizioni latine, e molte monete romane ritrovate in quei campi per tutto il XVII, XVIII, e XIX secolo gli studiosi di Maiorca discussero se Pollentia si trovasse a Alcudia o a Puerto de Pollensa, dodici chilometri ovest di Alcudia, dove furono ritrovati numerosi reperti romani.

La questione è stata finalmente risolta quando due appassionati, Gabriel Llabrés, professore di storia presso l'Istituto Balear di Palma, e Rafael Isasi Ransome, un colonnello di artiglieria, scavarono nel 1923-1935 una serie di trincee tra i filari di mandorli nei campi di Alcudia. I loro spettacolari ritrovamenti resero di fatto indiscutibile che esistesse una grande città romana a sud di Alcudia. Un frammento di un'iscrizione trovata sul sito nel 1887 sembra identificare la città proprio col nome di Pollentia.

Gli scavi archeologici di Pollentia sono iniziati nel 1920 e sono ancora in corso. Oggi si possono ammirare: una parte delle antiche mura della città, i resti di tre dimore nobiliari e di una via porticata. Ma il fiore all'occhiello di Pollentia è senz'altro il Teatro Romano, che risale al I secolo d.C. (forse sotto Augusto) e aveva una capienza di 2.000 persone. Della costruzione è rimasto parte delle gradinate e del palcoscenico che la città di Alcudia usa ancora per le sue rappresentazioni musicali e teatrali.

La città di Alcudia e la zona archeologica di Pollentia furono dichiarate di valore storico-artistico nel 1963. Della città però non si conoscono i limiti né a Nord verso la città moderna, né a Sud verso il teatro, né verso Est o verso Ovest. Non si conoscono le sovrapposizioni arabe, né sono individuati i porti visto che la città si trova su un promontorio che separa due baie.



Fig. 6.2: Rovine di Pollentia

### **6.1 La prospezione geofisica**

I dati sono stati acquisiti da una spedizione effettuata in più riprese dal Dipartimento di Ingegneria del Territorio nell'ambito del progetto FIRB 2003. La zona nella quale sono stati acquisiti i dati non fa parte di nessuna delle tre aree archeologiche visitabili in cui è diviso il sito: né di "Sa Portella", né del "Foro romano", né della zona del "Teatro". La zona è indicata nella Fig. 6.4 col quadrato giallo posto a circa 300 metri a Sud del centro dell'antica città (Capitolium).



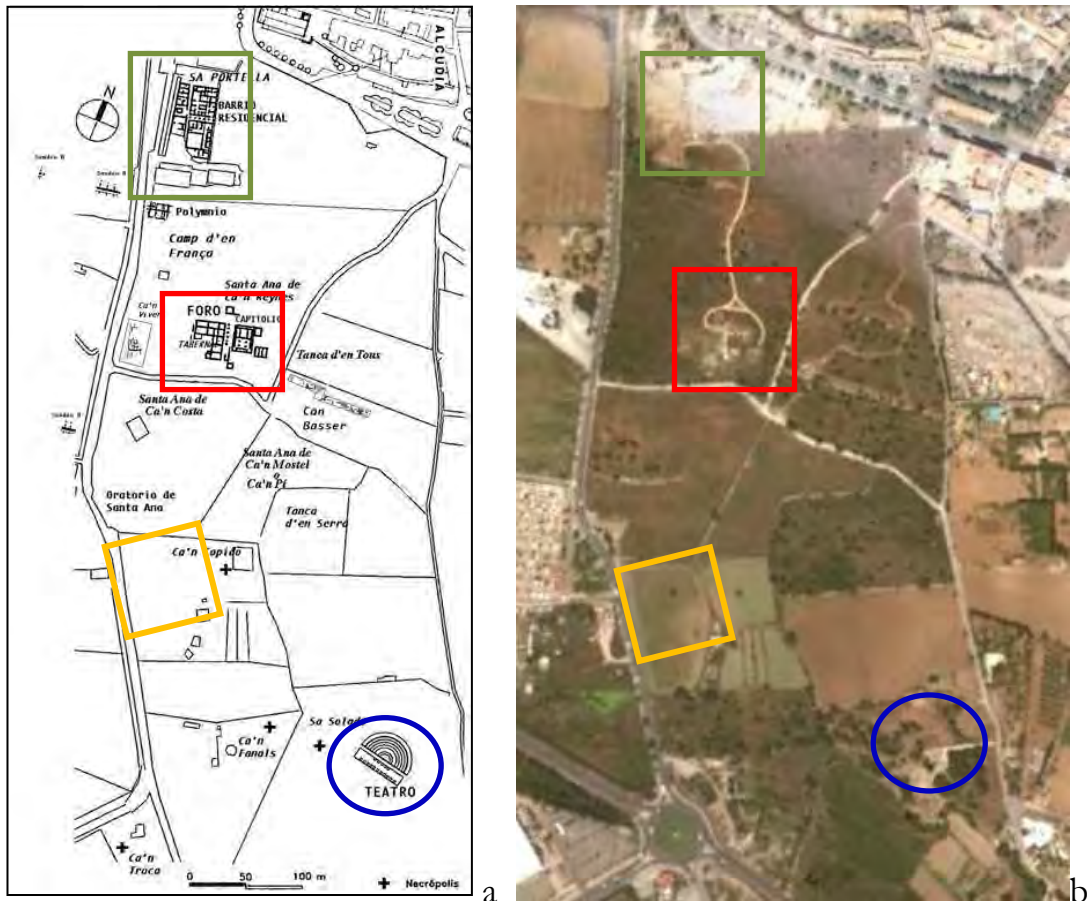


Fig. 6.4: a) dalla brochure del sito le tre aree visitabili del sito archeologico. b): la posizione dell'area d'indagine rispetto alle già rovine visitabili

La strumentazione era costituita da un Georadar della IDS RIS con un antenna di frequenza 200 MHz bistatica (Tx-Ex) ad offset costante in configurazione monocanale. La direzione dei profili su cui è stato fatto scorrere il GPR è approssimativamente N-S e hanno una lunghezza compresa tra i 54 e 59 m. I profili distano tra loro 0,50 m. e sono stati acquisiti su una superficie complessiva di circa 3900 m<sup>2</sup>

Il rilievo è stato eseguito in direzione Nord-Sud per profili pari e Sud-Nord per quelli dispari.

## 6.2 Trattamento ed editing dei dati

I dati sono stati processati secondo criteri standard con il software Reflex (Sandmeier, 2010) secondo una sequenza 2D standard (Yilmaz, 1987).

L'effettiva partenza del segnale si è rivelata alcuni nanosecondi dopo l'invio della prima onda radar: lo start time che è stato applicato però non è lo stesso per ogni profilo, perché i dati sono stati acquisiti parte al mattino e parte al pomeriggio. Per quelli al mattino si sono eliminati i primi 9,6 ns mentre alla sera sono stati sufficienti 4,38 ns; probabilmente ciò è dovuto alla maggiore evaporazione d'acqua del terreno nel corso delle ore più calde della giornata.

Per eliminare il rumore continuo presente in tutte le tracce, si è applicato un background removal in direzione orizzontale.

Si è applicato inoltre un filtro passa banda nel dominio del tempo, eliminando le frequenze registrate minori di 150 MHz e maggiori di 250 MHz, ed inoltre è stata applicata una sottrazione della media (dewow) all'interno di una finestra di 5 ns.

Inoltre prima del guadagno si è eseguita la media di un certo numero di tracce (subtracting average) di cui una è stata presa come esempio (0,48 x 1,20 cm).

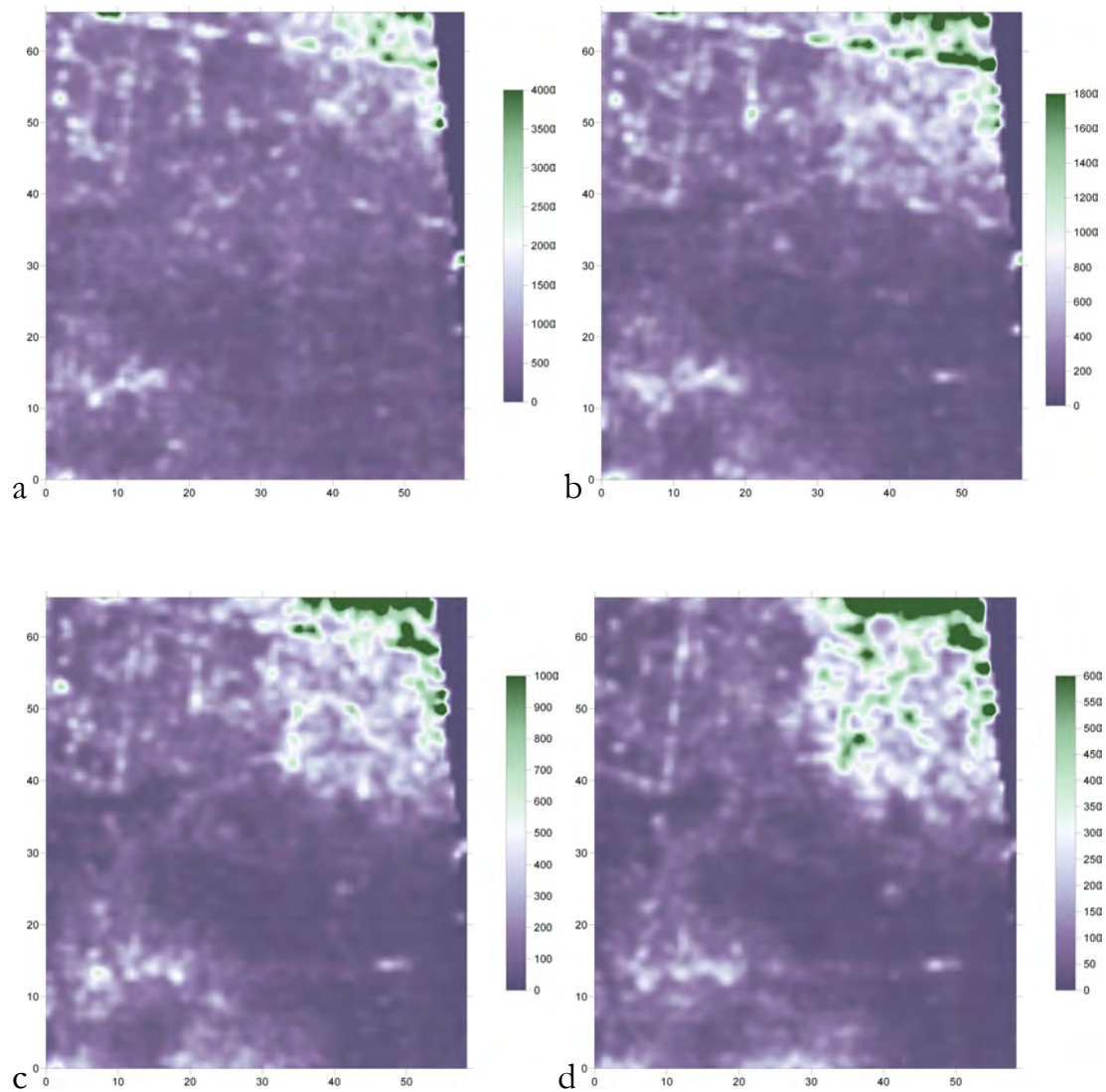
Per un guadagno più puntuale si è scelto il "gain function", realizzato per poter osservare eventuali riflessioni provenienti da zone più profonde le cui ampiezze risultano fortemente attenuate per fenomeni di assorbimento.

