



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

- Dipartimento di Scienze della Terra -

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA, *XVII° CICLO*

TESI IN GEOFISICA APPLICATA:

**PROSPEZIONI GEOELETTRICHE: OTTIMIZZAZIONE IN ACQUISIZIONE E RICOSTRUZIONE 3D  
PER PROBLEMATICHE AMBIENTALI E ARCHEOLOGICHE.**

TUTORE:  
Ch.mo Prof.  
**MAURIZIO FEDI**

CANDIDATA:  
**DOTT.SSA MARIA GRAZIA SOLDOVIERI**

COORDINATORE:  
Ch.mo Prof. **ITALO SGROSSO**

**Anno Accademico 2004/2005**

# *INDICE*

<b>PREMESSA.....</b>	<b>I</b>
<b>I. PRINCIPALI METODI GEOELETTRICI: RESISTIVITA' E POLARIZZAZIONE INDOTTA.</b>	
<b>Premessa.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 METODO DELLA RESISTIVITÀ.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 A PARAMETRO.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 B FATTORI DI INFLUENZA.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 C PRINCIPI TEORICI DEL METODO GEOELETTRICO IN CORRENTE CONTINUA.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 POLARIZZAZIONE INDOTTA.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 A ORIGINE DEL FENOMENO DELLA POLARIZZAZIONE INDOTTA.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3 B MISURE DI POLARIZZAZIONE INDOTTA.....</b>	<b>20</b>
<b>II. ACQUISIZIONI E RICOSTRUZIONI BIDIMENSIONALI DEL SOTTOSUOLO ATTRAVERSO MISURE DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA DEL TERRENO.</b>	
<b>Premessa.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 VARIE CONFIGURAZIONI ELETTRONICHE.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.1 WENNER <math>\alpha</math>.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.2 WENNER <math>\beta</math>.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.3 WENNER <math>\gamma</math>.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.4 WENNER-SCHLUMBERGER.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.5 DIPOLO-DIPOLO ASSIALE.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1.6 POLO-DIPOLO.....</b>	<b>33</b>
<b>2.1.7 POLO-POLO.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2 RICOSTRUZIONI DELLE PSEUDOSEZIONI.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3 FORWARD PROBLEM E SCELTA DEL DISPOSITIVO.....</b>	<b>37</b>

### **III. ACQUISIZIONI E RICOSTRUZIONI BIDIMENSIONALI DEL SOTTOSUOLO ATTRAVERSO MISURE DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA DEL TERRENO.**

<b>Premessa.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Modello 1.....</b>	<b>45</b>
3.1.1 DIPOLO-DIPOLO.....	46
3.1.2 POLO-POLO.....	50
3.1.3 WENNER-SCHLUMBERGER.....	58
<b>3.2 Modello 2.....</b>	<b>61</b>
3.2.1 DIPOLO-DIPOLO.....	62
3.2.2 POLO-POLO.....	68
3.2.3 WENNER-SCHLUMBERGER.....	75
<b>3.3 Modello 3.....</b>	<b>80</b>
3.3.1 DIPOLO-DIPOLO.....	81
3.3.2 POLO-POLO.....	83
3.3.3 WENNER-SCHLUMBERGER.....	87
<b>3.4 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE SUI TRE CONFRONTI ELABORATI E SCELA DEL DISPOSITIVO E DELLA METODOLOGIA DA UTILIZZARE IN CAMPAGNA PER LE RICOSTRUZIONI 3D DEI DATI.....</b>	<b>90</b>

### **IV. L'INVERSIONE DEI DATI**

<b>Premessa.....</b>	<b>94</b>
<b>4.1 INVERSIONE DEI DATI.....</b>	<b>95</b>
<b>4.2 DISCRETIZZAZIONE DEL MODELLO DI SOTTOSUOLO.....</b>	<b>100</b>

## **V. DATI ACQUISITI IN CAMPAGNA**

<b>Premessa.....</b>	<b>103</b>
<b>5.1 PROBLEMATICHE ARCHEOLOGICHE.....</b>	<b>104</b>
<b>5.1.1 PONTECAGNANO.....</b>	<b>104</b>
<b>5.1.1 a PARCO.....</b>	<b>104</b>
<b>5.1.1 b AUTOSTRADA.....</b>	<b>113</b>
<b>5.1.2</b>	
<b>POMPEI.....</b>	<b>115</b>
<b>5.2 PROBLEMATICHE AMBIENTALI.....</b>	<b>124</b>
<b>5.2.1 Discarica: Inquadramento geologico e ricostruzione</b>	
<b>elettrostratigrafica dell'area.....</b>	<b>125</b>
<b>5.2.2 Falda freatica: Inquadramento geologico e ricostruzioni geoelettriche</b>	
<b>dell'area.....</b>	<b>133</b>
<b>OSSERVAZIONI CONCLUSIVE.....</b>	<b>138</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>143</b>

## **Premessa**

Le problematiche archeologiche ed ambientali hanno conquistato negli ultimi decenni una attenzione davvero singolare. Infatti, grazie al ritrovato interesse verso i beni archeologici congiuntamente ad un crescente interesse nell'ambito delle problematiche riguardanti la difesa del suolo per la tutela dell'ambiente, considerandone i molteplici aspetti e *sfaccettature*, le programmazioni e i lavori relativi a questa tipologia di problematiche devono essere affrontati considerando uno studio di tipo multidisciplinare. Non sono più i singoli professionisti dei vari settori a dover trattare separatamente le varie problematiche in relazione alle singole competenze ma, è necessario presentare un progetto unico e di intesa tra le varie competenze. I nuovi progetti di intervento sono il risultato di una laboriosa collaborazione dei vari esperti del settore; una sorta di tavola rotonda sulla quale si confrontano vari tecnici e, ognuno in relazione alla singola competenza, fornisce il suo contributo. Non c'è una gerarchia di competenze, ma nel rispetto reciproco del singolo professionista si può pervenire ad un progetto unico di intesa che tiene conto di tutte le possibili tematiche del problema in esame.

Per questo motivo le risposte ed il dettaglio tecnico che vengono richieste al geofisico professionista nel definire le caratteristiche del sottosuolo, le dimensioni e le forme delle anomalie in esso presente, devono essere sempre più dettagliate ed univocamente determinate per poter pervenire all'individuazione e all'ottimizzazione di un progetto in cui definire lo stato di fatto è il primo passo verso la caratterizzazione più idonea di uno specifico progetto di recupero ambientale e/o archeologico. E' in quest'ottica che ad

esempio si colloca anche la nuova normativa sismica. Il maggiore dettaglio con il quale è possibile determinare le caratteristiche geologico tecniche del sottosuolo effettuando una analisi puntuale della zona oggetto di intervento, consente di determinare accuratamente i parametri necessari per il calcolo strutturale di un edificio; l'ottimizzazione dell'analisi preliminare del terreno può comportare una ottimizzazione del progetto che si traduce in termini di costi effettivi con una diminuzione delle spese di costruzione anche del 30%.

Strettamente legato al discorso di cui sopra, è l'utilizzo di metodologie geofisiche per la ricostruzione del sottosuolo, che consentano una acquisizione dei dati, una elaborazione e un'analisi di dettaglio degli stessi in tempi relativamente brevi senza comprometterne la qualità e quindi, l'attendibilità della interpretazione.

Fine ultimo di questa tesi di dottorato è quello di definire, mediante l'utilizzo della metodologia geoelettrica ed in particolare del metodo della resistività, la possibilità di ottimizzare la risoluzione in varie problematiche geologiche sia in termini di acquisizione che di elaborazione e ricostruzione del sottosuolo investigato.

In particolare si è provato a definire in varie problematiche, sia di carattere ambientale che archeologico, la tipologia di acquisizione dei dati di resistività del sottosuolo che meglio consentisse la ricostruzione delle anomalie in esso presenti. Si è, infatti, osservato che i vari dispositivi di acquisizione applicati lungo uno stesso profilo, possono evidenziare, ognuno di essi, delle particolarità di una stessa anomalia ma, a volte, con alcune configurazioni non è possibile delineare bene i bordi o discriminare l'anomalia di un corpo dall'effetto che esso riproduce.

Infatti, la prima analisi che è stata fatta per poter definire la scelta dei dispositivi da utilizzare per una ottimizzazione nelle ricostruzioni 3D del sottosuolo, è relativa allo studio delle diverse tipologie di array. Analizzando l'andamento della funzione sensitivity per i vari dispositivi, è stato possibile individuare i limiti e i vantaggi di ciascun dispositivo.

Per sottolineare ed evidenziare meglio i limiti delle varie tipologie di array, sono stati elaborati e confrontati anche 2 modelli sintetici rappresentativi di due particolari realtà geologiche quali un dicco e una stratificazione piano parallela. Questo è riportato nel secondo capitolo.

Per quanto riguarda la ricostruzione tridimensionale del sottosuolo, sono state eseguite varie tipologie di acquisizioni e di elaborazione dei dati con l'obiettivo di individuare una metodologia che consentisse una ricostruzione dettagliata ma con un numero ridotto di acquisizioni; ridurre il numero di acquisizioni implica, naturalmente, una campagna di acquisizione più breve con costi minori. Per questo motivo sono state calcolate varie risposte elettriche elaborate su modelli sintetici. In particolare sono state confrontate le ricostruzioni del sottosuolo considerando acquisizioni 3D (i dati sono acquisiti contemporaneamente lungo la direzione **X, Y e XY** di una maglia), acquisizioni 3DX o 3DY (acquisizioni eseguite solo lungo una direzione e i dati poi sono stati elaborati con algoritmi di inversione 3D) e pseudo 3D (acquisizioni eseguite lungo profili, inversione dei dati mediante l'utilizzo di algoritmi 2D e visualizzazione pseudo 3D dei dati).

Le ricostruzioni 3D e 3DX o 3DY, sono state confrontate anche riducendo il numero di profili acquisiti. Sono state realizzate delle maglie in cui non si è fatto variare il passo di acquisizione su ogni profilo ma si è variata la copertura

areale di acquisizione aumentando la distanza tra i profili secondo multipli interi del passo di campionatura.

Inoltre, i vari confronti sono stati eseguiti anche considerando varie tipologie di acquisizioni.

Nel terzo capitolo sono definiti dettagliatamente i risultati raggiunti.

E' stato eseguito anche un confronto tra ricostruzioni 3D e ricostruzioni pseudo 3D cercando di evidenziare le eventuali anomalie tra queste ricostruzioni volte a definire se il maggiore dispendio di tempo necessario per l'acquisizione 3D in luogo della pseudo sia confrontabile con il tipo di risoluzione; fornisca cioè dei risultati significativamente migliori.

Questi confronti sono stati valutati in ambiente di discarica e in ambiente archeologico e i risultati non sono univocamente determinati: la strategia di acquisizione e di elaborazione dei dati da adottare dipende, naturalmente, dalla problematica da studiare.

Infatti, ad esempio nella ricostruzione e determinazione di una discarica di piccole dimensioni, la ricostruzione è stata possibile solo tramite la ricostruzione 3D; le ricostruzioni elaborate lungo i profili presentano errori di RMS anche superiori al 50% (paragrafo 5.2.1).

Come accennato, la metodologia geoelettrica è stata utilizzata in diverse problematiche. In seguito agli studi di problematiche di specifico interesse ambientale (quali le discariche e la ricostruzione di una falda vicino al mare) è stato possibile, analizzare le problematiche di cui sopra, anche in ambienti archeologici, grazie alla possibilità fornitami dal Laboratorio mobile di archeogeofisica, del *Centro Regionale di Competenza per lo Sviluppo ed il Trasferimento dell'Innovazione Applicata ai Beni Culturali e Ambientali (Innova)*

il cui responsabile scientifico, è il prof. Maurizio Fedi del Dipartimento di Scienze della Terra.

La tipologie di ambienti studiati, sono sicuramente diverse ma l'obbiettivo è comune: individuazione di schemi di acquisizioni diversificati per problematica e per ognuno di essi evidenziare il sistema di acquisizione e di elaborazione più idoneo in relazione alla tipologia dei dati stessi.

E' stato eseguito anche un confronto tra due tipologie di inversione e riportato nel paragrafo 5.1.1 a .

Con questo lavoro di dottorato si vuole determinare la possibilità di definire una metodologia che consenta di ottenere delle ricostruzioni 3D del sottosuolo riducendo al minimo il numero dei dati da acquisire senza che con questo sia compromessa la validità della ricostruzione stessa.

# Capitolo I

## ***Principali metodologie geoelettriche: resistività e polarizzazione indotta.***

### **Premessa**

Conrad Schlumberger condusse a partire dal 1912, i primi esperimenti in Normandia sulla possibilità di definire la natura e le strutture presenti nel sottosuolo attraverso misure opportunamente eseguite in superficie sfruttando, in particolare, le diverse caratteristiche di conducibilità dei materiali. 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).

Il potenziale elettrico può essere causato anche da una serie di altre fenomenologie legate al fatto che il terreno non è schematizzabile semplicemente come un conduttore puramente ohmico. Infatti, la carica elettrica può accumularsi lungo l'interfaccia di alcuni minerali e determinare un flusso di corrente diverso da quello dovuto dalla corrente immessa nel terreno: grazie a questa particolare caratteristica è possibile stimare la diversa caricabilità del terreno. Questo metodo è comunemente indicato come metodo della polarizzazione indotta attraverso il quale è possibile individuare giacimenti minerali, minerali argillosi e/o acquiferi. Il potenziale elettrico può essere causato, anche, da fenomeni elettrochimici tra minerali e soluzioni fluide a contatto, o da processi elettrocinetici tra vari flussi di fluidi. Ancora la variazione di potenziale può essere causato anche da correnti naturali che circolano nel terreno (correnti telluriche).

Nel corso di questo capitolo saranno trattati esclusivamente i metodi geoelettrici di tipo attivo (metodi che sfruttano correnti elettriche

artificialmente immessi nel terreno; in particolare il metodo della resistività e della caricabilità); pertanto le correnti naturali che esistenti nel terreno, rappresentano il noise ambientale per le misure da eseguire.

Nell'ultimo paragrafo di questo capitolo, è riportato un lavoro di letteratura volto a sottolineare la potenzialità delle misure contemporanee di resistività e caricabilità eseguite su una stessa area. Inoltre nel paragrafo 5.2.1, è riportato lo studio eseguito su una discarica controllata in cui sono state realizzate nella stessa area sia misure di resistività che di caricabilità. Le ricostruzioni dell'andamento di resistività nella discarica studiata sono state oggetto, tra l'altro, di una tesi di laurea quinquennale in scienze naturali della quale ho fatto da correlatrice.

## **1.1 Metodo di resistività**

### **1.1.a Parametro ( $\rho$ )**

Il metodo della resistività utilizza, come parametro geofisico per indagare il sottosuolo, la resistività elettrica del terreno. La resistività è una grandezza fisica posseduta dalle rocce, misurata in  $\Omega m$  ed indica la resistenza incontrata dalla corrente elettrica nell'attraversare una formazione rocciosa. 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.

Ed è proprio grazie al fatto che la distribuzione della resistività apparente è legata allo spessore, alla localizzazione, alla forma e alla resistività dei litotipi che la corrente ha oltrepassato, che da questa misura si possono ottenere informazioni sulle discontinuità presenti nel sottosuolo. In generale la resistività apparente può essere definita come la resistività vera di una roccia immaginaria (omogenea ed isotropa) equivalente ad una reale eterogenea ed anisotropa (Astir, 1971).

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. Nella tabella riportata di seguito è possibile evidenziare i diversi range di variazioni di resistività delle varie litologie:

<b>Rocce e minerali metallici</b>	<b>Resistività (<math>\Omega</math> m)</b>
<b>Sedimentarie</b>	
Calcarea chalk	50 ÷ 150
Argilla (clay)	1 ÷ 100
Ghiaia (gravel)	100 ÷ 5000
Calcarea (limestone)	50 ÷ 10 <sup>7</sup>
Marna (marl)	1 ÷ 100
Quarzite (quartzite)	10 ÷ 10 <sup>8</sup>
Argilla (shale)	10 ÷ 1000
Sabbia (sand)	500 ÷ 5000
Arenaria (sandstone)	1 ÷ 10 <sup>8</sup>
<b>Ignee e Metamorfiche</b>	
Basalto	10 ÷ 10 <sup>7</sup>
Gabbro	10 <sup>3</sup> ÷ 10 <sup>6</sup>
Granito	10 <sup>2</sup> ÷ 10 <sup>6</sup>
Marmo	10 <sup>2</sup> ÷ 10 <sup>8</sup>
Scisto	10 ÷ 10 <sup>4</sup>
Ardesia	10 <sup>2</sup> ÷ 10 <sup>7</sup>
<b>Minerali e minerali metallici</b>	
Argento	1,6 · 10 <sup>-8</sup>
Grafite (giacimento massivo)	10 <sup>-4</sup> ÷ 10 <sup>-3</sup>
Galena (Pbs)	10 <sup>-3</sup> ÷ 10 <sup>2</sup>
Magnetite di giacimento	1 ÷ 10 <sup>5</sup>
Sfalerite (ZnS)	10 <sup>3</sup> ÷ 10 <sup>6</sup>
Pirite	10 <sup>2</sup>
Calcopirite	10 <sup>-5</sup> ÷ 0,3
Quarzo	10 <sup>10</sup> ÷ 2 · 10 <sup>14</sup>
Salgemma	10 ÷ 10 <sup>13</sup>
<b>Acque ed effetto del contenuto in sale</b>	
Acqua pura	10 <sup>6</sup>
Acque naturali	1 ÷ 10 <sup>3</sup>
Acqua di mare	0,2
Sale 20%	5 · 10 <sup>-2</sup>
Granito 0% di acqua	10 <sup>10</sup>
Granito 0,19% di acqua	10 <sup>6</sup>
Granito 0,31% di acqua	4 · 10 <sup>3</sup>

Valori di resistività di alcune Rocce e Minerali da A.E. Musset, M. Aftab Khan, *ESPLORAZIONE DEL SOTTOSUOLO una introduzione alla geofisica applicata*. Ed. Zanichelli (modificata)

La resistività dei vari materiali è funzione della temperatura alla quale essi ritrovano. 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:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_0 T)$$

$\alpha_0$  rappresenta il coefficiente di temperatura della resistività riferito alla temperatura di  $0^\circ\text{C}$ . Non tutti i materiali sono caratterizzati da un coefficiente di temperatura della resistività positivo. Infatti, a seconda se tale coefficiente è 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  $500\text{-}600^\circ\text{C}$ , o può essere causata dalla temperatura per valori più elevati di  $600^\circ\text{C}$  (Keller, Rapolla; 1974).

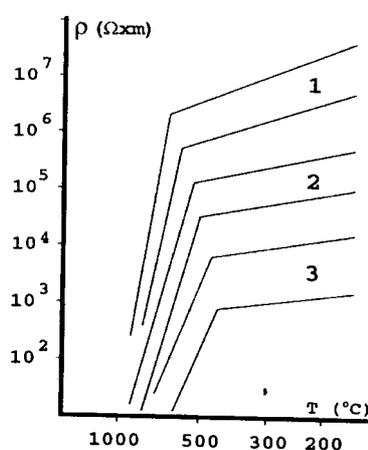


Figura 1.1: Variazione generica della resistività elettrica di vari tipi di rocce secche in funzione della temperatura: 1 rocce granitiche; 2 rocce basaltiche; 3 rocce ignee idrate. La

notevole diminuzione sopra i 500°C è causata dai primi processi di fusione (da Jacobson, riportata in Keller, Rapolla, 1974, modificata).

A complicare ulteriormente la relazione tra resistività e temperatura vi è il fatto che le rocce a temperatura ambiente presentano una certa quantità d'acqua che, se è presente in quantità tale da costituire almeno una pellicola continua sulle pareti dei pori (in genere superiore al 10% della quantità totale di acqua che potenzialmente la roccia può contenere), le proprietà elettriche cambiano sensibilmente. Le proprietà elettriche della roccia in esame saranno determinate dalle caratteristiche elettriche della soluzione a contatto con la roccia (come vedremo meglio in seguito). Se oltre alla presenza dell'acqua, la roccia contiene anche dell'argilla, allora la presenza di ioni alcalini mobili presenti nel reticolo cristallino, condizionano la conducibilità ionica delle rocce stesse.

### ***1.1 b Fattori di influenza***

Il parametro resistività è influenzato da: tessitura e porosità, grado di cementazione, temperatura della roccia, contenuto argilloso, permeabilità, temperatura e salinità della soluzione acquosa che imbibisce la formazione. Inoltre, a parità di condizioni litologiche, vi sono alcuni processi geologici che causano un'immediata variazione della resistività perché ne modificano la porosità. In generale molti di questi processi portano ad una riduzione della resistività. Essi sono: alterazione dell'argilla, dissoluzione, fratturazione della roccia, intrusione d'acqua salata, scollamento e/o alterazione superficiale. Causano un aumento della resistività il processo di solidificazione, la precipitazione di carbonato di calcio o la silicizzazione. Il metamorfismo può causare sia un aumento sia una diminuzione della resistività. Per questo motivo la resistività delle rocce e dei terreni non possono essere definite da un solo valore, ma da un intervallo più o meno ampio entro il quale esso può variare. Inoltre, come si vede dalla tabella riportata a pagina 3, i range di resistività delle varie litologie, spesso si sovrappongono comportando ulteriori problemi in fase di elaborazione dati e di identificazione della roccia.

*temperatura*. La temperatura è legata alla resistività da una relazione di tipo inverso: all'aumento della temperatura la viscosità dell'acqua diminuisce e quindi gli ioni in essa presenti godono di una mobilità maggiore. A tale mobilità è associata una diminuzione della resistività pari a:

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18)}$$

dove:

$\alpha$  è il coefficiente termico di resistività

T è la temperatura ambiente

$\rho_T$  è la resistività a tale temperatura

$\rho_{18}$  è la resistività alla temperatura di 18°C.

Questo fattore, fatta eccezione per i sistemi geotermali, è poco significativo per studi di carattere ambientali e/o archeologico. Si deve tener conto di questa correzione solo in zone in cui le risalite di fluidi caldi potrebbero far variare significativamente il valore di resistività da stimare.

*effetti sulla tessitura e la porosità della roccia*. La tessitura della roccia è molto importante. Si verifica che: un'arenaria ben selezionata ha una resistività più bassa rispetto ad un'arenaria meno selezionata; le rocce con tessitura granitica conducono l'elettricità lungo le fessure o i giunti di strato per cui presentano generalmente una resistività alta; il basalto presenta molti pori ma la sua porosità efficace è molto bassa per cui la resistività è alta.

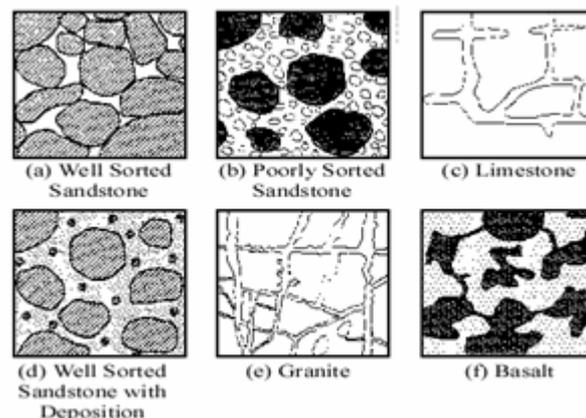


Fig. 1.2: variazione di tessitura nelle rocce (Staley Ward, Geophysical Engineer).

Sperimentalmente si verifica che a parità di contenuto e tipo d'acqua, una roccia vulcanica presenterà una resistività più alta di una roccia sedimentaria avente la stessa porosità. La causa è da ricercarsi, molto probabilmente, in una differenza più sensibile della porosità totale e porosità utile che differenzia le due litologie (Fig. 1.3 da Keller, Rapolla, 1974).

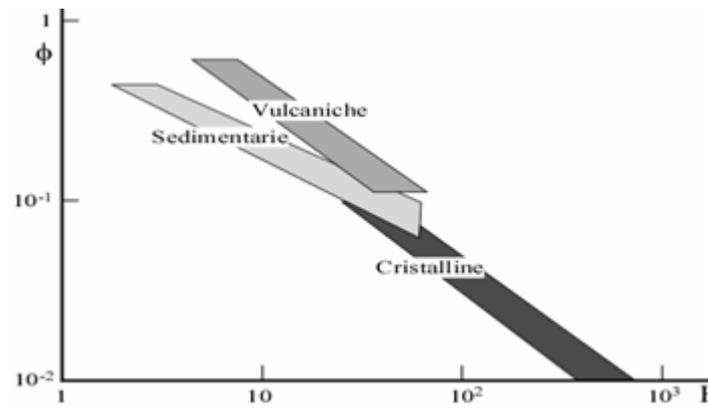


Fig. 1.3: campi di variazione del fattore di formazione F con la porosità  $\Phi$  per le principali categorie di rocce saturate (da Keller, Rapolla, 1974).

La resistività delle rocce ( $\rho_R$ ) non argillose è data dall'espressione di Archie (1942):

$$\rho_R = F \cdot \rho_w$$

dove:

$\rho_w$  = resistività dell'acqua di ambizione della roccia;

F = fattore elettrico di formazione che dipende dalla porosità efficace (perché l'acqua contenuta nei pori isolati non influenza la resistività), dalla granulometria e dalla forma dei meati, oltre che dal grado di cementazione della roccia. Se il suo valore è inferiore a 2,5 la formula di Archie, non è valida in quanto la roccia è argillosa; tale valore corrisponde al limite massimo della porosità totale delle alluvioni non consolidate costituite da granuli sferici con distribuzione cubica.

Il fattore di formazione può essere anche espresso dalla seguente formula:

$$F = \frac{1}{\rho_c^m \cdot S^n}$$

dove:

$p_e$  = porosità efficace

$S$  = grado di saturazione della roccia

$m$  = esponente sperimentale che varia da 1,3 per le sabbie a 2,3 per le formazioni cementate;

$n$  = esponente sperimentale che varia da 1,4 a 2,6 e dipende dalla forma dei meati, dalla viscosità e densità del fluido interstiziale.

Definendo il valore di  $F$  in questo modo, si ricava che:

$$\rho_r = \frac{\rho_a}{p_e^m \cdot S^n}.$$

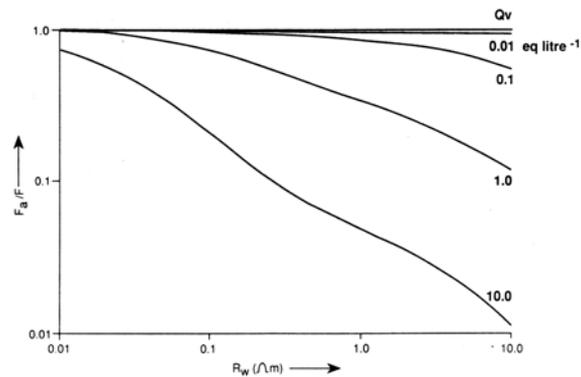
Da questa formula si deduce che, a parità di porosità efficace e di grado di saturazione, la resistività delle rocce è direttamente proporzionale a quella della soluzione elettrolitica contenuta nei meati; la resistività della roccia è sempre maggiore di quella dell'acqua contenuta nei pori; a parità di resistività dell'acqua e di porosità efficace, la roccia assume il minimo valore di resistività quando il grado di saturazione è massimo; a parità di resistività del fluido ed a parità di grado di saturazione, la roccia ha una resistività tanto minore quanto maggiore è la porosità. Se la legge di Archie viene utilizzata in modo corretto e se sono noti la porosità efficace della roccia serbatoio, è possibile ricavare il grado di saturazione e quindi la quantità e la qualità di acqua presente in una roccia priva di argilla. Le argille presenti in una roccia, infatti, partecipano al processo di conduzione in quanto in esse sono presenti cationi e anioni non bilanciati, che possono essere interscambiati. La conducibilità della roccia è quindi pari alla somma delle conducibilità dell'acqua e dell'argilla e quindi (Winsauer W.O., McCardell W.M., 1953):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{F} \cdot \left( \frac{1}{\rho_w} + X \right)$$

dove  $X$  è il termine aggiuntivo che tiene conto degli effetti dell'argilla. La formula precedente può essere anche definita in termini di fattori elettrici:

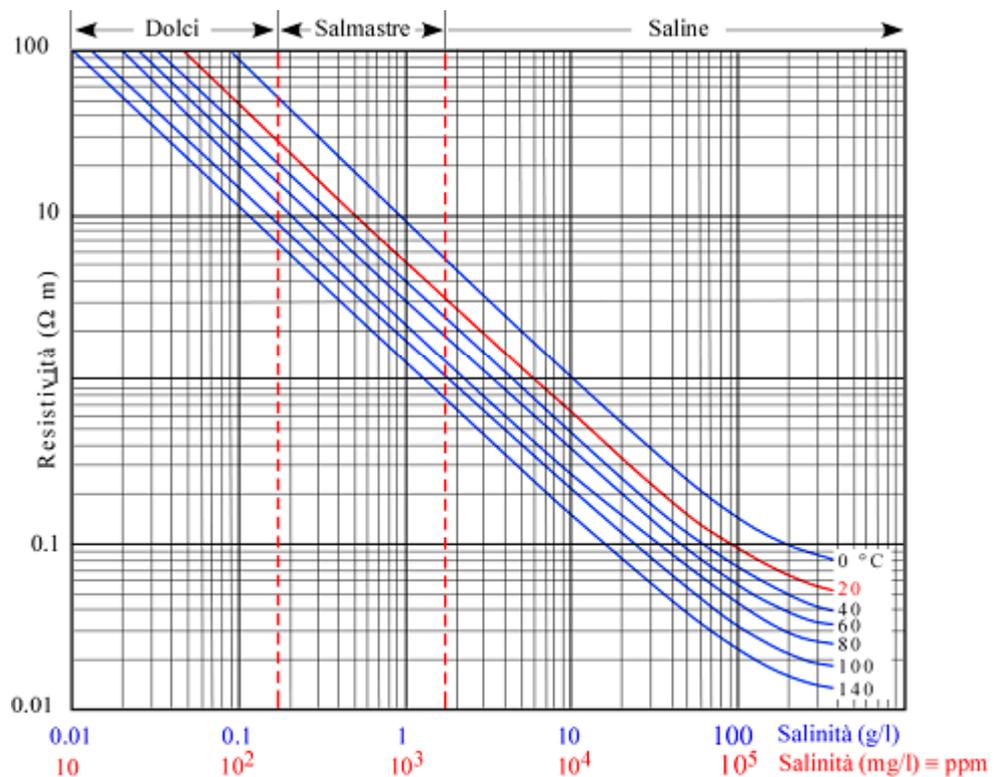
$$F_a = F \cdot (1 + \rho_w X)^{-1}$$

dove  $F_a$  rappresenta il *fattore elettrico apparente* che è tanto minore di  $F$  quanto maggiore è il contributo additivo della conducibilità dovuta dell'argilla.



**Fig. 1.4:** Variazione del fattore di formazione apparente con la resistività dell'elettrolita per campioni con percentuale di argilla crescente da 1 a 4 (Appunti del corso di Prospezioni Geofisiche, prof. Carrara).

Come si evince dal grafico, il contributo dovuto alla presenza di argilla nella formazione è mascherato per basse resistività e esiste per ogni percentuale di argilla un valore critico di  $\rho_w$  al di sotto del quale  $F_a$  è molto prossimo a  $F$ ; al di sopra di tale valore,  $F_a$  decresce per il manifestarsi degli effetti argillosi.



**Figura 1.5:** Tenori di  $Cl^-$  (mg/l): <100 acque dolci; 100-1000 acque salmastre; >1000 acque saline, da Celico.  $S^{°/°} = 0.030 + 1.8050 \cdot Cl^{°/°}$  da Fornaseri. Pertanto gli intervalli di salinità, in mg/l, delle acque dolci, salmastre e saline sono compresi rispettivamente tra i range: 10 ÷ 180; 180 ÷ 1800; > 1800.

Si evince chiaramente dal grafico di fig 1.6 che passando da una salinità di circa 0.1 gr/lit (acque dolci) circa 3 gr/lit (acque salmastre) la resistività si abbassa di circa un ordine di grandezza. Per dare un criterio generale di valutazione delle argille, Waxman e Smits (Waxman M.H., Smits L.J.M., 1968), hanno proposto la seguente relazione che lega il fattore di formazione  $F$  al fattore di formazione apparente  $F_a$ :

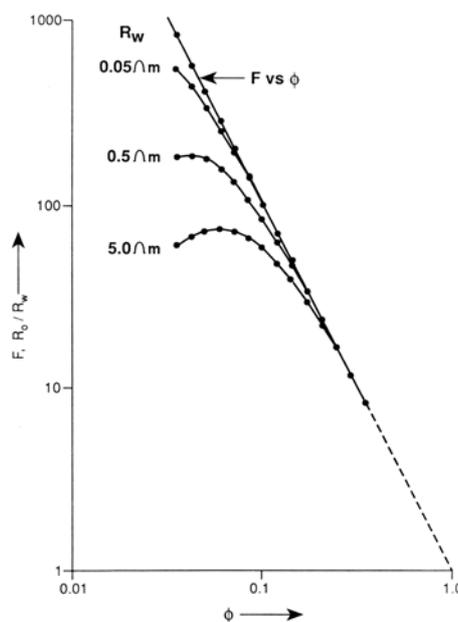
$$F_a = F \cdot (1 + Q_v B \rho_w)^{-1}$$

dove  $Q_v$  è la capacità di scambio cationica per unità di volume;  $B$  è la conducibilità equivalente di questi ioni; il prodotto di queste due quantità rappresenta, quindi, l'eccesso di conducibilità dovuta alla presenza di argilla. Rappresenta un indice d'argillosità della roccia in esame.

La capacità di scambio ionico è possibile legarla alla porosità (Worthington, 1993) secondo la seguente legge ottenuta sperimentalmente analizzando campioni saturi a contenuto costante d'argilla:

$$\log Q_v = -3,56 - 2,74 \log \Phi$$

Ad alta porosità la capacità di scambio ionico è irrilevante e pertanto  $F_a$  si può approssimare a  $F$ . Tutti questi parametri possono facilmente essere raggruppati nel seguente grafico:



**Figura 1.6:** relazione tra il fattore elettrico e la porosità (Appunti del corso di Prospezioni Geofisiche, prof. Carrara).

Dal grafico di figura 1.6, si evince la possibilità di ottenere andamenti relativi ad elevata porosità che convergono ad un trend lineare. Questo trend è sintetizzato dalla legge di Archie ed il trend  $\rho/\rho_w$  non è di tipo lineare. In questo caso vi sono valori critici di porosità per i quali  $F_a$  si approssima a  $F$  e gli effetti argillosi sono trascurabili e valori per i quali ciò non è possibile. La legge di Archie può essere, dunque, applicata sicuramente quando la formazione in esame presenta un resistività molto elevata: quando  $F$  assume valori inferiori a 3 bisogna considerare il fattore elettrico apparente e, quindi, valutare il contenuto argilloso della formazione per non incorrere ad errori nella stima della resistività. Il diagramma seguente, ottenuto sperimentalmente, mostra le variazioni della resistività elettrica all'aumentare del contenuto argilloso presente in una roccia alluvionale recente:

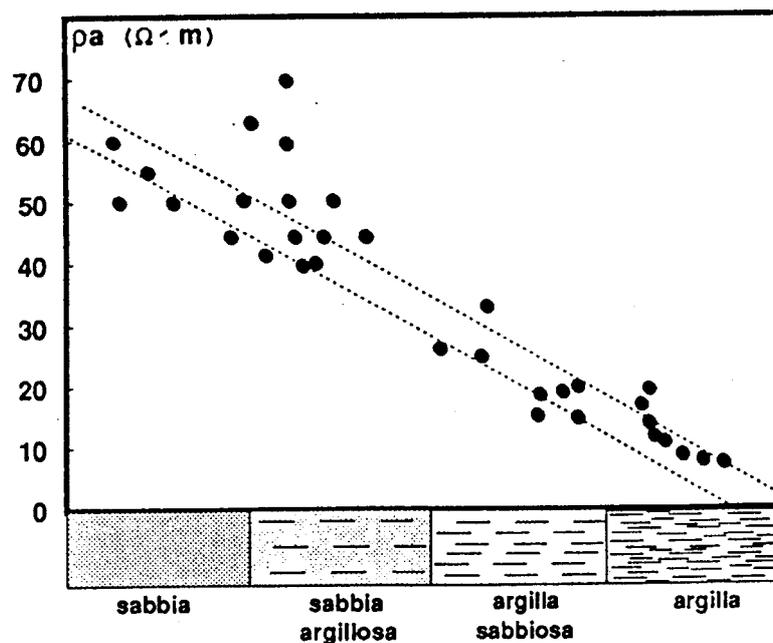


Fig. 1.7: relazione tra resistività elettrica e contenuto argilloso (da Carrara et al., 1992).

### 1.1.3 Principi teorici del metodo geoelettrico in corrente continua.

Il metodo geoelettrico si basa sullo studio degli effetti provocati dal flusso di correnti immesse all'interno del sottosuolo. Il grande successo di questa metodologia rispetto alle altre metodologie geofisiche, è da ricercarsi nella relativa semplicità dei suoi presupposti teorici. Immettendo nel terreno corrente continua (o corrente alternata a bassa frequenza in modo da

trascurare i fenomeni di induzione magnetica), si genera un campo elettrico  $\vec{E}$  (V/m), 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  $\rho$  ( $\Omega \text{ m}$ ) la resistività elettrica del mezzo in ogni punto all'interno del semispazio considerato e  $\vec{J}$  la densità di corrente (che rappresenta la quantità di corrente che si distribuisce su una superficie infinitesima di terreno ortogonale al movimento delle cariche), dalla espressione della legge di Ohm è possibile definire il campo elettrico  $\vec{E}$ . Infatti, la legge di Ohm lega le tre variabili suddette nel seguente modo:

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

Considerando un semispazio isotropo e correnti continue, si avrà che:

$$\text{div}\vec{J} = 0$$

e quindi:

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

Quest'equazione può essere espressa anche nel modo seguente:

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

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 (la resistività costante in tutto il semispazio considerato), si ha:

$$\text{grad}\frac{1}{\rho} = 0$$

per cui l'equazione di Poisson diventerà:

$$\nabla^2 U = 0.$$

Quest'ultima equazione è definita equazione differenziale di Laplace e se  $\rho$  è costante, il potenziale elettrico rispetta tale relazione.

Considerando un sistema di riferimento sferico con origine nel punto sorgente A (elettrodo di corrente), tale che ogni punto del semispazio inferiore è individuato da una terna di coordinate  $(r, \theta, \phi)$ .

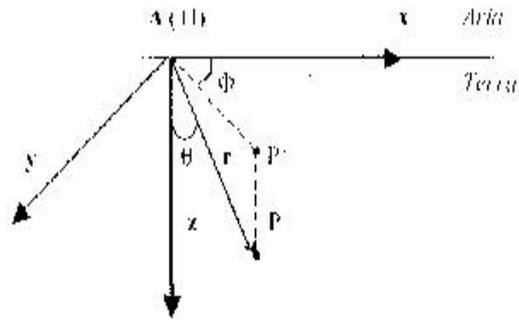


Fig. 1.8: sistema di riferimento sferico.

L'equazione di Laplace, in un sistema di coordinate sferiche diventa:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \left( \frac{1}{\sin \theta} \right) \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \left( \frac{1}{\sin^2 \theta} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} = 0$$

Poiché le linee di corrente, e quindi il flusso, sono radiali, il campo elettrico avrà la stessa direzione: le superfici equipotenziali sono rappresentate da semisfere concentriche centrate nel punto A. Ne consegue che il potenziale non dipenderà da  $\theta$  e da  $\phi$ , ma soltanto dalla coordinata  $r$ :

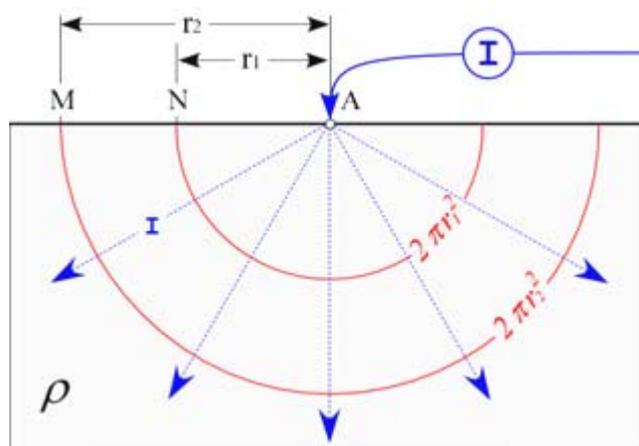


Fig. 1.9: schema di distribuzione di corrente in un terreno omogeneo di resistività  $\rho$  per l'immissione puntiforme di corrente continua di intensità I in un punto A.

Per questo motivo l'equazione di Laplace in coordinate sferiche si riduce a (Telordet al.,1986):

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{dU}{dr} = 0$$

la cui soluzione è del tipo:

$$U(\mathbf{r}) = C_1 + \frac{C_2}{r}.$$

$C_1$  e  $C_2$  rappresentano le due costanti di integrazione che si determinano imponendo le condizioni a contorno del potenziale. Per convenzione si pone il potenziale nullo all'infinito per questo:

$$U(\mathbf{r}) = \frac{C_2}{r}$$

Dalla seconda relazione e tenendo conto che, si ricava:

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\rho} \frac{C_2}{r^2}$$

Per determinare il valore di  $C_2$  bisogna stabilire il valore dell'intensità di corrente che si può; determinare dalla relazione seguente:

$$\mathbf{I} = \int_s \vec{\mathbf{J}} \cdot d\vec{\mathbf{S}} = \int_s \vec{\mathbf{J}} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS$$

dove  $\hat{\mathbf{n}}$  è il versore normale uscente dall'elemento di superficie  $d\mathbf{S}$  e  $\mathbf{J}$  è uniforme su tutta la superficie. Dato che la superficie in esame è una sfera  $\{\mathbf{I} = 2\pi r^2 \mathbf{J}\}$ , allora è possibile definire il valore di  $C_2$

$$C_2 = \frac{I\rho}{2\pi}$$

La funzione del potenziale generato dalla sorgente A in ogni punto del semispazio in cui esso si trova e, quindi pari a:

$$U(\mathbf{r}) = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

Questa relazione è molto importante perché consente di valutare il potenziale in ogni punto dello spazio ed è alla base della metodologia geoelettrica. Infatti, misurando la corrente elettrica  $I$  mediante un amperometro e la tensione  $V$  tra due punti generici  $M$  ed  $N$  del terreno con un voltmetro e dette  $r_1$  e  $r_2$  rispettivamente la distanza  $MA$  e  $NA$  (con  $A$  elettrodo di corrente), si ha che:

$$V = U_A(M) - U_A(N) = \left( \frac{\rho I}{2\pi} \right) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

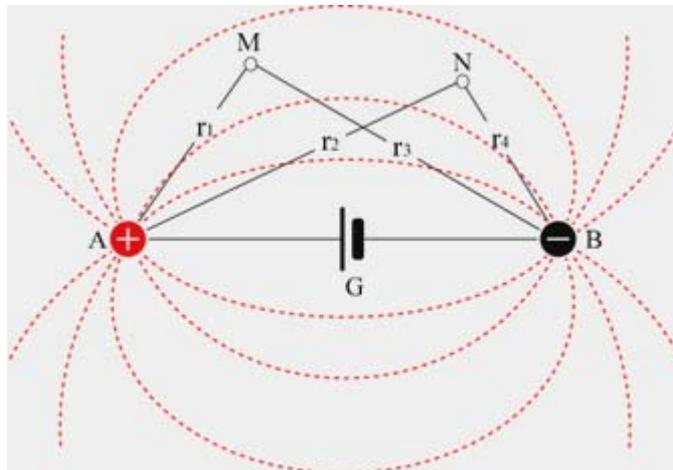
da cui:

$$\rho = \left( \frac{V}{I} \right) \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

Il metodo geoelettrico prevede sempre la presenza di almeno due elettrodi di corrente per cui la corrente fluisce nel terreno seguendo un percorso curvilineo riportato in figura 1.12.

Si assume che i due elettrodi di corrente, generalmente definiti come  $AB$ , siano due sorgenti puntiformi e d'intensità pari a  $\pm I$ . Per il principio di sovrapposizione il potenziale è la somma dei due potenziali che si sviluppano a causa della presenza delle due sorgenti, per cui:

$$U_{AB}(M) = \left( \frac{\rho I}{2\pi} \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$



**Figura 1.10:** Schema della distribuzione delle linee di corrente in un terreno omogeneo dovuta ad un dipolo AB di corrente continua.

La differenza di potenziale che si registra tra M ed N è data da:

$$U_{AB}(M) - U_{AB}(N) = \left( \frac{\rho I}{2\pi} \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

dove  $r_3$  e  $r_4$  sono, rispettivamente le distanze da A e B. Visto che è possibile misurare la variazione di potenziale, l'intensità di corrente e le distanze tra le varie sorgenti, dalla precedente formula, risulta immediato valutare la  $\rho$  che rappresenta l'unica incognita dell'equazione:

$$\rho = \left( \frac{V}{I} \right) \cdot K$$

dove K rappresenta il *coefficiente geometrico* il cui valore dipende delle posizioni reciproche dei punti A,B,M,N e la  $\rho$  è la resistività apparente del sottosuolo reale. Questo valore si riferisce, in modo indicativo, ad una roccia di forma parallelepipedica la cui lunghezza è pari a  $L=3AB/2$ , larghezza  $l=AB/2$  e si trova ad una profondità  $H=AB/4$ . Il parametro che condiziona principalmente la profondità di investigazione è rappresentato dalla distanza tra gli elettrodi di corrente (come riportato in fig. 1.13):

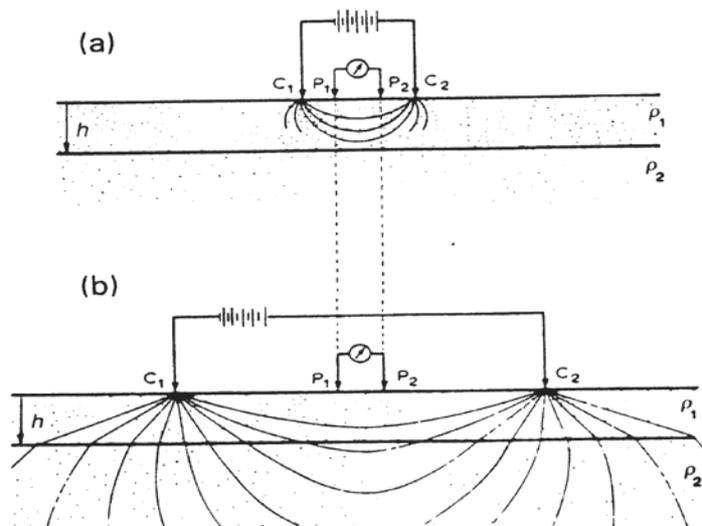


Figura 1.11: dallo schema si evince che all'aumentare della distanza tra gli elettrodi di corrente  $C_1$  e  $C_2$  la profondità raggiunta dalla corrente stessa è maggiore.