Inoltre per comprimere la diffrazione delle iperboli e di focalizzarne il vertice, abbiamo migrato i dati (diffraction stack), filtrando ad una velocità delle onde elettromagnetiche di 0,08 m/ns (osservata dall'analisi delle iperboli nel radargramma) su 10 tracce. Infine visto che i profili erano bidirezionali quelli "pari" sono stati flippati lungo l'asse X.

I dati elaborati nel dominio bidimensionale sono stati interpolati (con una griglia di 2 x 2 m) per ottenere un volume da cui estrarre le sezioni isocrone

(o timeslices), in modo da avere una visione d'insieme della profondità investigata. Di 2,3 m di profondità abbiamo ottenuto 15 sezioni, una ogni 0,16 m.

Alcune delle time-slices importate sul Surfer 8 utilizzando il Kriging method, sono visibili nelle seguenti figure:



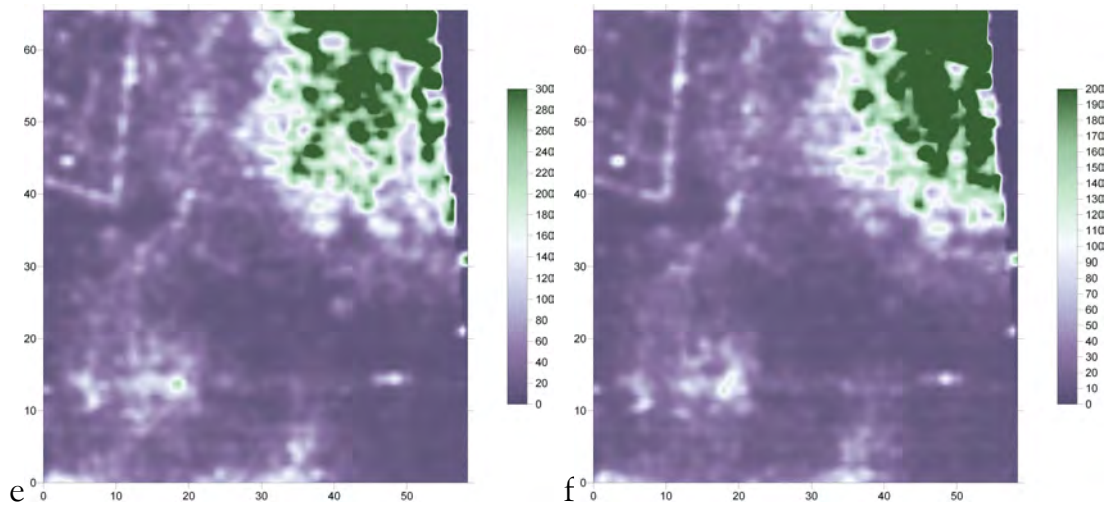


Fig 6.5 a, b, c, d: time slices a differenti profondità. Dall'alto:  $z = -0,48$  m,  $z = -0,64$  m,  $z = -0,80$  m,  $z = -0,96$  m,  $z = -1,12$  m,  $z = -1,28$  m. Nella legenda ci sono le ampiezze del segnale riflesso. Si osserva in alto a sinistra la struttura con i vari ambienti e sempre in alto ma a destra il presunto bedrock.

### 6.3 Analisi e rappresentazione dei dati con la realtà diversa

Quest'area presenta nella parte Nord-Ovest delle anomalie immediatamente riconoscibili come muri che iniziano ad una profondità di circa  $-0,5$  m e il cui segnale diventa sempre più debole sino a scomparire del tutto a  $-1,80$  m. Nella parte Nord-Est è invece ben visibile una forte anomalia interpretata come il bedrock.

In passato, in precedenti lavori, per visualizzare nel modo più chiaro possibile le anomalie presenti in questo set di dati è stata creata una matrice 3D dalla quale poi è stata estrapolato un grafico di isosuperfici (Stocco, 2010) (Fig. 6.6). Il risultato come è noto non è molto chiaro a causa della dispersione del segnale per la presenza in zona di una discarica.

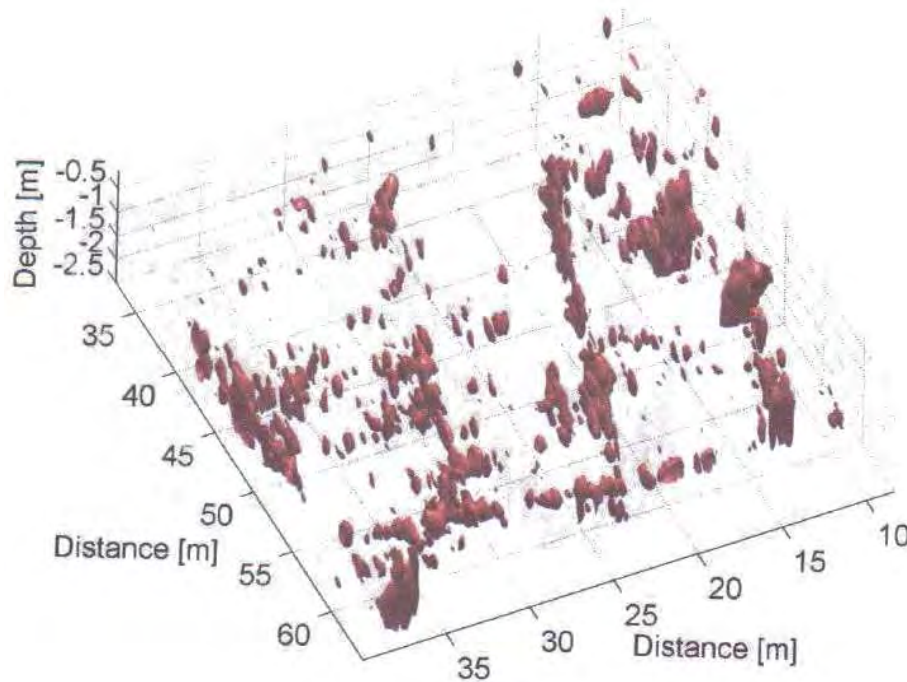


Fig 6.6: Isosuperfici dell'area indagata di Pollentia (da Stocco, 2010)

In questo lavoro come detto nel Capitolo 4 si è voluta eseguire una rappresentazione tridimensionale digitale delle anomalie considerate come vere e proprie strutture.

Partendo anche in questo caso da una matrice 3D in formato ASCII, in cui le quattro colonne non sono altro che i valori x y z e ampiezza del segnale, la matrice è stata inserita come input nel software R2vrml. Considerando che il R2vrml è scritto mediante linguaggio php, si rende necessario ogni volta modificare la funzione sorgente, in modo da adattare le nostre esigenze al set di dati immesso: per esempio le coordinate delle Viewpoints iniziali, la posizione della struttura rispetto al punto zero, la grandezza dei cubi che rappresentano le anomalie, il colore, la soglia delle ampiezze, etc.

A causa della dispersione del segnale, ai vari piani in cui si è diviso il sottosuolo (in questo caso 7, ognuno dei quali misura 0,32 m) è stato assegnato un valore soglia dell'ampiezza del segnale differente:

Soglia 1: 550	Soglia 1: 420	Soglia 1: 300
Soglia 2: 100	Soglia 2: 80	Soglia 2: 70
Soglia 3: 30	Soglia 3: 20	Soglia 3: 15
Soglia 4: 12	Soglia 4: 10	Soglia 4: 5
Soglia 5: 15	Soglia 5: 11	Soglia 5: 7
Soglia 6: 17	Soglia 6: 15	Soglia 6: 10
Soglia 7: 17	Soglia 6: 15	Soglia 6: 10

Tali valori sono stati calcolati osservando i valori soglia nelle singole time-slices. Il software R2vrmf prenderà tutti i valori compresi all'interno della soglia assegnata con trasparenza differente e restituirà in output un file formato .wrl che necessita del browser web per funzionare e l'interfaccia grafica di Cortona 3D Viewer per interagire con l'utente (e anche il plugin per leggere il vrmf). La profondità è stata esagerata di un fattore pari a 4 per poter apprezzarne meglio l'insieme. Nell'Allegato 2 è possibile vedere i render realistici di una delle tante navigazioni possibili all'interno della struttura investigata, un esempio lo si può osservare nella figura 6.7

Nella parte in alto a sinistra dove si notano delle strutture regolari con muri ben definiti e numerose stanze è stato eseguito uno zoom esemplificativo al quale si può accedere attraverso gli "hancor" del file "zoom.wrl".