## 1.2 Polarizzazione indotta

Anche il fenomeno della polarizzazione indotta così come la resistività, è stato studiato ed analizzato per la prima volta da Conrad Schlumberger nel 1912. I principali campi di applicazione di questa metodologia è relativa alla ricerca di materiali metallici disseminati nel terreno e in misura minore per le ricerche di acquiferi e zone termali.

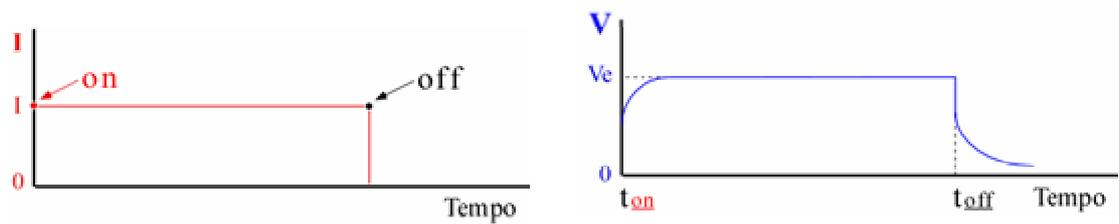
In tabella sono riportati i range di variazione di caricabilità confrontati con i range di variazione di resistività. La misura contemporanea di questi due parametri nella stessa zona di investigazione, consente di ottenere una ricostruzione più dettagliata del sottosuolo.

LITOTIPO	$\rho$ ( $\Omega$ m)	$\phi$ (%)
Acqua	10+100	-
Acqua di mare	2+3	-
Arenarie	200+5000	7+30
Argille	1+50	40+70
Calcari	300+10000	2+30
Detrito alluvionale	50+1000	15+60
Dolomie	500+10000	2+20
Sabbie e Ghiaie	70+700	30+60
Graniti	1000+20000	0.2+0.8
Marne	100+500	8+15
Piroclastiti	50+600	15+60
Rocce ignee	100+10000	30+10
Suolo di copertura	10+200	60+90
Tufi	150+900	10+40

Tabella di confronto tra i dati di resistività e i dati di caricabilità.

Le misure della polarizzazione indotta sono fatte utilizzando le configurazioni utilizzate per eseguire le misure di resistività (descritte nel capitolo 2); in particolare sono utilizzati due elettrodi di corrente e due elettrodi di potenziale non polarizzabili. Quando si sospende l'immissione della corrente elettrica nel terreno, il voltaggio tra gli elettrodi di potenziale non è direttamente 0 ma segue una curva di decadenza (riportata in figura 14), in quanto il terreno è temporaneamente caricato (polarizzato). Anche quando viene immessa corrente nel terreno, il voltaggio tra gli elettrodi raggiunge il massimo valore non in modo istantaneo ma dopo un certo intervallo di tempo (rise-time). Il tempo di decadimento e il rise-time

dipendono da fattori geologici e quindi sono dei parametri che possono essere diagnostici per la ricostruzione delle strutture presenti nel terreno.

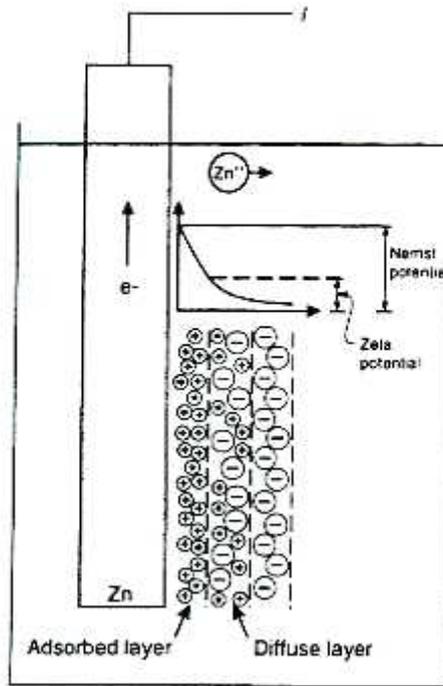


**Fig. 1.14:** Andamento della corrente agli elettrodi corrente a sinistra e andamento della tensione agli elettrodi di potenziale. a destra.

### 1.2.1 Origine del fenomeno della polarizzazione indotta

I processi che spiegano l'origine del fenomeno della polarizzazione indotta non sono ancora del tutto noti; sono noti due meccanismi che possono determinare tali effetti per i quali se necessario che si determinino dei processi elettrochimici, e sono detti polarizzazione di elettrodo e polarizzazione di membrana.

La polarizzazione di elettrodo avviene quando ad esempio poniamo un metallo in una soluzione ionica (figura 1.15): se non viene applicato nessun voltaggio, le cariche che presentano una polarità differente da quella del metallo, si separano e si determina una differenza di potenziale tra l'elettrodo e la soluzione detta potenziale di Nernst. Questo potenziale è costituito da un particolare tipo di potenziale (misurabile solo in laboratorio) definito come *zeta potential*.

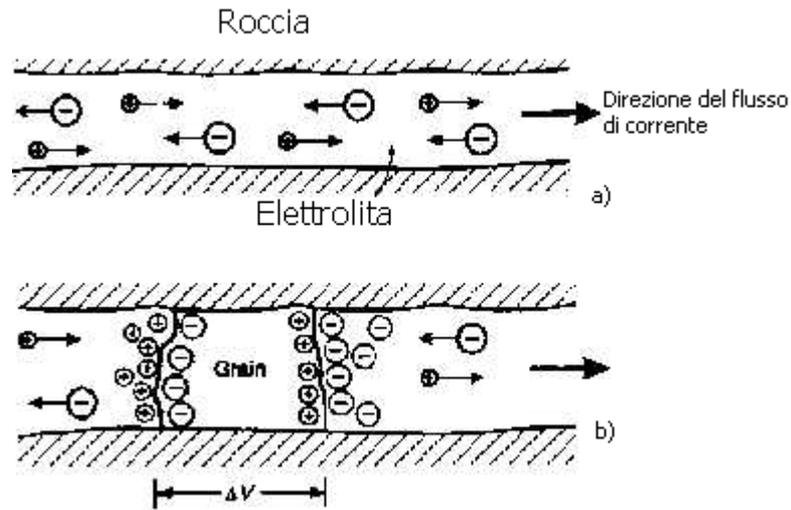


**Fig. 1.15:** Polarizzazione di elettrodo determinata dal potenziale di Nernst e dal potenziale zeta.

Le cariche all'interno della soluzione elettrolitica non sono ugualmente distribuite quando sono a contatto con un metallo. Come si evince dalla figura 1.15, si determina, vicino al metallo, un accumulo di cariche positive la cui mobilità è legata al zeta potential rappresentato proprio dagli ioni, di segno opposto a quelli del metallo, che vengono assorbiti dal metallo stesso (strato fisso o adsorbed layer); questa capacità di assorbimento decade man mano che ci si allontana dal metallo (strato diffuso o diffuse layer). Applicando un potenziale, non vi è più un bilanciamento delle cariche e il flusso di corrente determina una variazione della differenza di potenziale tra il metallo e la soluzione ionica. Quando tale potenziale viene nuovamente rimosso, le cariche tendono a disporsi come rappresentato in figura 1.15.

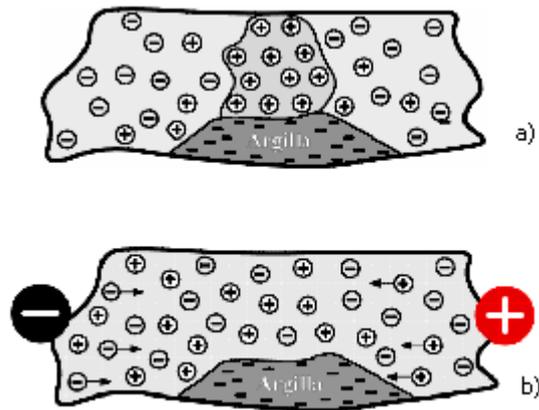
In figura 1.16, è descritto ciò che avviene nel terreno quando si immette corrente nel sottosuolo. Nel caso in cui non è presente nessun metallo (fig. 1.16 a), il flusso di corrente applicato non incontra nessun impedimento al passaggio. Nel caso in cui, invece, è presente un metallo (fig. 1.16 b), il passaggio di corrente è ostacolato da questa presenza e si determina una differenza di potenziale maggiore che, al cessare del flusso di

corrente immesso, tenderà a 0 in un tempo finito che dipende dalla natura del terreno.



**Fig. 1.16:** a) percorso del flusso di corrente applicato in un canale aperto b) percorso di un flusso di corrente quando è presente all'interno di un'elettrolita un corpo metallico.

La polarizzazione di membrana è un fenomeno che si determina quando sono presenti dei restringimenti maggiori nei pori o quando è presente dell'argilla o ad altri minerali nei pori (fig. 1.17). Se è presente una carica negativa sulla superficie di interfaccia tra la roccia e il fluido, le cariche positive sono attratte dalla parete della roccia (zeta potential pari a  $-100\mu\text{m}$ ) quelle negative sono respinte; nelle zone in cui il diametro del fluido si riduce, i determina un accumulo di cariche positive che tende ad ostacolare l'eventuale flusso di ioni quando viene immessa corrente nel terreno.



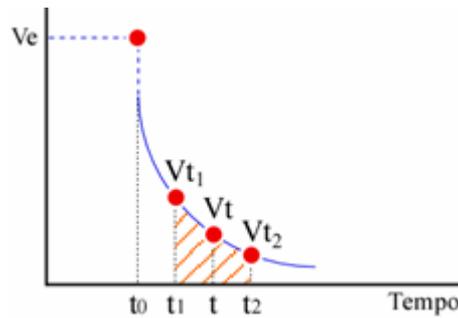
**Fig. 1.17:** a) Distribuzione delle cariche elettriche in presenza di argilla; b) distribuzione della carica elettrica in presenza di argilla in presenza di un campo elettrico.

Quando il flusso di corrente cessa, gli accumuli di carica così determinati tendono a diffondersi nel fluido: il tempo necessario affinché termini questo processo dipende sempre dalla natura del terreno. La stessa fenomenologia si determina anche quando sono presenti delle particelle di argilla o dei minerali fibrosi in quanto anche questi presentano una carica negativa sulla superficie.

### 1.2.2 Misure di polarizzazione indotta

Le misure di polarizzazione indotta possono essere effettuate nel dominio nel tempo o nel dominio delle frequenze.

Quando si applica una corrente nel terreno, nel momento in cui si interrompe tale flusso è possibile valutare, quando sono presenti dei fenomeni di polarizzazione, un potenziale definito *totale* ( $V_p$ ) determinato dalla somma del potenziale applicato ( $V$ ) ed il potenziale di polarizzazione ( $V_s$ ) (fig. 1.17). Nelle misure eseguite nel dominio del tempo, il rapporto tra  $V_s$  e  $V$  definisce il parametro Caricabilità o polarizzabilità del terreno ed è espresso in termini di millivolt per volt o in percentuale.



**Figura 1.17:** Esempio di campionamento della curva di scarica dopo il tempo  $t_0$ .

Strumentalmente risulta molto complesso definire i valori di  $V_s$ , pertanto si preferisce misurare il potenziale in vari intermalli di tempo; integrando tutti questi valori rispetto al tempo, si valuta l'area compresa tra la curva di scarica e l'asse dei tempi. Il valore che si ottiene dividendo questo valore per il potenziale  $V_p$  è detto caricabilità apparente ( $Ma$ ) ed è misurato in millisecondi:

$$\left(1/V_e\right) \cdot \int_{t_2}^{t_1} V(t) d(t)$$

La polarizzabilità,  $P$ , può essere considerata come il valore medio della Caricabilità apparente,  $Ma$ , quando l'intervallo di integrazione è piccolo.

Per le misure nel dominio delle frequenze la polarizzazione indotta è analizzata misurando la resistività apparente del terreno immettendo nel terreno corrente alternata in luogo della corrente continua. In questo caso piuttosto che descrivere il parametro resistività del terreno si definisce l'impedenza del terreno stesso.

In figura 1.18 (pag 531 del Reynold), si evince chiaramente come all'aumentare del tempo di immissione della corrente (a, b e c) e al diminuire della frequenza di misure, il potenziale di polarizzazione aumenta. Di conseguenza la resistività apparente a basse frequenze è maggiore di quella ad alta frequenza.

Nel dominio della frequenza si possono definire l'effetto frequenza percentuale (PFE) ed il fattore metallico (MF). Questi sono valutati nel seguente modo:

**nn**

$$\text{PFE} = 100 (\rho_f - \rho_F) / \rho_F$$

$$\text{MF} = 10^3 \text{PFE} / \rho_f \text{ [simens x m]}$$

Dove f e F rappresentano le due diverse frequenze utilizzate. In particolare il range di variazione delle f è compreso tra 0.05-0.5 Hz mentre il range di F è pari a 1-10 Hz. Le misure di  $\rho_f$  corrispondono alle misure della  $\rho_a$  definite con il metodo della resistività.

Da quanto definito, si evince chiaramente che le informazioni che si possono ottenere eseguendo delle misure di IP, possono fornire informazioni che in aggiunta ai dati di resistività in una determinata zona, consentono di analizzare meglio il sottosuolo investigato.

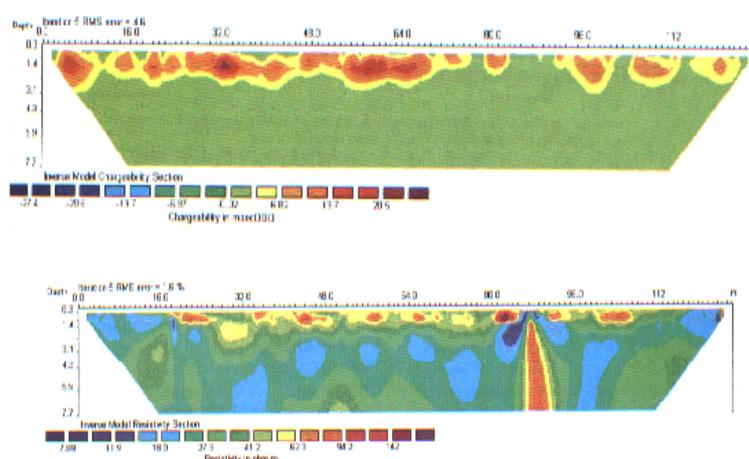
In particolare di seguito sono riportati degli esempi in cui le misure contemporanee lungo uno stesso profilo dei dati di resistività e dei dati di IP consentono di comprendere meglio l'importanza di questa tipologia di ricostruzione.

Le problematiche che possono essere studiate attraverso questo parametro sono quelle di tipo ambientale: delimitazioni delle aree inquinate nel sottosuolo, individuazione di inquinanti in argille e localizzazione ed identificazione di uno specifico materiale presente in discariche.

Di seguito sono riportati degli esempi di applicazioni di ricostruzioni 2D del sottosuolo attraverso misure di resistività e caricabilità del sottosuolo (fig. 1.18, 1.19).

Il primo esempio è ubicato nell'entroterra veneziano (fig. 1.18) in cui fosse di cava di argilla per laterizi vennero adibite a discarica di RSU ed il secondo nell'alta pianura pordenonese in cui una cava di ghiaia subì la stessa sorte. Per quanto riguarda la discarica dell'entroterra veneziano era nota la stratigrafia dell'area fino a 20 m dal piano campagna. Si tratta d'alternanze di terreni in prevalenza limoso-argillosi con modesti livelli di depositi sabbiosi che diventano consistenti dagli 8-10 m. Su quest'area è stato eseguito un profilo elettrico utilizzando il dispositivo Wenner con passo iniziale pari a 1m. I risultati di tale indagine, rappresentati in figura 30, evidenziano un comportamento mediamente resistivo dei RSU rispetto

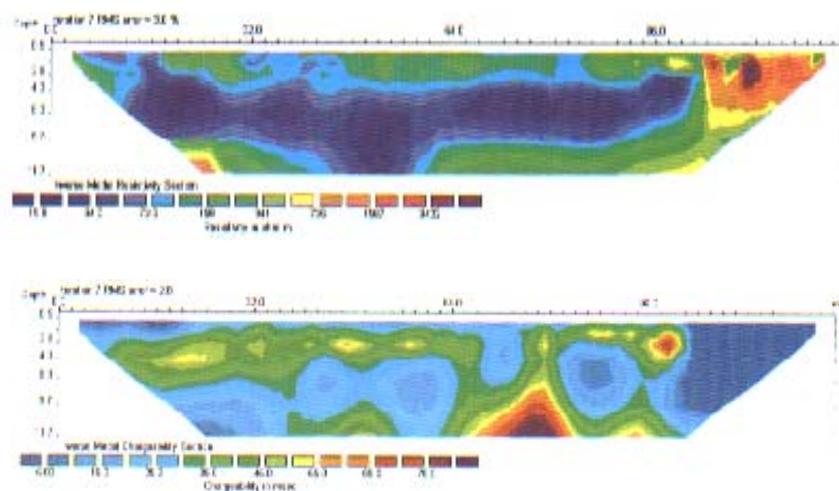
ai bassi valori di resistività manifestati dai terreni circostanti. Solo con l'ausilio del parametro caricabilità si può escludere che i bassi valori di resistività riscontrati alla base della discarica siano da attribuire a terreno naturale e non ad un eventuale percolato. Infatti, sia gli elevati valori di caricabilità (indice sicuro della presenza di materiale antropico) valutati alla base della discarica sia gli spessori dello strato di RSU (che sono risultati simili a quelli individuati con il metodo della resistività), consentono di attribuire i bassi valori riscontrati, a terreno naturale poco intriso di percolato data la debole aureola di valori medio-bassi di caricabilità che delimitano lo stato di RSU.



**Fig. 1.18:** confronto tra resistività e caricabilità della discarica dell'entroterra veneziano (*Geologia Tecnica*, 1998).

Diverso è, invece, il caso della discarica dell'alta pianura pordenonese dove il comportamento dei RSU é sempre ben distinto da quello dei terreni che la inglobano. Sono, infatti, presenti elevatissimi valori di resistività ai lati della discarica attribuibili ai terreni ghiaiosi in posto, terreni mediamente resistivi attribuibili a terreni di copertura dei RSU e un corpo molto conduttivo rappresentante la discarica stessa. Per identificare i bassi valori di resistività riscontrati alla base della discarica bisogna analizzare l'andamento della caricabilità. Gli alti valori di caricabilità, a differenza del caso precedente, non accennano a scomparire con la profondità. Noto lo spessore dei rifiuti, il prosieguo di alti valori di caricabilità può essere attribuito alla presenza di percolato assorbito dalla matrice limoso-sabbiosa. Questi due esempi servono a sottolineare la risposta univoca e inappellabile

che le misure contemporanee della caricabilità e resistività possono fornire in una realtà così complessa come quella di una discarica.



**Fig. 1.19:** Confronto tra resistività e caricabilità nell'alta pianura pordenonese (Geologia Tecnica, 1998).

## Capitolo II

### ***Acquisizioni e ricostruzioni bidimensionali del sottosuolo attraverso misure della resistività elettrica del terreno.***

#### **Premessa**

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 nel stesso mediante gli elettrodi di corrente ( $C1$   $C2$ ), e misurando il potenziale che si viene a determinare ai capi degli elettrodi di potenziale ( $P1$   $P2$ ) a causa della corrente immessa, è possibile stimare la resistività elettrica apparente ( $\rho_a$ ) mediante la seguente relazione:

$$(1) \quad \rho_a = k (\Delta V/I),$$

dove  $k$  è il *fattore geometrico* ed è pari ad:

$$(2) \quad k = 2\pi / (1/r_1 - 1/r_2 - 1/r_3 + 1/r_4),$$

e dipende esclusivamente dalla posizione degli elettrodi di corrente rispetto a quelli di potenziale ( $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$  indicano le posizioni degli elettrodi, Fig. 1.10).

La caratteristica strettamente legata al fattore geometrico è rappresentata dall'intensità del segnale: più basso è il fattore geometrico più è alta l'intensità del segnale. Per questo motivo, anche l'intensità del segnale è un parametro che può essere utilizzato per discriminare le diverse risposte fornite dai vari dispositivi elettrodi e soprattutto per individuare i motivi delle diverse risposte fornite dai vari dispositivi che possono essere utilizzati.

Obiettivo di questo capitolo è quello di descrivere dettagliatamente, le configurazioni elettrodiche più comunemente utilizzate cercando di evidenziare le diverse informazioni che si possono desumere dai vari dispositivi in relazione ai diversi andamenti della funzione sensitivity nei vari array analizzati.

La funzione sensitivity, definita analiticamente nel capitolo IV, consente di stabilire il modo in cui una variazione di resistività in una particolare regione del sottosuolo influenza la misura di potenziale effettuata con un determinato dispositivo elettrodico posto in superficie. Tale funzione può assumere sia valori positivi che negativi ed in particolare i valori relativi ai primi strati presentano valori più alti di sensitività rispetto a quelli posti a maggiori profondità. Quest'ultima caratteristica si ritrova in tutte le tipologie di array.

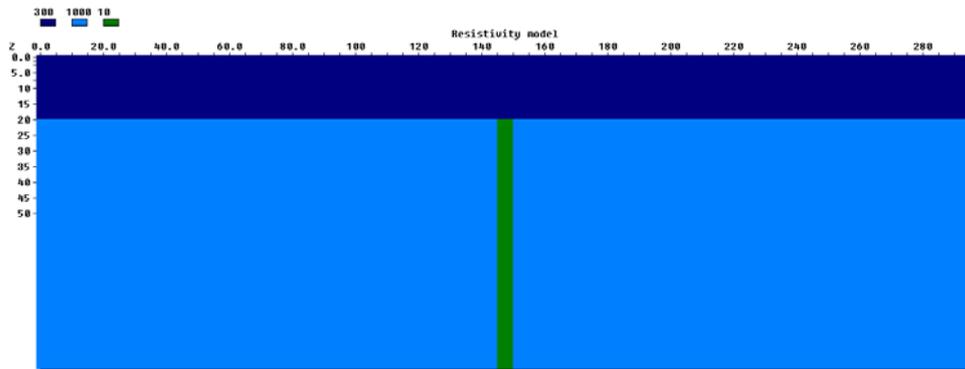
Dal valore della funzione sensitivity dipende anche la profondità di investigazione raggiunta dai vari dispositivi.

## **2.1 Varie configurazione elettrodiche**

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.

Le risposte geoelettriche dei vari dispositivi, descritti di seguito, sono confrontate tra loro mediante l'utilizzo della funzione sensitivity e della variazione dell'intensità del segnale rispetto a ciascun dispositivo.

I vari risultati saranno confrontati rispetto ad un modello di dicco (attraverso il quale è possibile schematizzare una discontinuità laterale), riportato in fig. 2.1: sarà possibile in questo modo definire le modalità di acquisizione più idonea e da utilizzare in campagna nel caso bisogna discriminare nel sottosuolo la struttura geologica considerata.



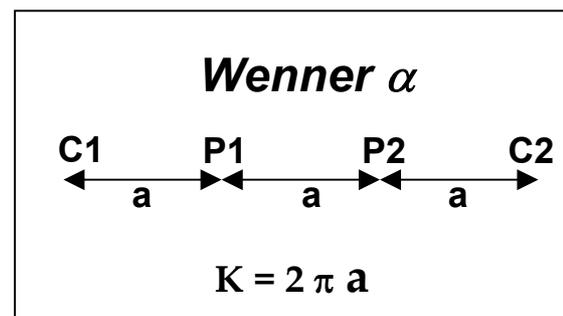
**Figura 2.1:** Modello di un disco conduttivo immerso in un resistivo. Con questo modello saranno valutate le varie risposte ottenute simulando delle misure con i vari array e gli andamenti della funzione sensitivity nelle diverse configurazioni.

### 2.1.1 Wenner $\alpha$

Il dispositivo Wenner  $\alpha$  è caratterizzato dal fatto che gli elettrodi di potenziale sono posti al centro degli elettrodi di corrente e la distanza tra i vari elettrodi (distanza interelettrodica) è sempre la stessa ed è pari ad  $a$  (Fig. 2.2).

Il valore del fattore geometrico relativo a tale dispositivo è pari a  $2\pi a$ . Come si evince dalla tabella riassuntiva (riportata alla fine di questo capitolo), il fattore geometrico del Wenner  $\alpha$ , risulta essere, il più basso tra i dispositivi più comunemente utilizzati. Pertanto è il tipo di array che consente di ottenere la massima intensità del

segnale e i dati che si misurano con questo dispositivo risultano essere poco rumorosi.



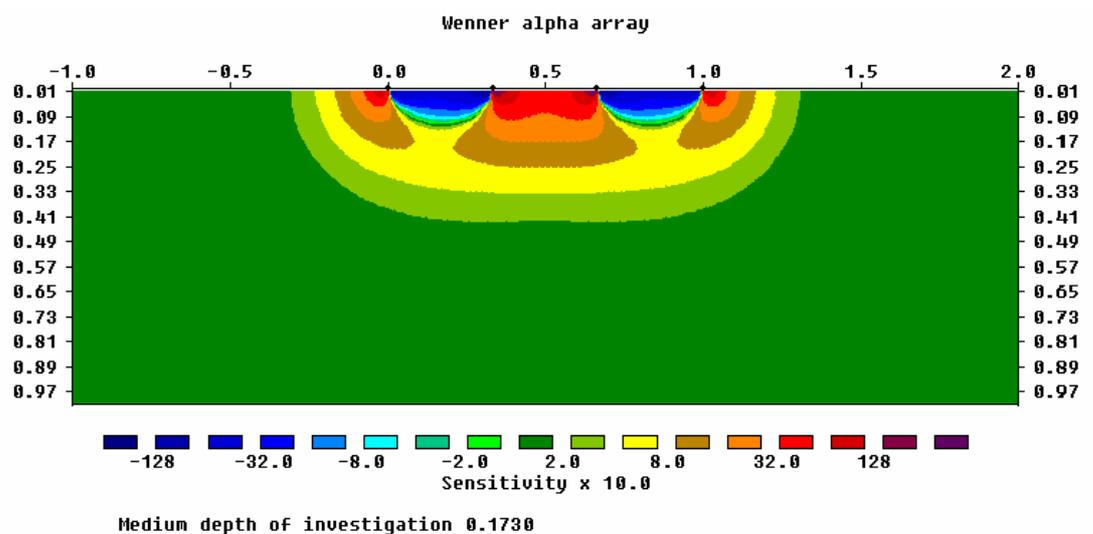
**Figura 2.2:** dispositivo Wenner  $a$

È il dispositivo da utilizzare nelle zone in cui è alto il noise ambientale.

La funzione sensitivity per un dispositivo Wenner  $\alpha$  presenta un andamento quasi orizzontale al disotto del centro del dispositivo (Fig. 2.3);

ne consegue che questa tipologia di array è relativamente sensibile ai cambiamenti verticali di resistività al di sotto del centro dello stendimento, ma è meno sensibile alle variazioni orizzontali della resistività. Questa tipologia di acquisizione risulta essere, quindi, adeguato ad evidenziare variazioni verticali di resistività ma relativamente poco idonea ad evidenziare delle discontinuità laterali di resistività; con questa tipologia di array è possibile individuare strutture orizzontali piuttosto che strutture verticali.

Inoltre lo stendimento Wenner  $\alpha$  ha una limitata profondità di investigazione pari a circa 0.5 volte la spaziatura tra gli elettrodi ( $a$ ) e, una copertura orizzontale che diminuisce con l'aumentare della spaziatura tra gli elettrodi: per i sistemi con un numero limitato di elettrodi questo dispositivo è fortemente sconsigliato per investigazioni nel sottosuolo.



**Figura 2.3:** Andamento della funzione sensitivity dal quale si evince un andamento pressoché orizzontale al centro del dispositivo.

### 2.1.2 Wenner $\beta$

Lo stendimento Wenner  $\beta$  è un caso particolare del Dipolo-Dipolo; infatti, come si evince dalla figura 2.4, questo stendimento è caratterizzato dal fatto che gli elettrodi di corrente e quelli di potenziale sono contigui: la distanza tra il dipolo di corrente è uguale alla distanza tra gli elettrodi di

potenziale(come accade per il Dipolo-Dipolo Assiale). Presenta un coefficiente geometrico pari a  $6\pi a$ .

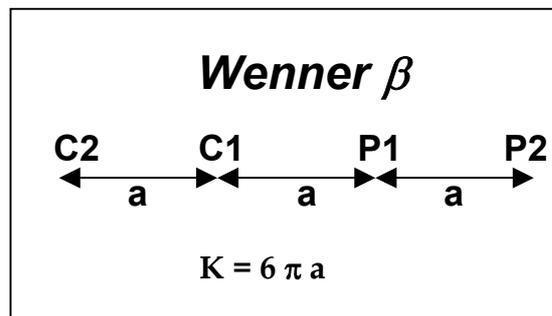


Figura 2.4: dispositivo Wenner  $\beta$

La profondità di investigazione è confrontabile con quella del Wenner  $\alpha$  ma l'intensità del segnale è solo 1/3 di quella del Wenner  $\alpha$ : i segnali sono leggermente più rumorosi. I valori maggiori di sensibilità sono presenti al centro del dispositivo. Da ciò consegue che le variazioni verticali presenti al di sotto del centro dello stendimento sono individuate meglio rispetto alle variazioni orizzontali di resistività. Il dispositivo Wenner  $\beta$  è meno sensibile ai cambiamenti di resistività orizzontale rispetto a quelli verticali.

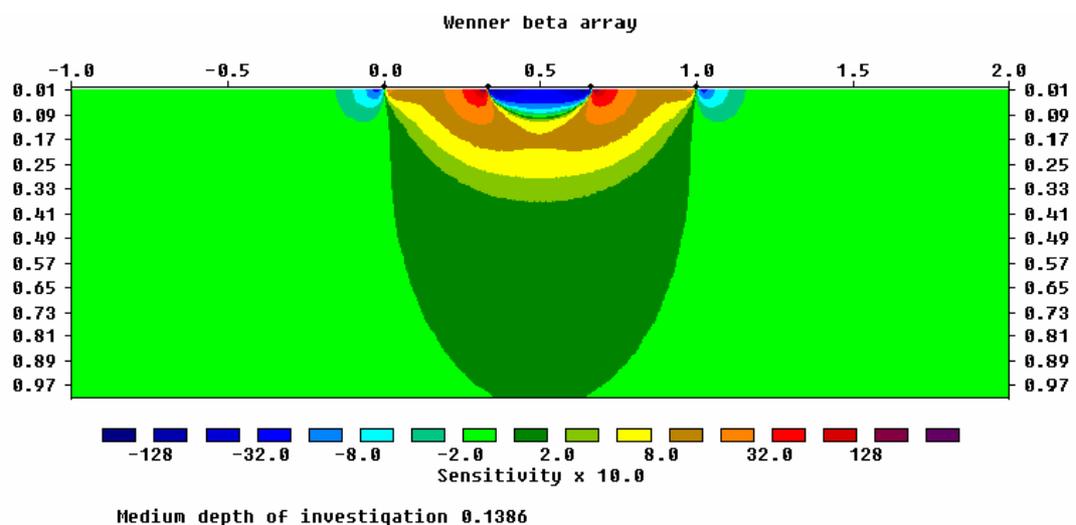


Fig. 2.5: Andamento della funzione sensitivity dal quale si evince un andamento pressoché orizzontale al centro del dispositivo.

### 2.1.3 Wenner $\gamma$

Il Wenner  $\gamma$  ha una disposizione particolare (e non molto utilizzata in letteratura) degli elettrodi di corrente rispetto a quelli di potenziali. Il quadripolo di misura è caratterizzato dal fatto che (Figura 2.6), la

posizione degli elettrodi è *alternata*.

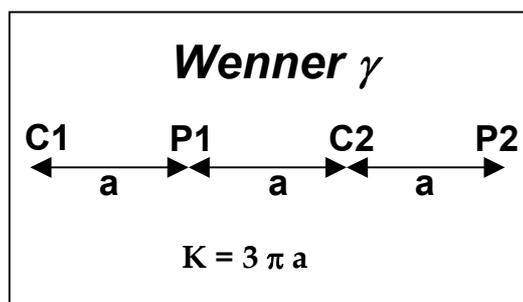


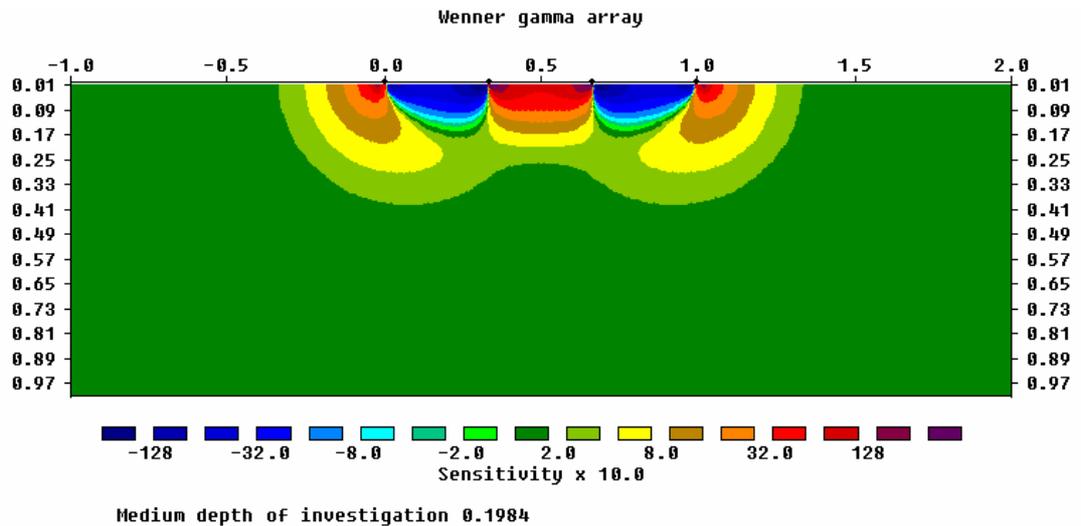
Figura 2.6: dispositivo Wenner  $\gamma$

Il fattore geometrico di questo dispositivo è pari a  $3 \pi a$ .

Con questa disposizione degli elettrodi, la funzione sensitività (il cui andamento è riportato in figura 2.7), presenta i valori più alti, al di sotto degli elettrodi più esterni e non più al centro dello stendimento come per gli array Wenner  $\alpha$  e Wenner  $\beta$ .

Pertanto con questo dispositivo è possibile investigare ad una maggiore profondità rispetto al Wenner  $\alpha$  e Wenner  $\beta$ . Risulta essere anche più adeguato alla ricostruzioni della variazione di resistività con la profondità e, quindi, alla individuazione di strutture verticali.

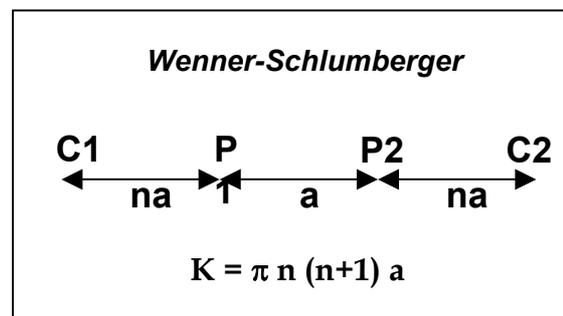
L'intensità del segnale del Wenner  $\gamma$  risulta essere più debole del Wenner  $\alpha$  di circa il 50%. Il segnale quindi è più rumoroso. Sconsigliabile l'utilizzo di tale dispositivo in zone in cui il noise ambientale è molto alto.



**Figura 2.7:** Andamento della funzione sensitivity dal quale si evince un andamento diverso dagli altri due dispositivi Wenner in quando la maggiore profondità di investigazione si raggiunge al di sotto degli elettrodi più esterni.

### 2.1.4 Wenner- Schlumberger

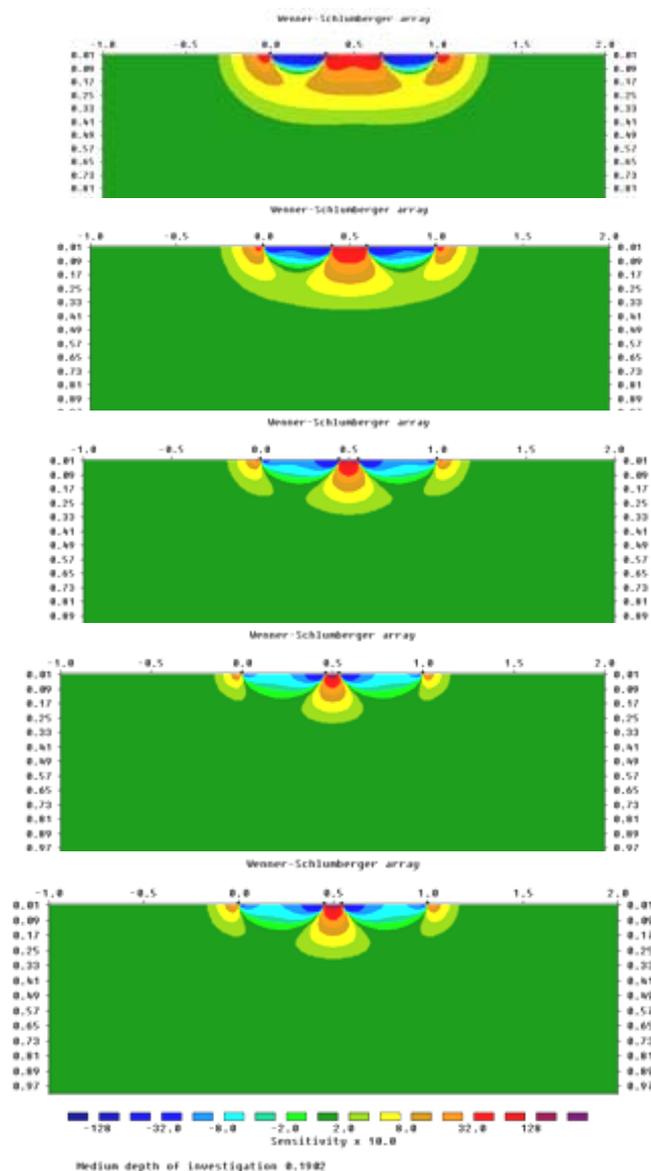
Questo tipo di dispositivo risulta essere un ibrido tra il dispositivo Wenner e quello Schlumberger (Pazdirek e Blaha, 1996). Il classico dispositivo Schlumberger è utilizzato comunemente per realizzare dei sondaggi di resistività ma, con degli opportuni accorgimenti, è possibile utilizzare lo stesso dispositivo anche per effettuare delle tomografie disponendo gli elettrodi come mostrato in figura 2.8.



**Fig 2.8:** dispositivo Wenner-Schlumberger

La spaziatura tra gli elettrodi di potenziale rimane costante e pari ad  $a$  mentre la spaziatura tra gli elettrodi di corrente aumento secondo multipli interi di  $a$ .

Il valore di  $n$ , in questo caso è dato dal rapporto tra la distanza degli elettrodi C1-P1 (o P2-C2) e la spaziatura tra gli elettrodi di potenziali P1-P2. La distribuzione delle misure di questa tipologia di array è confrontabile con quella Wenner ma la copertura orizzontale che si raggiunge con questa tipologia di acquisizione, è maggiore.



**Fig. 2.9:** Andamento della funzione sensitivity per valori di  $n$  rispettivamente pari a 1, 2, 4, 5 e 6 per un dispositivo Wenner-Schlumberger.

L'andamento della funzione sensitivity del dispositivo in esame (fig. 2.9), è differente da quella dell'array Wenner. Presenta una leggera curvatura al centro dell'array, bassi valori di sensitivity al disotto degli elettrodi C1 e P1 (e/o tra gli elettrodi C2 e P2) e una maggiore concentrazione di alti valori di sensitivity tra gli elettrodi di potenziale.

Gli andamenti della funzione sensitivity sono fortemente variabili in relazione ai valori di  $n$  considerati; infatti, per bassi valori di  $n$  l'andamento di tale funzione risulta essere piuttosto piatto (e quindi più sensibile ad individuare strutture orizzontali) mentre per alti valori di  $n$  l'andamento

della funzione sensitivity presenta dei lobi di picco che si estendono maggiormente lungo la direzione verticale (e quindi si discriminano maggiormente delle strutture verticali). Nel caso in cui è necessario studiare aree in cui ci sono presenti sia variazioni laterali di resistività che con la verticale, questo tipo di dispositivo potrebbe rappresentare un giusto compromesso tra il dispositivo Wenner ed il dipolo-dipolo.

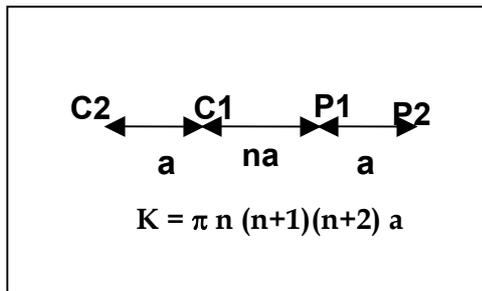
A parità di distanza tra gli elettrodi di corrente, la profondità di investigazione che è possibile raggiungere con il dispositivo Wenner-Schlumberger è maggiore del 10% rispetto al dispositivo Wenner. L'intensità del segnale è più piccola rispetto al Wenner ma è più alta del Dipolo-Dipolo Assiale. Per quanto riguarda la copertura orizzontale, il dispositivo Wenner-Schlumberger presenta una copertura maggiore rispetto a quella del Wenner ma inferiore a quella del Dipolo-Dipolo Assiale.

### **2.1.5 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 2.10. 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.

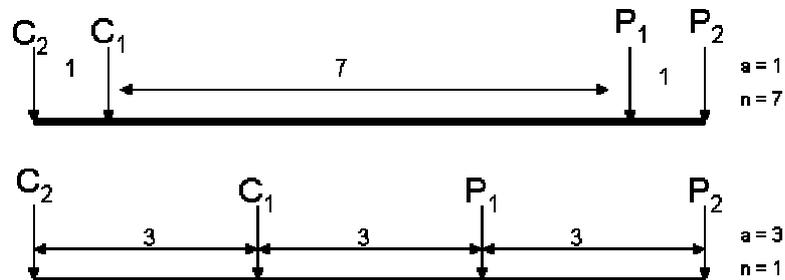
Le distanze tra gli elettrodi di corrente e quelli di potenziali aumentano seguendo multipli interi di  $n$ . Per questo dispositivo il parametro  $n$  è pari al rapporto tra la distanza fra gli elettrodi C1 - P1 e la distanza tra gli elettrodi di corrente C2-C1 oppure tra gli elettrodi di potenziale P1-P2 (pari alla distanza elettrodica definita come  $a$ ).



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

**Fig. 2.10:** dispositivo Dipolo-Dipolo

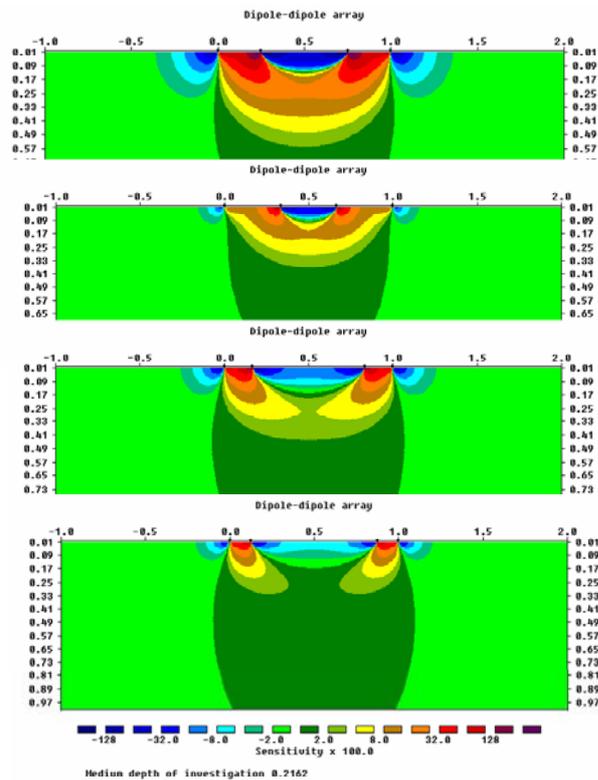
passando da  $n$  pari a 1 a  $n$  pari a 6 la differenza di potenziale misurata da un resistivimetro crolla di circa 56 volte nel passare dal valore di  $n$  pari ad 1 al valore di  $n$  pari a 6. Per ovviare a questo inconveniente e cercare di raggiungere una maggiore profondità di investigazione senza compromettere la qualità del dato, è sufficiente aumentare il passo di campionatura. In figura 2.11 sono rappresentati due diversi arrangiamenti di uguale lunghezza ma con diversi valori dei parametri  $n$  ed  $a$ .



**Fig. 2.11:** Due diversi arrangiamenti di uguale lunghezza, ma con diversi fattori di  $a$  e  $n$ . Stendimento Dipolo-Dipolo Assiale.

Valutando l'intensità del segnale nei due casi si ottiene che tale valore per lo stendimento in cui  $n=1$  è 28 volte superiore a quello con  $n=7$ .

La funzione sensitivity per questa tipologia di stendimento presenta degli andamenti che variano significativamente in relazione ai valori del parametro  $n$ .



**Fig. 2.12:** Andamento della funzione sensitivity per valori di  $n$  rispettivamente pari a 1, 2, 4, 6 per un dispositivo Dipolo-Dipolo.

In generale i massimi valori della funzione sensitivity, riportati in figura 2.12, sono assunti al disotto dei due dipoli (quello di corrente e quello di potenziale). Per bassi valori di  $n$ , l'andamento è quasi piatto mentre man mano che  $n$  aumenta i lobi rappresentativi di alti valori della funzione sensitivity sono sempre più concentrati al disotto dei dipoli spostandosi dal centro dello stendimento.

A tal proposito è utile osservare che lo schema utilizzato per la ricostruzione delle pseudosezioni di resistività apparente che consentono di posizionare il valore di resistività misurato nel punto di intersezione di due semirette tracciate a  $45^\circ$  rispetto al centro del dipolo di corrente e del dipolo di potenziale relativo alla misura in esame, corrisponde ad una zona in cui il valore di sensitivity è piuttosto basso. Infatti, come già detto, per il Dipolo-Dipolo Assiale, le zone in cui si concentrano alti valori di sensitivity sono posizionate al disotto dei due dipoli e quindi verso l'esterno del dispositivo e non al centro: la zona in cui il dispositivo risulta essere meno sensibile (con

valori prossimi a 0) è l'area in cui viene assegnato il valore di resistività misurato. Questa tipologia di problema riguarda esclusivamente la configurazione dipolo-dipolo assiale (e il polo-dipolo) in quanto per le altre configurazioni il punto in cui viene plottato il dato misurato all'interno della pseudosezione, corrisponde ad una zona in cui i valori di sensitivity sono alti. Comunque l'algoritmo di inversione di Loke e Barker (1996, descritto nel capitolo IV) tiene conto di questo errore nel quale si potrebbe incorrere e costruisce un modello a blocchi in cui le dimensioni delle celle non sono fisse.

Considerando le variazioni dei valori di sensitività in relazione all'aumentare del parametro  $n$ , il Dipolo-Dipolo assiale risulta essere maggiormente adatto per la individuazione di dicchi e cavità e poco adatto per la ricostruzione di strutture orizzontali quali ad esempio livelli sedimentari. A questo proposito è riportato nel paragrafo 5.5.2 un confronto tra la ricostruzione Wenner-Schlumberger ed il Dipolo-Dipolo Assiale eseguite per ricostruire la posizione della falda in prossimità del mare.

La profondità media di investigazione è confrontabile con quella del Wenner ma, a parità di elettrodi, la copertura orizzontale raggiunta dal dispositivo Dipolo-Dipolo risulta essere maggiore del Wenner.

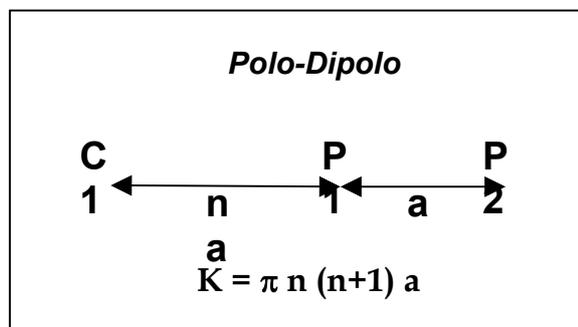
### **2.1.6 Polo-Dipolo**

Il dispositivo polo-dipolo presenta una migliore copertura orizzontale e raggiunge una profondità di investigazione maggiore rispetto al dispositivo Wenner e Wenner-Schlumberger ; risulta essere meno sensibile al noise tellurico rispetto al dispositivo Polo-Polo. Questo tipo di stendimento a differenza di quelli esaminati sopra, non è simmetrico (Fig. 2.13); pertanto nel ricostruire strutture simmetriche, tale dispositivo evidenzia delle anomalie di resistività asimmetriche.

Per ovviare a questo inconveniente, è necessario ripetere cambiando la posizione dell'elettrodo remoto confrontando i modelli ottenuti nelle due diverse acquisizioni e interpretazioni, si elimina l'effetto dovuto all'asimmetria del dispositivo.

Naturalmente dover acquisire due volte i dati per ogni profilo da realizzare significa raddoppiare il tempo di misura ed è per questo motivo che questo dispositivo non viene generalmente utilizzato. Per eseguire le misure con il polo dipolo è necessario posizionare l'elettrodo remoto (C2).

La posizione dell'elettrodo remoto deve essere non inferiore a 5 volte la distanza massima tra C1-P1 per poter trascurare gli effetti dovuti alla vicinanza dell'elettrodo di corrente



**Figura 2.13:** Dispositivo Polo-Dipolo

remoto rispetto ai dati di resistività valutati: gli effetti della vicinanza dell'elettrodo C2 sono proporzionali al quadrato del rapporto tra la distanza C1-P1 e la distanza C2-P1.

L'intensità del segnale diminuisce all'aumentare del fattore n. I valori di n massimi da utilizzare variano da 8 a 10. Infatti, per questi valori di n, l'intensità del segnale è molto bassa e i valori di sensitività per n maggiori di 8 presentano un andamento piuttosto orizzontale. L'andamento della funzione sensitivity espressa in funzione del parametro n, è riportato in figura 2.14.

I lobi sono presenti per valori di n più bassi e hanno dei massimi positivi al disotto degli elettrodi di potenziale. Per questi valori di n il dispositivo risulta essere più sensibile alle variazioni verticali di resistività. Per valori maggiori, come già detto i lobi tendono ad essere meno pronunciati e quindi la sensibilità risulta essere maggiore rispetto a strutture di tipo orizzontali. Questo significa che per poter raggiungere una maggiore profondità di investigazione è necessario aumentare la spaziatura tra P1-P2, in quanto la profondità di investigazione effettiva del polo-dipolo diminuisce all'aumentare di n.

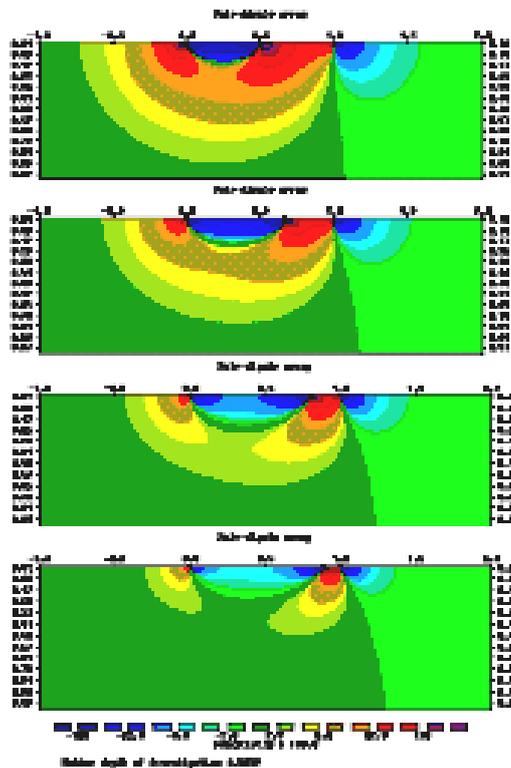


Fig. 2.14: Andamento della funzione sensitivity per valori di n rispettivamente pari a 1, 2, 4, 6 per un dispositivo Polo-Dipolo.

### 2.1.7 Polo-Polo

Questo dispositivo è utilizzato molto meno in letteratura rispetto ai dispositivi Wenner, Dipole-Dipole, Schlumberger e Wenner-Schlumberger. Come si evince dalla figura 2.15, questo tipo di dispositivo è caratterizzato da soli due elettrodi: uno di corrente e uno di potenziale.

Per schematizzare questo tipo di dispositivo è necessario posizionare il secondo elettrodo di corrente e quello di potenziale ad una distanza che sia pari a 20 volte la

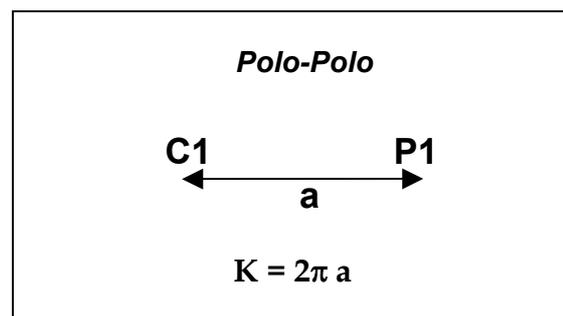


Figura 2.15: Dispositivo Polo-Polo

distanza massima tra gli elettrodi C1-P1. Questo significa che quando la spaziatura tra gli elettrodi è superiore a qualche metro, ci si può scontrare facilmente con delle difficoltà logistiche per posizionare gli elettrodi remoti;

inoltre la distanza tra i due elettrodi di potenziale potrebbe essere eccessiva tanto da compromettere la qualità del dato a causa del noise tellurico della zona da investigare. Questa tipologia di array presenta la migliore copertura orizzontale ed è possibile raggiungere una maggiore profondità di investigazione rispetto alle altre tipologie di array. Presenta però la più bassa risoluzione come si desume dalla presenza di grandi spaziature tra le isolinee del diagramma della funzione sensitivity (figura 2.16).

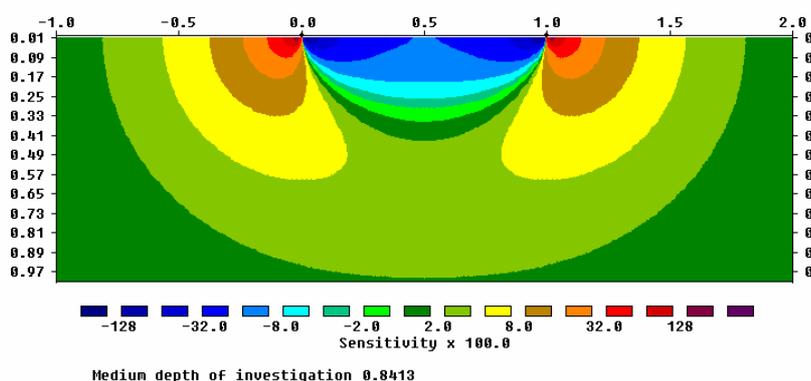


Fig. 2.16: Andamento della funzione sensitivity per il dispositivo Polo-Polo.

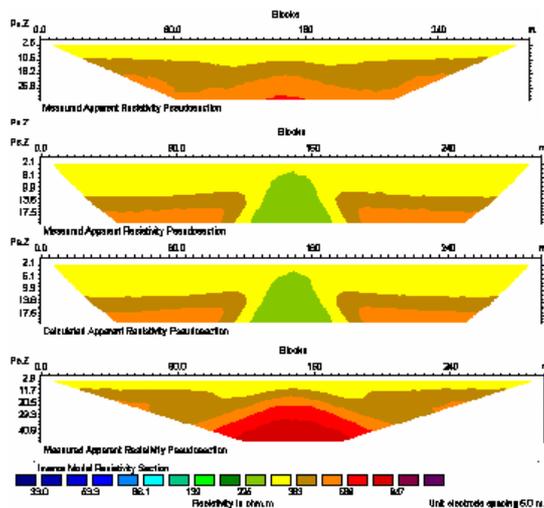
## 2.2 Ricostruzioni delle Pseudosezioni

Per quanto riguarda la ricostruzione delle pseudosezioni di resistività apparente è possibile usare varie metodologie. Quella comunemente utilizzata è il metodo del contouring. Con questa metodologia, la posizione orizzontale è stabilita dal punto medio tra gli elettrodi utilizzati per eseguire la misura mentre la posizione verticale è posta ad una distanza proporzionale alla distanza tra gli elettrodi. Per le misure eseguite utilizzando il dispositivo Dipolo-Dipolo, si usa comunemente posizionare il punto di misura rispettivamente nel punto di intersezione di due semirette tracciate a  $45^\circ$  partendo rispettivamente dai due centri dei due dipoli utilizzati per effettuare la misura. E' opportuno sottolineare che la profondità di investigazione non è data da questa intersezione, in quanto le linee di corrente o le isopotenziali in un mezzo non omogeneo sicuramente non seguono delle linee a  $45^\circ$ .

Un'altro metodo per stabilire la posizione verticale della misura eseguita, si determina attraverso l'utilizzo della *profondità media di investigazione*, stimata tramite la funzione sensitivity (o derivata di Frechet) valutata per un sottosuolo omogeneo (Edwards 1977): la profondità media di investigazione di uno stendimento è la profondità al di sopra della quale l'area, al di sotto della curva di sensitività, è uguale alla metà dell'area totale sotto la curva.

La rappresentazione della pseudosezione è utile in quanto fornisce un'idea, anche se molto qualitativa, della distribuzione delle resistività reali del sottosuolo. Inoltre, consente di eseguire una prima analisi, qualitativa, sulla distribuzione dei dati di resistività apparente nel sottosuolo. Infatti, con questa rappresentazione, è possibile evidenziare delle anomalie locali determinate da valori o troppo alti o troppo bassi rispetto ai valori limitrofi, eliminando questi valori prima di procedere all'inversione dei dati stessi.

Confrontando le pseudosezioni che si possono ottenere con le varie tipologie di array appare evidente come la copertura del Wenner diminuisca molto rapidamente con la profondità rispetto al Polo-Polo e soprattutto come le isoanomale siano fortemente influenzate dal tipo di dispositivo utilizzato per eseguire le misure. In figura 2.17 sono riportate le diverse tipologie di pseudosezioni valutate per il dicco riportato in figura 2.1. In particolare è possibile osservare che il dispositivo Wenner-Schlumberger non sia adatto all'individuazione di un dicco in quanto non si evidenzia alcun tipo di anomalia; il Wenner  $\beta$  consente di osservare una discontinuità ma non ben definita come invece è possibile discriminare attraverso le pseudosezioni di resistività apparenti ottenuta dall'analisi di dati acquisiti con dispositivo Wenner  $\gamma$  e nel Dipolo-Dipolo.



**Fig. 2.17:** Confronto tra diverse pseudosezioni di resistività apparente valutate rispetto al dicco riportato in fig. 2.1. I vari array riportati sono (procedendo dall'alto verso il basso): il Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo Assiale, il Wenner  $\beta$  e il Wenner  $\gamma$ .

## 2.3 Forward problem e scelta del dispositivo

Note le problematiche e le strutture da individuare in un'area, è possibile, utilizzando degli opportuni algoritmi di calcolo, progettare una campagna preliminare di prospezione geoelettrica volta ad individuare il dispositivo attraverso il quale poter meglio delimitare ed individuare le anomalie da definire. Infatti, noto il modello di sottosuolo è possibile valutarne la risposta elettrica, e quindi la distribuzione di resistività apparente elettrica che il modello di sottosuolo in esame, determina in superficie (forward problem).

Naturalmente le distribuzioni di resistività del modello possono essere valutate per le diverse configurazioni. Inoltre questo tipo di problema è *ben posto*, per cui esiste una sola soluzione: dato uno specifico modello di sottosuolo esiste una sola distribuzione dei dati che tale modello determina.

Per questo motivo conoscendo a priori le profondità medie alle quali individuare le anomalie e le caratteristiche delle strutture o delle litologie da determinare nel sottosuolo, è possibile progettare una campagna di prospezione ottimale in relazione alla problematica oggetto di studio. Per rendere più chiaro quanto esposto sono stati definiti due modelli sintetici

rappresentativi di due diverse situazioni geologiche: una stratificazione piano parallela e un dicco (lo stesso utilizzato per discriminare i vari andamenti della funzione sensitivity e riportato in figura 2.1). I dati sono stati elaborati mediante l'algoritmo di Loke and Barker scritto nel 1996 ed in particolare con il software *RES2DMOD*.

Dall'analisi eseguita per quanto concerne l'individuazione di una stratificazione piano parallela, tutti i dispositivi utilizzati consentono di individuare con lo stesso dettaglio tale problematica (figg. 2.18, 2.19, 2.20).

Per quanto riguarda il dispositivo Polo-Dipolo, se si eseguono misure considerando solo una posizione dell'elettrodo remoto, si individua un andamento particolare delle resistività apparenti con la individuazione di un'anomalia nel sottosuolo che nel modello sintetizzato non è presente; questa è dovuta semplicemente al fatto che tale tipologia di array è asimmetrico (fig. 2.21).

Per eliminare questa asimmetria basta ripetere le misure cambiando la posizione dell'elettrodo remoto e interpretare tutti i dati contemporaneamente. Naturalmente l'inconveniente consiste nel fatto che in fase di acquisizione bisogna prendere più dati.

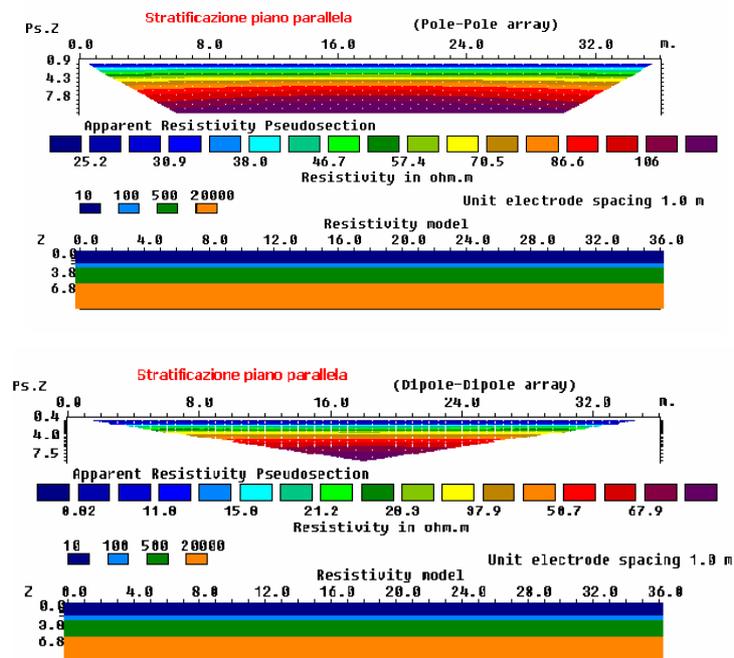
Per la problematica in esame, quindi, tutti i dispositivi consentono la ricostruzione della struttura modellizzata. La scelta del dispositivo da utilizzare dipende solo dalla profondità di investigazione. Pertanto ad esempio si potrà decidere di utilizzare il dispositivo Wenner-Schlumberger in luogo del Dipolo-Dipolo se la profondità di investigazione, a parità di lunghezza dello stendimento da realizzare, è tale che il Dipolo-Dipolo non riesca a raggiungere.

Il dispositivo Polo-Polo, che comporta difficoltà logistiche in fase di acquisizione, come il polo-dipolo, non è consigliabile in questo caso in quanto non apporta un contributo significativo alla individuazione di strutture.

Nel caso della ricostruzione del dicco si evince chiaramente (Figg. 2.22, 2.23) come le ricostruzioni che possono essere eseguite con i vari metodi di acquisizione, non sono tutti equivalenti e non tutti consentono la

individuazione della struttura presente nel sottosuolo. Infatti, il dicco conduttivo, riportato in figura 2.1 e rispetto al quale sono stati realizzati diversi confronti, è ben definito dai dispositivi Dipolo-Dipolo Assiale e Wenner  $\gamma$ . Le altre tipologie di acquisizione risultano essere poco adatte per l'individuazione di questa tipologia di anomalia.

I motivi per i quali è possibile ottenere un simile risultato è dovuto, come discusso nel paragrafo 2.1, alle diversi andamenti della funzione sensitivity nelle varie tipologie di array.



**Fig. 2.18:** Ricostruzione della pseudosezione di resistività apparenti considerando una stratificazione piano parallela attraverso i dispositivi Polo-Polo e Dipolo-Dipolo. La copertura dei dati in profondità del Polo-Polo è maggiore rispetto a quella del Dipolo-Dipolo ma le ricostruzioni sono correlabili.

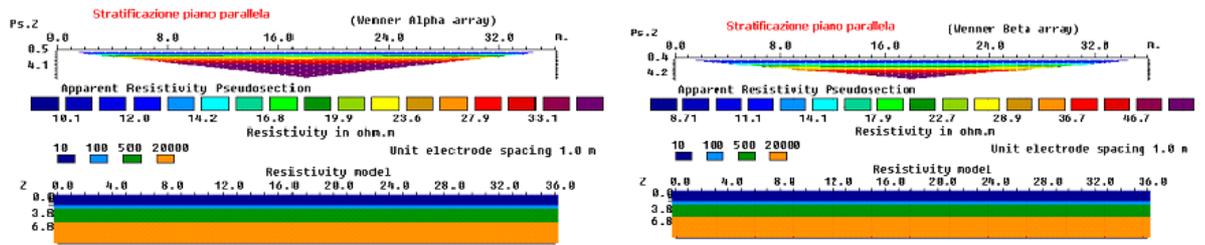


Fig. 2.19: Ricostruzione della pseudosezione di resistività apparenti considerando una stratificazione piano parallela attraverso i dispositivi Wenner  $\alpha$  e Wenner  $\beta$ .

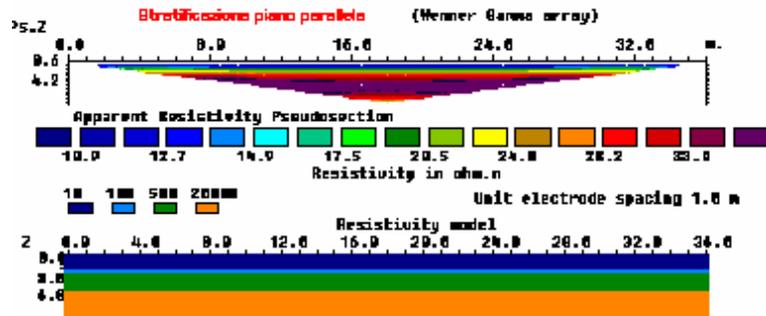


Fig. 2.20: Ricostruzione della pseudosezione di resistività apparenti considerando una stratificazione piano parallela attraverso il dispositivo Wenner  $\gamma$ .

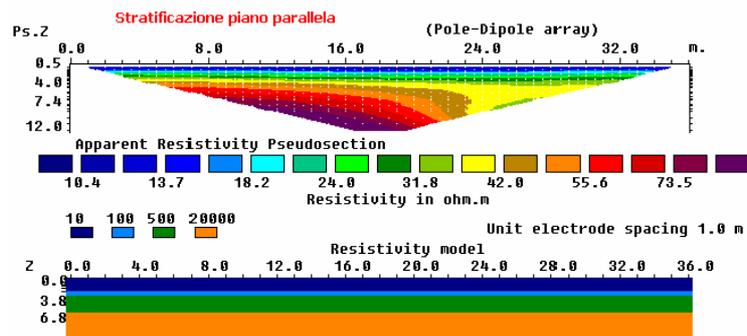
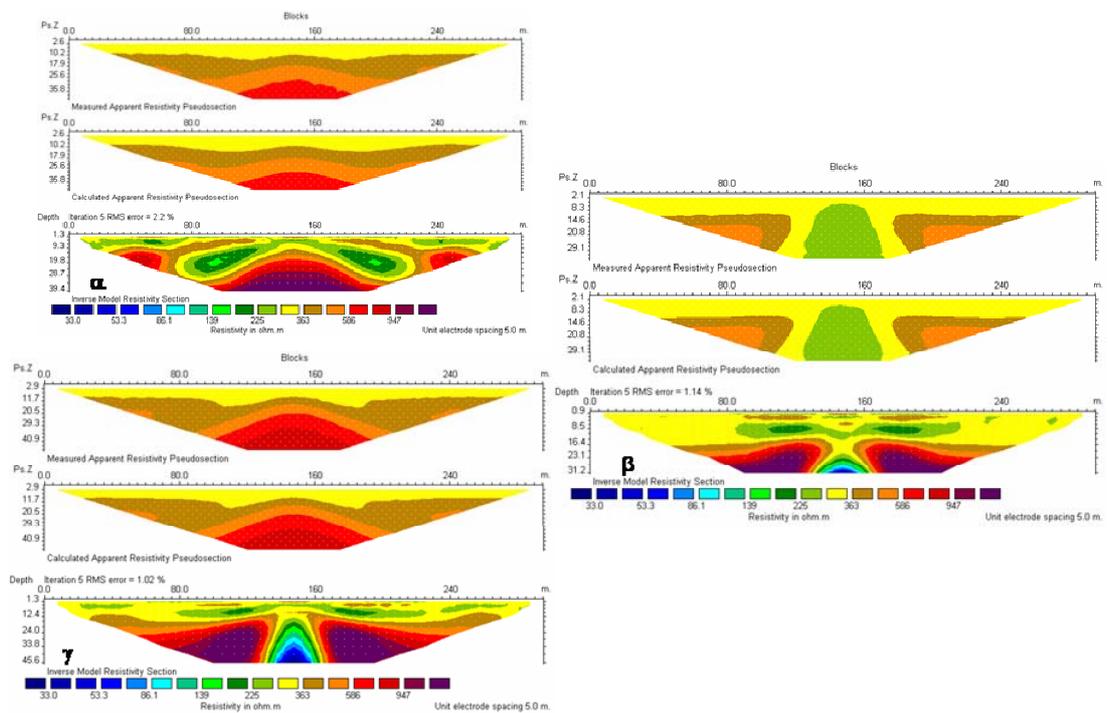
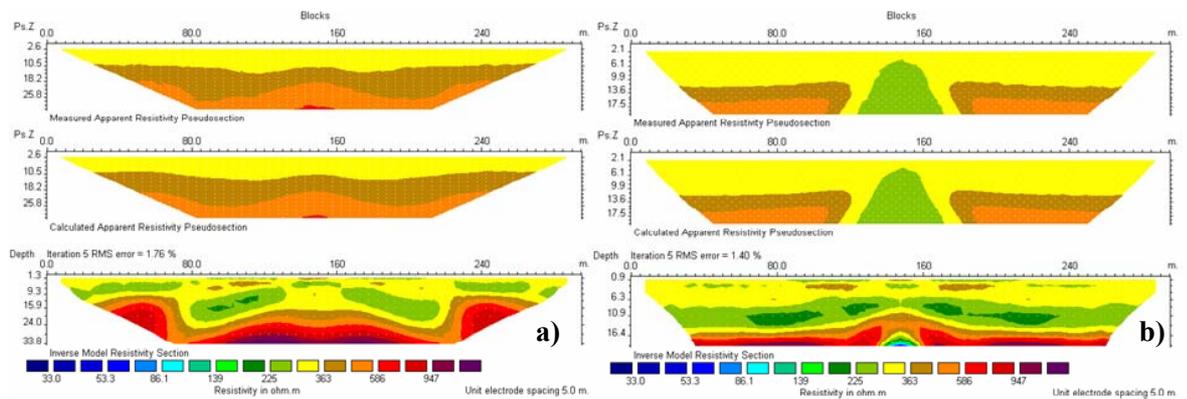


Fig. 2.21: Ricostruzione della pseudosezione di resistività apparenti considerando una stratificazione piano parallela attraverso il dispositivo Polo-Dipolo.



**Fig. 2. 22:** Ricostruzione della risposta elettrica valutata attraverso le varie tipologie di acquisizioni del dispositivo Wenner del modello di dicco di figura 2.1. Le lettere indicano rispettivamente il Wenner  $\alpha$ , Wenner  $\beta$  e Wenner  $\gamma$ .



**Figura 2.23:** Ricostruzione della risposta elettrica valutata attraverso l'array Wenner-Schlumberger (a) e il Dipolo-Dipolo Assiale (b).

Tabella relativa ai diversi valori di profondità che possono essere raggiunti ( $Z_e$ ) espressi in funzione della spaziatura elettrodica ( $a$ ) o della lunghezza dello stendimento ( $L$ ) (Loke, 1996):

<b>Tipo di Array</b>	<b><math>Z_e/a</math></b>	<b><math>Z_e/L</math></b>
<i>Wenner Alpha</i>	0.519	0.173
<i>Wenner Beta</i>	0.416	0.139
<i>Wenner Gamma</i>	0.594	0.198
<b><i>Dipolo-Dipolo</i></b>		
n = 1	0.416	0.139
n = 2	0.697	0.174
n = 3	0.962	0.192
n = 4	1.22	0.203
n = 5	1.476	0.211
n = 6	1.73	0.216
n = 7	1.983	0.22
n = 8	2.236	0.224
<b><i>Dipolo-Dipolo Equa.</i></b>		
n = 1	0.451	0.319
n = 2	0.809	0.362
n = 3	1.18	0.373
n = 4	1.556	0.377
<b><i>Polo-Polo</i></b>	0.867	
<b><i>Wenner-Schlumberger</i></b>		
n = 1	0.519	0.173
n = 2	0.925	0.186
n = 3	1.318	0.189
n = 4	1.796	0.190
n = 5	2.093	0.190
n = 6	2.478	0.191
n = 7	2.863	0.191
n = 8	3.247	0.191
n = 9	3.632	0.191
n = 10	4.015	0.191
<b><i>Polo-Dipolo</i></b>		
n = 1	0.519	
n = 2	0.925	
n = 3	1.318	
n = 4	1.796	
n = 5	2.093	
n = 6	2.478	
n = 7	2.863	
n = 8	3.247	

## Capitolo III

### ***Acquisizioni e ricostruzioni tridimensionali del sottosuolo attraverso misure della resistività elettrica del terreno.***

#### **Premessa**

Nel corso di questo capitolo sarà definito il metodo attraverso il quale è possibile ottenere una ottimizzazione delle ricostruzioni 3D del sottosuolo.

Una ricostruzione 3D del sottosuolo risulta essere molto utile nel caso in cui bisogna definire delle situazioni geologiche piuttosto complesse o delimitare aree di interesse archeologico o ambientale: avere la possibilità di definire la zona in cui eseguire uno scavo conoscendo le dimensioni delle strutture presenti o definire, ad esempio, le dimensioni areali di una eventuale infiltrazioni di inquinanti, può essere molto utile per stabilire le campagne di indagini più appropriate e l'intervento più idoneo per la risoluzione della problematica in esame.

L'obbiettivo di questa tesi di dottorato è quello di riuscire ad individuare una metodologia di acquisizione che consenta di ottenere una buona ricostruzione del sottosuolo ottimizzando il numero di acquisizioni dei dati. Ridurre il numero di acquisizione dei dati, significa ridurre i costi della campagna di indagine senza compromettere la qualità della ricostruzione stessa.

Per raggiungere tale obbiettivo, sono stati innanzitutto realizzati dei modelli sintetici rappresentativi di diverse situazioni geo-archeologiche, considerando anche alcuni modelli riportati come esempio nel manuale del programma Res3Dmod scritto da Loke .

In questo lavoro di dottorato sono stati confrontate, in particolare, le ricostruzioni del sottosuolo considerando acquisizioni 3D (i dati sono acquisiti contemporaneamente lungo la direzione X, Y e XY di una maglia predefinita), acquisizioni 3DX e 3DY (acquisizioni eseguite solo lungo una direzione della

maglia ricostruita e i dati poi sono stati elaborati con algoritmi di inversione 3D) e acquisizioni pseudo 3D con ricostruzioni di slice 3D (acquisizioni eseguite lungo i profili di una maglia definita, inversione dei dati acquisiti mediante l'utilizzo di algoritmi 2D e ricostruzioni di slice per la visualizzazione 3D dei dati invertiti).

Per l'ottimizzazione dei profili, per stabilire, cioè le modalità di acquisizioni che consentono di ottimizzare la campagna di prospezione geoelettrica per ricostruzioni 3D del sottosuolo, sono stati eseguiti dei confronti in cui è stato mantenuto costante il dettaglio su ogni profilo realizzato ma è stata variata la copertura areale di acquisizione dei dati aumentando la distanza, per le varie maglie realizzate, tra i vari profili.

I vari confronti sono stati eseguiti, anche, considerando diverse tipologie di acquisizione, tra le più comunemente utilizzate in vari lavori di letteratura: Dipolo-Dipolo, Polo-Polo e Wenner-Schlumberger.

La risposta elettrica dei vari modelli sintetici ricostruiti, è stata valutata utilizzando l'algoritmo di calcolo di Loke and Barker, Res3dmod, scritto nel 1996. Con questo algoritmo è possibile risolvere un forward problem: è possibile cioè, realizzato un modello qualsiasi di resistività, valutare la risposta elettrica che il modello di sottosuolo ricostruito determina in superficie. E' possibile valutare questa risposta con qualsiasi tipologia di array. I dati sono assegnati a diversi profili in modo da poter ottenere varie maglie da poter confrontare. Con l'algoritmo di inversione scritto sempre da Loke è stato definito il modello di sottosuolo nelle diverse maglie ricostruite.

Lavori simili sono stati eseguiti da Papadopoulos (Abstract, 2005) nel quale sono state confrontate, sia su modello sintetico che su un caso reale, le ricostruzioni 3D con pseudo 3D solo con dispositivo Polo-Polo in linea e da Illiceto et al. (2002) dove, su modelli ridotti, nell'ambito del sistema ERS (Electrical Resistivity Sistem), sono stati confrontati l'array Wenner, il Dipolo-Dipolo Assiale e il Rettangolo. L'obiettivo di quest'ultimo lavoro consiste nel cercare di definire quali dei dispositivi confrontati risulta essere il più idoneo alla ricostruzione della complessa struttura analizzata; in questo lavoro, le varie ricostruzioni sono state ottenute facendo variare il passo di campionatura lungo

ogni profilo. Nei confronti realizzati in questa tesi di dottorato, non è stato modificato il passo di campionamento sui profili ma è stata variata la copertura areale dei dati (la distanza tra i profili della maglia).

### 3.1 Modello 1

Nel primo modello considerato, riportato in fig. 3.1 e modificato da un modello riportato nel manuale del programma di Loke, sono stati modellizzati, all'interno di un sottosuolo omogeneo di resistività pari a  $10 \text{ Ohm m}$ , due corpi di uguale resistività (pari a  $100 \text{ Ohm m}$ ), uguale spessore ( $1.25 \text{ m}$ ) ma di dimensioni diverse (rispettivamente di  $3 \text{ m} \times 7 \text{ m}$  e  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ). Le misure sono state calcolate considerando una maglia rettangolare di dimensioni  $15 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ .

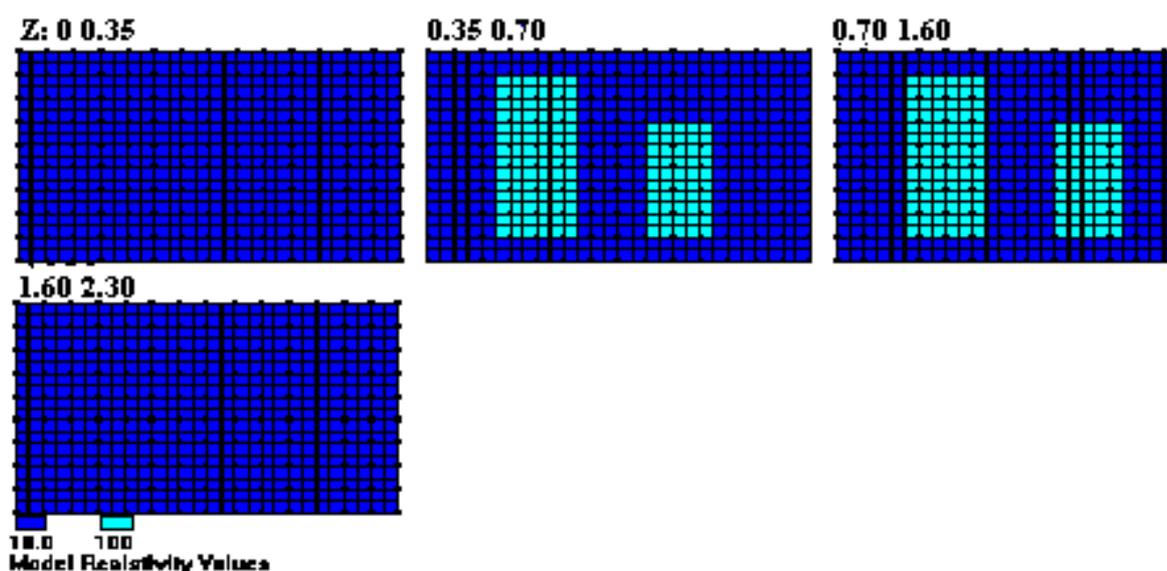


Fig. 3.1: Primo modello ricostruito. Le diverse slice rappresentano vari livelli di profondità indicate al di sopra di ogni slice. I diversi colori indicano i valori di resistività reali dei corpi modellati.

La risposta elettrica da definire è stata valutata considerando un passo di campionatura pari a  $1 \text{ m}$ ; date le dimensioni delle strutture così modellizzate, il passo scelto consente una buona ricostruzione dei corpi stessi.

Sono state considerate diverse maglie di misure che presentano una diversa copertura areale considerando distanze tra i profili rispettivamente paria ad  $1 \text{ m}$ ,  $2 \text{ m}$  e  $3 \text{ m}$ . Infatti, per confrontare le diverse ricostruzioni che

possono essere realizzate, si è scelto di campionare i dati lungo ogni profilo con lo stesso passo di campionamento e variare solo la distanza tra i profili: in questo modo viene ridotta la copertura areale dei dati ma non il dettaglio su ogni profilo. L'obiettivo è quello di trovare una acquisizione che consenta di definire, se possibile, uno schema di acquisizione ottimale per le ricostruzioni 3D del sottosuolo.

Come già detto, i diversi confronti e le diverse ricostruzioni, sono stati realizzati anche considerando diverse tipologie di array.

Il modello considerato, rappresenta una struttura 3D che in ambiente archeologico può essere rappresentativa di strutture assimilabili a vasche o tombe riempite di materiale piuttosto compatto e con una discreta componente di materiale argilloso.

### **3.1.1 Dipolo-Dipolo**

In fig. 3.2, sono riportate le diverse ricostruzioni ottenute rispettivamente acquisendo solo lungo la direzione X della maglia ipotizzata (fig. 3.2 a), solo lungo la direzione Y (fig. 3.2 b) e su entrambe le direzioni. Il passo di campionatura e la distanza tra i vari profili realizzati è di 1m. I dati sono stati invertiti, utilizzando l'algoritmo di inversione Res3Dinv.

Come si evince dalla stessa figura, le ricostruzioni, riportate utilizzando la stessa scala di colore per le resistività per rendere più veloce il confronto, non presentano nessuna significativa differenza. In tutte e tre le ricostruzioni elaborate è possibile determinare la presenza di due corpi di dimensione diversa, con lo stesso contrasto di resistività rispetto al materiale omogeneo in cui essi sono inseriti.

La presenza dei corpi è individuata dai contrasti di resistività più alti (definiti nella terza e quarta slice di tutte e tre le figure 3.2) mentre l'effetto determinato dalla presenza delle strutture modellizzate è rappresentato da un contrasto di resistività più basso.

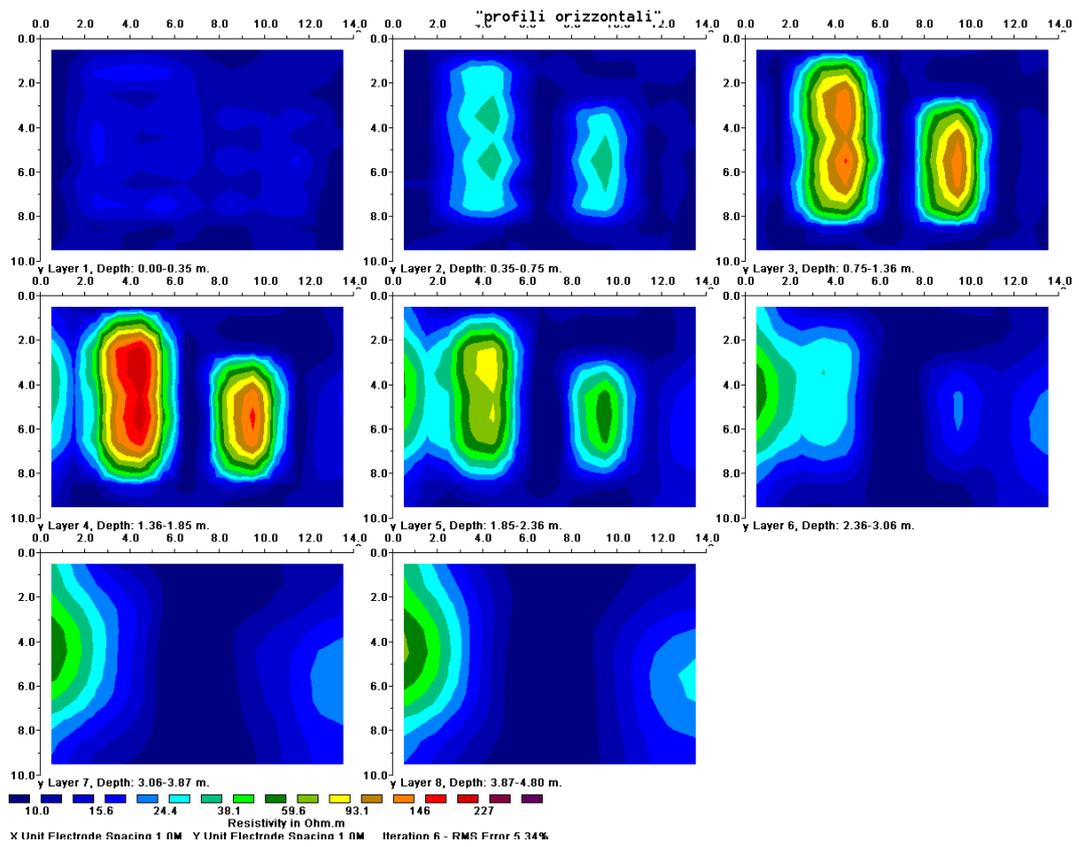


Fig.3.2 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m, distanza tra i profili pari a 1m e acquisizioni solo lungo la direzione X.

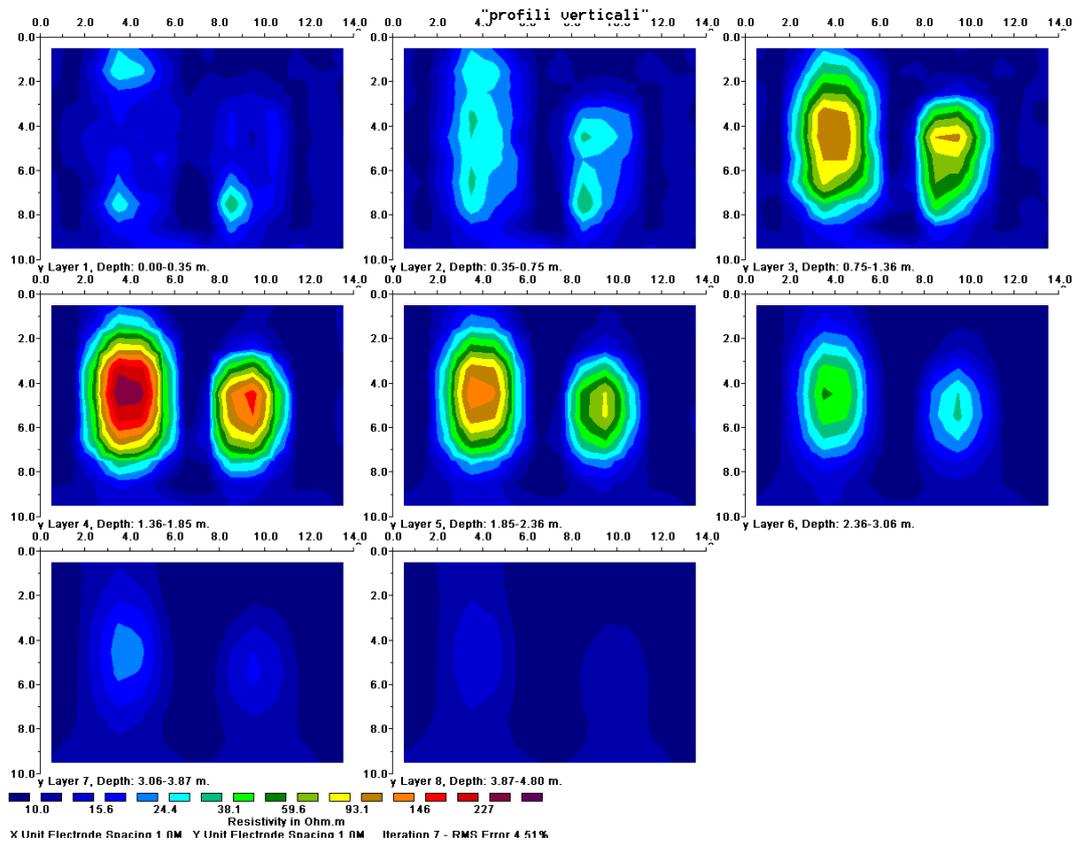
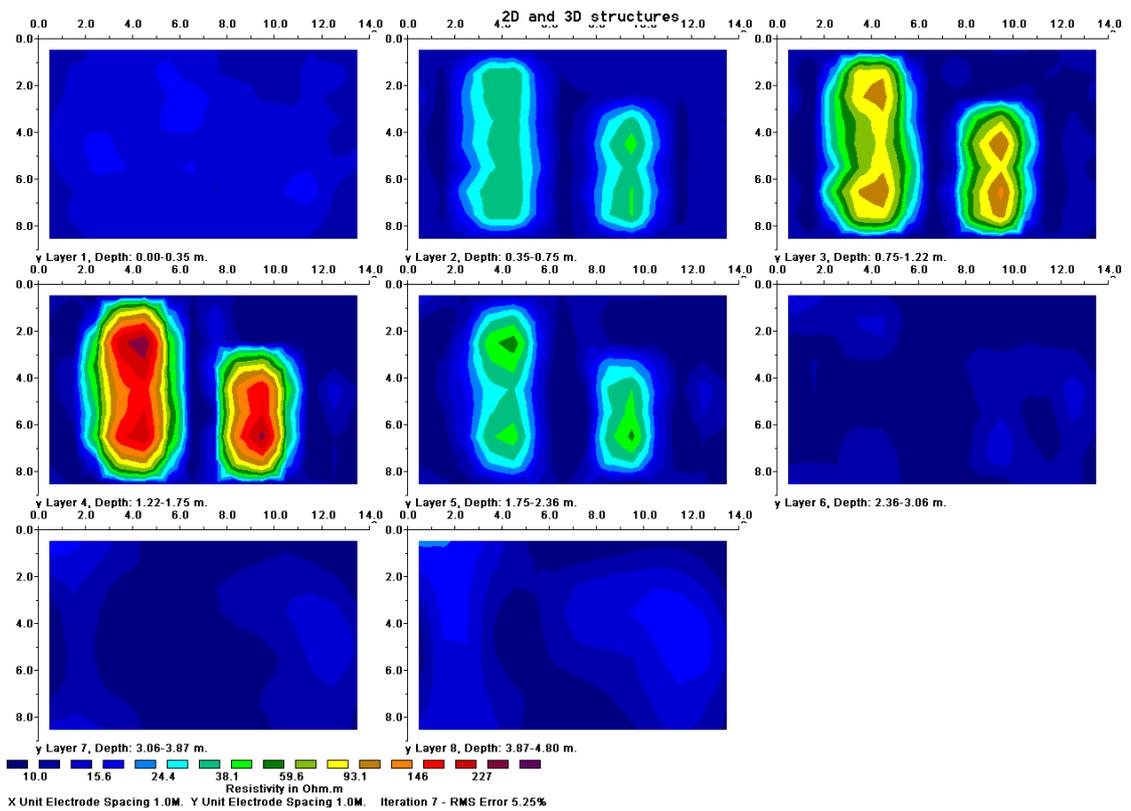
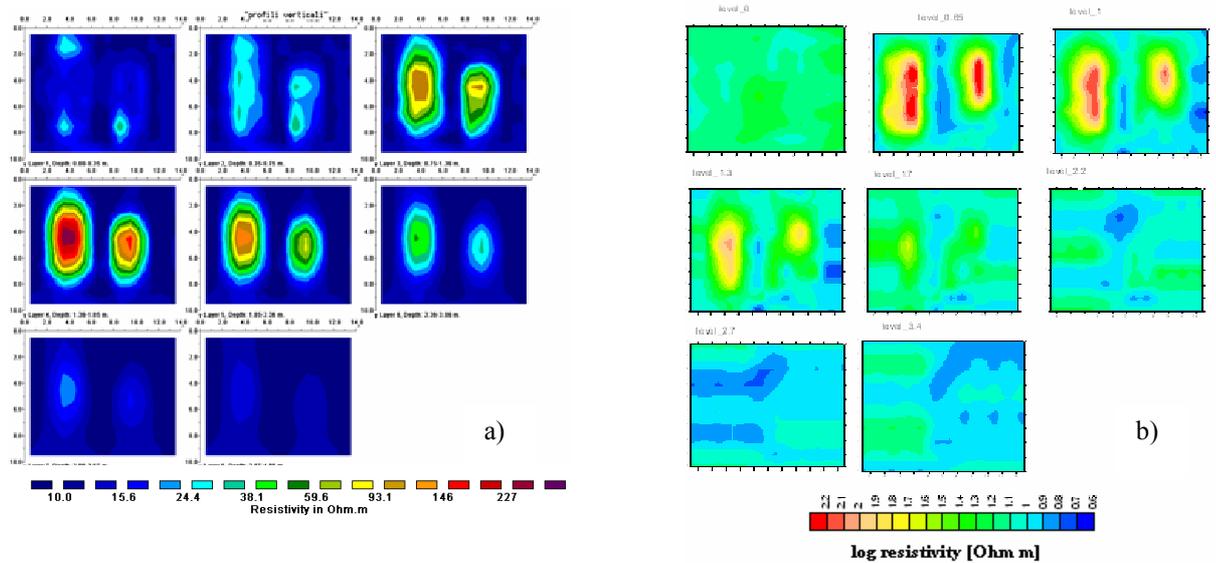


Fig.3.2 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m, distanza tra i profili pari a 1m e acquisizioni solo lungo la direzione Y.