In questo caso anche il colore di ogni singolo piano in cui è stato diviso il sottosuolo ha una colorazione differente e la trasparenza varia a seconda dei valori dell'ampiezza secondo la tabella seguente (dal listato php):

```
if ($resist > $sogliaminima && $resist <= 1900) {$indice=0;}
elseif ($resist > 1900 && $resist <= 3000) {$indice=0;}
elseif ($resist > 3000 && $resist <= 4400) {$indice=1;}
elseif ($resist > 4400 && $resist <= 6000) {$indice=2;}
```

```
elseif ($resist > 6000 && $resist <= 9000) {$indice=4;}
elseif ($resist > 9000 && $resist <= 16000) {$indice=5;}
elseif ($resist > 16000) {$indice=6;}
```

e i valori di trasparenza in funzione dell'indice sono:

```
$trasparenza[0]=" 1 ";
$trasparenza[1]=" 0.9 ";
$trasparenza[2]=" 0.8 ";
$trasparenza[3]=" 0.6 ";
$trasparenza[4]=" 0.4 ";
$trasparenza[5]=" 0.2 ";
$trasparenza[6]=" 0 ";
```

Questo per evidenziare meglio la struttura studiata. L'asse z nel file zoom.wrl è stato esagerato di un fattore 3,125.

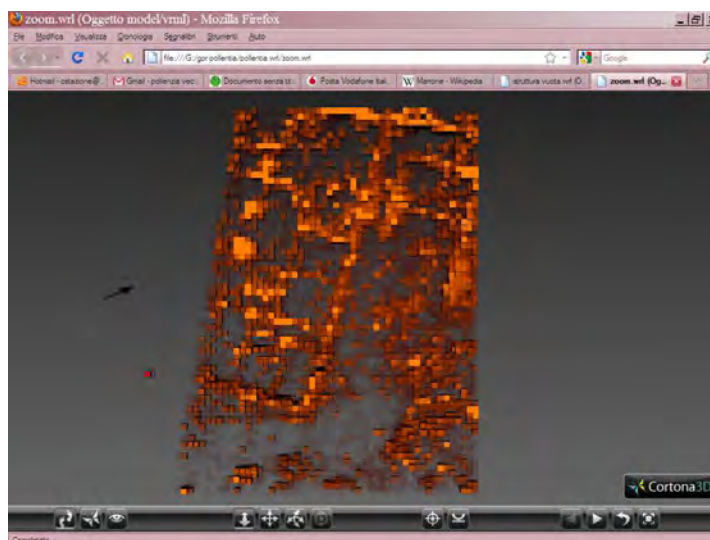


Fig 6.7: Zoom della zona in alto a destra del file precedente.  
Si notano meglio la forma e le dimensioni delle stanze

Nella figura 6.7 si possono facilmente riconoscere strutture murarie e ambienti le cui direzioni principali sono identiche a quelle del resto della città

di Pollentia. Ciò induce a pensare a strutture ancora legate a Pollentia e che la città potrebbe estendersi verso sud e almeno ad oltre 300 m dal Capitolium. Questo risultato è di notevole interesse archeologico e attualmente l'amministrazione comunale di Alcudia sta valutando l'opportunità di estendere la prospezione non solo tra le strutture ritrovate (300x200 m) ma anche a Sud di quest'ultima individuata per potere eventualmente riconoscere se si tratta di strutture portuali.

Poiché da oltre 30 anni si avvicendano gli scavi diventa molto oneroso poter eseguire lo scavo sia come costi che come tempi e la ricostruzione dell'interno della città pertanto potrà essere affidata al nostro gruppo di ricerca del Dipartimento per poter realizzare un museo digitale.



### 7. 3° SITO CAMPIONE: BASTIONE DI S. CATERINA, CAGLIARI



Fig 7.1: Ubicazione del Bastione di S. Caterina

Il sito campione, denominato Bastione di Santa Caterina a Cagliari, si trova al di sopra del Bastione di Sant Remy. Adesso si accede partendo dalla terrazza di Umberto I, dopo una scalinata.

Dopo la distruzione del villaggio di Santa Igia o Gilla (borgo che dal IX secolo al 1258 fu la capitale del giudicato di Cagliari) i Pisani trasferirono l'abitato e gli edifici amministrativi nel "Castello di Castro", l'attuale quartiere storico cagliaritano di Castello, dove l'unica fontana allora disponibile alle esigenze idriche cittadine era sita nell'attuale Piazza Indipendenza. Successivamente alla conquista spagnola e alla disposizione regia che permise ai Sardi di trattenersi nel castello anche oltre il tramonto, con il relativo trasferimento della popolazione cagliaritana nella rocca, furono date disposizioni per l'edificazione di due nuove fontane. Col nome di "Funtana Bona" infatti fu costruita una fonte ai piedi della "Chiesa degli Angeli" il cui nome fu mutato in Santa Caterina da Siena nel 1641 in onore della santa senese. Di tale pozzo però non si conoscono le origini, né la collocazione, poiché nei documenti ufficiali non è mai stata menzionata se non quando le è stato cambiato il nome nel 1641.

Il bastione di Santa Caterina, fu costruito di fronte alla chiesa e all'omonimo convento di monache domenicane, e viene citato per la prima volta in un documento del 1830, in epoca sabauda, menzionando una macchina con cui era possibile attingere, dal pozzo ivi presente, l'acqua necessaria all'irrigazione degli alberi della zona. I lavori terminati nell'agosto 1831 furono realizzati dall'ufficiale del Genio militare Ignazio Porro, che procedette alla pulizia del pozzo e alla costruzione di un serbatoio di 4 metri cubi. Nel 1833 venne proposta la costruzione di una seconda cisterna nel bastione di Santa Caterina, ma tale richiesta non venne approvata. Assieme al pozzo di Santa Caterina, nel periodo, vennero realizzate, per esigenze d'irrigazione, 6 vasche nel terrapieno e una vasca nella salita di San Lorenzo. Nel 1834 il vicerè autorizzò il consiglio ad incanalare l'acqua della fontana di Santa Lucia in Castello, sita nell'attuale slargo tra via Martini e via Canelles e ormai inutilizzata, fino alla cisterna de "s'aziada di Federico de sa Noce" ovvero al

serbatoio del bastione di Santa Caterina. Sembra invece essere il 1875 l'anno del completamento finale del bastioncino; il progetto originario riporta anche una vista prospettica del suolo da cui si deduce che all'interno di esso non vi è altro che materiale di riempimento. Non è però affatto chiara la collocazione della cisterna o del pozzo da cui si attingeva l'acqua nel 1830, né si comprende la sua forma, e non si conosce nemmeno dove fosse dislocata la chiesa di Santa Caterina da cui prende il nome.

Al di sotto del bastione si stende la Passeggiata Coperta (vedi Fig. 7.2), utilizzata in vario modo: come sala dei banchetti dopo la sua inaugurazione ai primi del 1900, come infermeria durante la Prima Guerra mondiale, come rifugio per gli sfollati per la Seconda. Oggi dopo un accurato restauro, è sede culturale, in particolare per mostre artistiche.

Gli studi eseguiti sul bastioncino in questione iniziarono per identificare l'origine della perdita idrica che nel 2007 aveva causato delle infiltrazioni d'acqua che stavano danneggiando la Passeggiata Coperta sottostante e quindi trovare le strutture della Chiesa e della Fontana Bona.

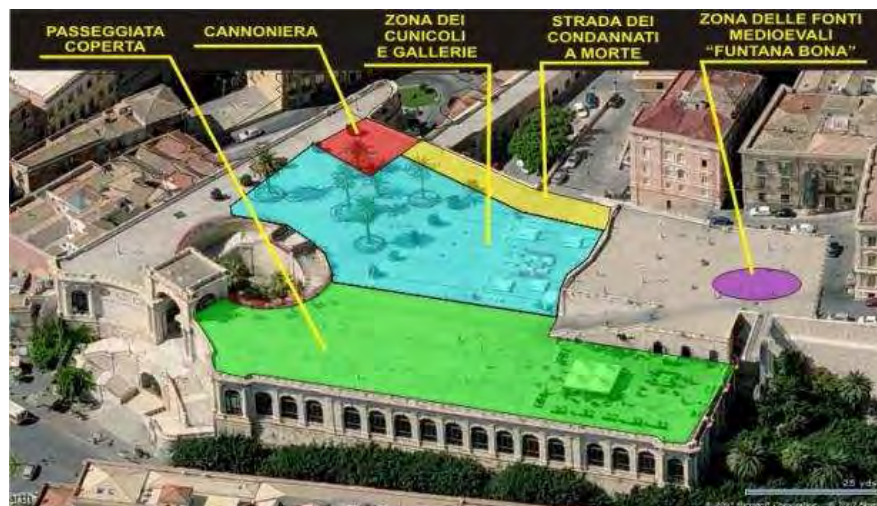


Fig 7.2: Individuazione delle zone in cui possono essere suddivisi il Bastione di S. Remy e S. Caterina

## 7.1 Dati a disposizione

Il Bastione di Santa Caterina può essere schematicamente rappresentato come un parallelepipedo di dimensioni 24x19 m cui possono essere accessibili quattro facce. Il rilievo è stato eseguito in otto direzioni distinte utilizzando l'antenna da 100 MHz con profili orizzontali e verticali lungo le tre facce verticali e profili orizzontali sulla faccia superficiale. Un punto del sottosuolo perciò è stato osservato fino a otto volte in diverse direzioni di polarizzazione. Trattandosi di un caso particolare abbiamo voluto prendere in esame solo le prospezioni eseguite sulla faccia superficiale.

- Propezioni lungo profili distanti 125 cm, in due direzioni ortogonali per complessivi metri 1510, utilizzando un'antenna da 100 MHz ;
- Prospezioni lungo profili distanti 100 cm, in due direzione ortogonali per complessivi metri 853 utilizzando un'antenna da 400 MHz

Nella figura seguente è mostrata l'ubicazione delle linee lungo le quali è stato eseguito il rilievo georadar.