**Fig.3.2 c:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m, distanza tra i profili pari a 1m e acquisizioni lungo le due direzioni. .

Pertanto le tre ricostruzioni possono essere considerate equivalenti ed il confronto tra la ricostruzione 3D del sottosuolo e la ricostruzione tramite l'elaborazione di pseudo 3D, sono state valutate solo lungo la direzione X.

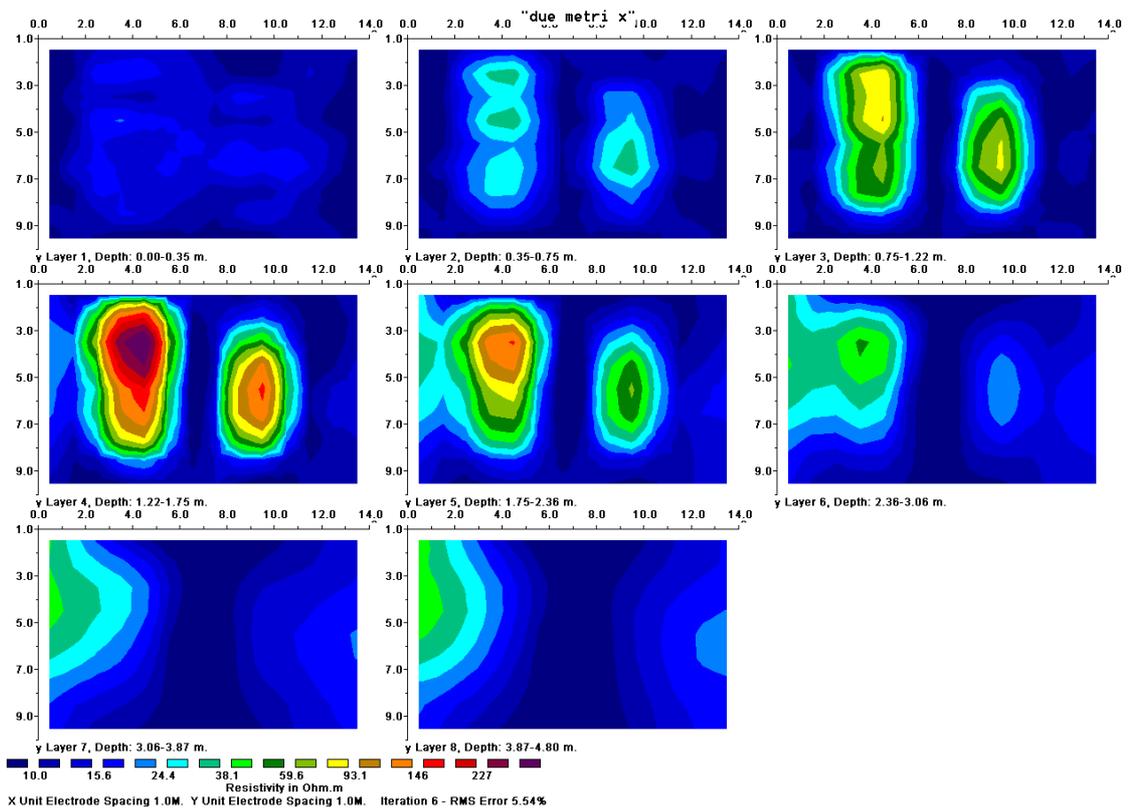


**Fig 3.3:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale e passo di campionatura pari a 1m. a) Ricostruzione 3D b) ricostruzione di pseudo 3D.

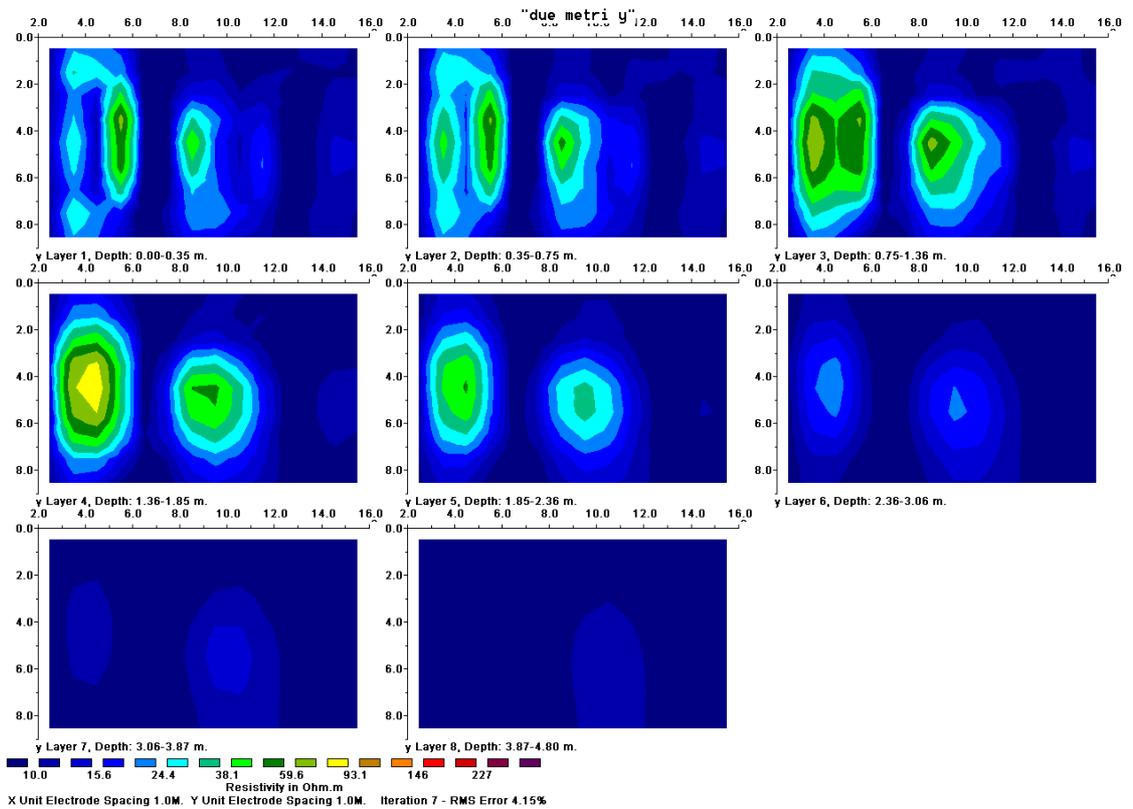
Quest'ultima ricostruzione è stata ottenuta, come già detto, considerando i profili eseguiti lungo la direzione X, invertendo i dati utilizzando l'algoritmo di inversione Res2Dinv e visualizzando i dati invertiti con opportuni programmi di visualizzazioni 3D (figg. 3.3 a e b, rispettivamente). Da questo confronto appare chiaro che le ricostruzioni non sono del tutto equivalenti; naturalmente la presenza dei due corpi è evidenziata da entrambe le metodologie ma il limite inferiore dei due corpi e i limiti degli stessi sono sicuramente più evidenti nelle ricostruzioni 3D che in quelle delle pseudo 3D.

Pertanto la ricostruzione 3D è da preferire a quella delle pseudo 3D.

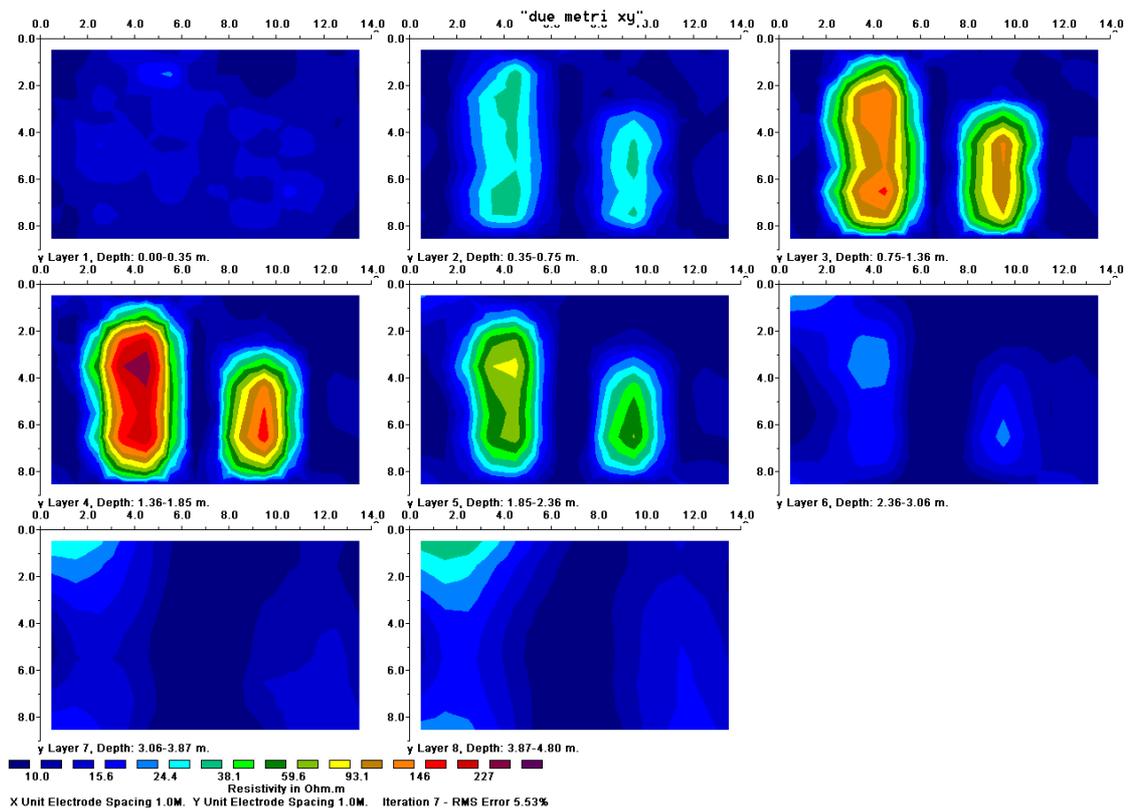
I successivi confronti sono stati eseguiti per verificare la possibilità di definire un'ottimizzazione nell'acquisizione dei dati per ottenere una ricostruzione 3D del sottosuolo con un ridotto numero di profili da realizzare.



**Fig.3.4 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione X.



**Fig.3.4 b:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione Y.



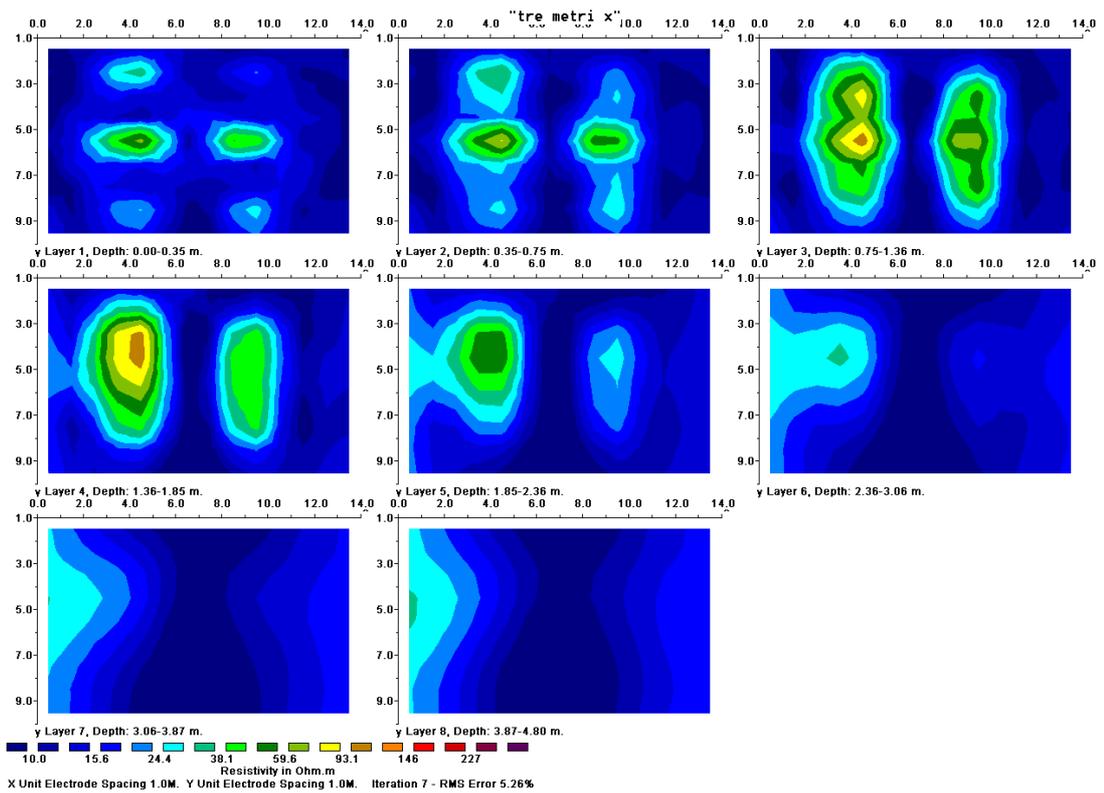
**Fig.3.4 c:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni lungo le due direzione.

Sono state eseguite ricostruzioni utilizzando un passo tra i profili pari a 2m (fig. 3.4) e un passo pari a 3 m (fig. 3.5); la scelta dei profili è stata fatta ipotizzando di non conoscere la posizione e la dimensione dei corpi. Sono state ricostruite delle maglie simmetriche nelle due direzioni.

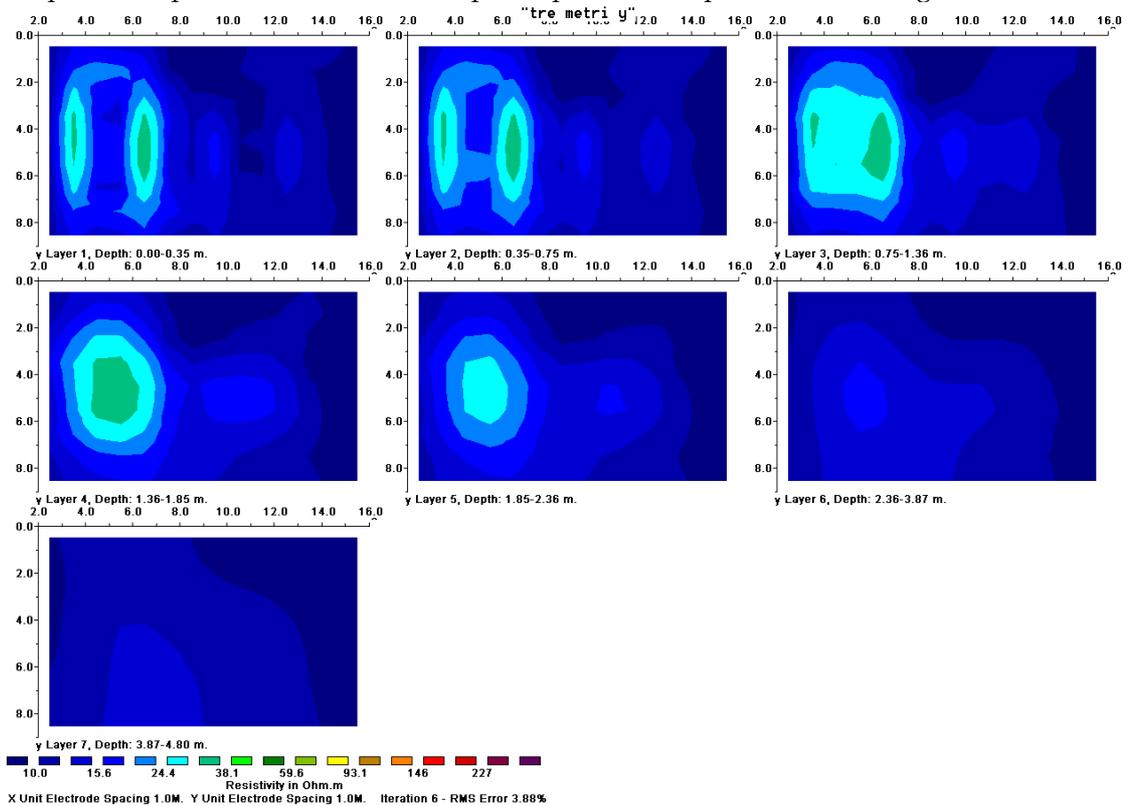
In figura 3.4 (così come in figura 3.5 anche se in maniera meno evidente), è ancora possibile evidenziare non solo la presenza dei due corpi in tutte e tre le diverse acquisizioni ma che le acquisizioni eseguite lungo la direzione X sono sicuramente confrontabili con quelle acquisite lungo le direzioni XY.

E' possibile definire una direzione in cui acquisendo meno dati, si ottiene una discreta ricostruzione delle strutture del sottosuolo.

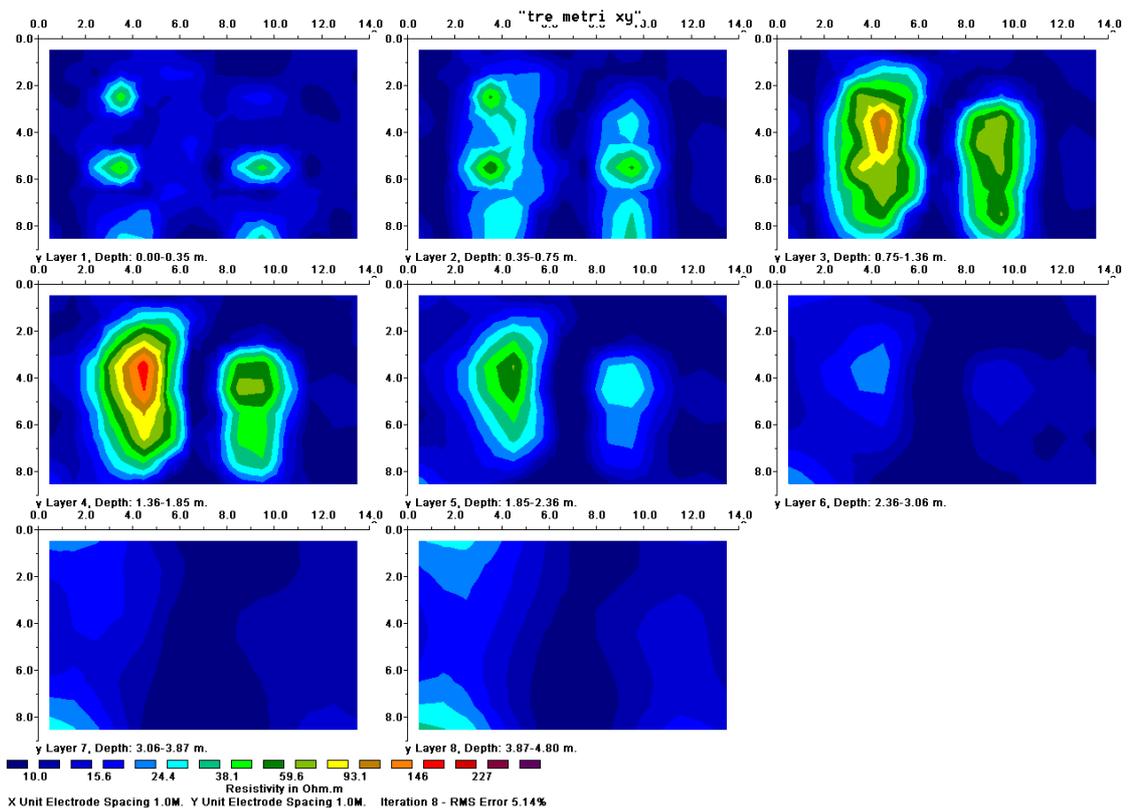
Conoscere la direzione in cui è più conveniente eseguire dei profili, è semplice quando ci sono informazioni a priori sulla zona oggetto di indagine. Questo è sicuramente fattibile quando bisogna investigare in aree archeologiche, in quanto nella maggior parte dei casi c'è una certa conoscenza delle strutture che si vogliono individuare.



**Fig.3.5 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione X.



**Fig.3.5 b:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione Y.



**Fig.3.5 c:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni lungo le due direzione

Acquisire meno dati non significa necessariamente ottenere delle ricostruzioni 3D meno dettagliate.

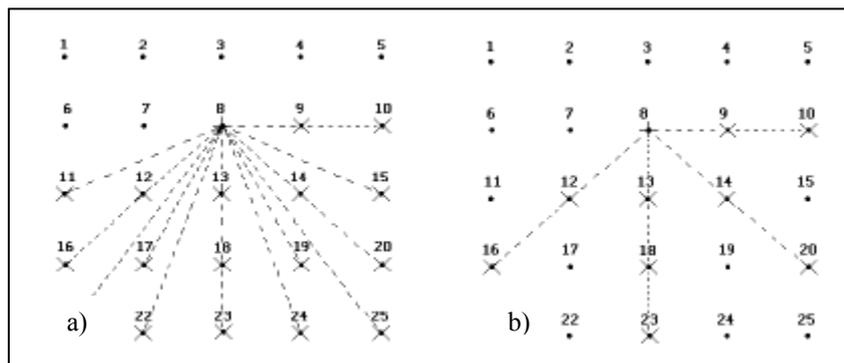
Le osservazioni fatte finora consentono di sottolineare che nel caso si abbiano informazioni a priori sull'area da studiare relative alla tipologia della struttura e alle dimensioni della stessa, è possibile ottenere una buona ricostruzione 3D del sottosuolo acquisendo dati solo lungo una direzione con distanza tra i profili uguale al passo di campionatura utilizzato per l'acquisizione dei dati lungo ogni profilo. In caso contrario bisogna eseguire dei profili in entrambe le direzioni.

Naturalmente minore è la distanza tra i profili di acquisizione, migliore sarà la ricostruzione ma maggiore saranno i costi della campagna di acquisizione. Un buon compromesso si raggiunge, nel caso non siano note le direzioni e/o le dimensioni dei corpi ed è necessario, comunque, fornire delle informazioni preliminari dell'area da investigare, eseguendo dei profili la cui distanza non sia superiore a tre volte il passo di campionatura utilizzata, dato

che, come si evince dalle strutture modellate, con un passo maggiore tra i profili non è più possibile definire la struttura.

### 3.1.2 Polo-Polo

Le acquisizioni eseguite con il dispositivo Polo-Polo possono essere fatte in diversi modi, come riportato in figura 3.6. Come si evince da questa figura è possibile realizzare due diverse acquisizioni definite complete data set data e cross-diagonal data. La differenza consiste nel fatto che nella prima acquisizione i dati sono acquisiti lungo tutte le direzioni possibili (rappresentate dalle linee tratteggiate di figura 3.6) mentre per la cross-diagonal sono scelte solo alcune diagonali lungo le quali acquisire i dati. In questo modo si possono realizzare due schemi di acquisizioni il cui numero dei dati è molto diverso, come si vedrà meglio in seguito.



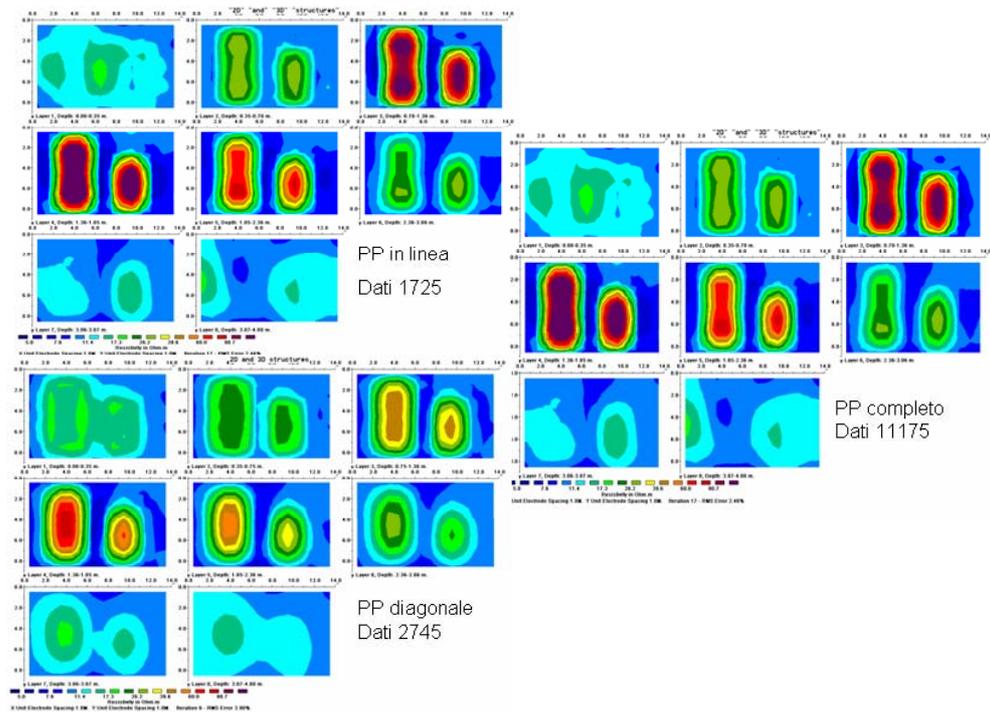
**Fig3.6:** Diverse acquisizioni con dispositivo Polo-Polo. I numeri indicano le diverse posizioni assunte dagli elettrodi; le X le posizioni dell'elettrodi di potenziale le + la posizione dell'elettrodo di corrente; le linee tratteggiate indicano le diverse coppie di acquisizione che si possono realizzare rispettivamente con la complete data set (a) e con la cross-diagonal survey (b).

Le acquisizioni con questo dispositivo possono anche essere realizzate acquisendo dati solo lungo una linea. In questo modo i due poli si spostano solo lungo i profili di una maglia prestabilita ed il numero di dati da acquisire è notevolmente ridotto rispetto agli altri due schemi di acquisizione.

Il primo confronto per questa tipologia di array è stato fatto valutando le diverse risposte elettriche (figura 3.7) che possono essere ricostruite con i vari schemi di acquisizione descritte sopra. Il modello di sottosuolo considerato è riportato in figura 3.1.

In questo confronto il passo di campionatura utilizzato e la distanza tra i profili realizzati è uguale ed è pari a 1 m.

Si evince chiaramente dalla figura 3.7 che tutte e tre le ricostruzioni elaborate consentono una ricostruzione del sottosuolo piuttosto simile a quella modellizzata. La ricostruzione con PP in linea è molto simile a quella realizzata con PP complete data set ottenuta con un numero di acquisizioni notevolmente superiore a quella del PP in linea. Con il PP in linea sono stati considerati solo 1725 dati, con il PP cross diagonal set 2745 mentre con il PP complete data set sono stati considerati 11175 dati.



**Fig. 3.7:** Ricostruzioni eseguite con varie disposizioni dell'elettrodo di corrente rispetto a quello di potenziale nell'array Polo-Polo. Il numero si riferisce ai dati che sono stati elaborati per ogni tipologia di acquisizione utilizzata.

In entrambe le ricostruzioni, infatti, nella prima slice non si evince la presenza di corpi nel sottosuolo, dalla seconda alla quarta si evince chiaramente la presenza di due corpi di uguale resistività ma di diverse dimensioni, mentre dalla quinta slice in poi si evidenzia l'effetto della presenza dei corpi posti più in superficie in quanto il contrasto di resistività comincia a diminuire. Queste osservazioni non sono confermate nelle ricostruzioni eseguite con l'acquisizione PP cross-diagonal; in questo caso, infatti, risulta essere più complesso definire la profondità alla quale sono presenti i due corpi e non si riesce a definire lo spessore degli stessi: è più complesso definire la struttura rispetto all'effetto che essa riproduce sui dati.

Quanto osservato, consente di affermare che, per le strutture esaminate e ricostruite, non esiste una correlazione diretta tra il numero dei dati e la ricostruzione elaborata: si possono ricavare ricostruzioni del sottosuolo piuttosto simili con un numero di dati notevolmente diverso.

Dato che non esiste alcuna differenza significativa tra le varie ricostruzioni eseguite nelle diverse modalità, gli altri confronti da realizzare per cercare di evidenziare (come fatto per il dipolo-dipolo), se esiste, una tipologia

di acquisizione con la quale ottenere una ricostruzione dei dati ottimale con un numero ridotto di dati, è stata considerata solo l'acquisizione eseguita con lo schema Polo-Polo in linea. Questa, rispetto alle altre due metodologie presenta il vantaggio di essere relativamente più semplice da realizzare e richiede un numero di dati da acquisire più basso.

Come già detto, acquisire meno dati non significa avere una ricostruzione meno dettagliata.

In figura 3.8 sono riportate le diverse ricostruzioni ottenute rispettivamente acquisendo solo lungo la direzione X della maglia ipotizzata (fig. 3.8 a), solo lungo la direzione Y (fig. 3.8 b) e su entrambe le direzioni (fig. 3.8 c). Il passo di campionatura e la distanza tra i vari profili realizzati è di 1m. I dati sono stati invertiti, utilizzando l'algoritmo di inversione Res3Dinv.

Come si evince dalla stessa figura, le ricostruzioni, riportate utilizzando la stessa scala di colore per indicare le variazioni di resistività in modo da renderle più immediato il confronto, non presentano nessuna significativa differenza.

E' possibile associare le due anomalie presenti a due corpi di dimensioni diverse ma che presentano gli stessi valori di resistività in quanto hanno lo stesso contrasto di resistività rispetto al materiale omogeneo in cui sono inseriti.

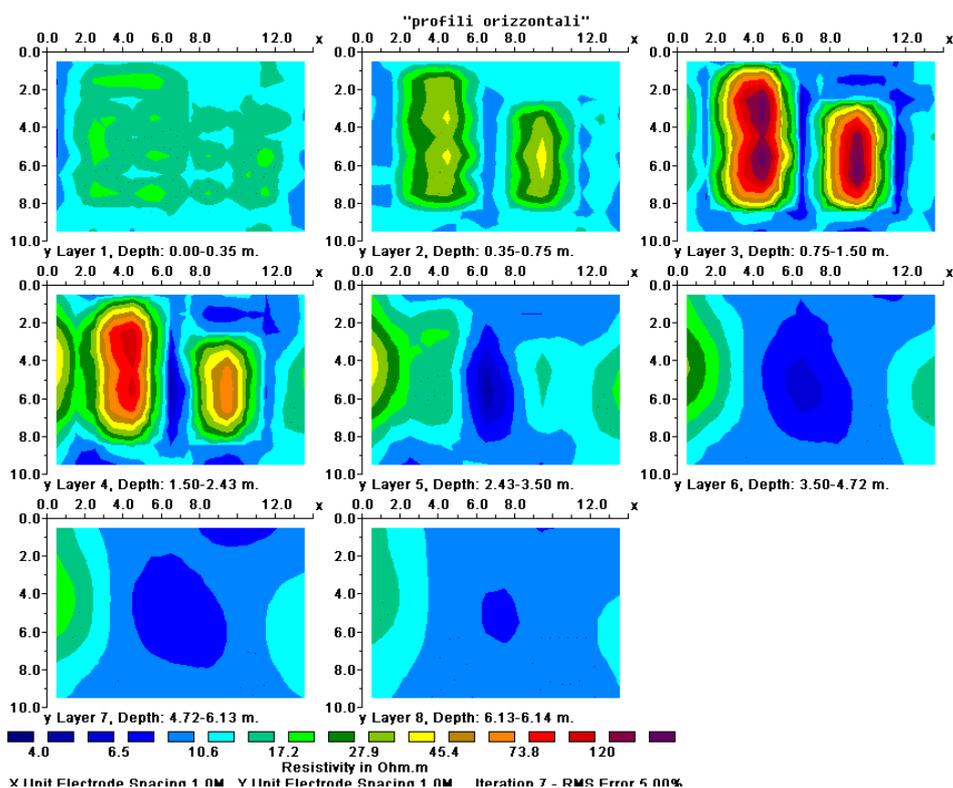


Fig.3.8 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X.

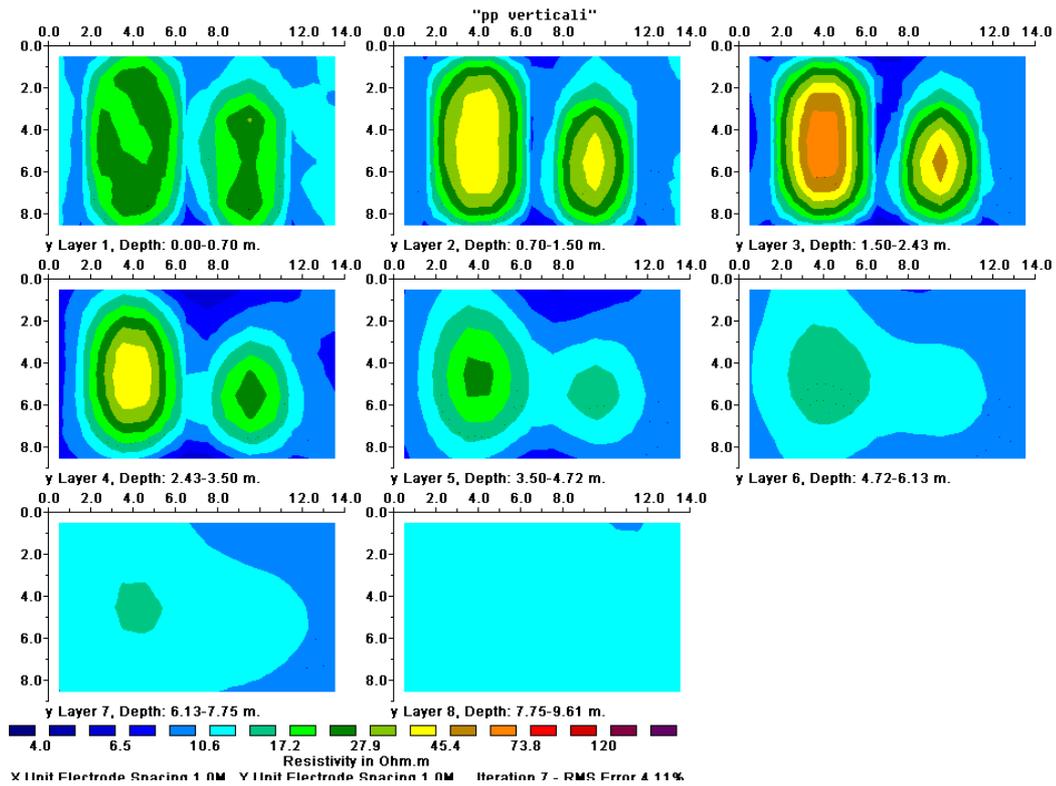


Fig.3.8 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y.

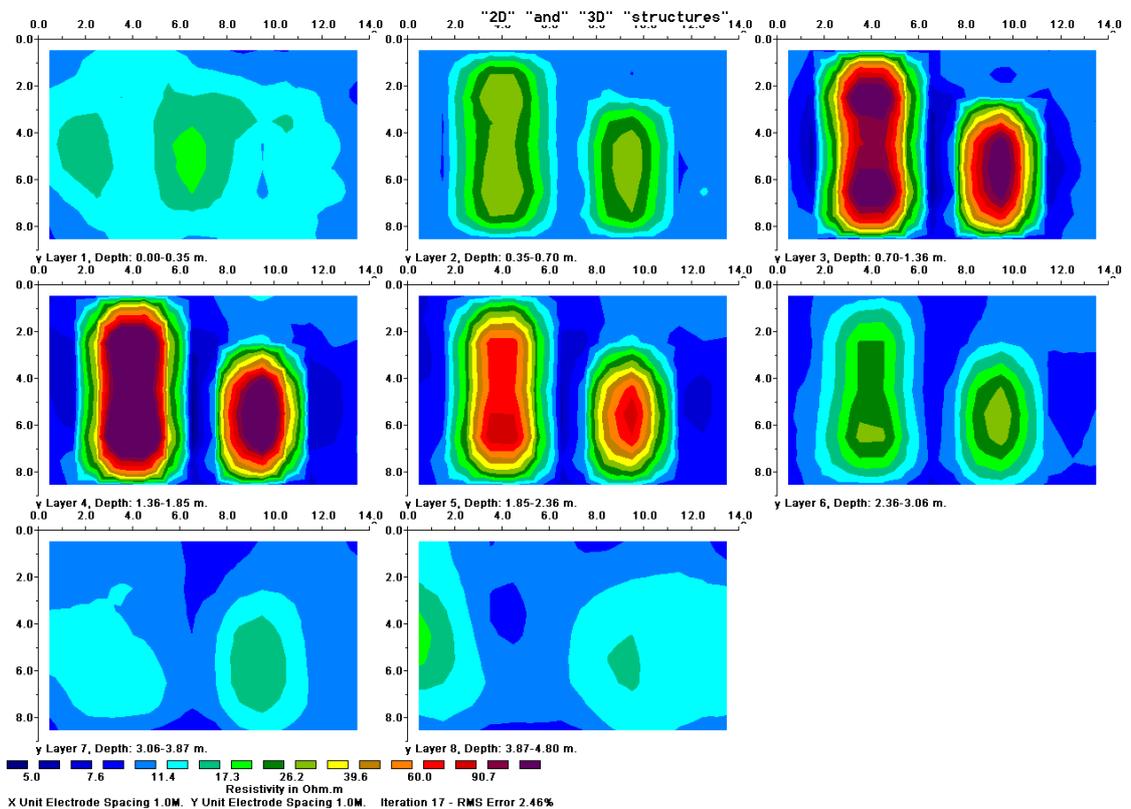
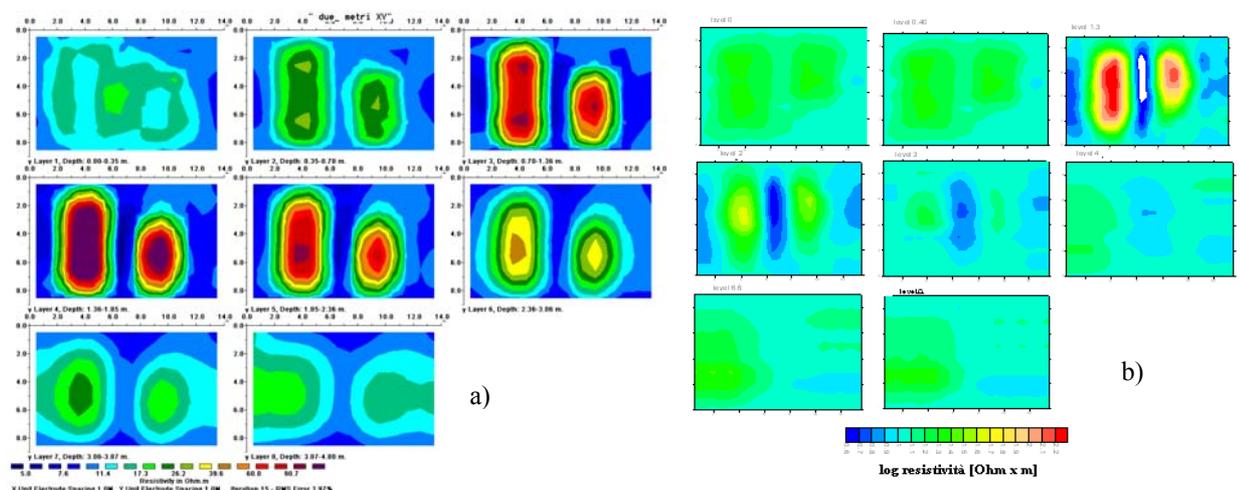


Fig.3.8 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzione.

In particolare è possibile, osservando con maggiore attenzione le ricostruzioni elaborate, evidenziare il fatto che mentre il limite superiore dei due corpi si individua bene in tutte e tre le diverse acquisizioni, il limite inferiore delle stesse è maggiormente evidente nelle fig. 3.8 a e 3.8 c. Infatti, la slice relativa alla profondità 1.85 – 2.30 m (quinta slice) delle figure di cui sopra, che rappresenta la slice in cui i due corpi non sono più presenti, l'effetto della presenza dei corpi è rappresentato da un contrasto di resistività più basso rispetto a quello che si legge nella stessa slice di fig. 3.8 b. Le ricostruzioni possono comunque essere considerate quantitativamente equivalenti ed il confronto tra la ricostruzione pseudo 3D e quella dello pseudo è stata elaborata solo lungo la direzione X (fig. 3.9).

Quest'ultima ricostruzione è stata ottenuta, come già detto, considerando i profili eseguiti lungo la direzione X, invertendo i dati utilizzando l'algoritmo di inversione Res2Dinv e visualizzando i dati invertiti con opportuni programmi di visualizzazioni 3D (figg. 3.9 a e b, rispettivamente). Da questo confronto appare chiaro che le ricostruzioni non sono del tutto equivalenti; naturalmente la presenza dei due corpi è evidenziata da entrambe le metodologie ma i bordi dei corpi ed il limite inferiore degli stessi, sono sicuramente più evidenti nelle ricostruzioni 3D rispetto a quelle delle pseudo 3D.



**Fig.3.9:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X con dispositivo Polo-Polo in linea e passo di campionatura pari a 1m. a) Ricostruzione 3D b) ricostruzione di imaging 3D.

Inoltre, confrontando i risultati riportati in figura 3.9 con quelli riportati in figura 3.3 è possibile effettuare la seguente osservazione: le ricostruzioni delle pseudo 3D elaborate con dati di Dipolo-Dipolo Assiale sono maggiormente correlabili alle ricostruzioni ottenute con i dati di inversione 3D rispetto allo stesso confronto fatto con i dati Polo-Polo in linea.

Quando il noise sui dati non è molto alto la ricostruzione con Dipolo-Dipolo risulta essere più stabile del Polo-Polo.

Come per il Dipolo-Dipolo Assiale, sono state confrontate anche le varie ricostruzioni 3D, eseguite con passo di campionatura sempre pari ad 1 m e con distanze tra i profili di 2 m e 3 m (figg. 3.10 e 3.11). Dall'analisi di queste ricostruzioni è possibile confermare che, come per il caso del Dipolo-Dipolo Assiale con l'aumento del passo di campionatura tra i profili realizzati, è possibile definire una direzione di acquisizione dei dati in cui esiste una buona correlazione con la ricostruzione fatta eseguendo i profili in entrambe le direzioni.

Questo dispositivo risulta essere meno sensibile rispetto al dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale alla variazione della distanza tra i profili realizzati e alla direzione degli stessi.

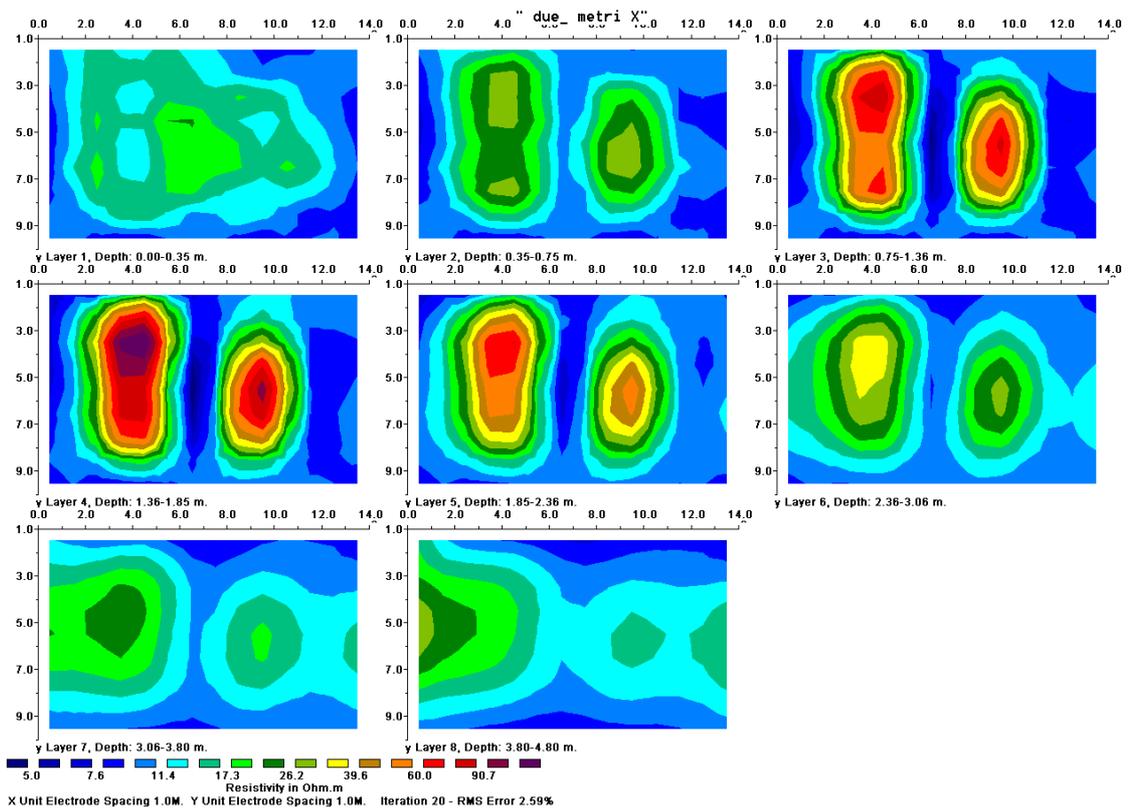


Fig.3.10 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione X.

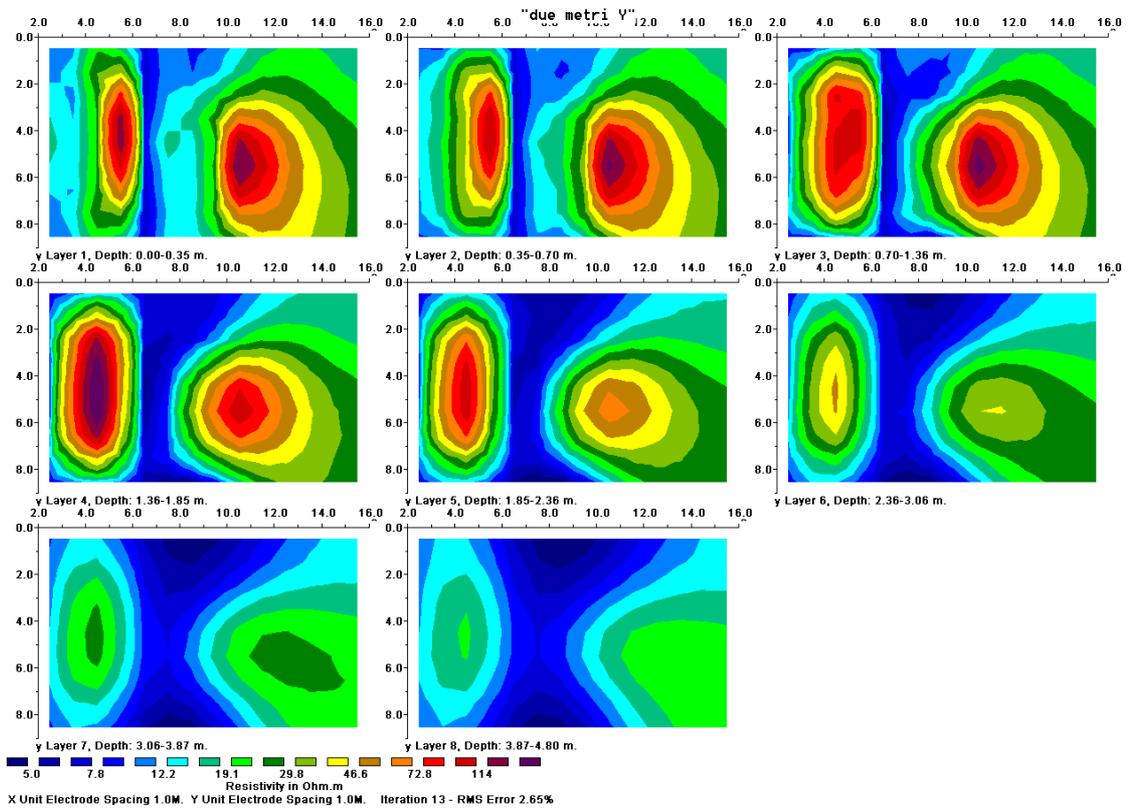
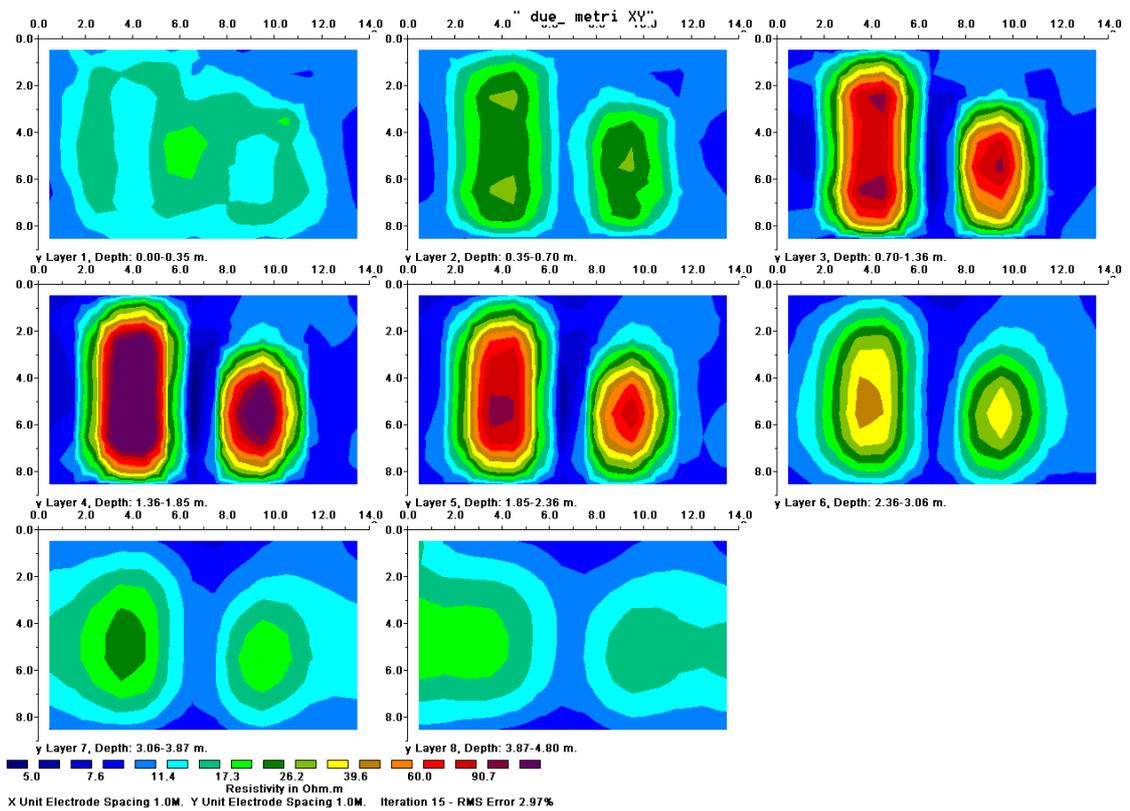


Fig.3.10 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione Y.



**Fig.3.10 c:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni lungo le due direzioni.

Confrontando infatti, la figura 3.4 con quella 3.10 si vede chiaramente come per il Dipolo-Dipolo solo la ricostruzione fatta lungo la direzione X consente di discriminare bene la presenza dei due corpi resistivi di uguale resistività ma di dimensioni diverse (così come con quella ottenuta lungo la direzione XY) mentre per il Polo-Polo esiste una buona correlazione per entrambe le direzioni. Inoltre sempre, e solo, per le ricostruzioni elaborate con i dati Polo-Polo è possibile ricavare una buona correlazione tra il modello ricostruito e il modello di sottosuolo modellizzato considerando sia distanze tra profili di 2 m che di 3 m (rispettivamente riportate in fig. 3.10 e 3.11).

Questa informazione, relativa alla maggiore sensibilità del dispositivo Dipolo-Dipolo assiale rispetto alla variazione del passo, è stata desunta anche dal lavoro eseguito da Finotti, Illiceto et al. .

Si è giunti alla stessa conclusione anche se nella ricostruzione da me eseguita non è stato variato il passo di campionamento lungo ogni profilo: la distanza tra i dipoli rimane la stessa nelle varie elaborazioni fatte; ciò che

cambia è solo la distanza tra i profili realizzati e quindi la copertura areale delle misure considerate.

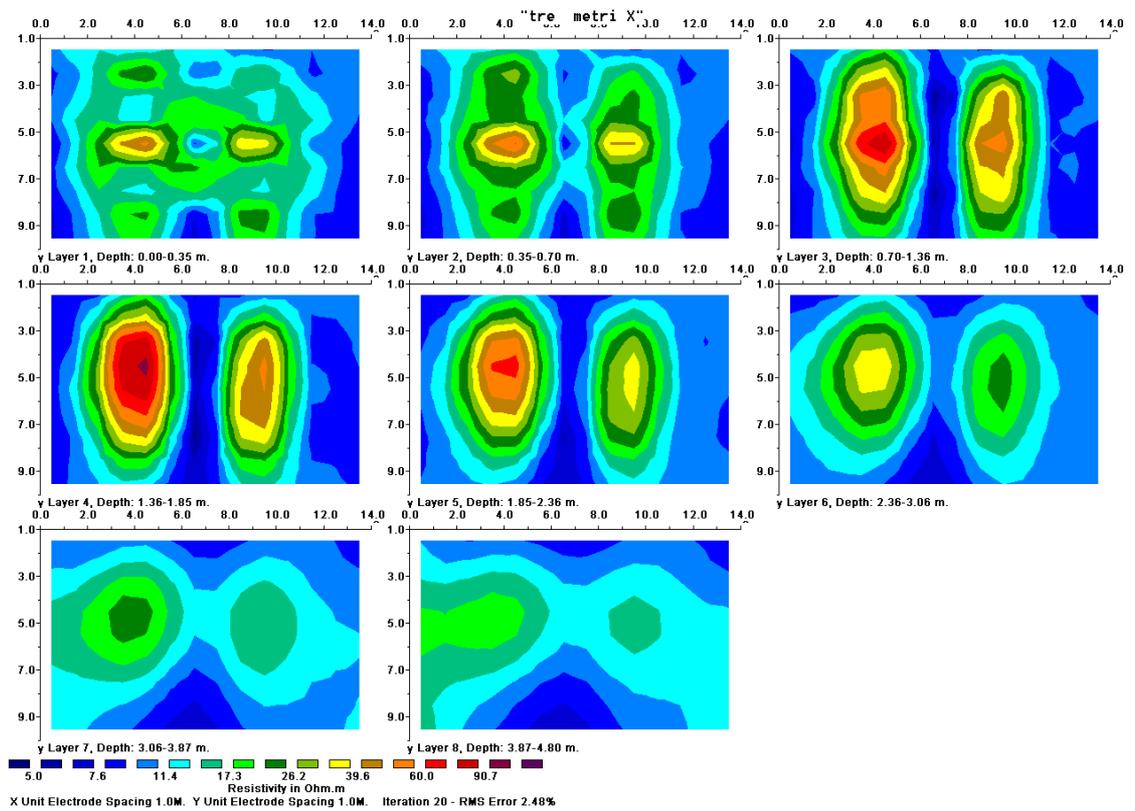
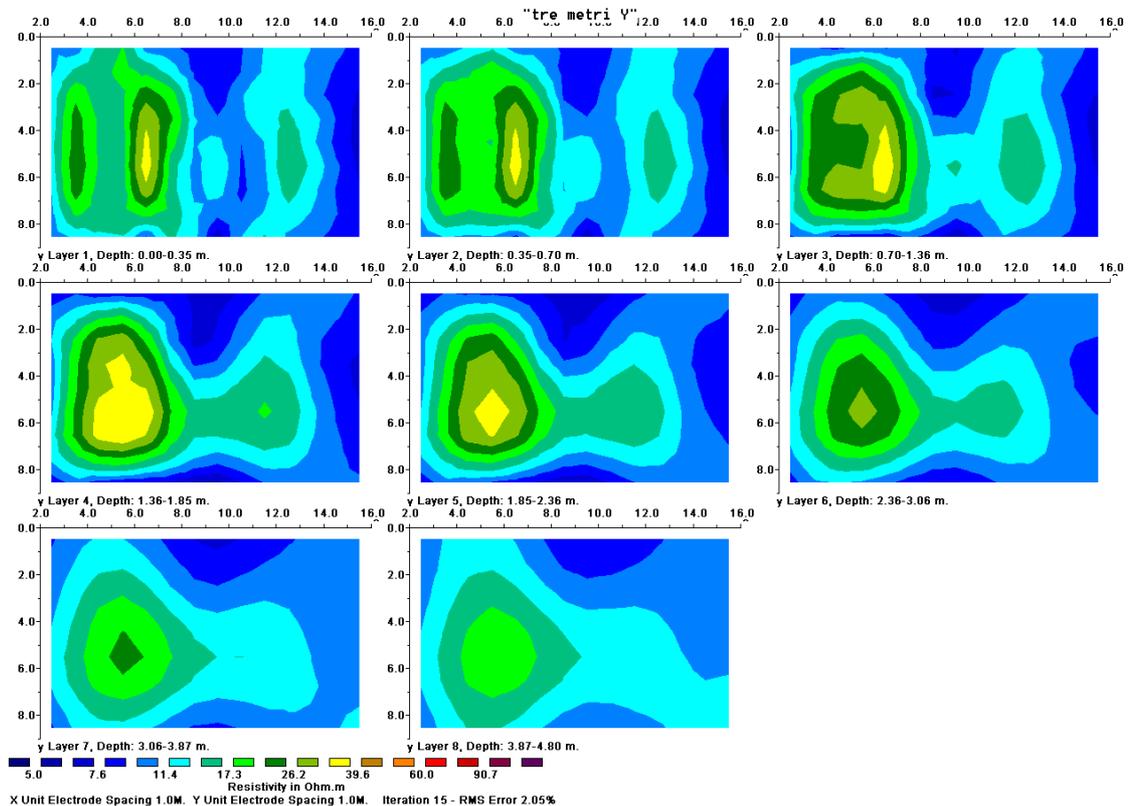
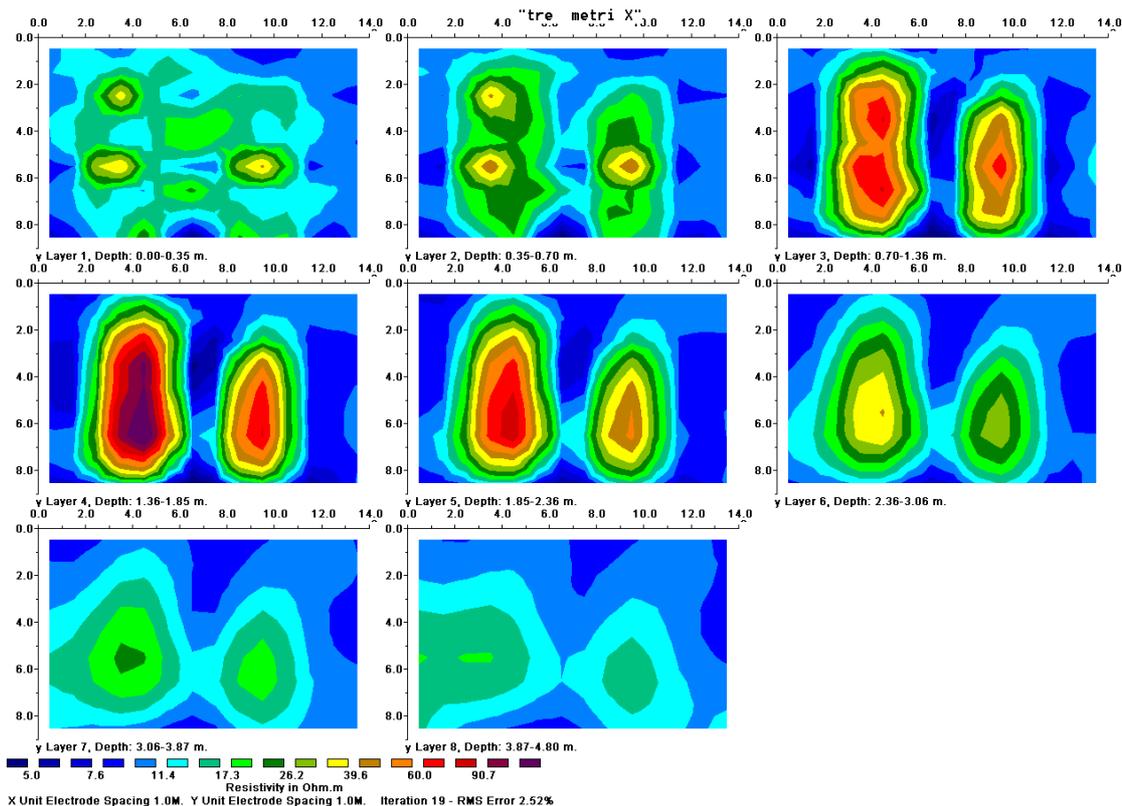


Fig. 3.11 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione X.



**Fig. 3.11 b:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione Y.



**Fig. 3.11 c:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni lungo le due direzioni.

### 3.1.3 Wenner-Schlumberger

In figura 3.12 sono riportate le ricostruzioni elaborate con i dati acquisiti con array Wenner-Schlumberger con un passo di campionatura uguale alla distanza tra i profili ipotizzati e pari ad 1 m.

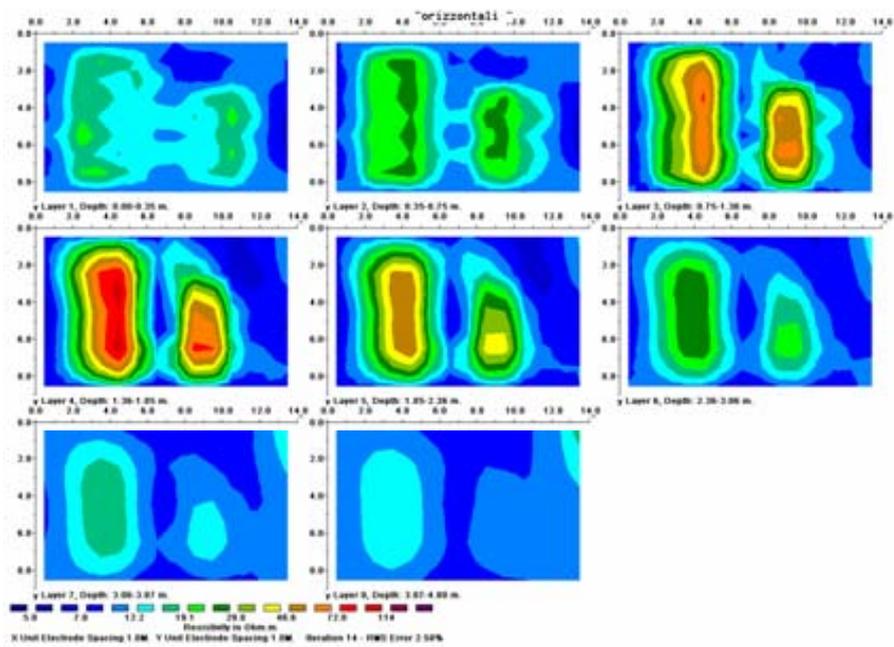


Fig. 3.12 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X.

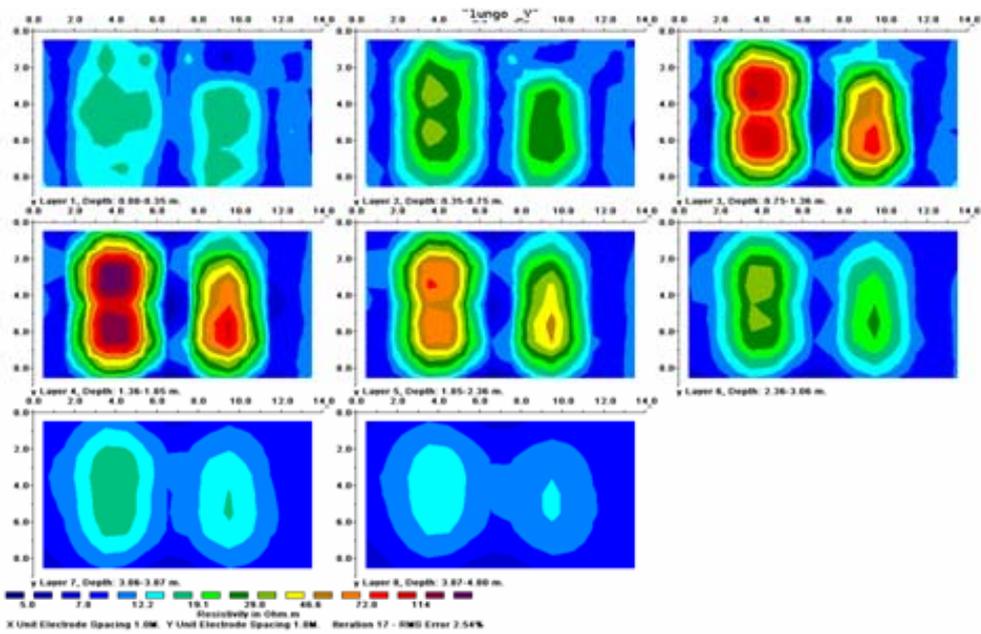


Fig. 3.12 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y.

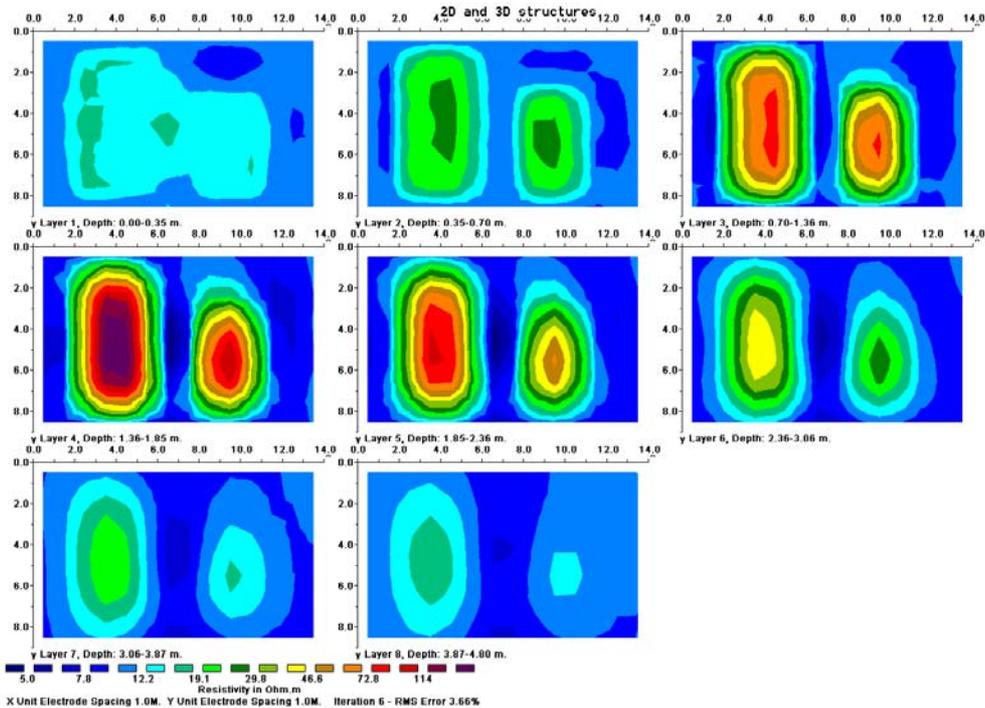
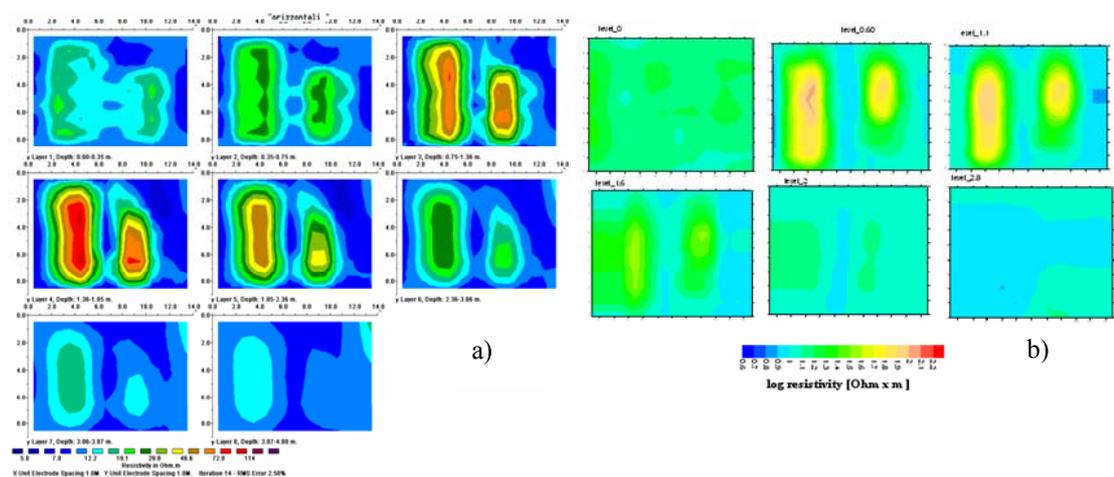


Fig. 3.12 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzioni.

Anche in questo caso, come già per il Dipolo-Dipolo ed il Polo-Polo in linea, le tre ricostruzioni eseguite sono correlabili: in tutte e tre le ricostruzioni fatte, è possibile delineare la presenza di due corpi che presentano lo stesso contrasto di resistività ma che presentano dimensioni diverse. E' possibile dunque, riconfermare il fatto che, per le strutture considerate, eseguire un fitto

campionamento in una delle due direzioni di una maglia, fornisce un risultato confrontabile con quello ricavato analizzando contemporaneamente le due direzioni.

Il confronto tra le ricostruzioni 3D e le pseudo 3D, sono state elaborate considerando l'acquisizione solo lungo la direzione X (fig. 3.13). In entrambe le ricostruzioni elaborate è possibile discriminare la presenza dei due corpi di uguale resistività ma le dimensioni degli stessi non sono ben definite nella ricostruzione dello pseudo 3D del sottosuolo (fig. 3.13 b). Infatti, in questa ricostruzione nella seconda e terza slice è evidente la presenza di due corpi resistivi immersi in un conduttivo ma le dimensioni dei due corpi non sono confrontabili con quelle modellizzate.

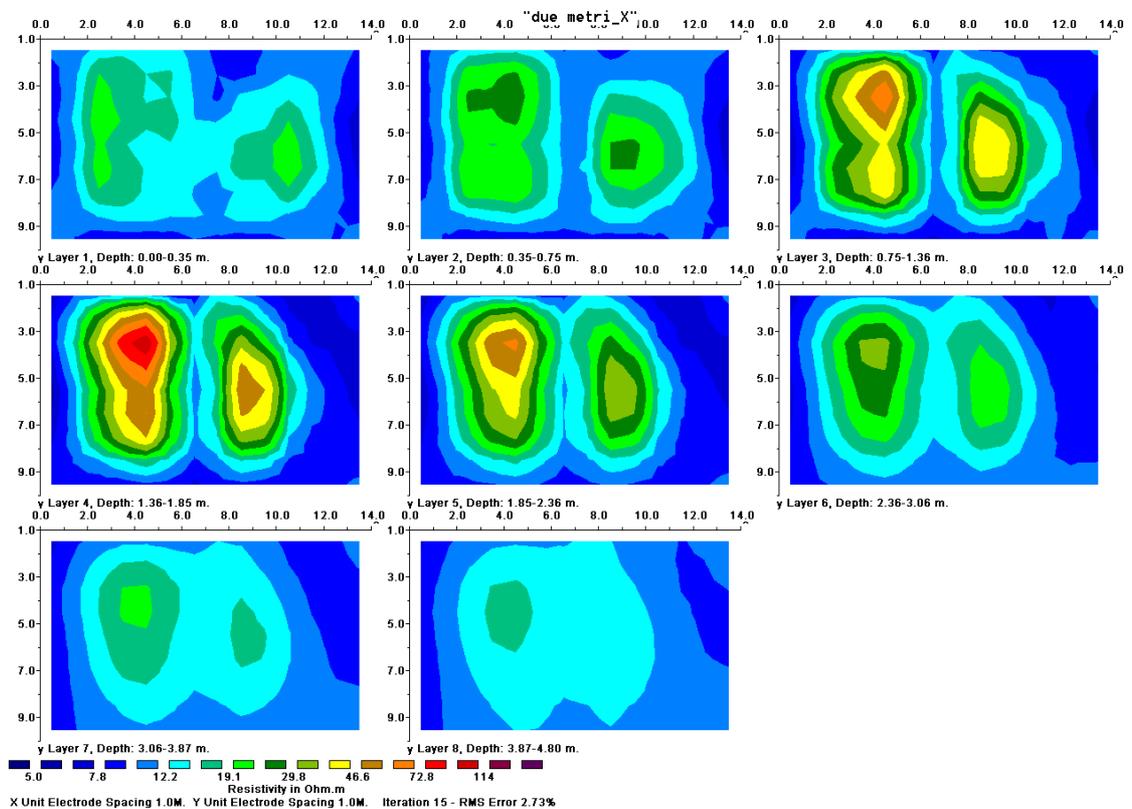


**Fig. 3.13:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X con dispositivo Wenner-Schlumberger e passo di campionatura pari a 1m. a) Ricostruzione 3D b) Ricostruzione di pseudo 3D.

Anche per questo dispositivo, sono stati realizzati dei confronti tra le varie ricostruzioni 3D eseguite con passo di campionatura sempre pari ad 1 m e con distanze tra i profili di 2 m e 3 m (figg. 3.14 e 3.15): il dettaglio su ogni profilo rimane lo stesso ma varia la copertura areale dei dati. Dall'analisi di queste ricostruzioni è possibile confermare che, come per il caso del Dipolo-Dipolo Assiale con l'aumento del passo di campionatura tra i profili realizzati, è possibile definire una direzione di acquisizione dei dati in cui esiste una buona

correlazione con la ricostruzione fatta eseguendo i profili in entrambe le direzioni.

E' evidente, confrontando le due ricostruzioni fatte con distanza tra i profili di 2m e 3 m, come anche il dispositivo Wenner-Schlumberger sia fortemente sensibile al passo di campionatura utilizzato. Le ricostruzioni elaborate infatti, con l'aumento del passo, sono fortemente dipendenti dalla direzione lungo la quale è stata eseguita la misura e per ottenere una buona correlazione con il modello considerato, sono necessarie acquisizioni su entrambe le direzioni della maglia.



**Fig. 3.14 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione X.

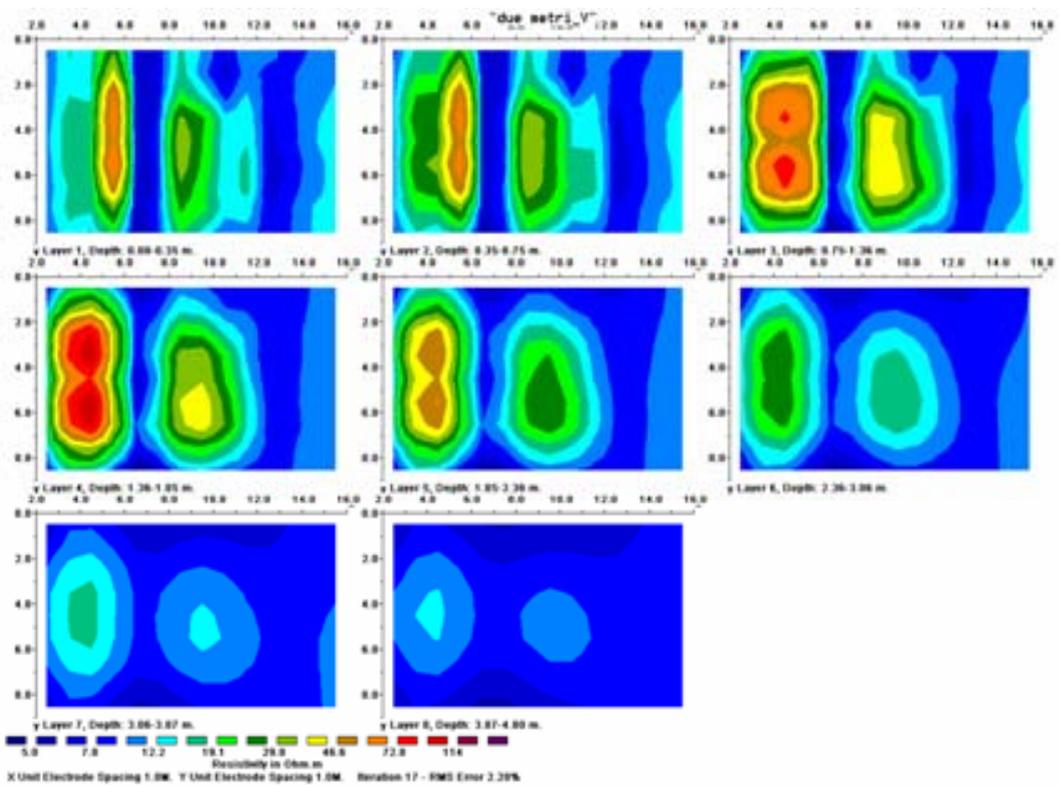


Fig. 3.14 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione Y

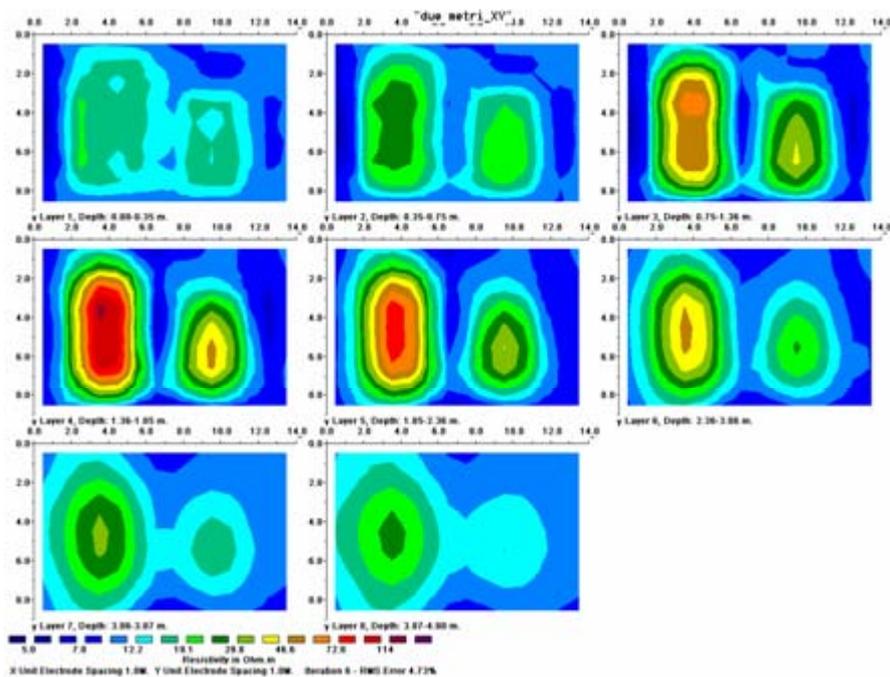


Fig. 3.14 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni lungo le due direzione.

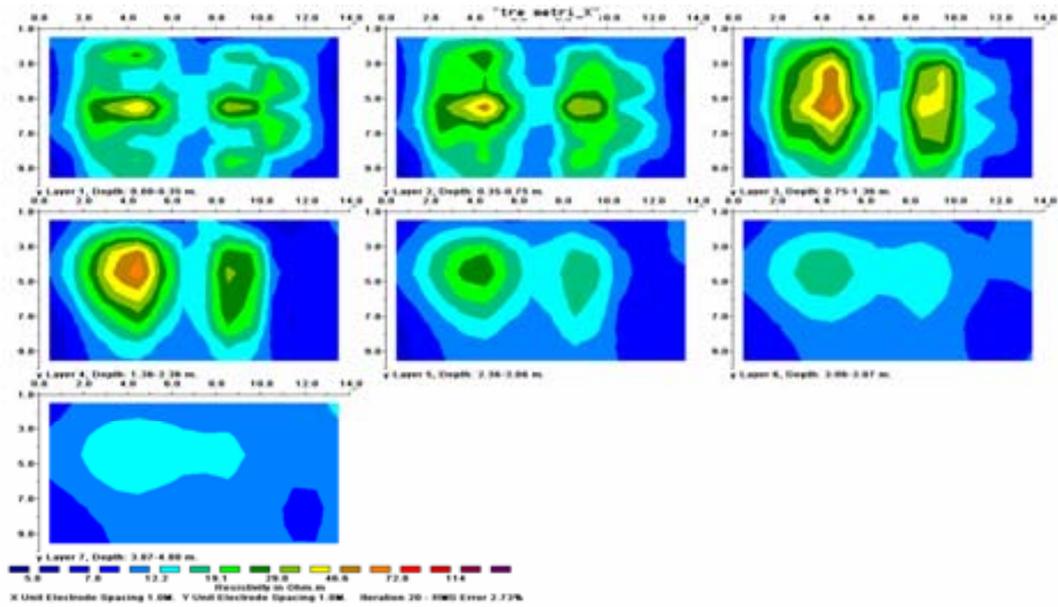


Fig. 3.15 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione X.

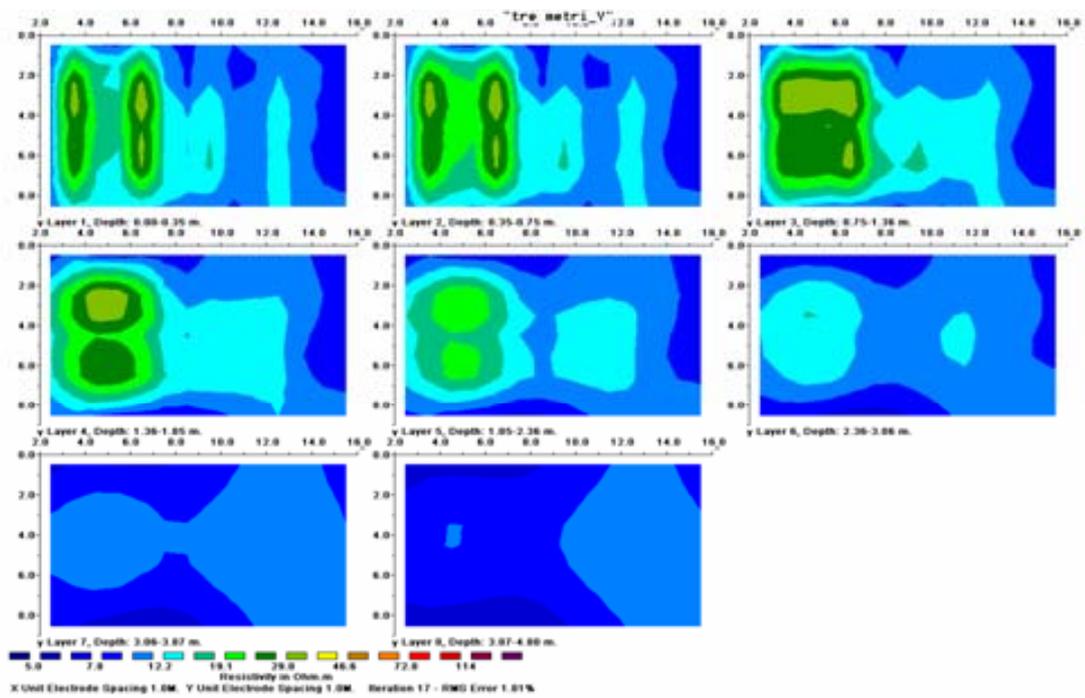


Fig. 3.15 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione Y

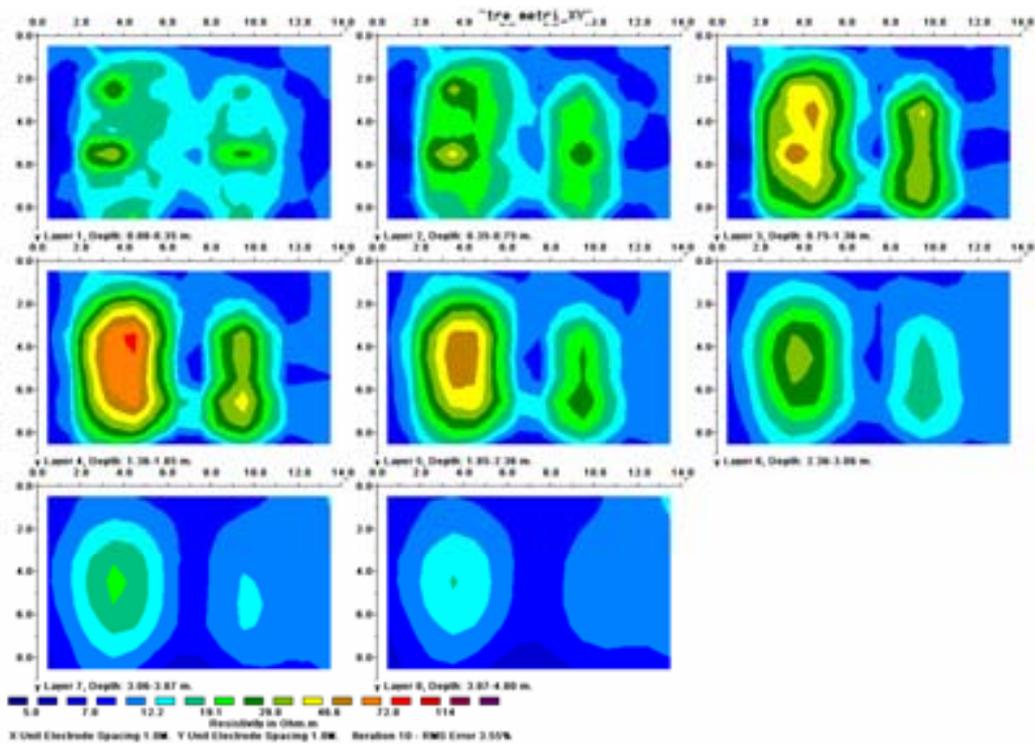
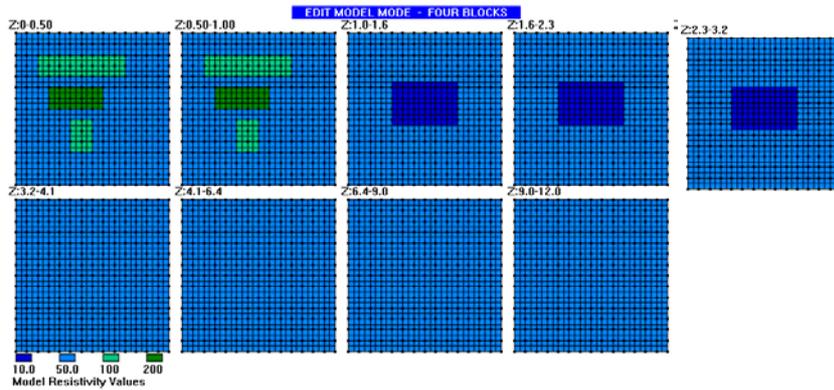


Fig. 3.15 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni lungo le due direzioni.

### 3.2 Modello 2

Nel secondo modello realizzato, riportato come esempio nel manuale del programma utilizzato per il trattamento dei dati (fig. 3.16), sono stati considerati, all'interno di un sottosuolo omogeneo di resistività pari a  $50 \text{ Ohm } m$ , quattro corpi di diverse resistività e spessore. A differenza del primo modello, le strutture modellizzate partono dalla superficie; i due corpi con la stessa resistività (pari a  $100 \text{ Ohm } m$ ) hanno uno spessore di 1 m così come il terzo corpo che presenta una resistività di  $200 \text{ Ohm } m$ . Al di sotto di questa struttura è presente un corpo di forma rettangolare di dimensioni  $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  di resistività pari a  $10 \text{ Ohm } m$ ; due bordi di questo corpo non ricadono lungo una direzione del profilo ma è posto a metà tra due profili contigui. Le misure sono state calcolate considerando una maglia quadrata di dimensioni  $14 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ .



**Fig. 3.16:** Secondo modello ricostruito. Le varie slice rappresentano vari livelli di profondità indicate al di sopra di ogni slice. I diversi colori indicano le diverse resistività reali dei corpi

La risposta elettrica da definire è stata valutata considerando un passo di campionatura pari a  $1\text{ m}$ ; date le dimensioni delle strutture modellizzate, il passo scelto consente una buona ricostruzione dei corpi stessi. Le distanze tra i vari profili sono state considerate pari ad  $1\text{ m}$ ,  $2\text{ m}$ ,  $3\text{ m}$  e  $4\text{ m}$  (sono state considerate anche diverse combinazioni tra i profili a parità di distanza tra i profili stessi).