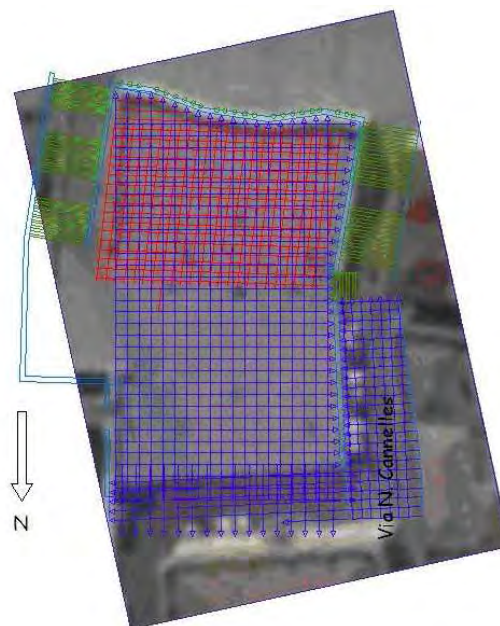
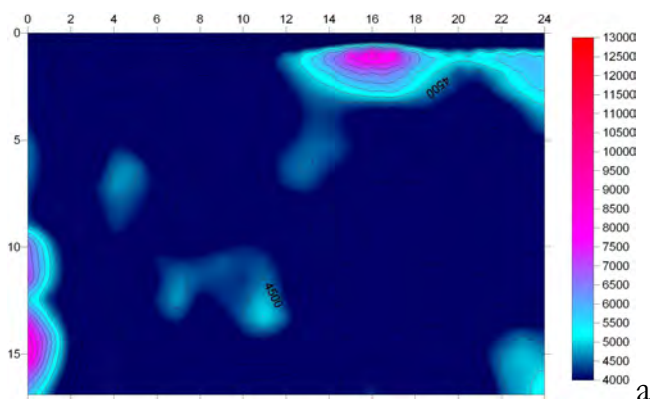


Fig. 7.3: GPR, profili trasversali e longitudinali, in rosso antenna da 400 MHz, in blu antenna da 100 MHz

Per l'intero rilievo è stato utilizzato l'apparato SIR 3 della GSSI (USA) in dotazione alla sezione Geofisica Applicata del Dipartimento di Ingegneria del Territorio, con le relative antenne da 100 MHz e da 400 MHz. Tutti i dati rilevati sono stati elaborati mediante il software ReflexW® (Sandmeier, 2010) secondo una sequenza 2D standard (Yilmaz, 1987) che comprende: normalizzazione della scala orizzontale ( $dx = 0,050$  m), modifica manuale dell'amplificazione, analisi spettrale, filtri passa-basso, rimozione del background e migrazione. Dalle iperboli di diffrazione e dall'analisi con metodologia WARR ad antenna trasmittente fissa e ricevente mobile (offset variabili di 25 cm fino ad un totale di 13 m), sono state valutate le velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nella parte immediatamente sottostante la pavimentazione del bastioncino (0,08 m/ns), valore compatibile con il tipo di materiale incoerente utilizzato per il riempimento del bastioncino (Moorman et al., 2001) di matrice calcarea.

Per ottenere una visualizzazione dettagliata del sottosuolo i dati georadar sono stati sottoposti a un processing per ottenerne delle slices. I dati complessivi sono riportati nelle figure da 7.4a sino a 7.5h, che riportano l'ampiezza del segnale riflesso, in mappe ricavate alle profondità da -1,14 a -5,55 metri, una ogni metro per l'antenna da 400 MHz e mappe da 1 a 7 m di profondità per l'antenna da 100 MHz, una ogni 50 cm.



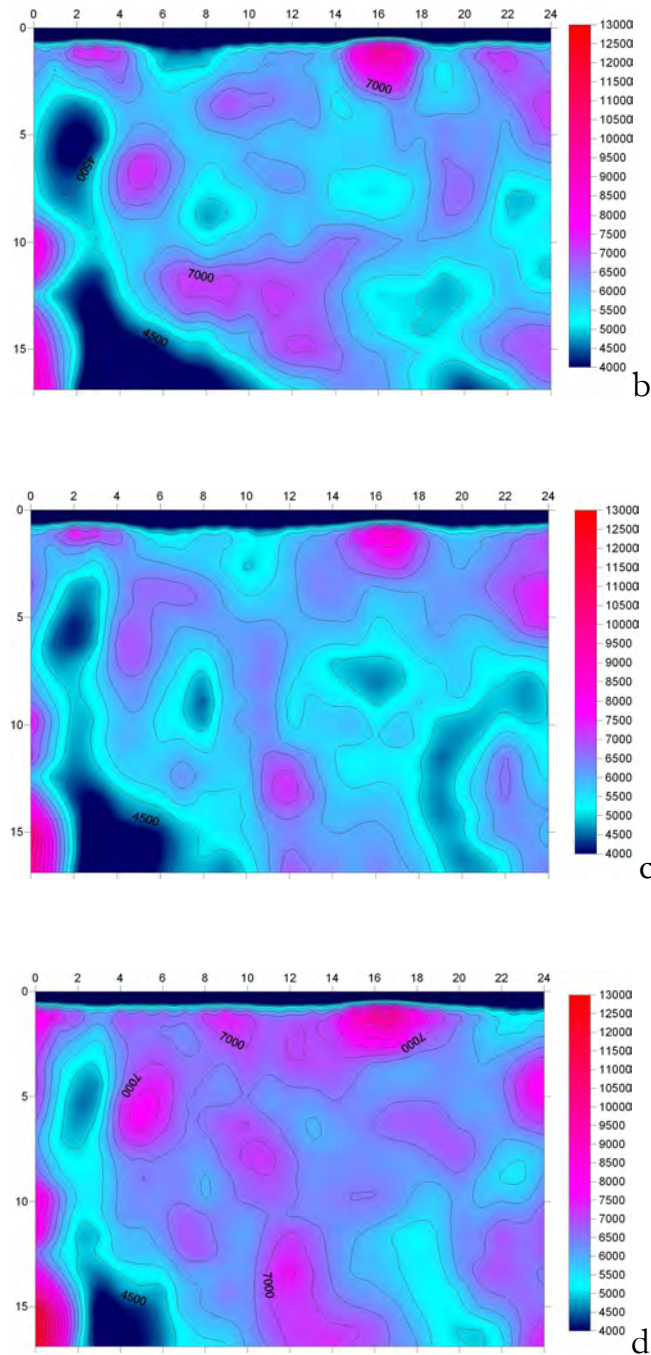
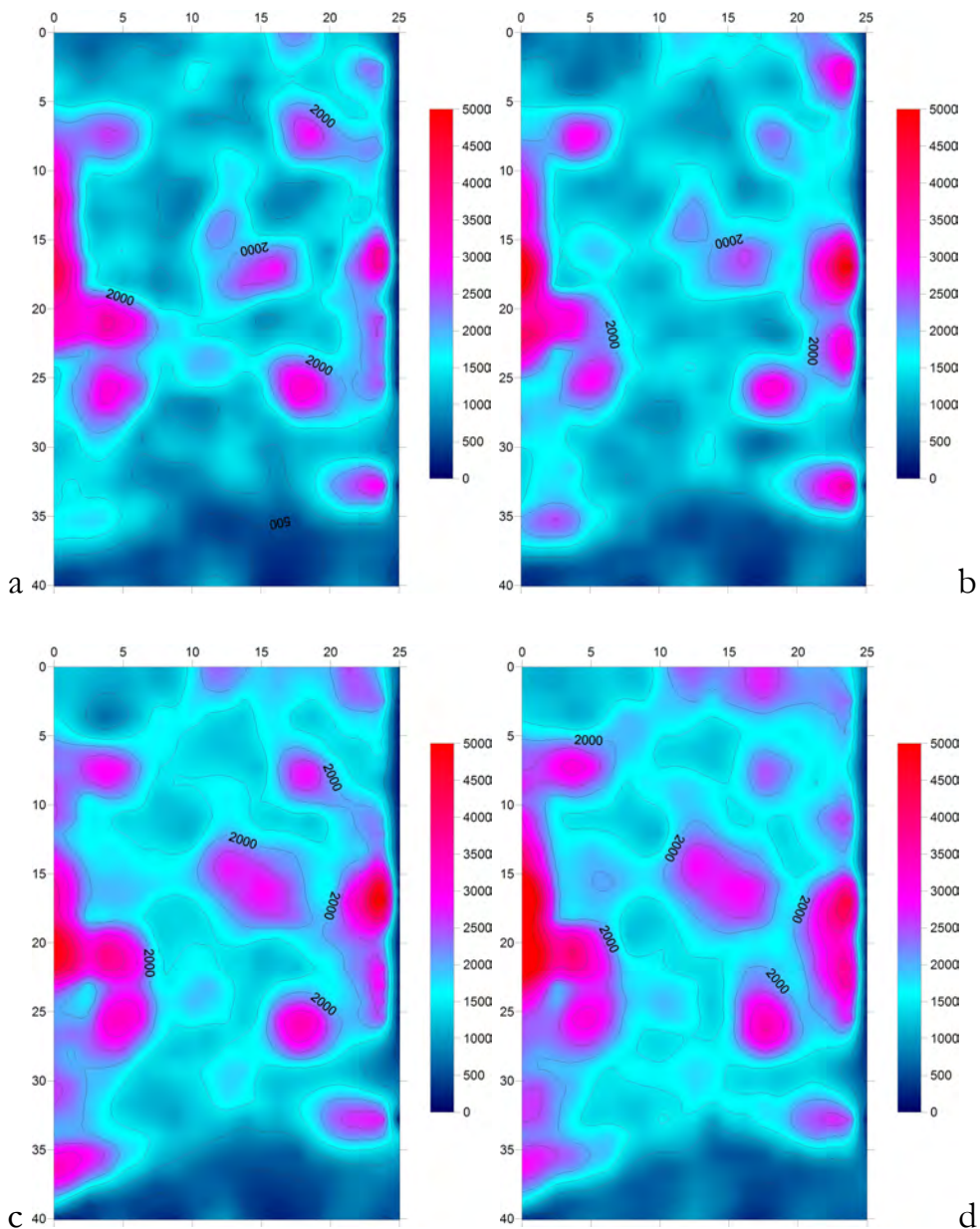


Fig 7.4 a, b, c, d: Time slices a differenti profondità per l'antenna a 400 MHz. Dall'alto:  $z = -1,14$  m,  $z = -2,28$  m,  $z = -3,42$  m,  $z = -4,56$  m. Nella legenda ci sono le ampiezze delle onde.