Infatti, per confrontare le diverse ricostruzioni che possono essere fatte, si è scelto di campionare i dati lungo ogni profilo con lo stesso passo di campionamento e di variare solo la distanza tra i profili: in questo modo viene ridotta la copertura areale dei dati ma non il dettaglio su ogni profilo. L'obiettivo, come per il primo modello esaminato, è quello di trovare una acquisizione che consenta di definire lo schema di acquisizione ottimale.

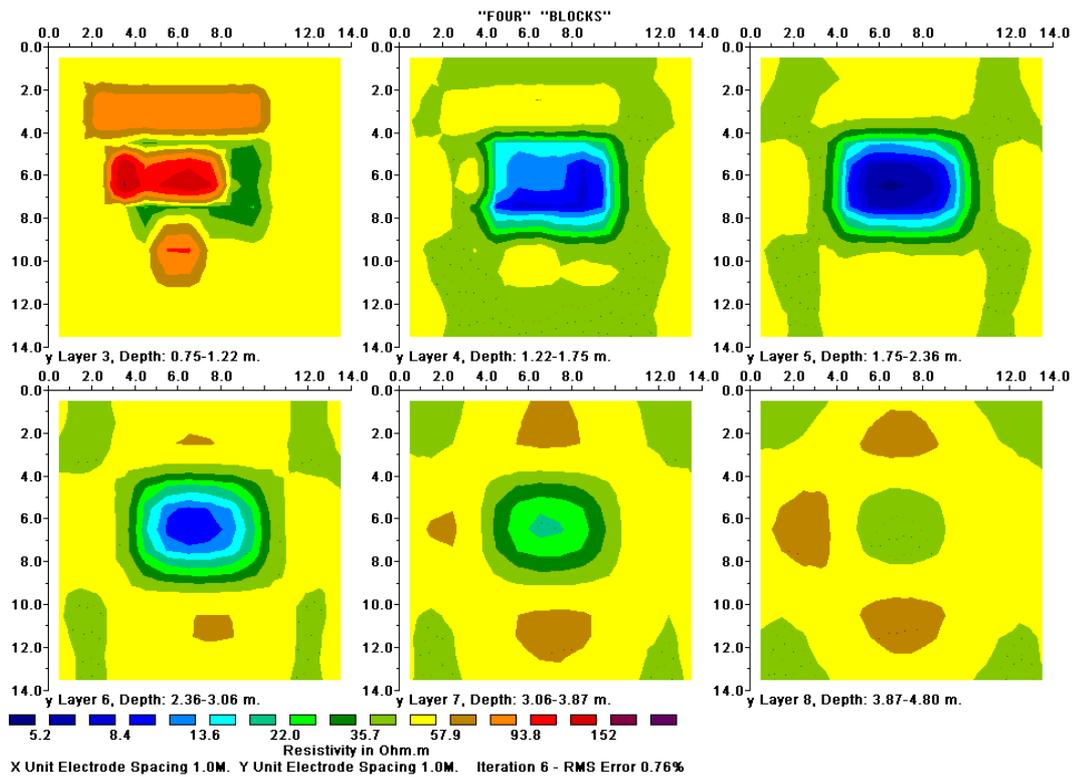
Naturalmente anche in questo caso, i diversi confronti e le diverse ricostruzioni, sono stati realizzati anche considerando diverse tipologie di array.

Il modello realizzato, rappresenta una struttura 3D che in ambiente archeologico può essere rappresentativa di strutture assimilabili a vari corpi sovrapposti di modeste dimensioni riempite da materiale piuttosto compatto.

### 3.2.1 Dipolo-Dipolo

In figura 3.17, sono riportate le diverse ricostruzioni ottenute rispettivamente acquisendo solo lungo la direzione X della maglia ipotizzata (fig. 3.17 a), solo lungo la direzione Y (fig. 3.17 b) e su entrambe le direzioni (fig. 3.17 c). Il passo di campionatura e la distanza tra i vari profili realizzati è di 1m. I dati sono stati invertiti, utilizzando l'algoritmo di inversione Res3Dinv.

Come si evince dalla stessa figura, le ricostruzioni, riportate utilizzando la stessa scala di colore per le resistività per rendere più veloce il confronto, non presentano nessuna significativa differenza in relazione alla presenza di vari corpi modellizzati. In particolare è possibile, discriminare i tre corpi dallo spessore di 1m modellizzati a partire dalla superficie. Sono ben definite sia le forme dei corpi che i contrasti di resistività.



**Fig. 3.17 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X

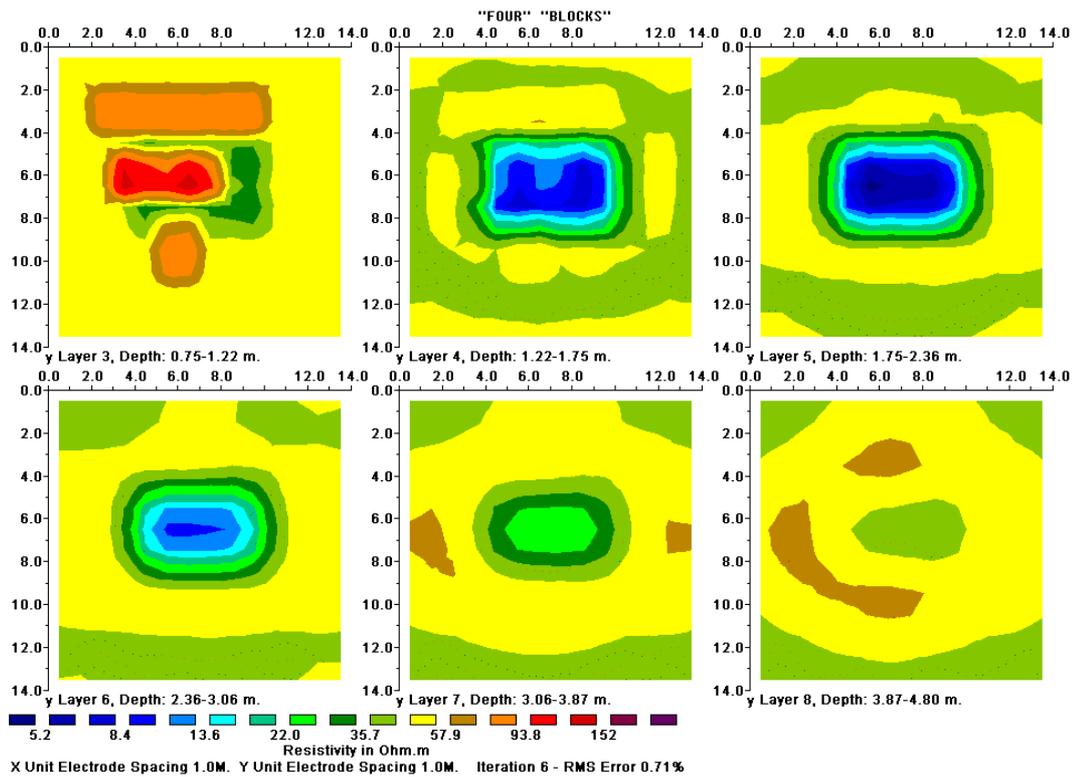


Fig. 3.17 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y

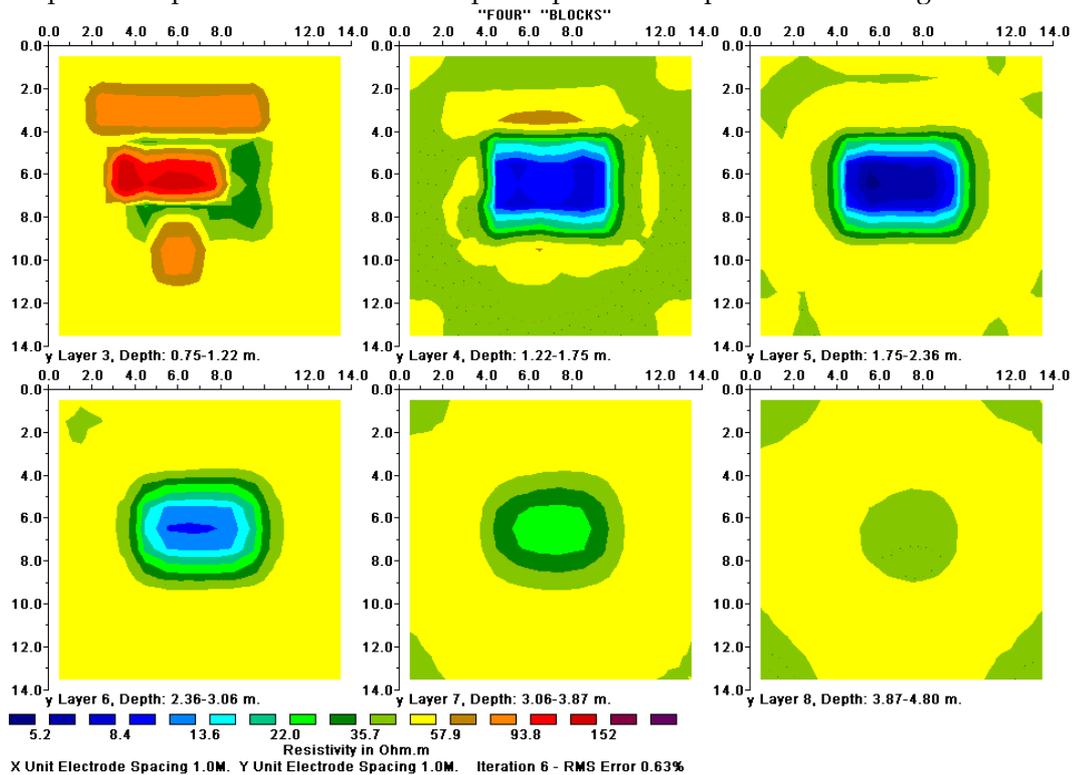
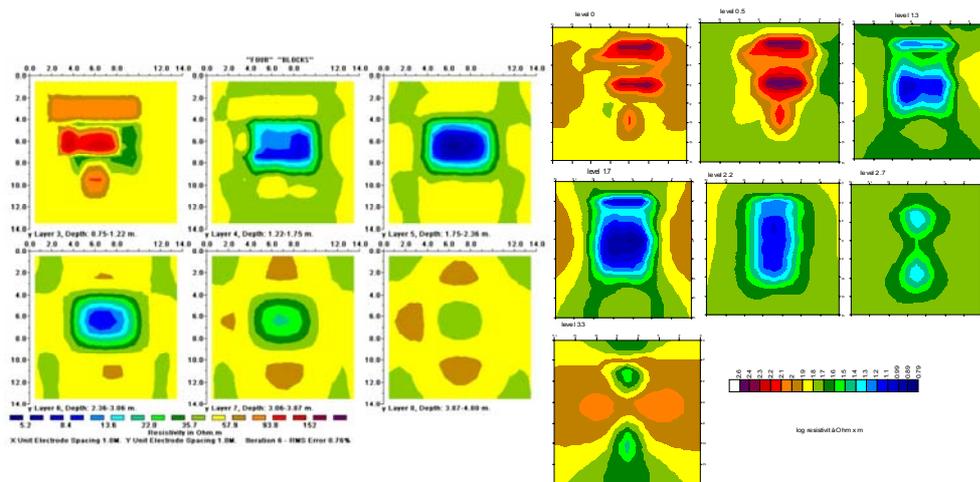


Fig. 3.17 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzione.

Le ricostruzioni elaborate, evidenziano bene entrambi i bordi dei corpi sia quelli superiori che inferiori. Le tre ricostruzioni eseguite non presentano

nessuna significativa variazione e, pertanto, è possibile nuovamente confermare il fatto che, campionando in una sola direzione in modo fitto e con il passo di campionatura tra i profili uguale a quello utilizzato per acquisire i dati sui profili, non c'è dipendenza tra la direzione di acquisizione e le direzioni delle strutture da individuare.

La ricostruzione 3D lungo la direzione X è confrontata anche con la ricostruzione dell' pseudo 3D (figura 3.18). La scelta della ricostruzione da confrontare con quella dello pseudo 3D risulta essere equivalente in quanto tutte le ricostruzioni realizzate lungo le varie direzioni sono tutte correlabili tra loro. La presenza dei corpi è evidente in entrambe le metodologie eseguite fatta eccezione per il corpo più piccolo con contrasto più basso. Comunque la delimitazione dei bordi nella ricostruzione tramite pseudo risulta essere piuttosto complessa. La ricostruzione 3D è da preferire a quella delle pseudo 3D.

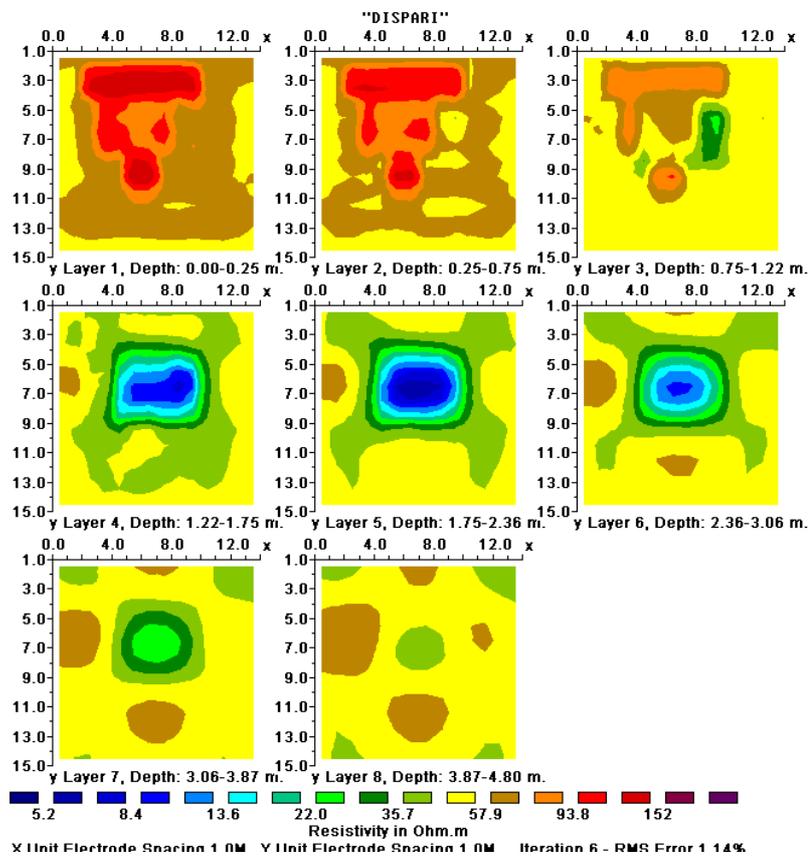


**Fig 3.19:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale e passo di campionatura pari a 1m. a sinistra è rappresentata una ricostruzione 3D a destra una ricostruzione di pseudo 3D.

Quest'ultima ricostruzione è stata ottenuta, come già detto, considerando i profili eseguiti lungo la direzione X, invertendo i dati utilizzando l'algoritmo di inversione Res2Dinv e visualizzando i dati invertiti con opportuni programmi di visualizzazioni 3D. Da questo confronto appare chiaro che le ricostruzioni non sono del tutto equivalenti; naturalmente la presenza dei diversi corpi è evidenziata da entrambe le metodologie ma le dimensioni dei vari corpi non sono ben definite. I bordi dei tre corpi modellizzati e presenti

immediatamente al di sotto del piano campagna, non sono ben definiti e i valori di resistività risultano essere diversi da quelli modellizzati. Lo stesso può essere detto anche per il corpo presente a profondità maggiore.

Per cercare di individuare se esiste un limite e se sia possibile ottenere una ottimizzazione nelle acquisizioni per la ricostruzione del sottosuolo nelle tre direzioni dello spazio, sono stati realizzati dei confronti considerando lo stesso passo di campionatura utilizzato per la prima ricostruzione (pari a 1 m) ma aumentando la distanza tra i profili. Inoltre, a parità di distanza, sono stati realizzati diversi raggruppamenti di profili.



**Fig. 3.19 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X

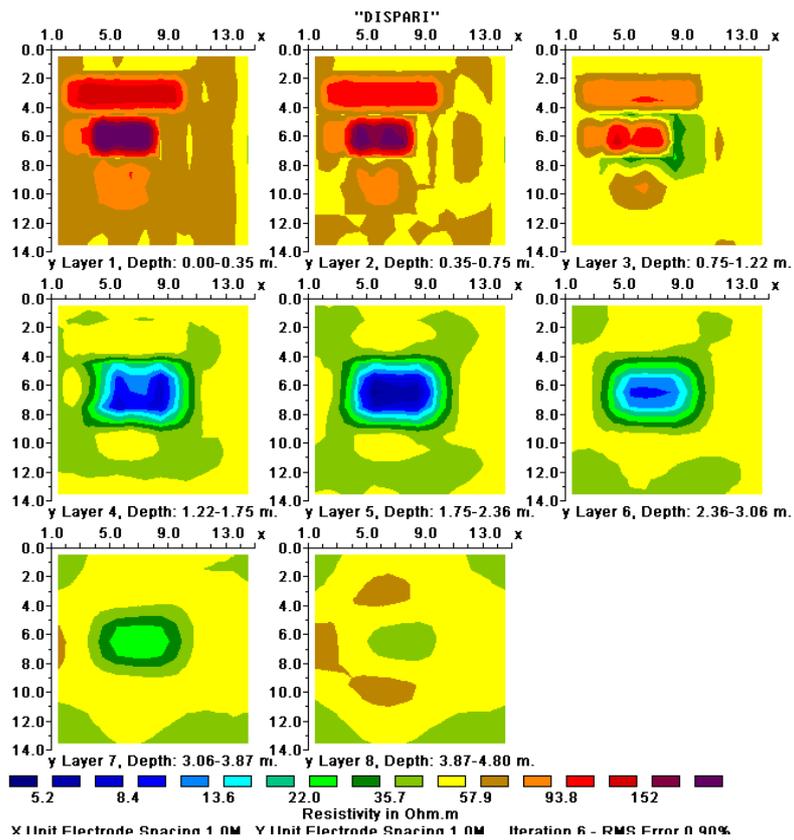


Fig. 3.19 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y

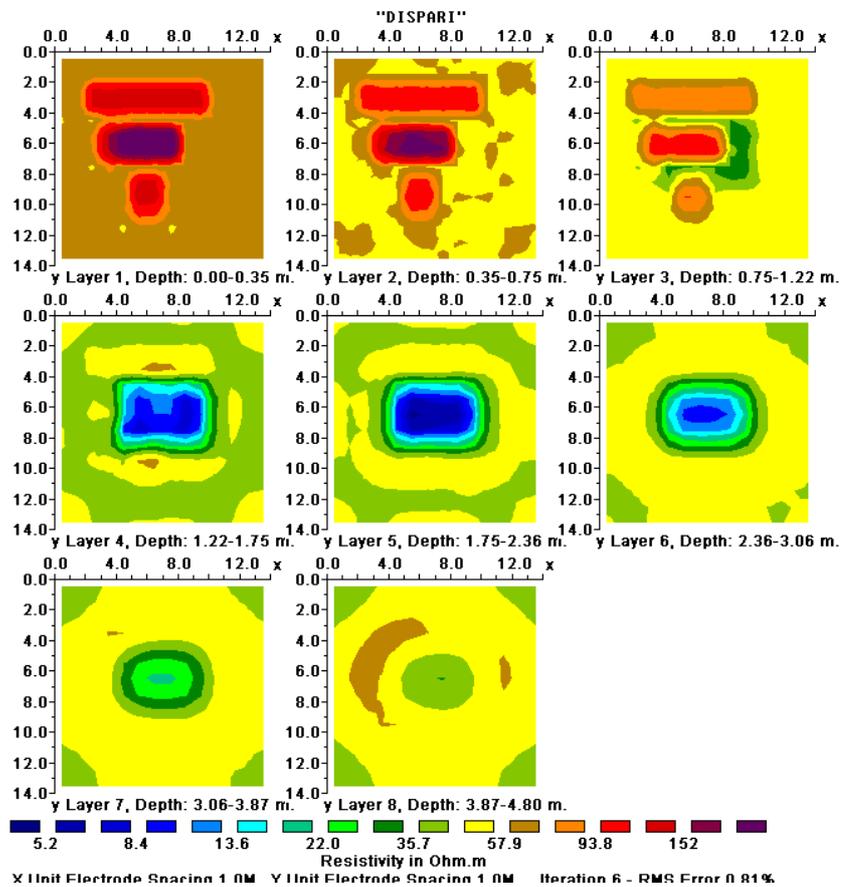
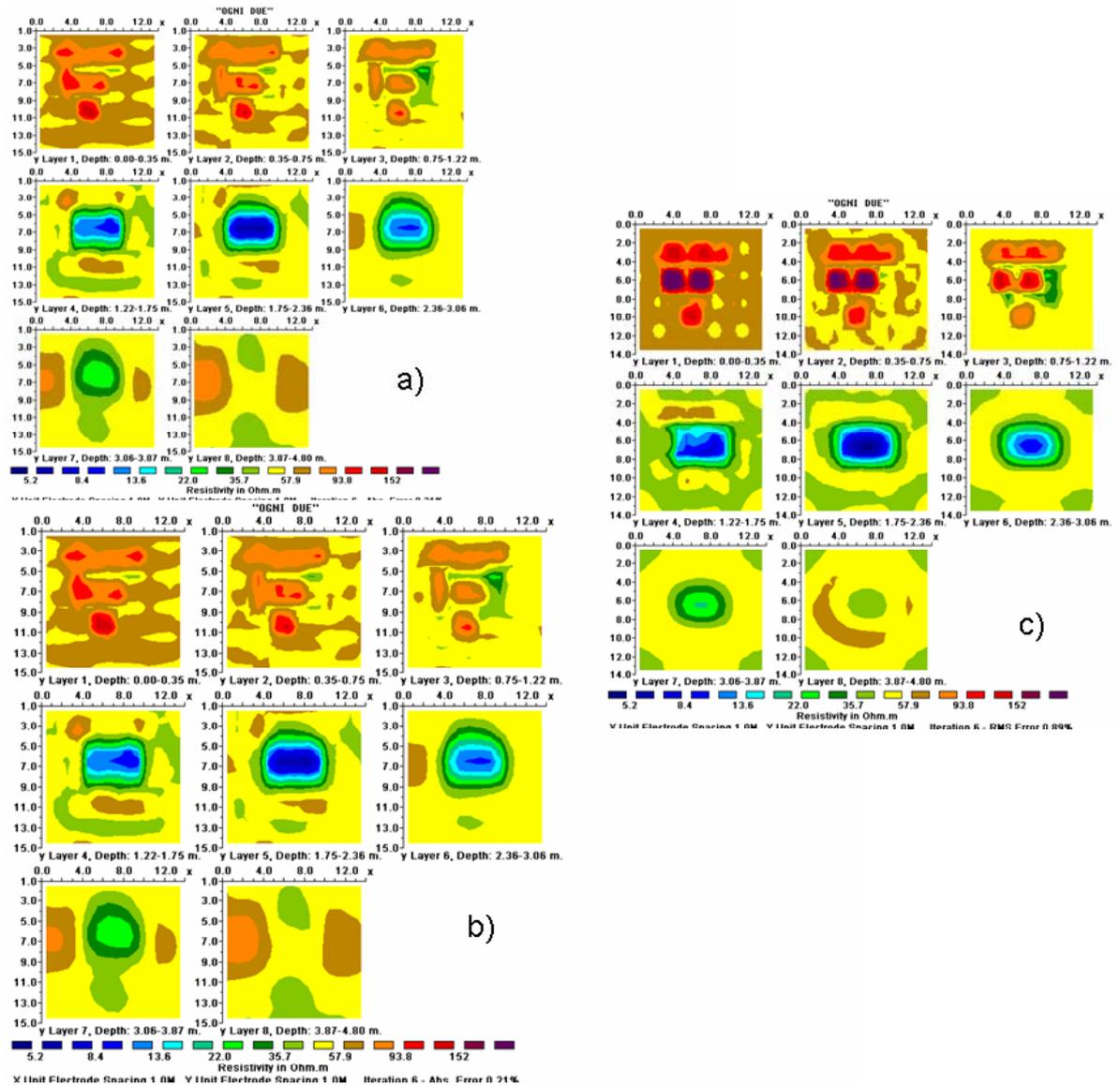


Fig. 3.19 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo-Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzione.

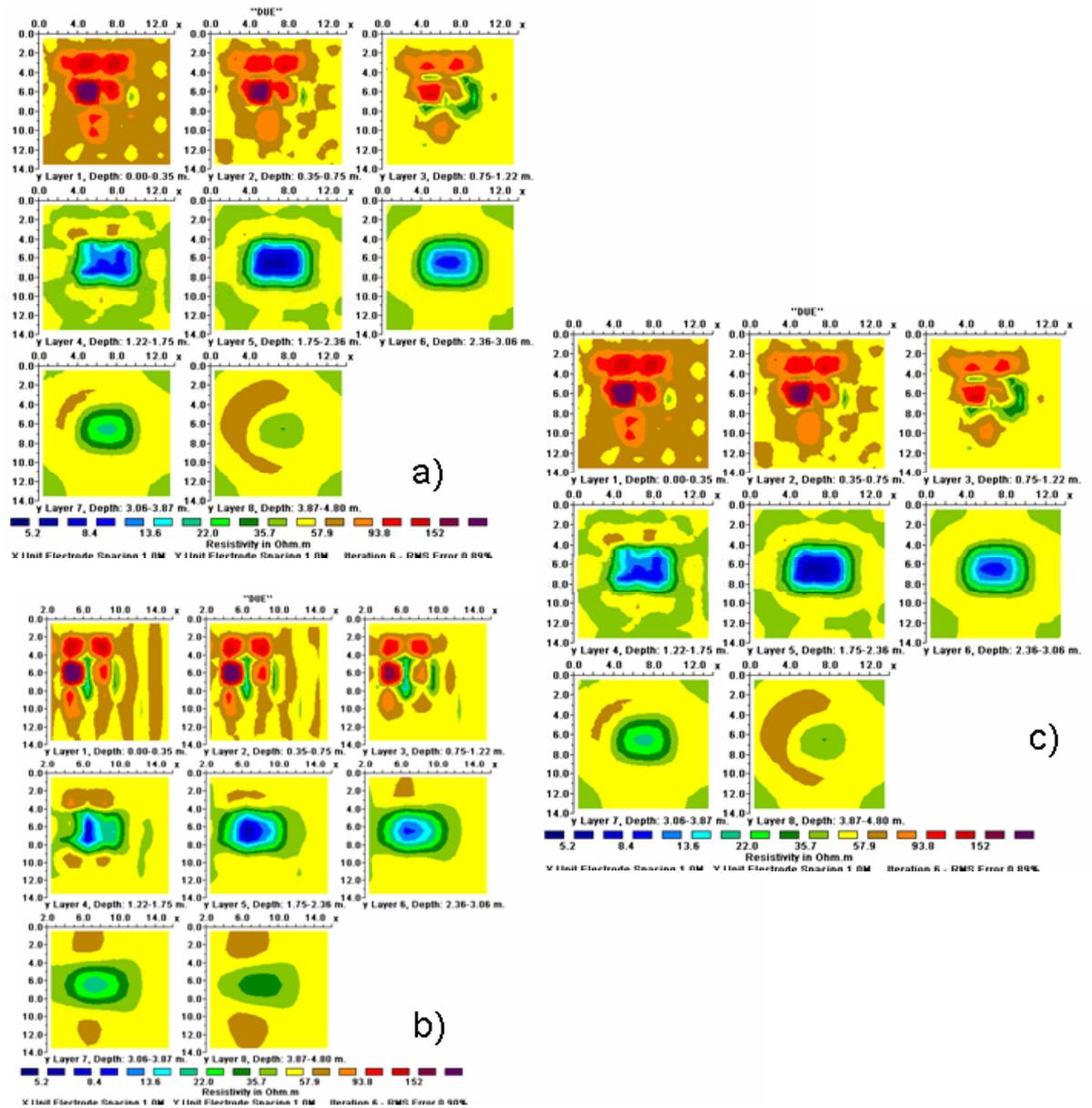
Sono state eseguite ricostruzioni utilizzando un passo tra i profili pari a 2m (fig. 3.19), un passo pari a 3 m (fig. 3.20 partendo dal profilo 1 dove non sono presenti nessun bordo di struttura, 3.21 partendo dal profilo 2 dove invece sono presenti i bordi del corpo più superficiale con resistività pari a 100 Ohm x m) e un passo pari a 4 m (fig. 3.22 partendo dal profilo 1, 3.23 partendo dal profilo 2).



**Fig. 3.20:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m partendo dal profilo 1. a) Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.

La scelta dei profili è stata fatta ipotizzando di non conoscere la posizione e la dimensione dei corpi.

Sono state ricostruite delle maglie simmetriche nelle due direzioni e sono stati scelti diversi raggruppamenti dei profili in modo tale da investigare le strutture con diverse acquisizione dei dati.



**Fig. 3.21:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m partendo dal profilo 2. a) Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.

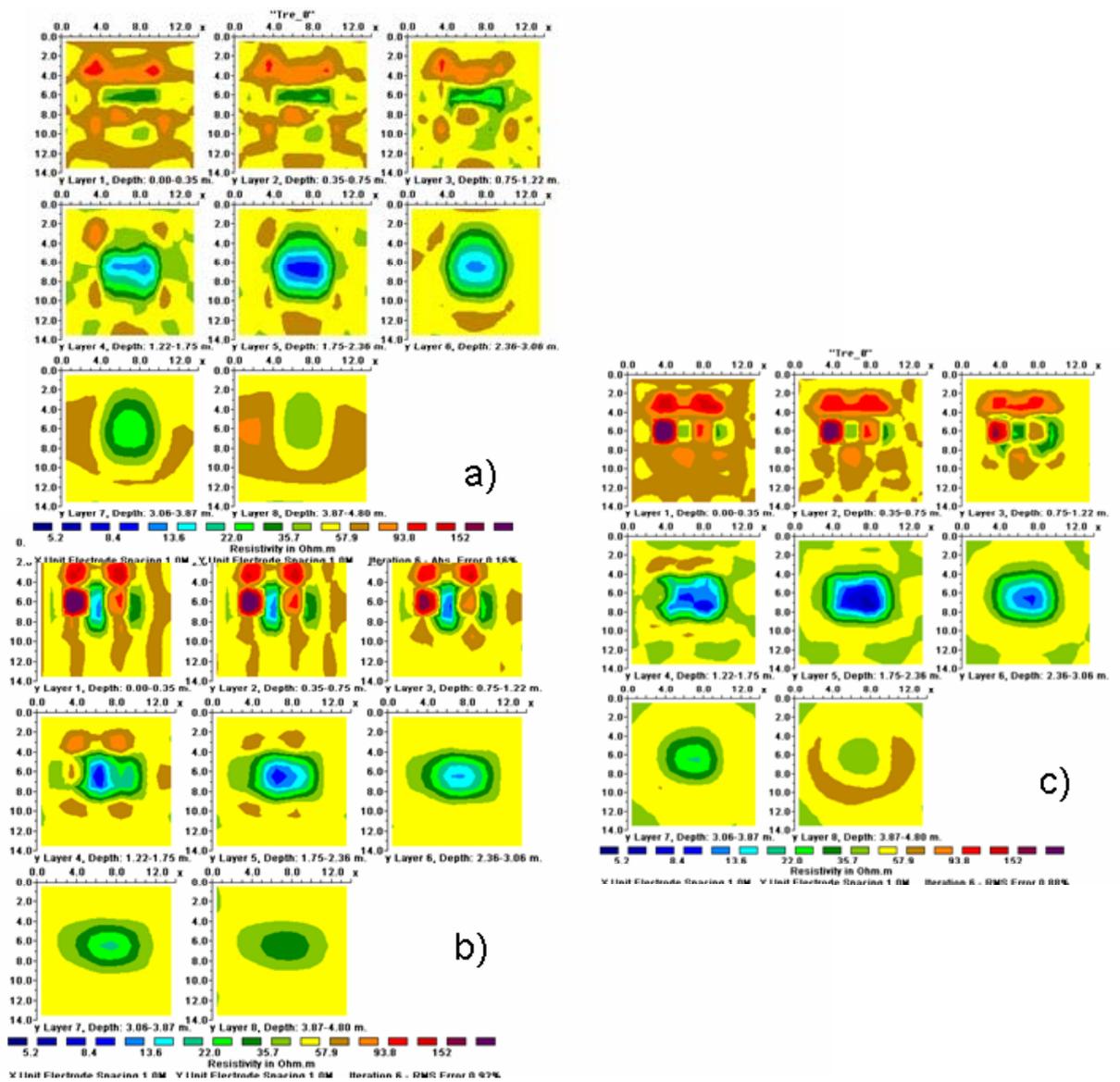


Fig. 3.22: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 4m partendo dal profilo 1. a) Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni

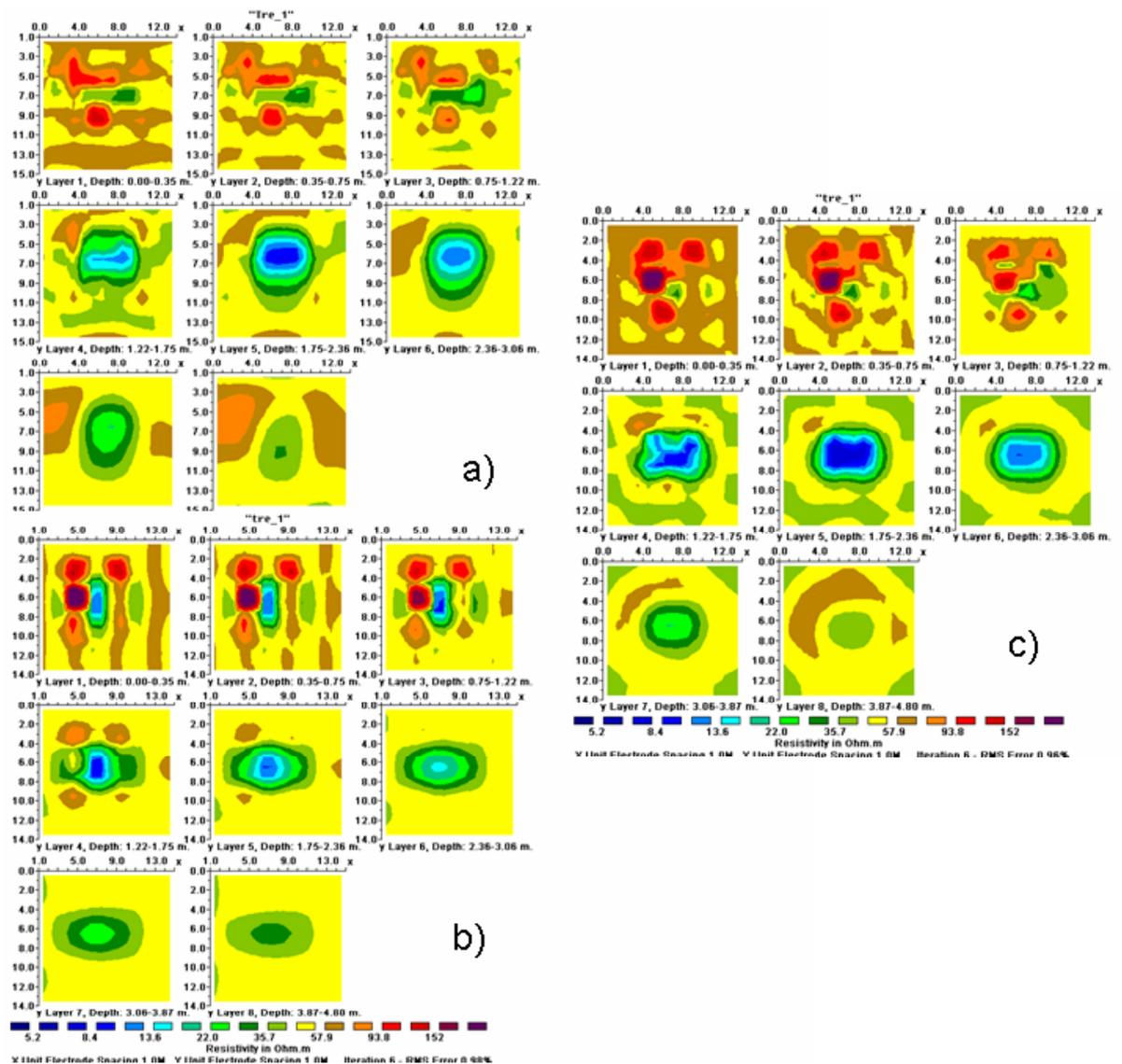


Fig. 3.23: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 4m partendo dal profilo 2. a) Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni

In figura 3.19 dove le ricostruzioni sono state effettuate, considerando dati acquisiti con distanze tra i profili pari a 2 m, è ancora possibile delimitare tutti i corpi modellizzati.

Confrontando la figura 3.19 a con la 3.19 b ed il modello di sottosuolo associato, è possibile osservare che la ricostruzione lungo la direzione Y consente un dettaglio migliore rispetto a quello definito lungo la direzione X: le acquisizioni eseguite perpendicolarmente (come noto in letteratura), alla direzione di massimo allungamento delle strutture da definire, consentono una migliore ricostruzione.

Inoltre le ricostruzioni lungo questa direzione sono maggiormente correlabili alla risoluzione eseguita lungo entrambe le direzioni. Pertanto è possibile affermare che, ancora una volta, è possibile identificare una direzione lungo la quale si ottengono delle risoluzioni confrontabili a quelle ottenute eseguendo le misure su entrambe le direzioni.

Anche con le ricostruzioni realizzate con distanza tra i profili di 3 m è possibile osservare l'esistenza di una buona correlazione tra le misure eseguite solo lungo la direzione X e quelle eseguite su entrambe le direzioni. In questo caso però dipende da come e da quanti profili intercettano le strutture da individuare; infatti l'osservazione fatta sopra è valida per la ricostruzione fatta considerando il passo di 3m partendo dal profilo 1 ma non è più valida se considero sempre una distanza tra i profili di 3m ma partendo dal profilo 2 (figure rispettivamente 3.20, 3.21). Pertanto, non essendo nota a priori la precisa posizione delle strutture presenti nel sottosuolo, è necessario, quando la distanza tra i profili non è confrontabile con il passo di campionamento utilizzato sul profilo, eseguire misure lungo le due direzioni. Infatti, anche considerando una distanza tra i profili di 4 m, considerando le ricostruzioni ottenute acquisendo dati su entrambe le direzioni (figg. 3.22, 3.23), è possibile ottenere un modello di sottosuolo confrontabile con quello modellizzato, soprattutto per quanto riguarda la ricostruzione del corpo più profondo.

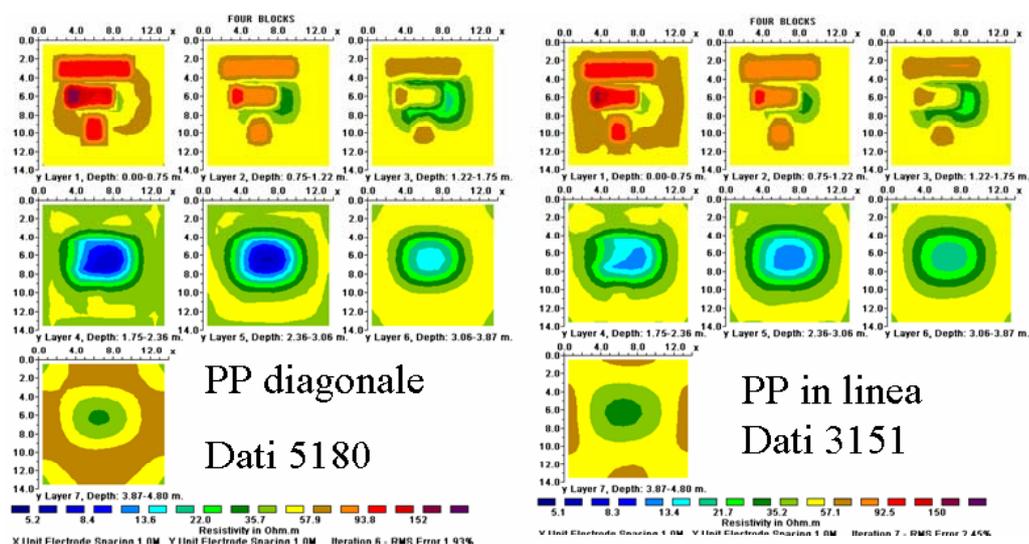
### **3.2.2 Polo-Polo**

Le modalità di acquisizione con il dispositivo Polo-Polo sono già state descritte nel paragrafo 3.1.2. In questo caso sono state confrontate solo le acquisizioni eseguite con array Polo-Polo cross-diagonal e con array Polo-Polo in linea. Non è stata eseguita anche la ricostruzione con l'array Polo-Polo complete data set in quanto il numero di dati che è possibile acquisire con questa tipologia di acquisizione e con la griglia ricostruita, è pari a 25200: l'algoritmo di inversione considerato può invertire fino a 20000 dati.

In figura 3.24 è riportato il confronto tra le due tipologie di array in cui i dati sono stati acquisiti considerando un passo di campionatura sul profilo pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m. Si evince chiaramente come le

ricostruzioni elaborate, sono quantitativamente equivalenti. Pertanto, come già osservato per il primo modello realizzato, non esiste una correlazione diretta tra il numero dei dati e la ricostruzione elaborata: si possono ricavare ricostruzioni del sottosuolo piuttosto simili con un numero di dati notevolmente diverso.

E' possibile giungere ad una ottimizzazione delle sequenze di acquisizioni che consentono di definire il numero minimo di dati da acquisire in relazione alla struttura da identificare.



**Fig. 3.24:** Ricostruzioni eseguite con varie disposizioni dell'elettrodo di corrente rispetto a quello di potenziale nell'array Polo-Polo. Il numero si riferisce ai dati che sono stati elaborati per ogni tipologia di acquisizione utilizzata.

Considerando quanto affermato sopra, i confronti successivi che sono stati eseguiti seguendo le stesse procedure fatte per il Dipolo-Dipolo, sono stati valutati considerando esclusivamente acquisizioni di tipo Polo-Polo in linea.

In figura 3.25 sono riportate le diverse ricostruzioni ottenute rispettivamente acquisendo solo lungo la direzione X della maglia ipotizzata (fig. 3.25 a), solo lungo la direzione Y (fig. 3.25 b) e su entrambe le direzioni (fig. 3.25 c). Il passo di campionatura e la distanza tra i vari profili realizzati è di 1m.

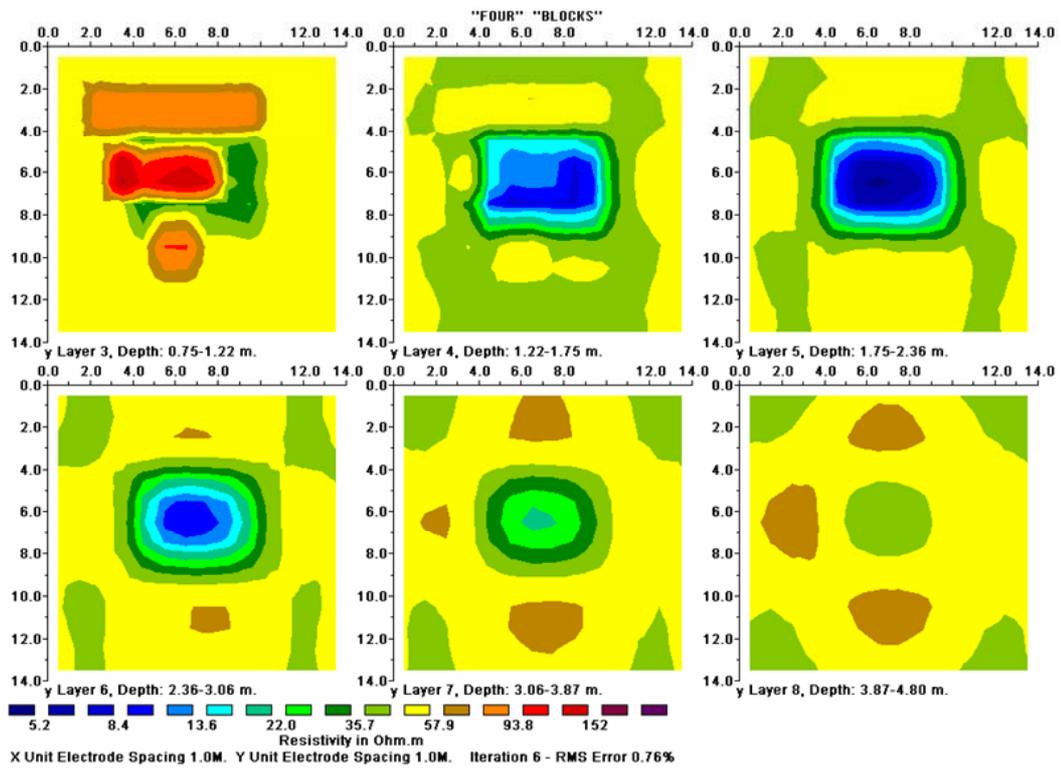


Fig. 3.25 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X

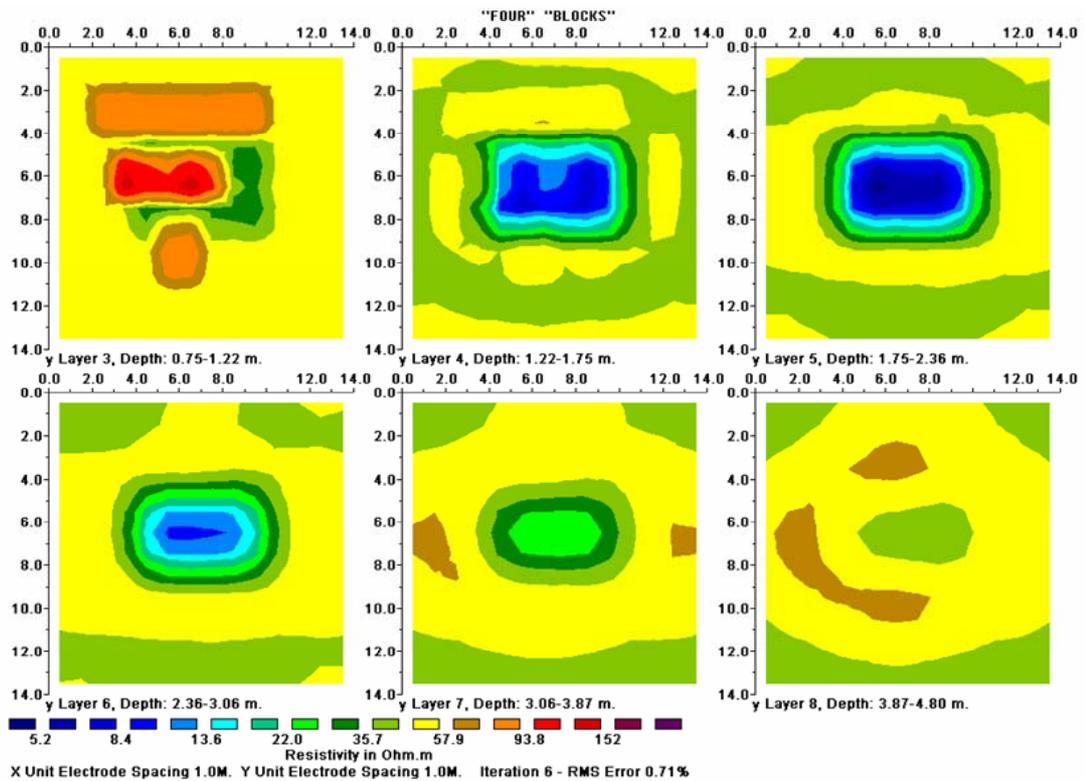


Fig. 3.25 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y

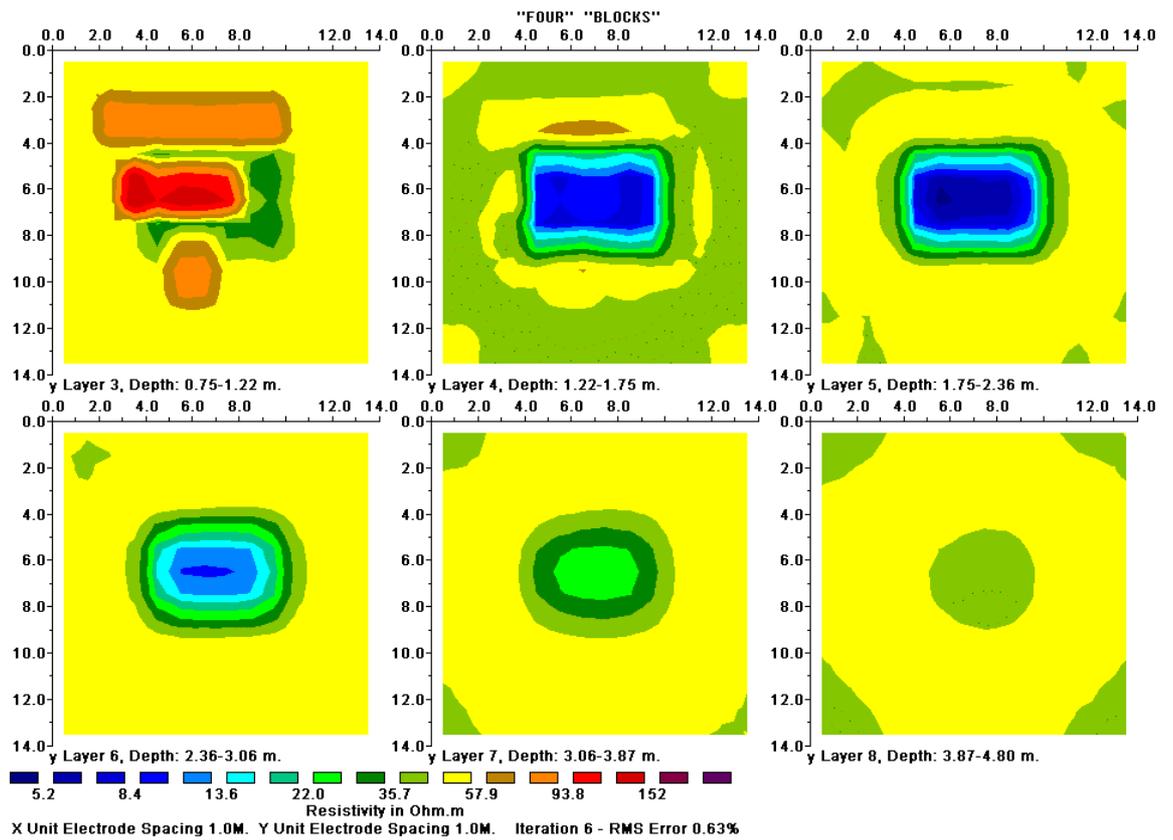
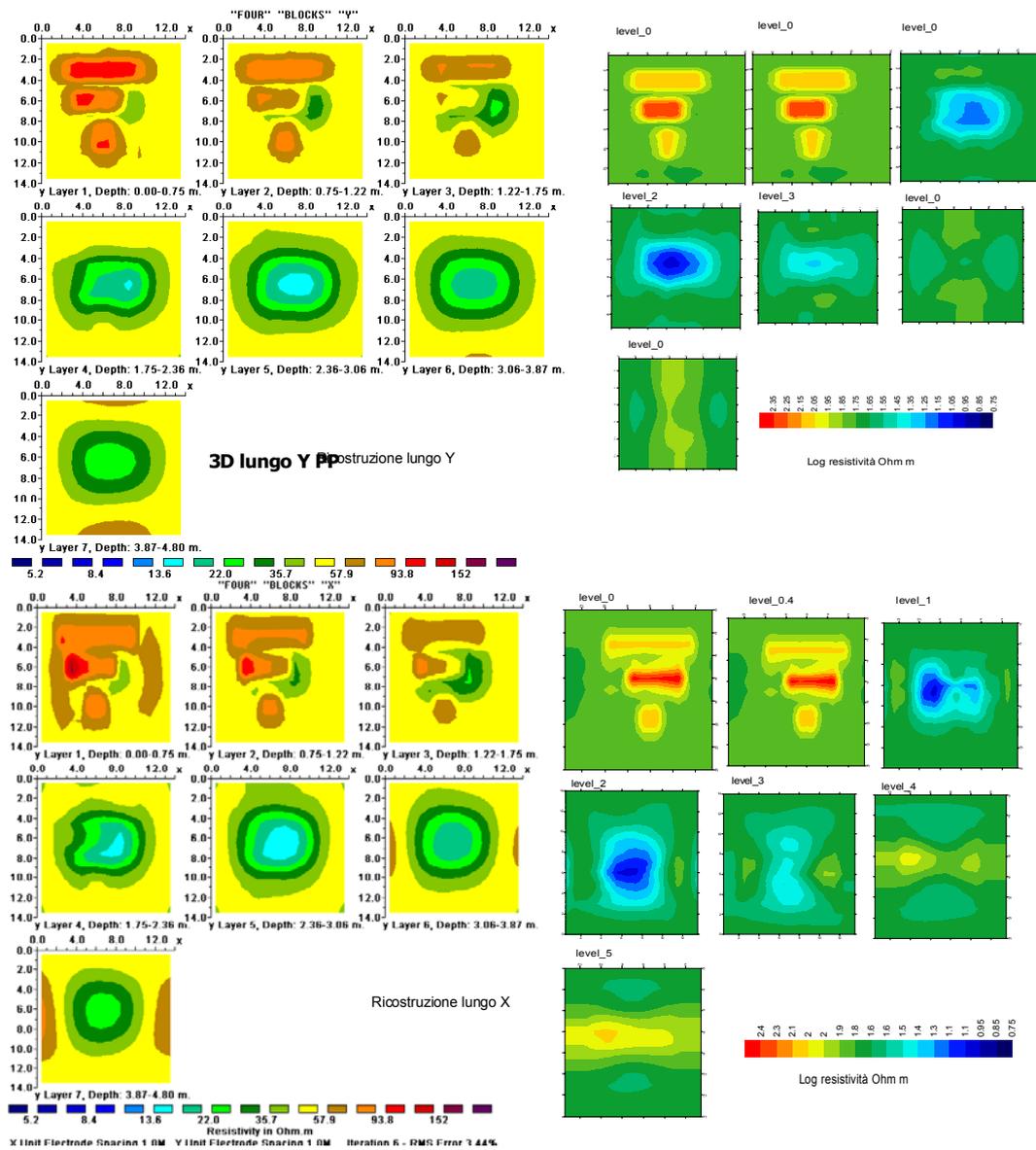


Fig. 3.25 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzioni.

Con questa ricostruzione eseguita con passo tra i profili uguale al passo di campionamento, le ricostruzioni sono tutte quantitativamente simili e sono correlabili al modello di sottosuolo considerato.



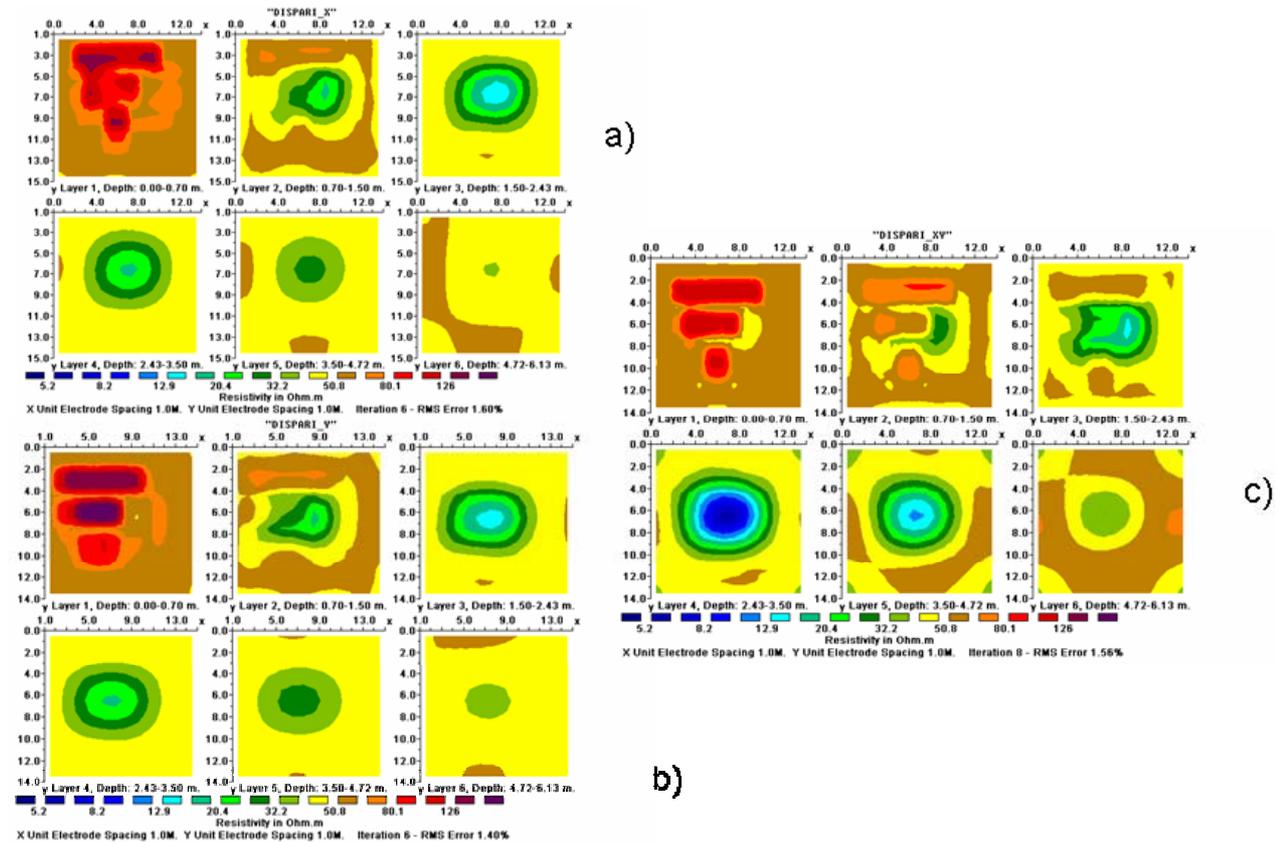
**Fig 3.26:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X e Y con dispositivo Polo-Polo e passo di campionatura pari a 1m. a sinistra è rappresentata una ricostruzione 3D a destra una ricostruzione di pseudo 3D.

Le ricostruzioni fatte con le pseudo 3D del sottosuolo, ricostruite per entrambe le direzioni e riportate in figura 3.26, risultano essere, al contrario di quanto accade per il Dipolo-Dipolo (fig. 3.19) correlabili con le ricostruzioni 3D. Il segnale risulta essere più stabile rispetto al Dipolo-Dipolo.

Sono state eseguite ricostruzioni utilizzando un passo tra i profili pari a 2m (fig. 3.26), un passo pari a 3 m (fig. 3.27 partendo dal profilo 1 dove non sono presenti nessun bordo di struttura, 3.28 partendo dal profilo 2 dove invece sono presenti i bordi del corpo più superficiale con resistività pari a 100 Ohm m, fig. 3.29 partendo dal profilo 0).

La scelta dei profili è stata fatta ipotizzando di non conoscere la posizione e la dimensione dei corpi.

Sono state ricostruite delle maglie simmetriche nelle due direzioni e sono stati scelti diversi raggruppamenti dei profili in modo tale da investigare le strutture con diverse acquisizione dei dati.



**Fig. 3.26:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m . Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.

Confrontando la figura 3.26 a con la 3.26 b ed il modello di sottosuolo associato, è possibile osservare che la ricostruzione lungo la direzione Y consente un dettaglio migliore rispetto a quello definito lungo la direzione X; inoltre le ricostruzioni lungo questa direzione sono maggiormente correlabili alla risoluzione eseguita lungo entrambe le direzioni. Pertanto è possibile affermare che, ancora una volta, è possibile identificare una direzione lungo la quale si ottengono delle risoluzioni confrontabili a quelle ottenute eseguendo le misure su entrambe le direzioni.

E' da osservare che anche dalle ricostruzioni eseguite lungo la direzione X è possibile definire, anche se in modo più complesso rispetto alla direzione Y, la presenza dei quattro corpi modellizzati: con questa tipologia di acquisizione la direzione dei profili non è determinante ai fini della ricostruzione del sottosuolo. Rispetto al Dipolo-Dipolo, il segnale è stabile e meno rumoroso.

I confronti eseguiti con le ricostruzioni fatte acquisendo con passo tra i profili pari a 3 m consentono di osservare, come già per il Dipolo-Dipolo, che le correlazioni tra la direzione di acquisizione ed il modello sono fortemente dipendenti da come e da quanti profili intercettano le strutture da individuare; infatti la ricostruzione eseguita con passo di 3m partendo dal profilo 0 (fig. 3.29) è diversa da quelle ricostruite con lo stesso passo ma partendo dal profilo 1 e 2 (fig. 3.27 e 3.28, maggiormente confrontabili).

Le differenze sono significative confrontando l'acquisizione lungo la direzione X.

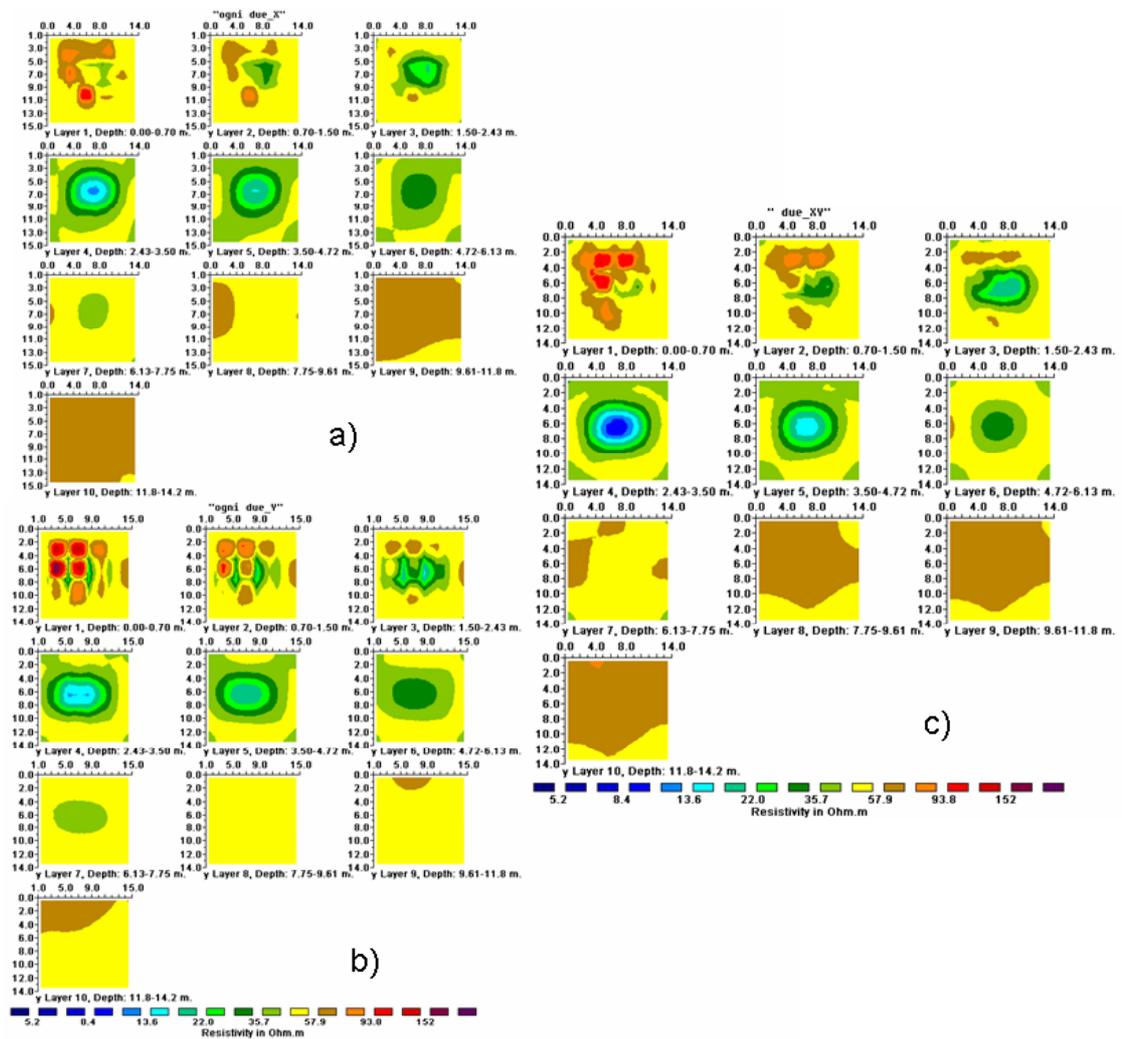
Le varie maglie confrontate e ricostruite consentono di definire che, quando la distanza tra i profili risulta essere pari al triplo del passo di campionamento tra i profili, per ottenere una buona ricostruzione del sottosuolo è necessario acquisire dati su entrambe le direzioni della maglia.

Osservando la qualità della ricostruzione, ottenuta con acquisizioni fatte su entrambe le direzioni della maglia con passo tra i profili maggiore del passo di campionatura tra i dati, si evince chiaramente che non è conveniente acquisire profili su entrambe le direzioni della maglia ma risulta essere molto più risolutivo acquisire in modo fitto lungo una delle direzioni.

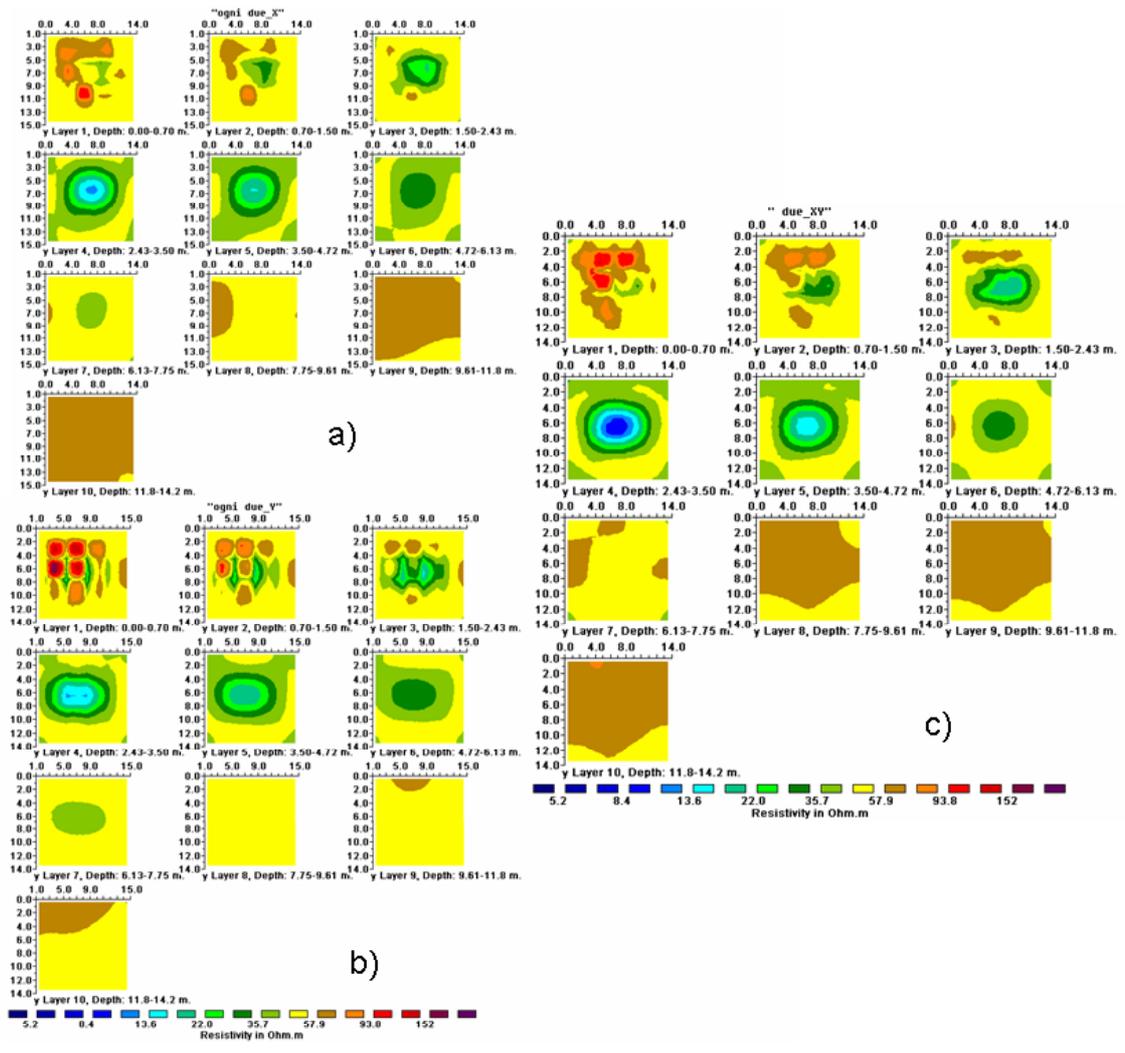
E' da precisare, inoltre, che questo tipo di analisi e ricostruzione, si eseguono solo in zone dove è richiesta una scrupolosa e dettagliata ricostruzione delle strutture presenti nel sottosuolo. Nella zona in cui è necessario realizzare delle ricostruzioni di questo tipo, sono sicuramente presenti altre informazioni desunte da altre metodologie di prospezione o di carattere geo-archeologico.

Infatti, ad esempio, nell'area relativa al parco di Pontecagnano (paragrafo 5.1.1 a), sono state realizzate prima delle indagini di prospezione magnetica, radar e dei profili geoelettrici lungo tutta l'area del parco e,

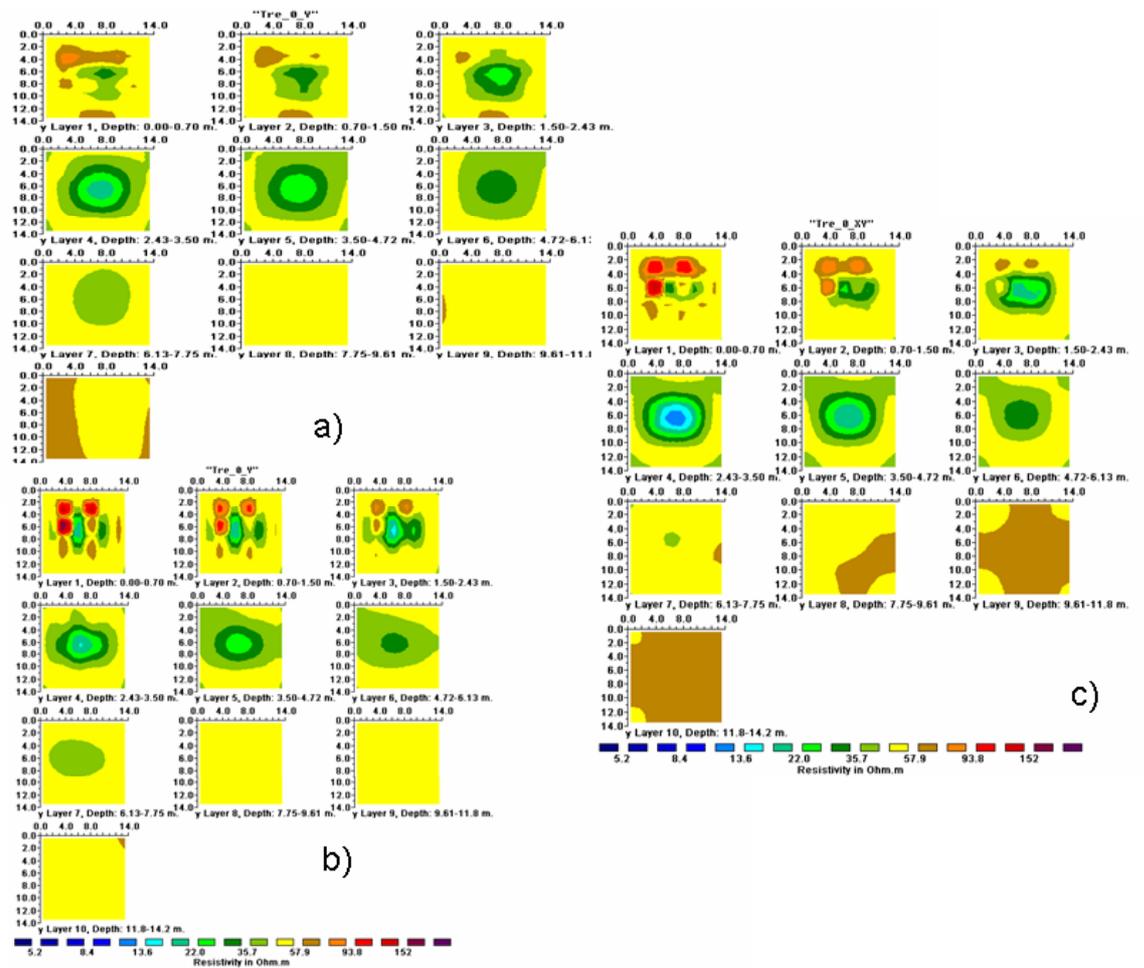
individuata la zona di maggior interesse, sono state ricostruite delle maglie in cui la copertura areale dei dati era maggiore.



**Fig. 3.27:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m partendo dal profilo 2. Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.



**Fig. 3.28:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m partendo dal profilo 1. Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.



**Fig. 3.29:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m partendo dal profilo 0. Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.

### 3.2.3 Wenner-Schlumberger

In figura 3.30, sono riportate le diverse ricostruzioni ottenute rispettivamente acquisendo solo lungo la direzione X della maglia ipotizzata (fig. 3.30 a), solo lungo la direzione Y (fig. 3.30 b) e su entrambe le direzioni (fig. 3.30 c). Il passo di campionatura e la distanza tra i vari profili realizzati è di 1m. I dati sono stati invertiti, utilizzando l’algoritmo di inversione Res3Dinv.

Come si evince dalla stessa figura, le ricostruzioni, riportate utilizzando la stessa scala di colore per le resistività per rendere più veloce il confronto, non presentano nessuna significativa differenza in relazione alla presenza di vari corpi modellizzati.

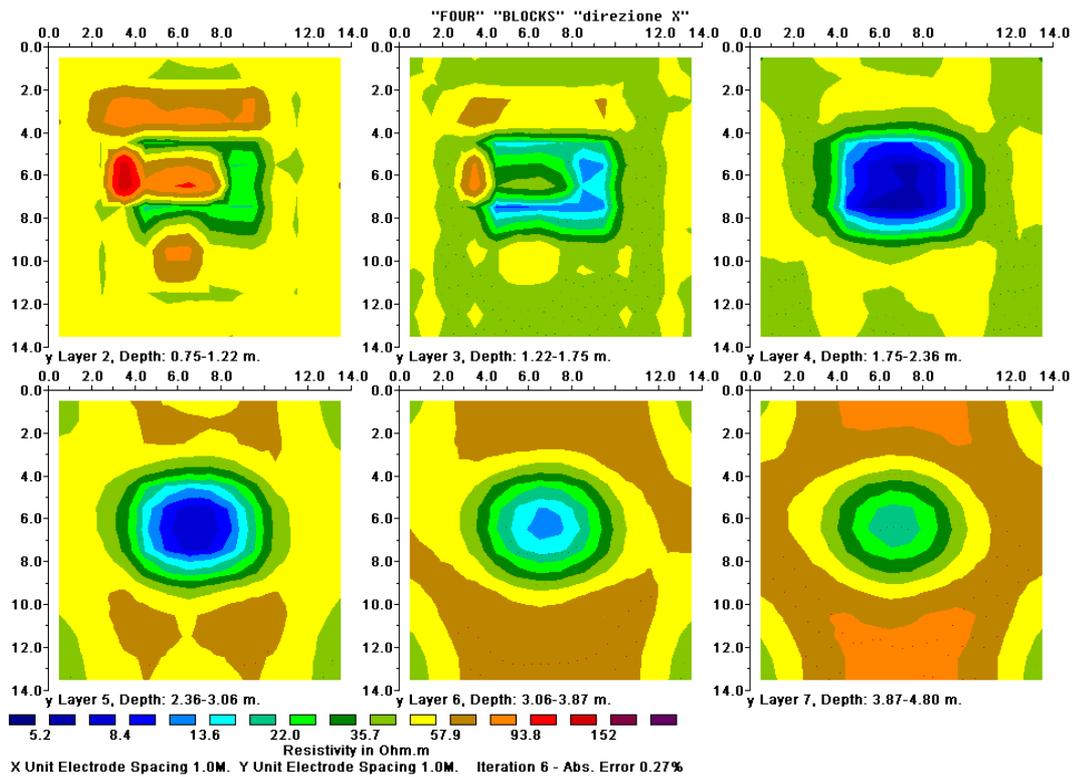


Fig. 3.30 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X

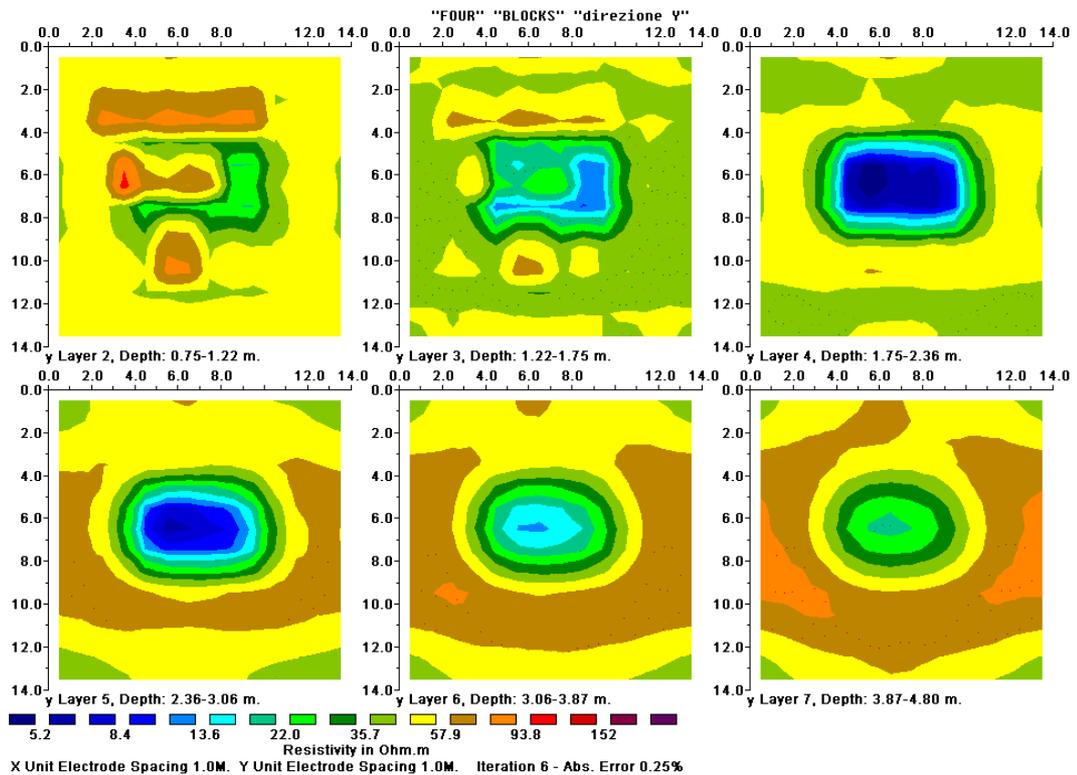


Fig. 3.30 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y

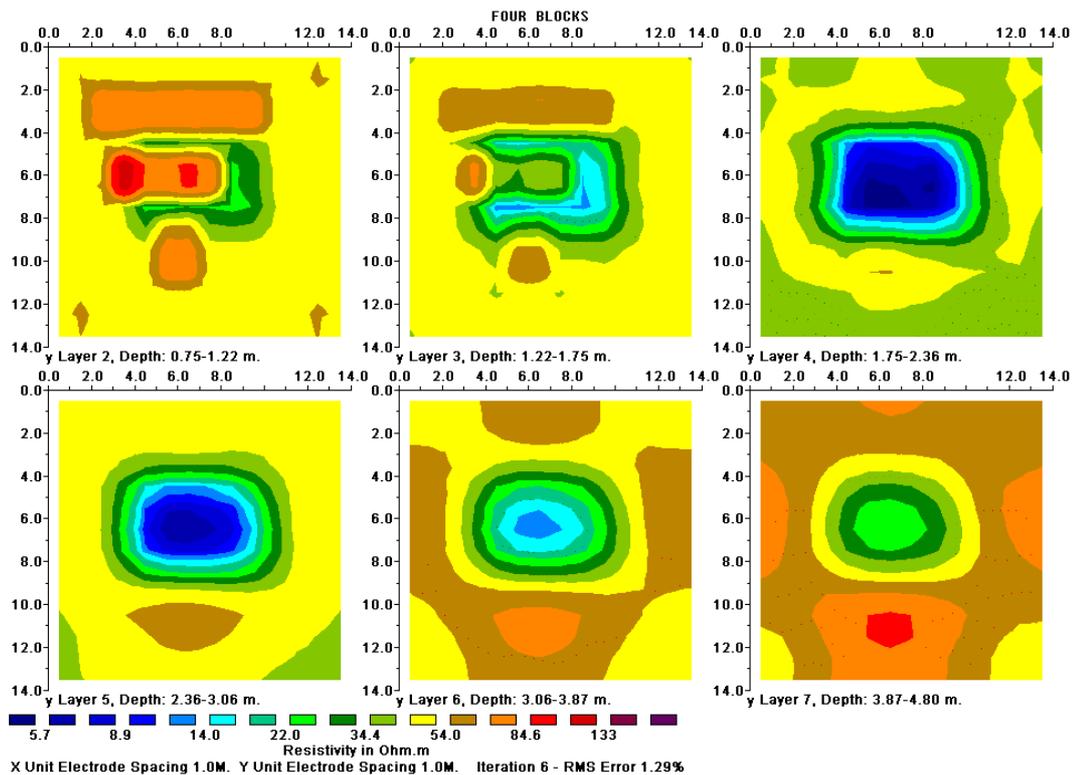


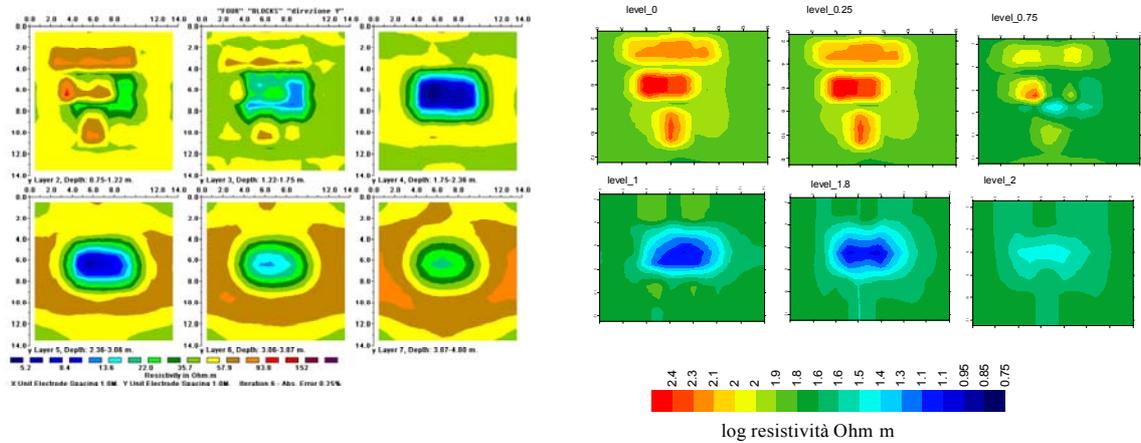
Fig. 3.30 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzioni.

In particolare, a differenza di quando osservato con gli altri due dispositivi le ricostruzioni eseguite lungo le direzioni X (fig. 3.30 a) e quella lungo Y (3.30 b) sono confrontabili tra loro ma le dimensioni dei corpi più superficiali non sono ben distinte come avviene invece, elaborando i dati acquisiti su entrambe le direzioni. Il corpo più profondo risulta ben individuato in tutte e 3 le ricostruzioni.

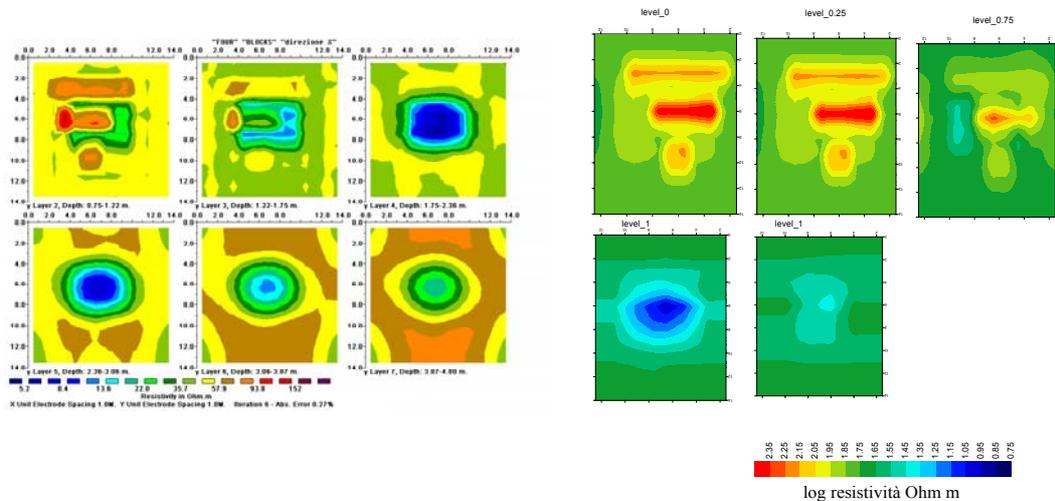
Inoltre, a differenza di quanto accade per gli altri due dispositivi, con questa ricostruzione il passaggio tra i tre corpi più superficiali e quello profondo simulato continuo, è invece rappresentato con una slice che sembra distinguere e quindi pone a profondità diversa da quella modellizzata il corpo più profondo.

In figura 3.31 e 3.32 sono riportati i confronti tra ricostruzioni 3D e le pseudo 3D sia lungo la direzione X che lungo la direzione Y. Da questo confronto, considerando le stesse profondità, è possibile osservare che la ricostruzione 3D, come per il Dipolo-Dipolo, fornisce una informazione migliore rispetto a quella della pseudo 3D.

Con questa ricostruzione, è comunque possibile correlare le anomalie presenti ricostruendo 4 corpi; i limiti e le profondità degli stessi, sono meno definite rispetto a quelle ottenute dall'analisi 3D.



**Fig 3.31:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X con dispositivo Wenner-Schlumberger con campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m. a sinistra è rappresentata una ricostruzione 3D a destra una ricostruzione di pseudo 3D.

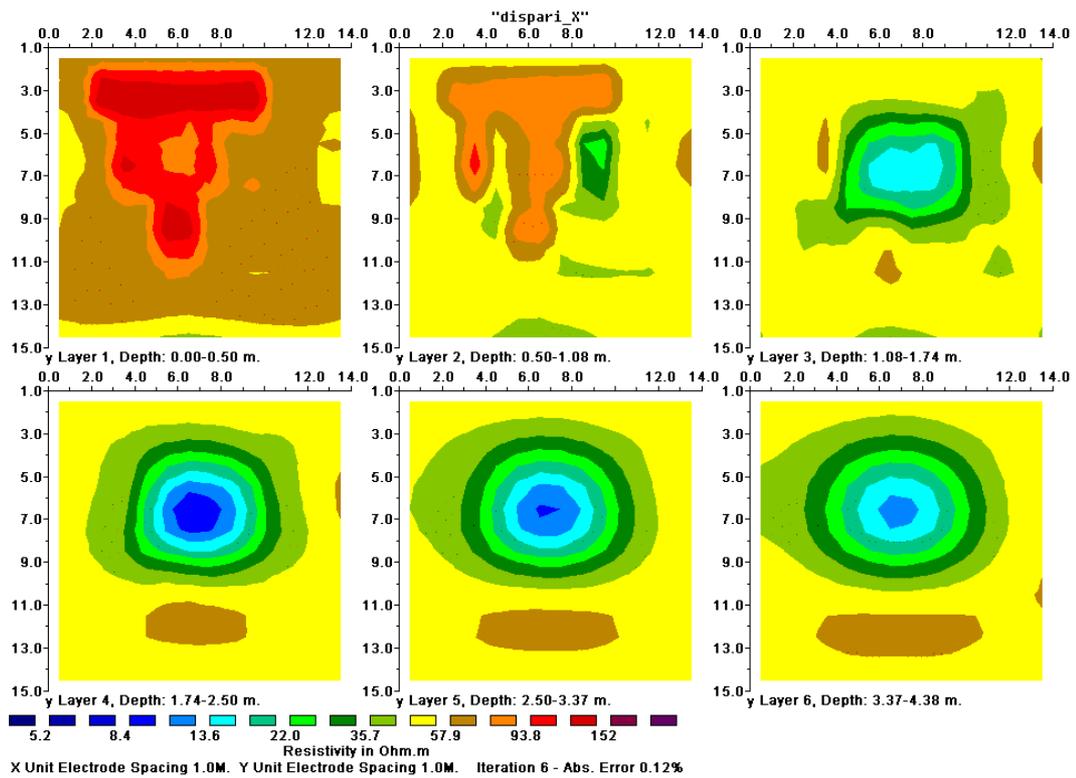


**Fig 3.32:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione Y con dispositivo Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1 m. a sinistra è rappresentata una ricostruzione 3D a destra una ricostruzione di pseudo 3D.

Per poter definire l'eventuale possibilità di ottimizzare il numero e la direzione delle acquisizioni, sono state elaborate, anche in questo caso, delle ricostruzioni mantenendo lo stesso dettaglio sul profilo ma diminuendo la copertura areale dei profili stessi. Sono state, quindi, eseguite ricostruzioni utilizzando un passo tra i profili pari a 2m (fig. 3.33), un passo pari a 3 m (fig.

3.34 partendo dal profilo 1 dove non sono presenti nessun bordo di struttura, 3.24 partendo dal profilo 2 dove invece sono presenti i bordi del corpo più superficiale con resistività pari a 100 Ohm x m) e un passo pari a 4 m (fig. 3.35 partendo dal profilo 1, 3.36 partendo dal profilo 2).

La scelta dei profili è stata fatta ipotizzando di non conoscere la posizione e la dimensione dei corpi. Sono state ricostruite delle maglie simmetriche nelle due direzioni e sono stati scelti diversi raggruppamenti dei profili in modo tale da investigare le strutture con diverse acquisizione dei dati.