Le sezioni orizzontali riportate nelle figure mostrano un ambiente sostanzialmente disturbato nella parte superficiale per la presenza probabile di tubazioni e cavidotti elettrici, rete elettrosaldada e dal riempimento non uniforme. Nelle mappe oltre i 1,5 m di profondità si nota un'anomalia

piuttosto intensa, proprio sul bordo del rilevamento verso Est, e probabilmente dovuta al muro pisano recentemente evidenziato nella passeggiata coperta.



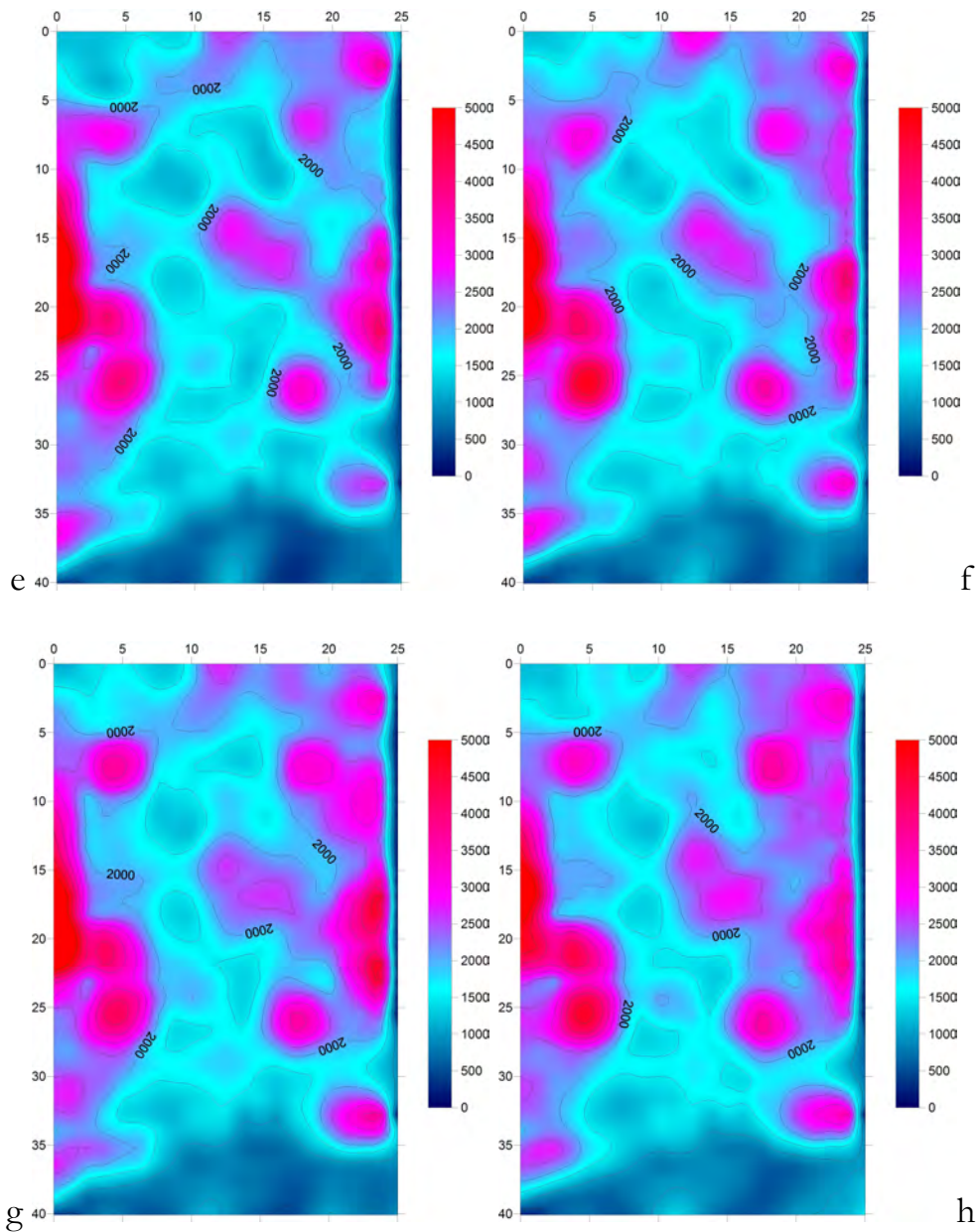


Fig 7.5 a, b, c, d, e, f, g, h: Mappe delle ampiezze del segnale riflesso a differenti profondità per l'antenna a 100 MHz. Dall'alto:  $z = -1$  m,  $z = -2$  m,  $z = -3$  m,  $z = -4$  m,  $z = -5$  m,  $z = -6$  m,  $z = -7$  m,  $z = -8$  m. In legenda le ampiezze delle onde del segnale riflesso.

Le figure di cui sopra riportano le mappe delle ampiezze del segnale riflesso alla frequenza di 100 MHz ottenute dall'interpolazione dei dati ottenuti e trattati da una griglia di linee distanti 50 centimetri.



## 7.2 Analisi e rappresentazione dei dati in realtà diversa

Da tutte le mappe presentate si coglie la presenza di una serie di ambienti a pianta e sezione circa quadrate di lato 4-5 metri spesso adiacenti, con un lato in comune. Quasi sempre tra un ambiente e l'altro sembra esserci una soluzione di continuità. Come già indicato dalle time slices precedenti, le anomalie si spingono sino ad oltre 8 metri di profondità (vedi le mappe dell'antenna da 100 MHz), andando anche molto al di sotto del piano di calpestio del bastione di S. Remy.

Per ottenere una rappresentazione tridimensionale digitale delle anomalie si è applicata la metodologia precedentemente descritta nel Capitolo 6.

Le rappresentazioni per le due antenne (400 e 100 MHz) sono state confrontate e organizzate anche in un unico file di output come si può vedere dalla figura 7.7. Inoltre a differenza del caso di Pollentia (aperta campagna) in questo caso i dati sono stati inseriti nel contesto reale del bastione di Santa Caterina. Per poter avere una buona prospettiva dell'insieme, la profondità è stata sovradimensionata di 2,5 volte.

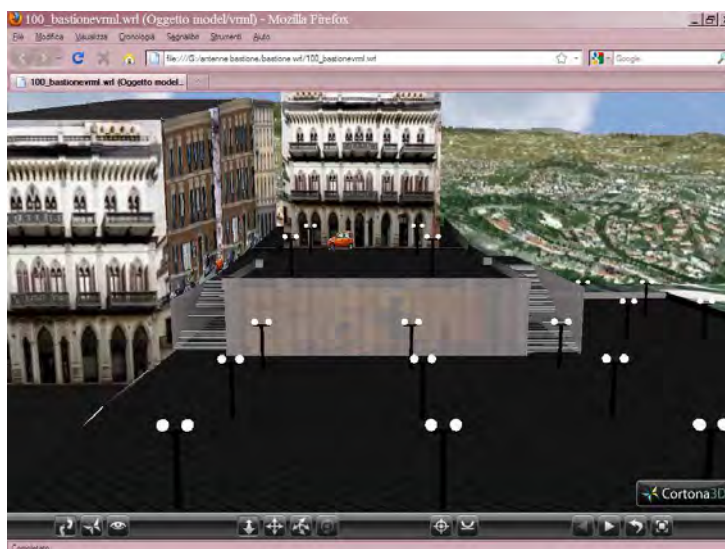


Fig 7.6: Vista di insieme del bastione di S. Caterina così come lo si può vedere nel file di output \*.wrl

All'interno di ogni file \*.wrl sono anche presenti le “ancore” (così come in Pollentia) con le quali è possibile passare da un file all'altro, senza soluzione di continuità e di visualizzazione. La rappresentazione finale che è stata ottenuta mostra la “struttura” come si presenta nel sottosuolo, in una raffigurazione evidentemente molto più efficace di quanto si possa vedere attraverso le time slices, o attraverso le isosuperfici, e anche assai migliore di quella di una classica rappresentazione 3D.

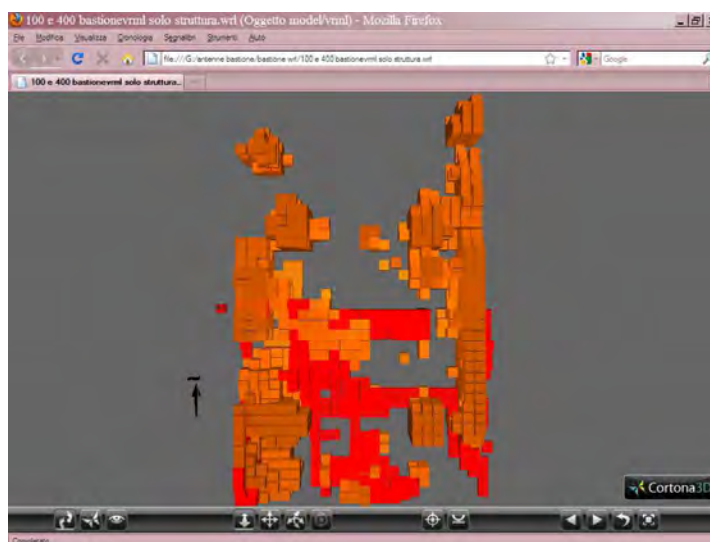


Fig 7.7: Vista in pianta delle anomalie dell'antenna da 100 MHz (in beige) confrontate con quelle dell'antenna da 400 MHz (in rosso); si noti come in questo caso sono stati eliminati tutti gli elementi di disturbo per poter “visitare” meglio la struttura

Si rimanda alla navigazione dei vari files di output generati presenti nel cd accluso, e alle immagini presenti nell'Allegato 3.

Gli stessi dati utilizzati per la ricostruzione vrlm sono stati trattati con il sistema Radan 6 (GSSI). Sono state realizzate oltre 500 time slices che sono state raggruppate in un formato \*.avi. Con tale sistema è possibile spogliare nelle tre direzioni il volume denso di dati centimetro per centimetro come una sorta di “scavo elettronico”.

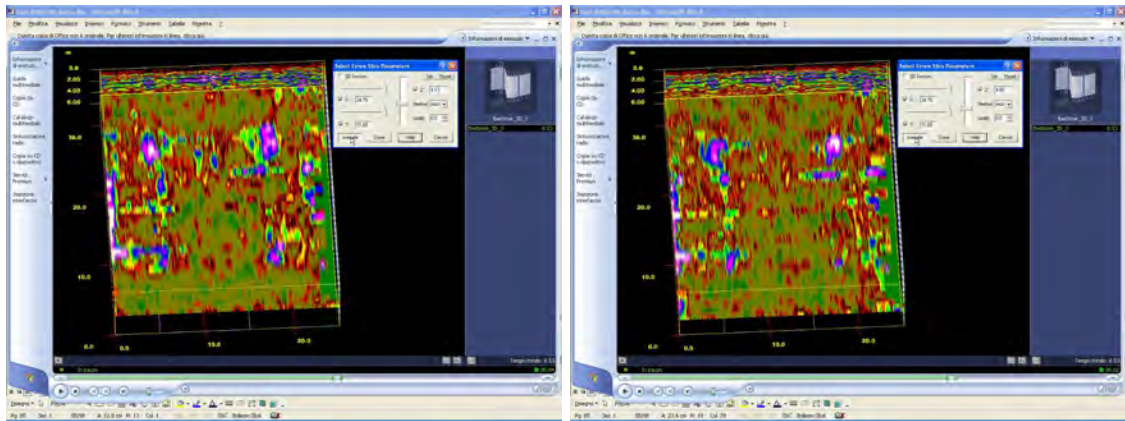


Fig. 7.8: Due immagini tratte dal filmato dello “scavo elettronico” alle profondità di 4,13 m e 4,85 m

## 8. CONCLUSIONI

La prospezione geofisica, nei diversi campi di applicazione, costituisce la fase propedeutica alle azioni dirette, quali lo scavo archeologico.

La grande quantità di dati che offre la prospezione geofisica può permettere la fruizione immediata della presenza di quei beni, che saranno successivamente scavati, attraverso una loro musealizzazione in “realtà diversa” cioè digitale. Al contrario della ricostruzione di una realtà virtuale, infatti la ricostruzione digitale offre una visualizzazione delle strutture, attraverso gli effetti della loro presenza nel sottosuolo, senza imporre ipotesi sullo stato originario delle strutture.

Occorre però che la quantità di dati sia elevata al fine di descrivere con dettaglio le strutture archeologiche e pertanto i metodi che vanno applicati devono essere speditivi, risolutivi e capaci di penetrare in profondità per alcuni metri.

Nel presente lavoro sono state effettuate inoltre ricerche sulla possibilità di una realistica visualizzazione a fini museali con la possibilità di “entrare” all’interno del set di dati come se si stesse viaggiando/camminando all’interno delle strutture archeologiche già scavate.

Il sistema più idoneo tra quelli studiati per una rappresentazione siffatta è risultato essere quella del R2vrml che utilizza il sistema composto dal plug-in di Internet e il Cortona della Parallel Graphics. Tale sistema può essere agevolmente allocato in un totem o in un semplice PC da collocare nei pressi di un sito archeologico. Ulteriori passi però potrebbero essere prodotti:

- 1) tenendo conto che l'informazione geofisica, in realtà molto complessa e sofisticata non viene utilizzata completamente, si potrebbe, dalla superficie, riconoscere il tipo di strutture eseguendo ad esempio un'analisi spettrale dell'intero set di dati e quindi rivestire le strutture stesse con il materiale riconosciuto dall'analisi;
- 2) eseguire un collegamento con le strutture visibili in un unicum digitale che comprende il rilievo geofisico per esempio con rilievi laser scanner.

L'organizzazione dei dati in particolare nei casi esaminati, ha consentito di proporre molto semplicemente lo "scavo elettronico" del volume indagato. Questo rappresenta un utile strumento sia per la fase di scavo che per la fase di consolidamento e restauro delle opere.

Infine è da rilevare che l'analisi in time laps (cioè con azioni ripetute nel tempo) e le ricostruzioni digitali conseguenti possono costituire un metodo di controllo dell'efficacia e dell'eventuale consolidamento delle strutture esistenti.

Cd allegato alla tesi, contenuto:

- ✓ filmato a volo d'uccello per il sito di Mothia (strada sommersa e Stagno di Marsala) ottenuto direttamente col Blender;
- ✓ simulazione della navigazione all'interno del software R2vrml per i siti Pollentia e Bastione di S. Caterina (antenna da 100 MHz, 400 Mhz e confronto tra le due antenne);
- ✓ filmato del così detto "scavo elettronico" per il sito del Bastione di S. Caterina.

---

**BIBLIOGRAFIA**

Annan A.P. (2001): Ground penetrating radar workshop notes. S.S Inc.;

Antinucci F. (2007): Musei virtuali. Come non fare innovazione tecnologica. Roma Bari 2007, Ed La terza;

Archie G.E. (1942): The electrical resistivity loss as an aid in determining some reservoir characteristics. 1942, Petroleum Trans AIME 146, pagg 54-62;

Astier J.L. (1971): Geophysique Appliquée à l'hydrogéologie. Masson & Cie;

Barbano M.S., Azzaro R., Camassi R., Cecic I., D'Amico S., Mostaccio A., Scarfi L., Tertulliani A., Tuvè T.(2009): The L'Aquila 2009 earthquake: an application of the European macroseismic scale to the damage survey. GNGTS Acts;

Berard B. A., Maillol J. M. (2008): Common and multi-offset ground-penetrating radar study of a roman villa, Tourega, Portugal. Archaeological Prospection 15 (1), pagg. 1-31;

Campbell R. B., Bower C. A., Richards L. A. (1948): Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. 1948, Soil Sci. Soc. Proc. pagg. 66-69;

Campedelli A., Boschi F., Curci A., Silani M. (2007): Sul campo: il municipium romano di Burnum (Dris, Croatia). Groma 1, Archeologia tra Piceno, Dalmazia ed Epiro, Par. 5.02;

Cardarelli E., Godio A., Morelli G., Sambuelli L., Santarato G., Socco L. V. (2002): Integrated geophysical surveys to investigate the Scarsella vault of St John's Baptistery in Florence. The Leading Edge, 21, 467-470;

- 
- Cargill R. R. (2009): Qumran through (Real) Time: A Virtual Reconstruction of Qumran and the Dead Sea Scrolls. Bible in Technology 1, Piscataway, NJ: Gorgias Press;
- Carrara E., Iacobucci F., Pinna E., and Rapolla A. (1973): Gravity and magnetic survey of the Campanian volcanic area, South Italy. Boll. Geof. Teor. Appl., 15 (57);
- Casanova Alig R. (2003): Electrostatics. Encyclopedia of applied physics. New York, Wiley;
- Cassioli D., Marchetti D., Olini F., Orlandi O., Seri R., Spina S. (2009): Esempi di applicazioni GPR (Ground Penetrating Radar) su beni architettonici e grandi complessi di edilizia civile e industriale nel centro Italia. 2009, pagg 2-3;
- Coiana M., Ranieri G. 2000: Geophysics as a tool for virtual archaeology- Proceedings of XXV EGS General Assembly.-Nice 25-29 april;
- Colman E. A., Hendrix T. M. (1949): The fiberglas electrical soil-moisture instrument. Soil Science n. 67;
- Conte A. (2004): Il radar penetrante (GPR). Artemis diagnostica edilizia. pagg 3-4;
- Cucarzi M. (1997): Rilevamento Geoarcheologico delle città medioevali russe, una ricerca con metodi non distruttivi alla scoperta delle origini urbane della Russia. Fondazione Lerici, pagg. 280, 281;
- David M., Pellegrino A. (2007-2009): Ostia Antica (Roma), ricerche fuori porta marina. pag 4;
- Dolce M., Moroni C. (2007): Le procedure VC e VM per la valutazione della vulnerabilità e del rischio sismico degli edifici pubblici. Congresso Anidis 10-14 giugno; Pisa, IT
- Ferrara E. (2009): Lezioni di Magnetismo Applicato nel settore dei Beni Culturali. Anno Accademico 2009/2010, Appunti parte VII, pag 57;

- Forte M., Beltrami R. (2000): A proposito di Virtual Archaeology: disordini, interazioni cognitive e virtualità. *Archeologia e Calcolatori* n. XI, Edizioni All'Insegna del Giglio;
- Goodman D., Nishimura Y. (1993): A ground radar view of Japanese burial mounds. *Antiquity* 67, 349-354;
- Goodman, D., Nishimura, Y., Rogers, J.D. (1995): GPR Time-slices in archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 2: pagg 85-89;
- Goodman D., Schneider K., Piro S., Nishimura Y. Pantel A.G., 2007. Ground Penetrating Radar Advances in Subsurfaces Imaging for Archaeology. In “*Remote Sensing in Archaeology*”, Ed. J. Wiseman and F. El-Baz. Chapter 15, pagg 367-386.
- Gottarelli A. (1996): Museografia e informatica: la ricostruzione virtuale della tomba menfita del generale Horemheb. *Archeologia e Calcolatori* n. VII, Edizioni All'Insegna del Giglio;
- Hoepli (2010): Grande Dizionario italiano di A. Gabrielli. Dizionario della lingua italiana. Ed. Hoepli;
- Jackson J. D (2003): Electrodynamics. Classical encyclopedia of applied physics. New York, Wiley;
- Jol H. M. (2009): Ground penetrating radar theory and applications. Ed. Elsevier;
- Leckebusch J. (2003): Ground-penetrating Radar: a modern three-dimensional prospection method. *Archaeological. Prospection*. 10, 213–240;
- Loddo F. (2010): Metodi elettrici in ambiente marino di bassa profondità. Applicazioni alla ricerca archeologica. Tesi di dottorato in Ingegneria del Territorio, Università degli studi Cagliari. pagg 49-51, 107-108;
- Loke M. H., Lane J.W. 2004. Inversione of data from electrical resistivity imaging surveys in water covered areas. *Exploration Geophysics*, 35, 266-271
- Marchisio M., Ranieri G. (2000): On the economic value of a geophysical survey on an archaeological site. *European journal of environmental and engineering geophysics*. vol. 5, pp. 91-110 ISSN: 1359-8155.



- Maxwell J. C. (1861): On physical lines of force. The London, Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science 1, 2. pagg: 161-175, 281-291, 338-348;
- Maxwell J. C. (1873): Treatise on electricity and magnetism. Oxford;
- Meyer C., Ullrich B., Barlieb C. (2004): Advances in combined geophysical prospection and visualization. 34th International Symposium of Archaeometry, Zaragoza, Spain;
- Meyer C., Ullrich B., Barlieb C. (2005): Wallflowers? Cute little projects – questions and solutions in Munigua (Spain). 6th International Conference on Archaeological Prospection, Rome;
- Moorman B. J., Last W. M., Smol J. P. (2001): Ground penetrating radar applications in paleolimnology. Tracking environmental change using lake sediments. Physical and chemical techniques. Boston, Kluwer Academic Publisher 2, pagg 23-47;
- Mucciarelli M. (2006): Geofisica applicata per gli Archeologi. Appunti di “Tecniche Automatiche di Rilievo e Rappresentazione” per la Scuola di specializzazione in Archeologia di Potenza: Università degli Studi della Basilicata. pagg 2-4 e 30-31;
- Novo A., Lorenzo H., Rial F. I. and Solla M. (2010): Three-dimensional ground-penetrating radar strategies over an indoor archaeological site: Convent of Santo Domingo (Lugo, Spain). *Archaeological Prospection* 17, 213–222;
- Orlando L. (2007): Georadar data collection, anomaly shape and archaeological interpretation: a case study from central Italy. *Archaeological Prospection* 14 (3), pagg. 213-225;
- Orlando L., Tramonti L. (2007): Water bottom electrical tomography in the river Tiber. 69th EAGE Conference & Exhibition - Workshop Package;
- Pinna G. (2005): Reale o virtuale. *Nuova museologia* n°12, 2005 Rivista semestrale di Museologia Giornale ufficiale dell'Associazione Italiana di Studi Museologici;

---

Piro S., Goodman D., Nishimura D. (2001): The location of Emperor Traiano's Villa (Altopiani di Arcinazzo – Roma) using high-resolution GPR surveys. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* Vol.43, n.1-2, pp. 143-155.

Piro S. (2006): Prospezioni Georadar. I casi della Villa di Traiano ad Arcinazzo e del Santuario di Diana a Nemi. In *Lazio e Sabina 3*, pp 177-182. De Luca Ed. d'Arte, (Roma).

Piro S. (2007): Indagini Georadar nella Domus del Centenario. In "*Pompei. Insula del Centenario. Indagini diagnostiche, geofisiche e analisi archeometriche*". Santoro S. (Ed.), Vol. 1, pp 51-62. ISBN:978-88-7849-0222-2, Bologna, Ante Quem (Italia).

Piro S., Ceraudo G., Zamuner D., 2011. Integrated geophysical and archaeological investigations of Aquinum in Frosinone, Italy. *Archaeological Prospection*, 18: 127-138. DOI: 10.1002/arp409.

Ranieri G. (2009): La Geofisica per l'archeologia. Convegno Geofisica e beni culturali, Cagliari, Atti;

Ranieri G., Loddo F., Godio A., Stocco S., Capizzi P., Messina P., Savini A., Bruno V., Cau M. A., Orfila M. (2009) Reconstruction of archaeological features in mediterranean coastal environment by means of non-invasive techniques and its digital musealization. 37th Annual CAA (Computer Applications to Archaeology) Conference, Williamsburg Virginia, USA;

Ranieri G., Loddo F., Piga C., Trogu A., Manos A., (2008) Analisi tridimensionale non distruttiva del Bastione di Santa Caterina in Cagliari, per l'individuazione di strutture monumentali e di percorsi idrici sotterranei. Atti del V Congresso nazionale di Archeometria. Siracusa, Italia, 26 - 29 Febbraio, 2008.

Reynolds J.M. (1998): An introduction to applied and environmental Geophysics;

Roberts R.L., Daniels, J.J. (1996): Analysis of GPR polarization phenomena. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1, 139–157;

---

Sandmeier K.J. (2010): REFLEXW. 2010, Version 5.5.1. Windows™ XP/Vista - program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Copyright 1997-2010 by K. J. Sandmeier, Zipser Strabe 1, D- 76227 Karlsruhe, Germany, [www.sandmeier-geo.de](http://www.sandmeier-geo.de)

Schaer R (1996): Il museo: tempio della memoria. Torino. pagg 11-16,18-20,31-34,36,48;

Schlumberger (1989): Log Interpretation Charts., Well Science, Houston;

Scollar I., Tabbagh A., Hesse A. and Herzog I. (1990): Archaeological prospecting and remote sensing. Cambridge University Press;

Stocco S. (2010): Acquisition and processing of magnetic and electromagnetic data in near surface geophysics. Tesi di Dottorato in Ingegneria del Territorio dell'Università degli studi di Cagliari, XXII Ciclo;

SYS Soc. Coop. a r. l., società di servizi per l'archeologia (2000): Campagna di indagini archeologiche subacquee nell'area della cosiddetta "strada sommersa di Mothia"., pag 2.

Tullo N., Apilongo A. P (2007): Lago Nero Report 2007, Indagine di Tomografia Elettrica. pag 1;

Ullrich B., Barlieb C., Meyer C. (2005): ZODIAC - Virtuelle Rekonstruktion von Baustrukturen aus Geophysikalischen Daten. Beispiele aus Pompeji und Munigua Interdisziplinäres Kolloquium "Von Handaufmaß bis High Tech II", BTU Cottbus;

Ward S. H. (1990): Resistivity and induced polarization methods: in geotechnical and environmental geophysics. Ward Vol. 1. Ed. Society of Geophysicists;

Yilmaz O. (1987): Seismic data processing, Society of Exploration Geophysicists. Tulsa, USA;

<http://it.wikipedia.org>;

<http://library.thinkquest.org>;

<http://web.tiscali.it/fondazionewhitaker.it>;

<http://www.ingesrl.it>;

<http://www.liceofoscarini.it>;

<http://www.marginalia.it>;

<http://www.php.it>

## ALLEGATO 1

### Alcuni render tratti dal filmato del sito “MOTHIA”



Vista da Ovest: Stagnone di Marsala, isole di S. Maria e a destra Mothia; in rosso l'ubicazione presunta della strada



Vista di Mothia da Sud



Vista dell'area indagata dalla collinetta antistante



Vista dall'alto del Nord-Ovest dell'isola di Mothia



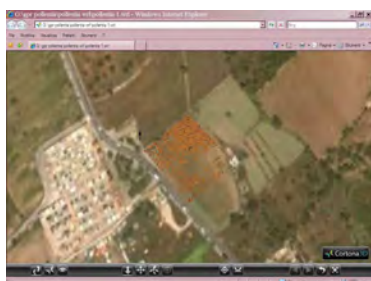
Vista dalla porta Nord di ciò che rimane della strada, anche della parte sotto al fango



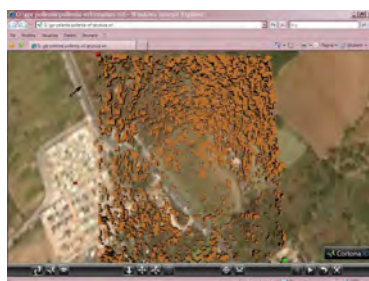
Particolare della parte al di sotto della superficie del mare

## ALLEGATO 2

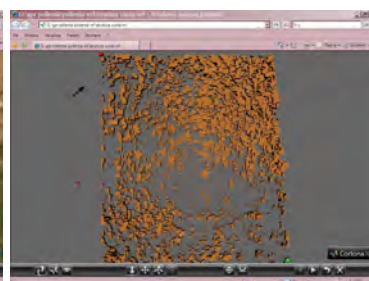
### Alcuni render tratti dal VRML del sito “ POLLENTIA”



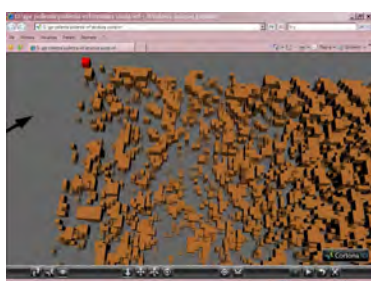
Vista in pianta dell'area investigata con mappa da satellite sottostante



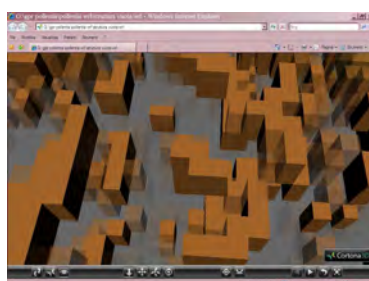
Ingrandimento dell'area e delle anomalie riscontrate, a sinistra il bedrock



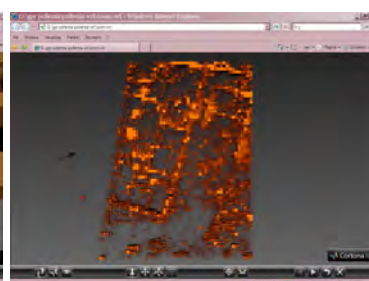
Pianta delle anomalie. Si nota in alto a sinistra una struttura ben definita



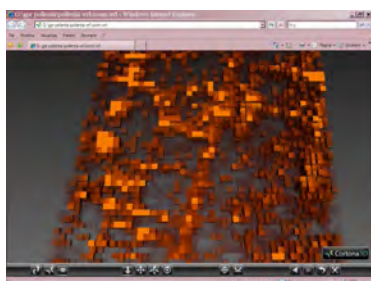
Navigazione del volume indagato



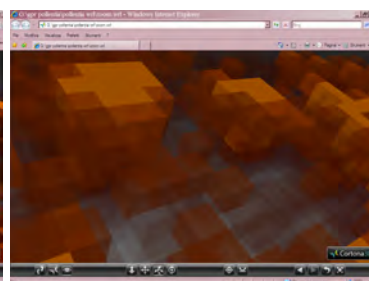
Altro render di una delle possibili navigazioni all'interno del volume



Zoom della parte in alto a sinistra del render precedente



Tre render tratti dalla navigazione all'interno della zona zoomata in cui sono visibili dei muri paralleli a formare stanze e/o corridoi

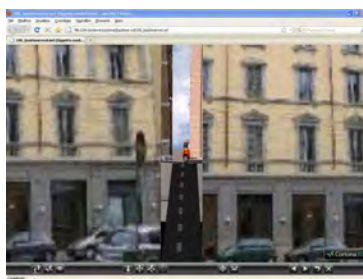


### ALLEGATO 3

Alcuni render tratti dal VRML del sito “BASTIONE DI S. CATERINA”



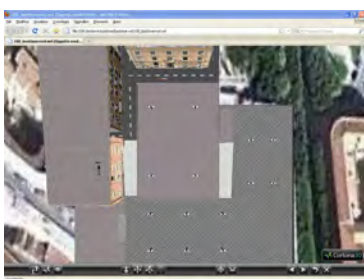
Vista da Sud



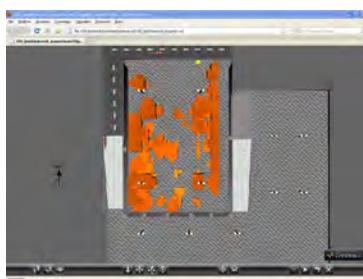
Vista da Ovest



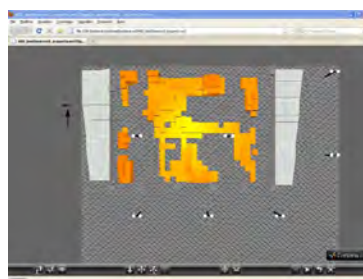
Vista da Est



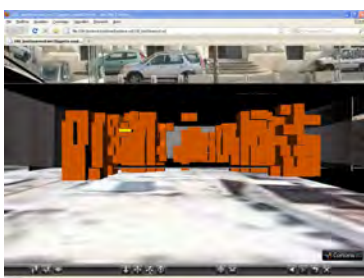
Vista in pianta



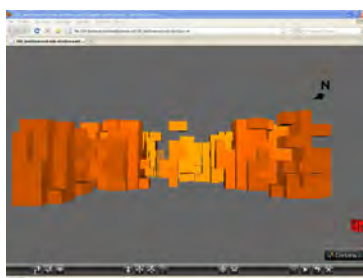
Vista in pianta con anomalie antenna da 100 MHz



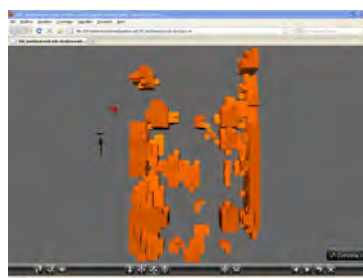
Vista in pianta con anomalie antenna da 400 MHz



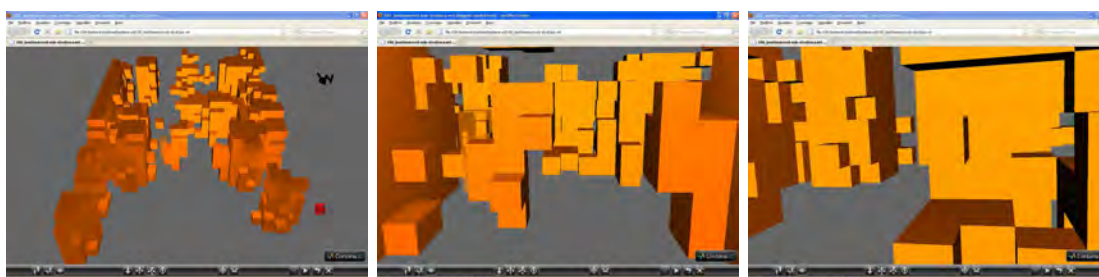
Vista da Nord anomalie da 100 MHz



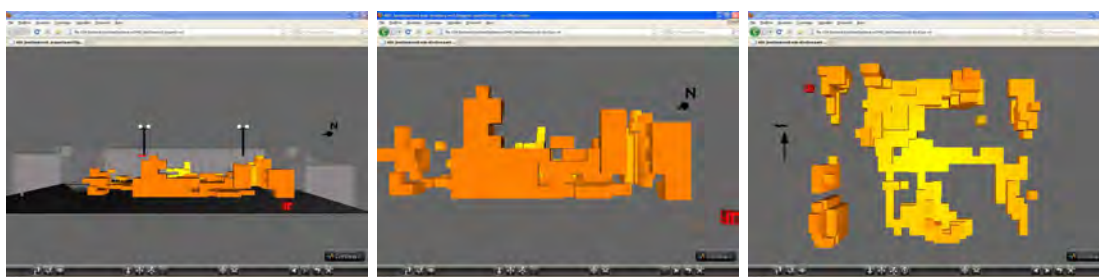
Anomalie antenna da 100 MHz da Nord



Anomalie antenna da 100 MHz pianta



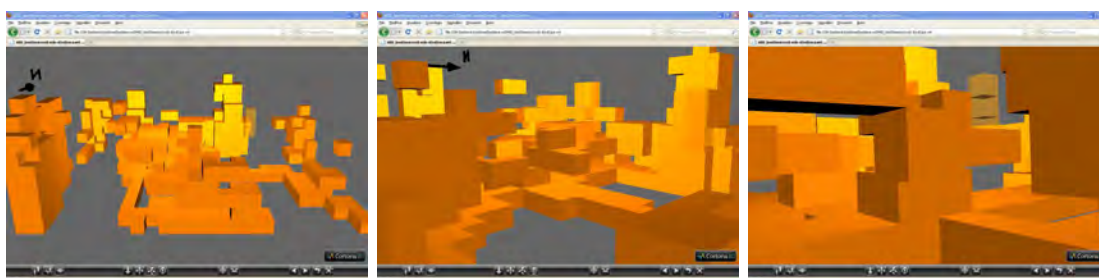
Tre render tratti dalla navigazione all'interno del volume investigato (antenna da 100 MHz)



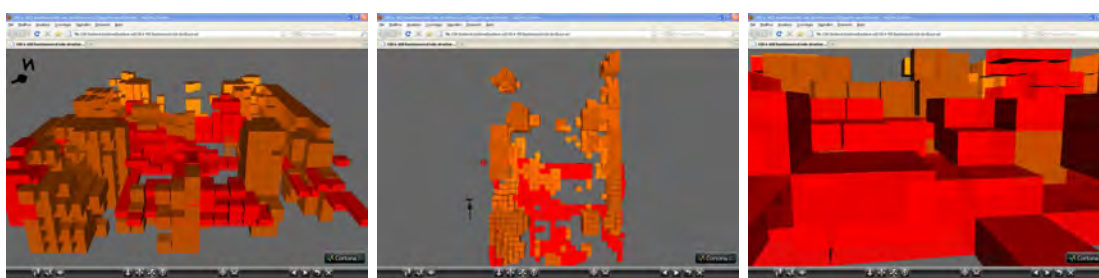
Vista da Nord anomalie da 400MHz

Anomalie antenna da 400 MHz da Nord

Anomalie antenna da 400 MHz pianta



Tre render tratti dalla navigazione all'interno del volume investigato (antenna da 400 MHz)



Tre render che mostrano il raffronto tra le anomalie indagate dalle due antenne (rosso 400 MHz, marroncino 100 MHz)



## **RINGRAZIAMENTI**

Poter ricordare in poche righe tutte le persone che in questi quattro anni mi sono state vicino è abbastanza difficile. Prima di tutto devo ringraziare il Professor Ranieri per il suo grande supporto scientifico, la disponibilità, l'entusiasmo dimostrati durante tutto il Dottorato di Ricerca, l'Ing. Coiana e il Dott. Degan della Delfis per il contributo allo sviluppo del software R2vrml e Prof. Piro, per i preziosi consigli per migliorare questo lavoro di tesi.

Un grazie anche a Francesco Loddo e Stefano Stocco per avermi procurato i dati grezzi su cui lavorare.

Non posso dimenticare tutti i colleghi del Dipartimento di Ingegneria del Territorio: Carlo, Marco, Checco S., Enzo, e ovviamente "San" Tonio!

Un ringraziamento particolare va ad Hajar la quale mi ha dimostrato che essere colleghe non esclude la possibilità di essere anche grandi amiche.

Grazie anche a Michele per avermi fatto uscire da una situazione difficile ed essere stato sempre presente nonostante la distanza, circondandomi di affetto.

Ma il ringraziamento più grande va ai miei genitori perché senza il loro sostegno non avrei mai completato questo lungo percorso costellato da ostacoli non indifferenti.