**Fig. 3.33 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione X

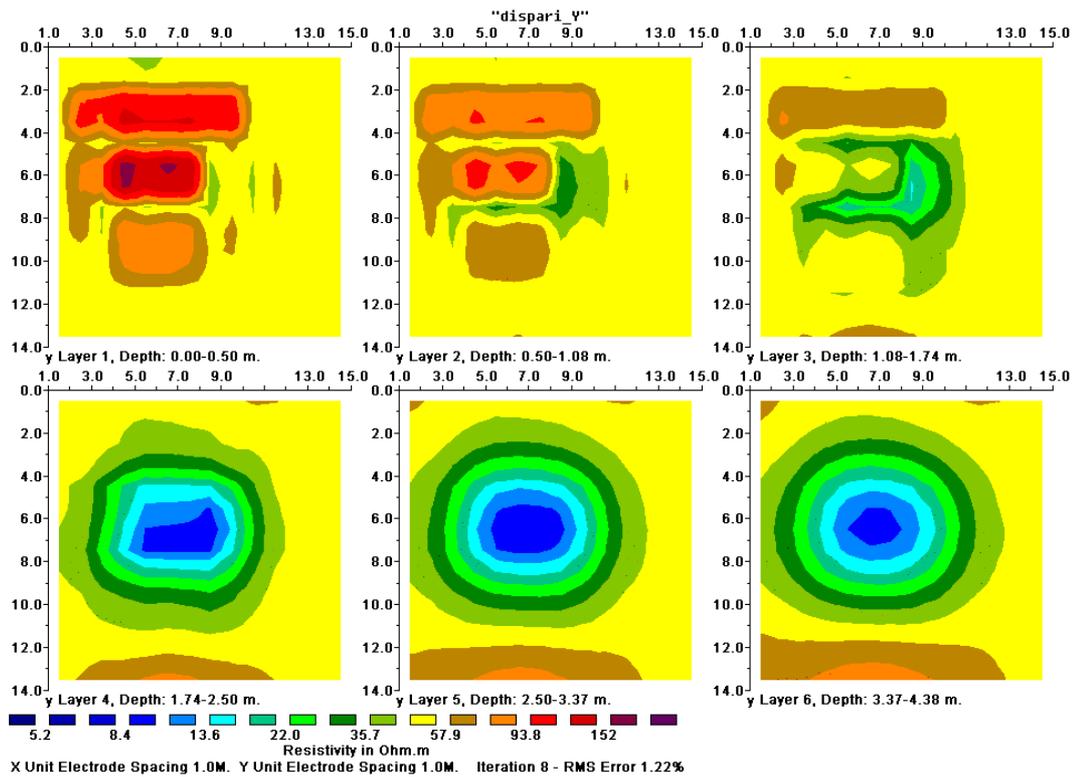


Fig. 3.33 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione Y

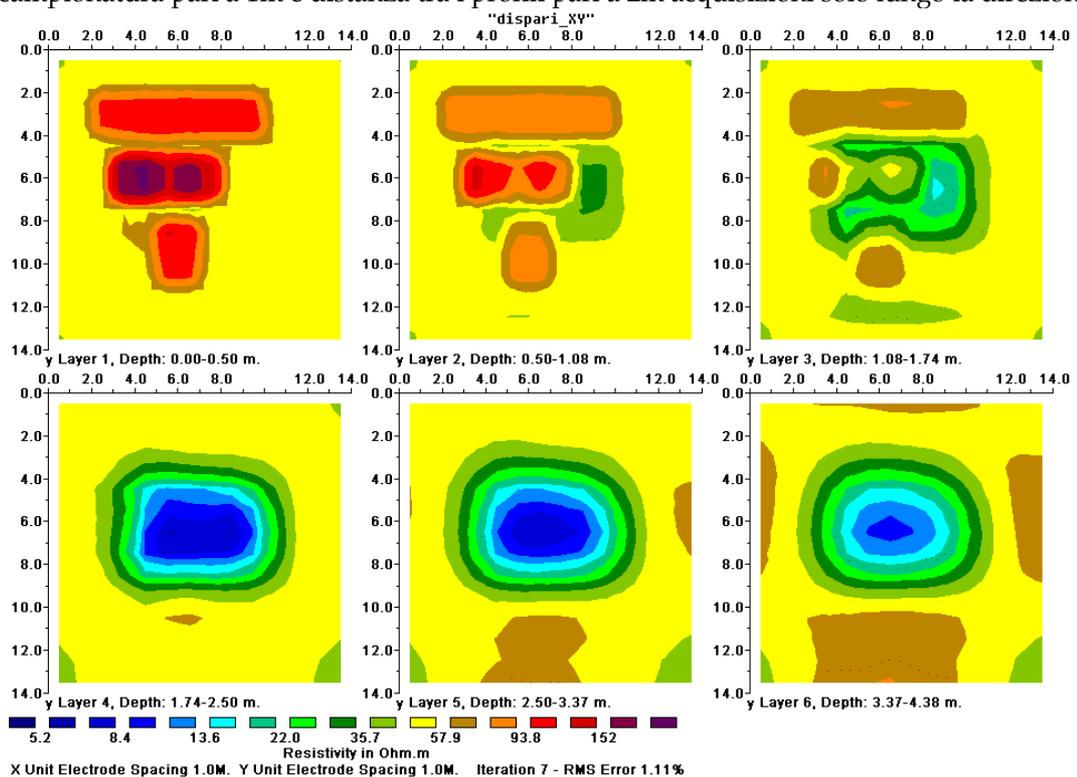
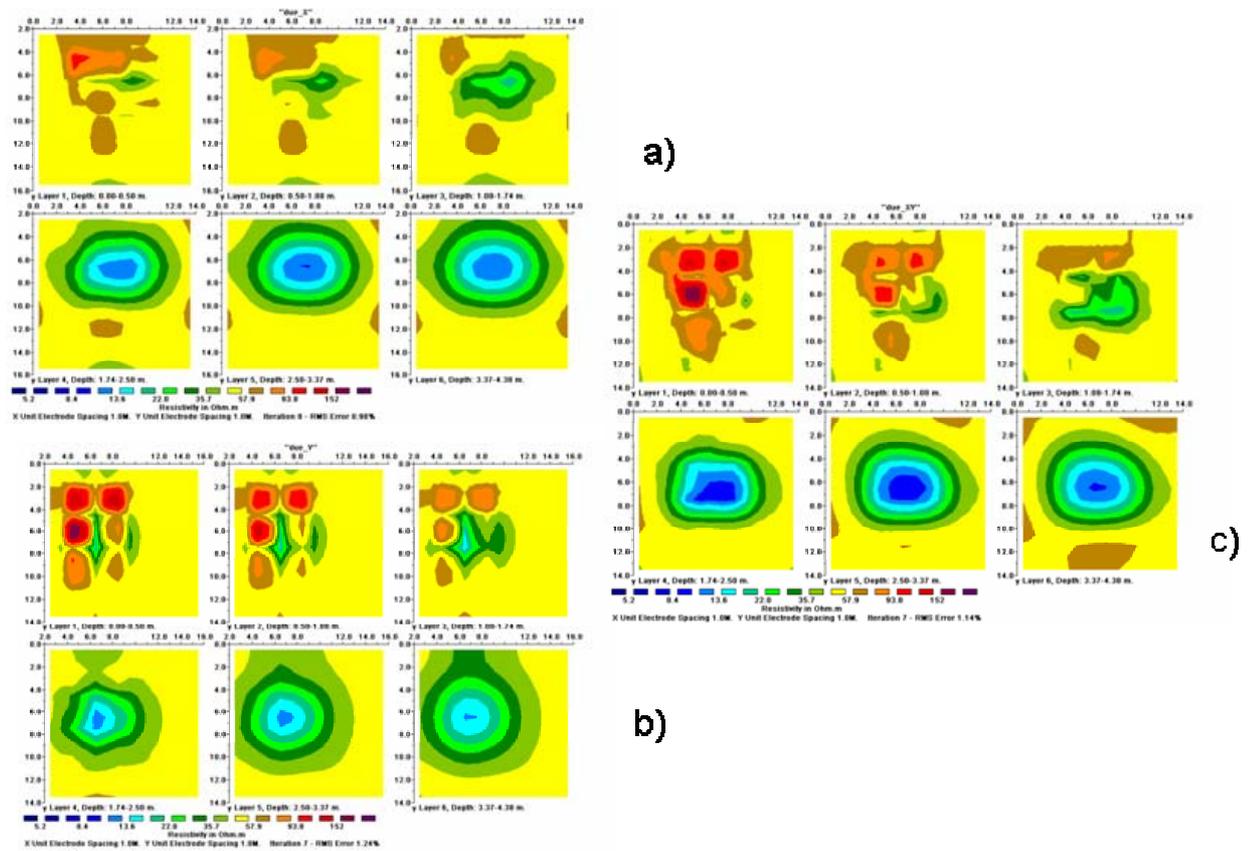


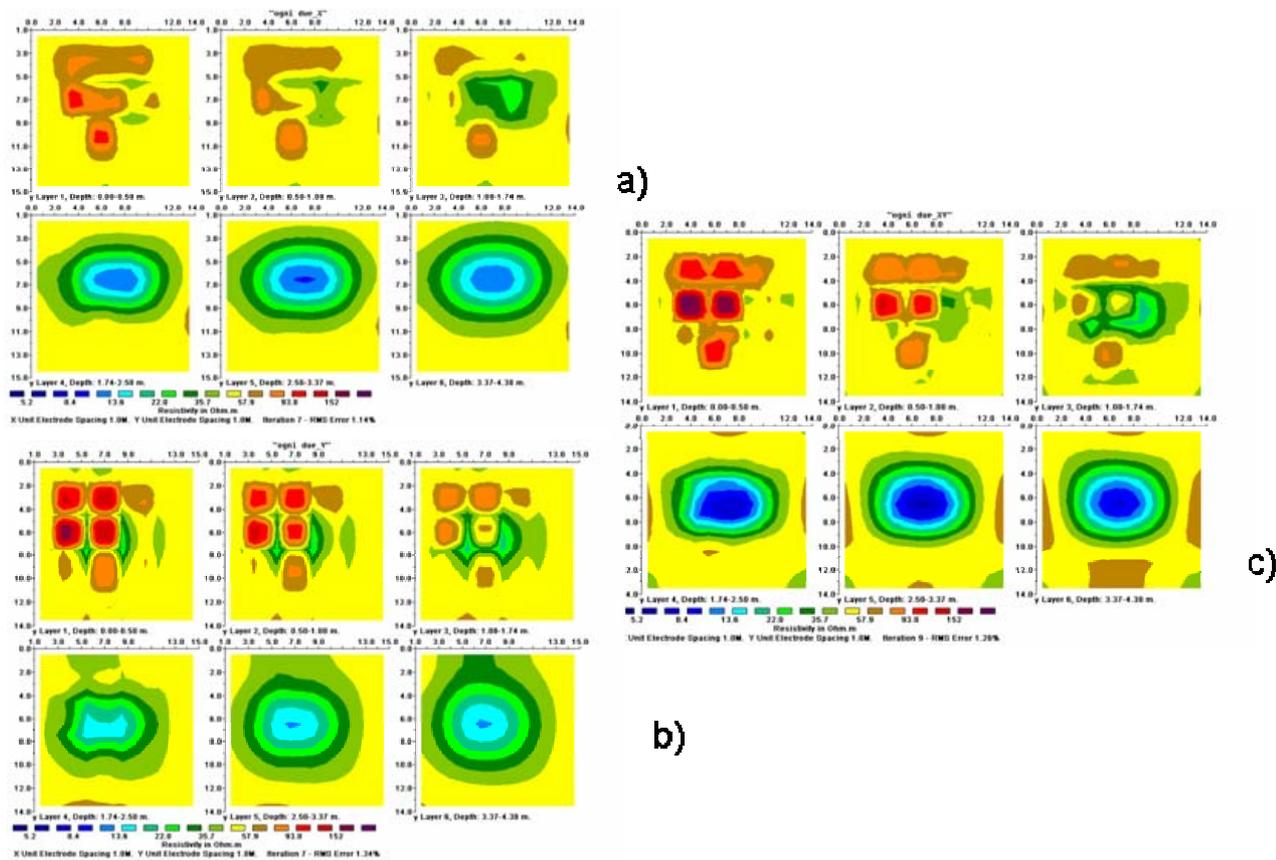
Fig. 3.33 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni lungo le due direzione.

Quando l'acquisizione è confrontabile con passo di campionatura ed è pari metà della distanza tra i profili (fig. 3.33), è possibile individuare una direzione (fig. 3.33 b) in cui è possibile ottenere una ricostruzione confrontabile

con quella ottenuta utilizzando acquisizioni fatte su entrambe le direzioni (3.33 c). In figura 3.33 a è possibile individuare la presenza dei corpi modellizzati ma i bordi dei corpi non risultano essere molto ben definiti.



**Fig. 3.34:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3 m partendo dal profilo 2. Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.



**Fig. 3.35:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner -Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3 m partendo dal profilo 1. Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.

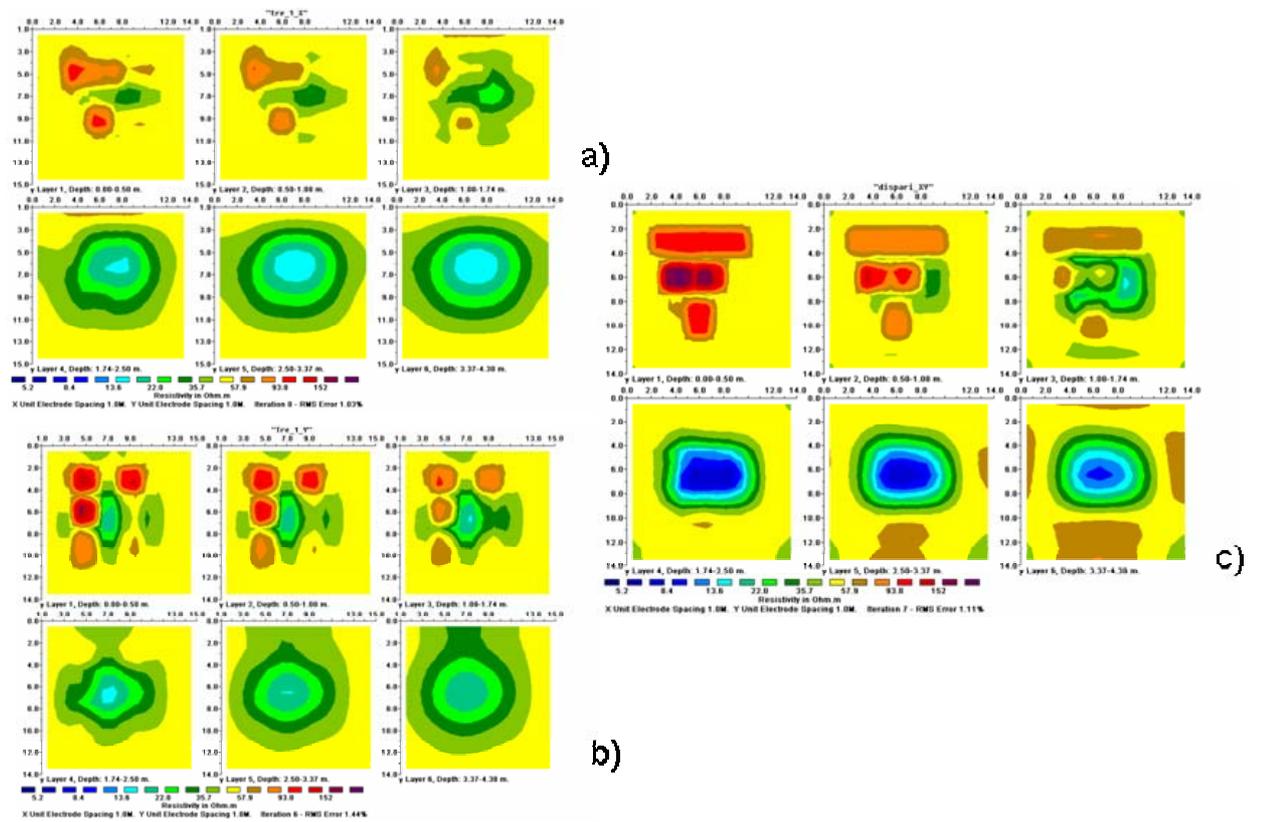


Fig. 3.36: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 4 m partendo dal profilo 1. Acquisizioni solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni.

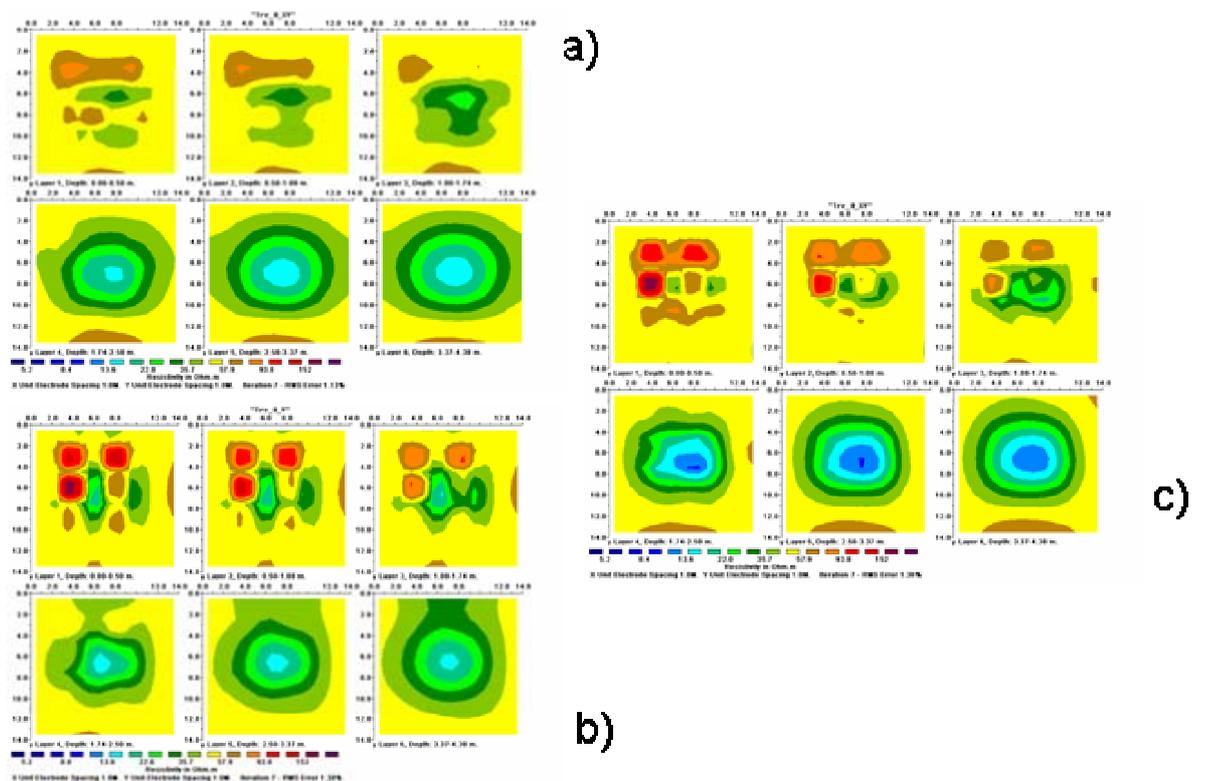


Fig. 3.37: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 4 m partendo dal profilo 1. Acquisizioni

solo lungo la direzione X b) acquisizioni solo lungo la direzione Y c) acquisizioni lungo le due direzioni

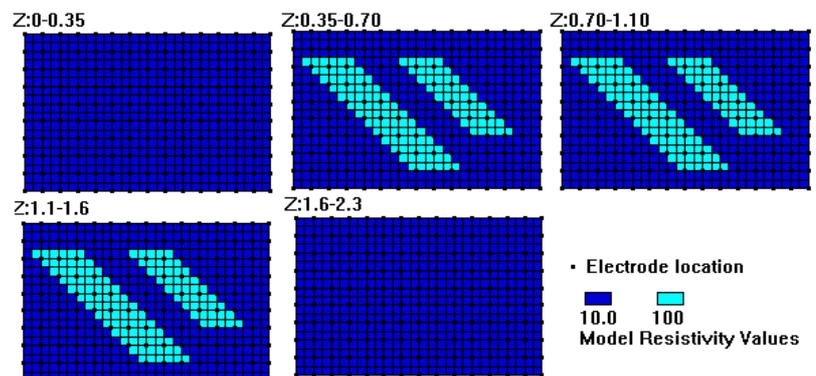
Aumentando la distanza tra i profili, è possibile ancora una volta, ottenere una buona correlazione con il modello del sottosuolo modellizzato se le acquisizioni sono fatte su entrambe le direzioni (figg. 3.34 e 3.35). Con un passo di campionatura pari ad  $\frac{1}{4}$  (figg. 3.36 e 3.37) della distanza tra i profili, anche la ricostruzione lungo le due direzioni non consente una buona correlazione. Questa distanza risulta essere troppo grande rispetto alle dimensioni delle strutture da investigare.

### 3.3 Modello 3

Il modello riportato in figura 3.38, sono rappresentate le stesse strutture analizzate per il primo modello (fig. 3.1) ma le strutture sono state ruotate.

Questo modello è stato elaborato per vedere se le osservazioni fatte per i due modelli analizzati in precedenza sono verificate anche quando le strutture presentano una certa inclinazione rispetto alla direzione dei profili. L'obiettivo è sempre quello di riuscire a definire, se possibile, una acquisizione che ottimizzi le ricostruzioni 3D dei dati con il numero minimo di dati.

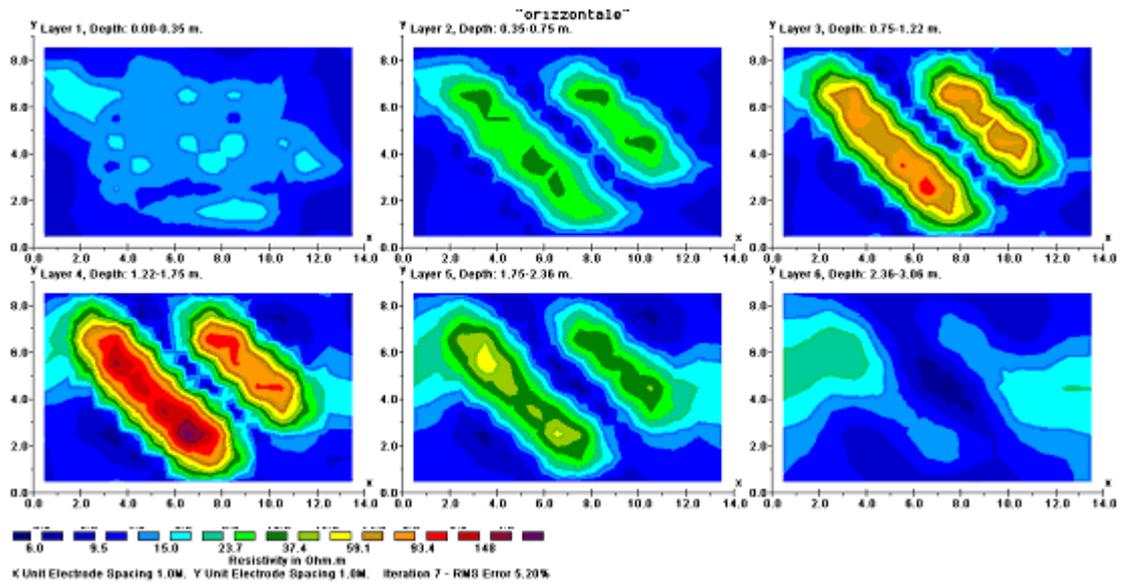
Come per il modello 1 è stata modellizzata la presenza, all'interno di un sottosuolo omogeneo di resistività pari a  $10 \text{ Ohm m}$ , di due corpi di uguale resistività (pari a  $100 \text{ Ohm m}$ ), uguale spessore ( $1.25 \text{ m}$ ) ma di dimensioni diverse (rispettivamente di  $3 \text{ m} \times 7 \text{ m}$  e  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ). Le misure sono state calcolate considerando una maglia rettangolare di dimensioni  $15 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ . Le modalità del confronto sono le stesse utilizzate per gli altri due modelli considerati.



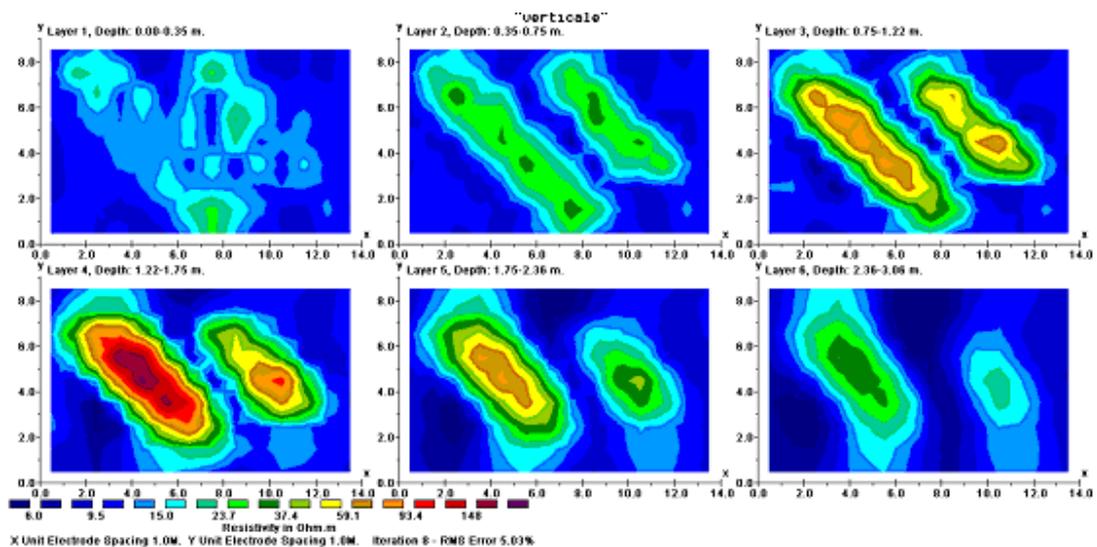
**Fig. 3.38:** Terzo modello ricostruito. Le varie slice rappresentano vari livelli di profondità indicate al di sopra di ogni slice. I diversi colori indicano le diverse resistività reali dei corpi modellati.

### 3.3.1 Dipolo-Dipolo

In figura 3.39 è riportato il confronto eseguito considerando una acquisizione Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura uguale alla distanza tra i profili e pari ad 1 m.



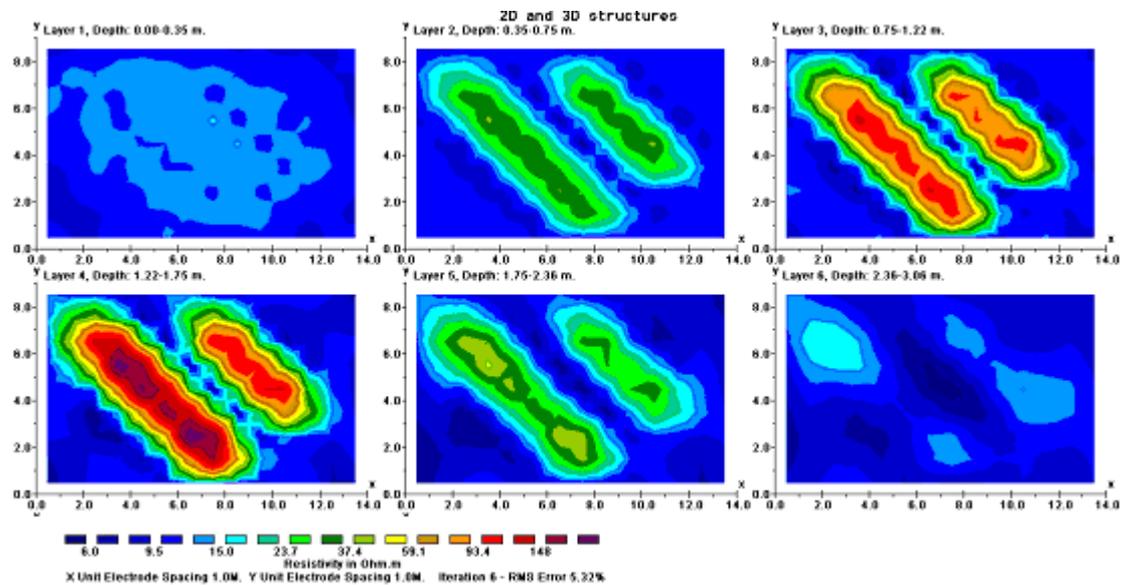
**Fig. 3.39 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X



**Fig. 3.39 b:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y

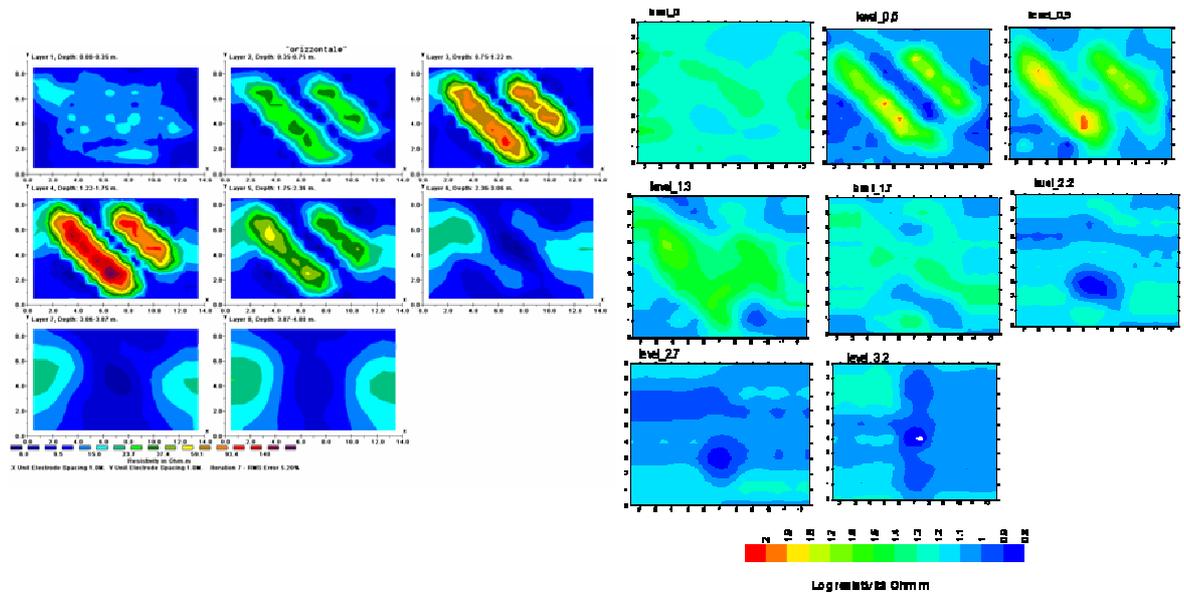
Ancora una volta anche se i profili presentano una certa inclinazione rispetto alle strutture, le ricostruzioni eseguite lungo la direzione X (fig. 3.39 a)

sono confrontabili sia con quelle eseguite solo lungo la direzione Y (fig. 3.39 b) che le ricostruzioni fatte su entrambe le direzioni (fig. 3.39 c): non c'è dipendenza tra le ricostruzioni e le direzioni dei profili lungo le quali esse sono state elaborate e neanche rispetto al numero dei dati presi in considerazione.



**Fig. 3.39 c:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzioni.

Pertanto il confronto con la ricostruzione di pseudo 3D è stato elaborato solo lungo la direzione X (fig. 3.40). Considerando le dimensioni e le forme dei corpi modellizzati, questi sono ben definiti nella ricostruzione 3D del modello; la ricostruzione delle pseudo 3D del sottosuolo consente di definire la presenza dei 2 corpi con dimensione diversa ma con lo stesso contrasto di resistività, ma non consente di definire bene le profondità alle quali i corpi sono presenti.



**Fig 3.40:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale con campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m. a sinistra è rappresentata una ricostruzione 3D a destra una ricostruzione di pseudo 3D.

Nella ricostruzione 3D, invece è molto chiara la differenza tra la struttura (slice 3 e slice 4 di figura 3.40) e l'effetto che essa determina (slice 2 e slice 5 di figura 3.40).

Anche in questo caso sono state eseguite delle ricostruzioni considerando una distanza tra i profili pari a 2m (fig. 3.41) e pari a 3 m (fig. 3.42). E' possibile nuovamente verificare che con una distanza tra i profili pari al doppio e/o al triplo del passo di campionatura utilizzato, è possibile individuare una direzione (fig. 3.41 a, fig. 3.42 a) in cui la ricostruzione della struttura è indipendente dal numero di acquisizioni fatte in quanto le due ricostruzioni risultano del tutto equivalente (fig. 3.41 c, fig. 3.42 c). Aumentando il passo tra i profili, è necessario acquisire su entrambe le direzioni.

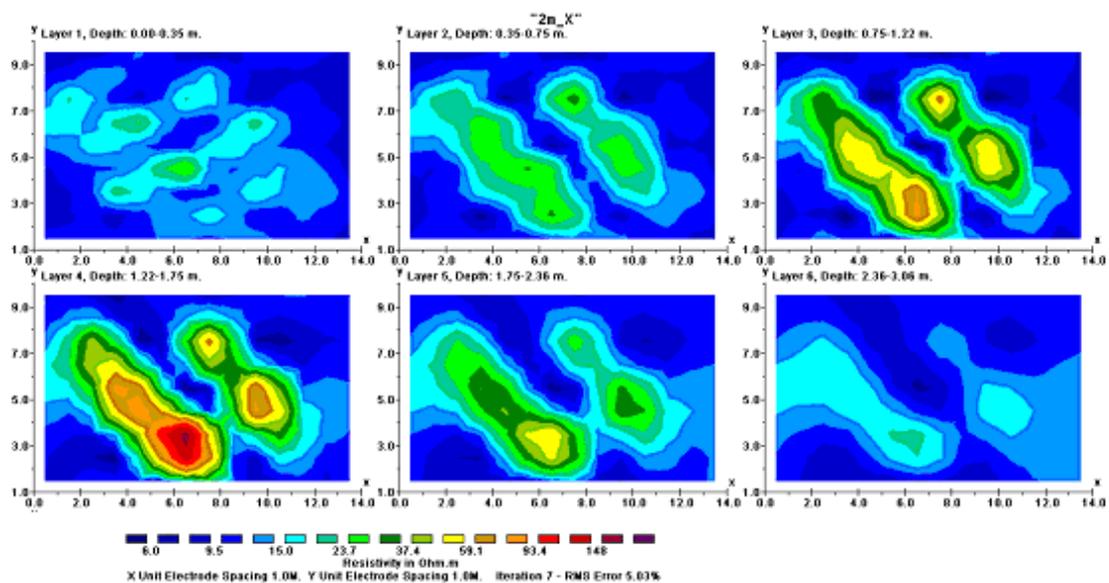


Fig. 3.41 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione X

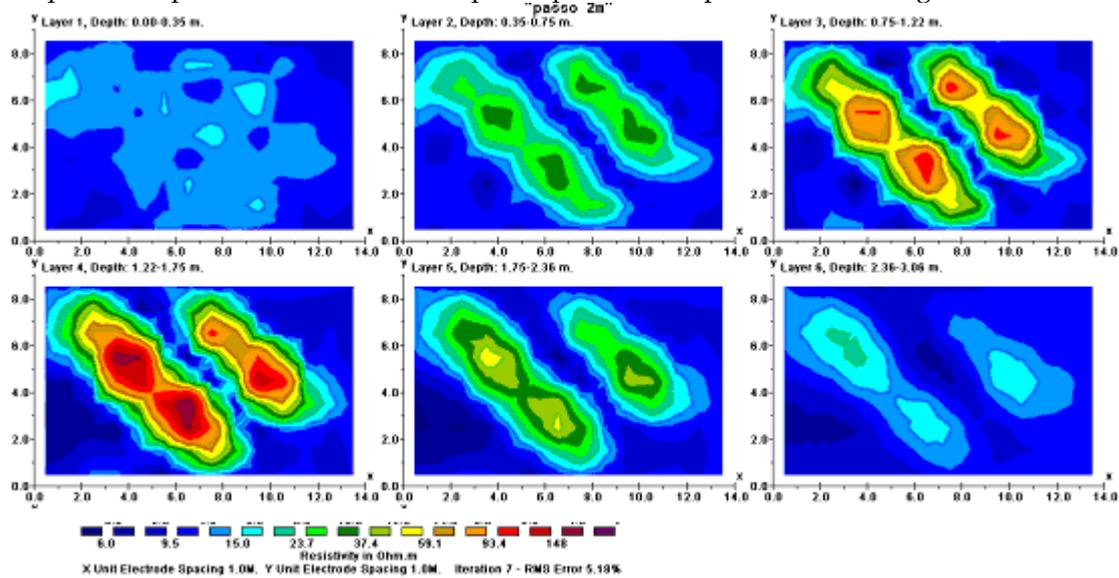


Fig. 3.41 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione Y

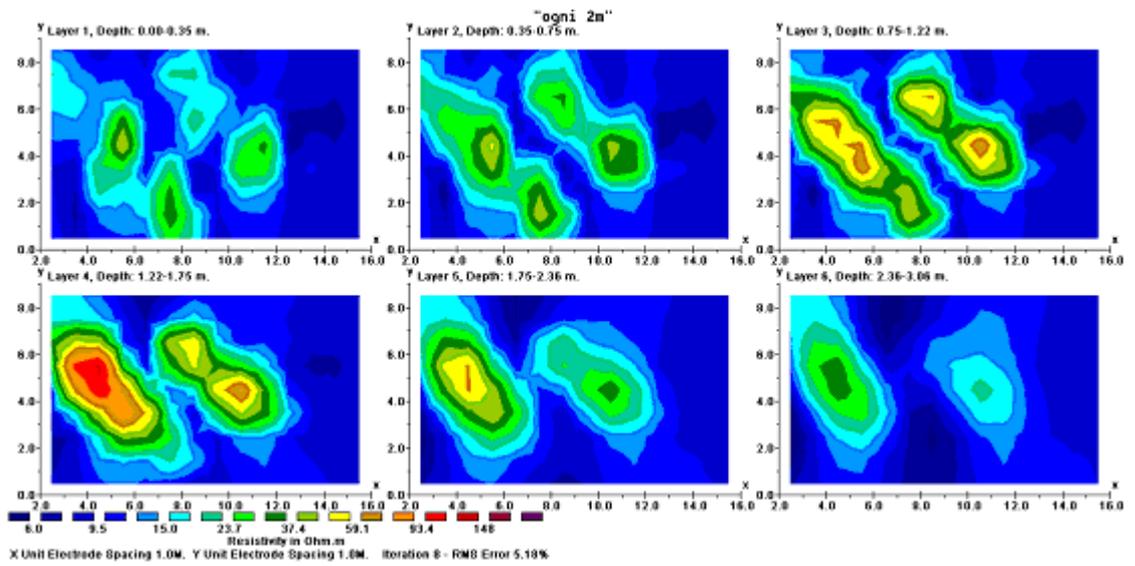


Fig. 3.41 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni lungo le due direzione.

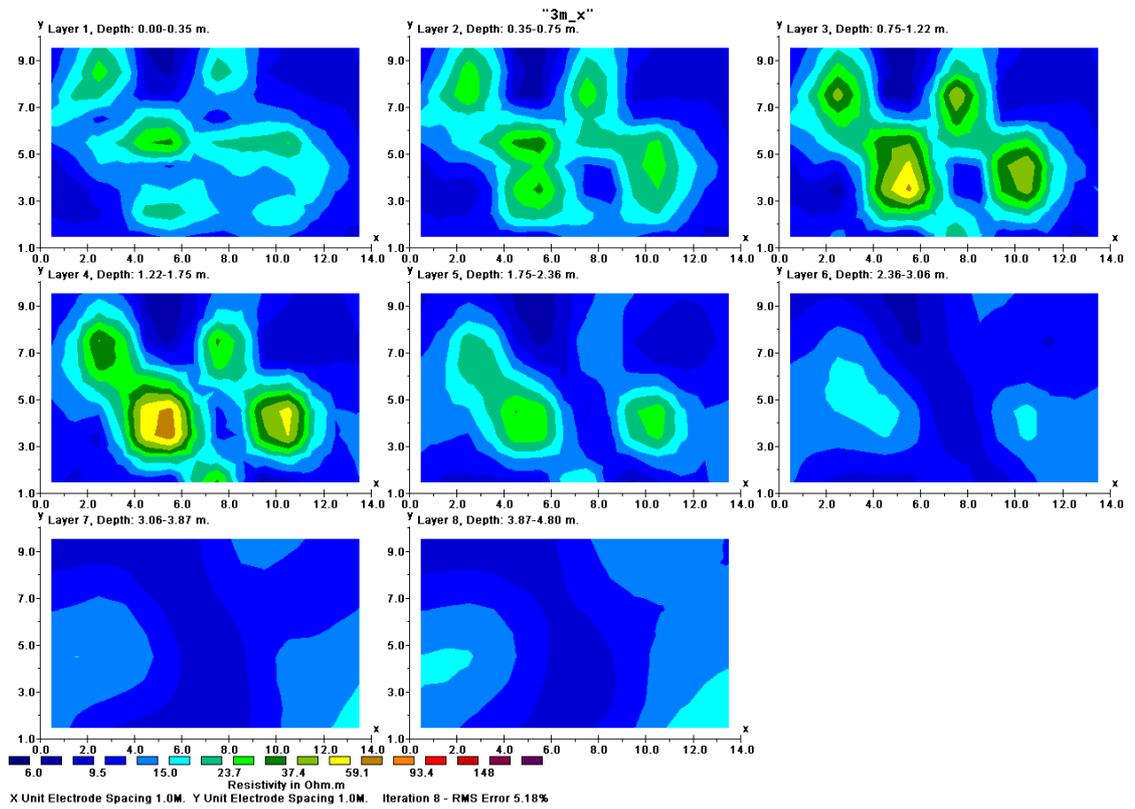


Fig. 3.42 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione X

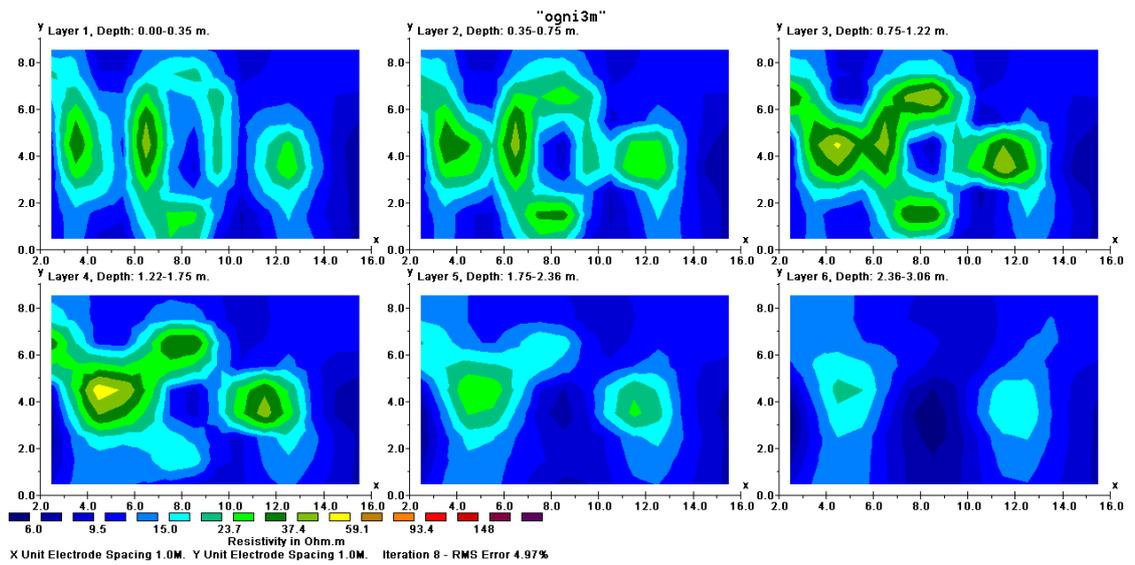


Fig. 3.42 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione Y

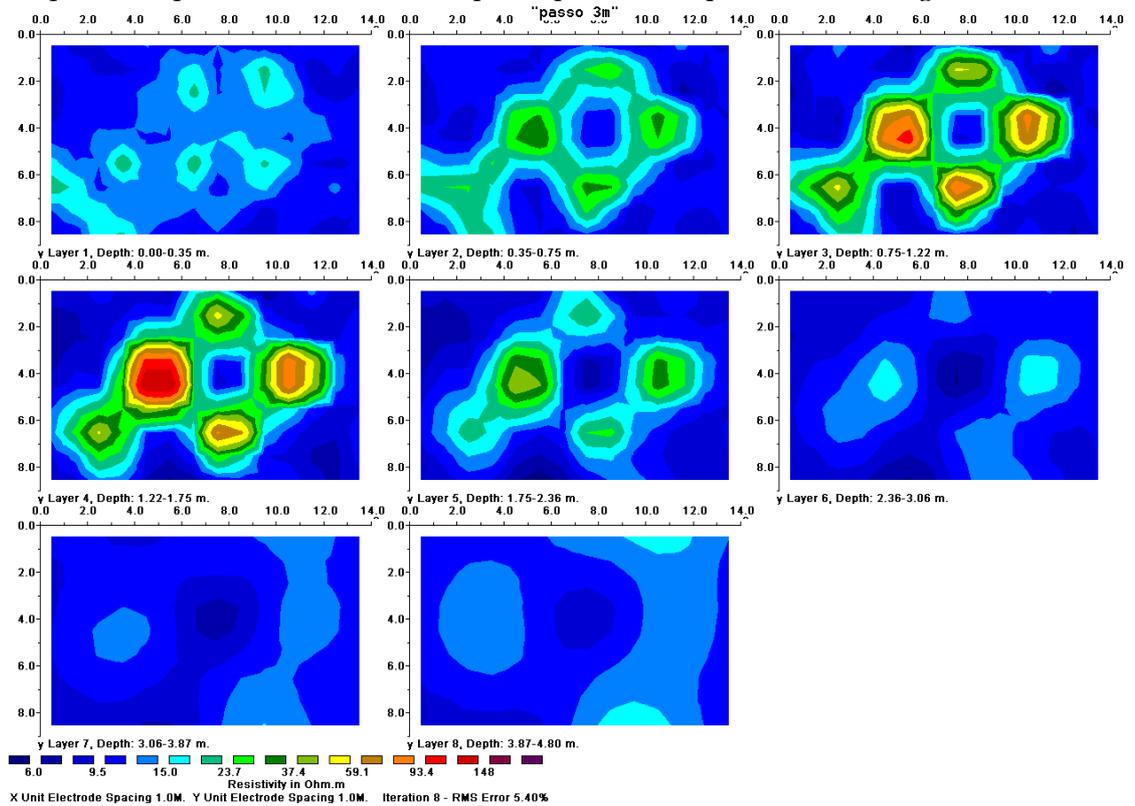


Fig. 3.42 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni lungo le due direzioni.

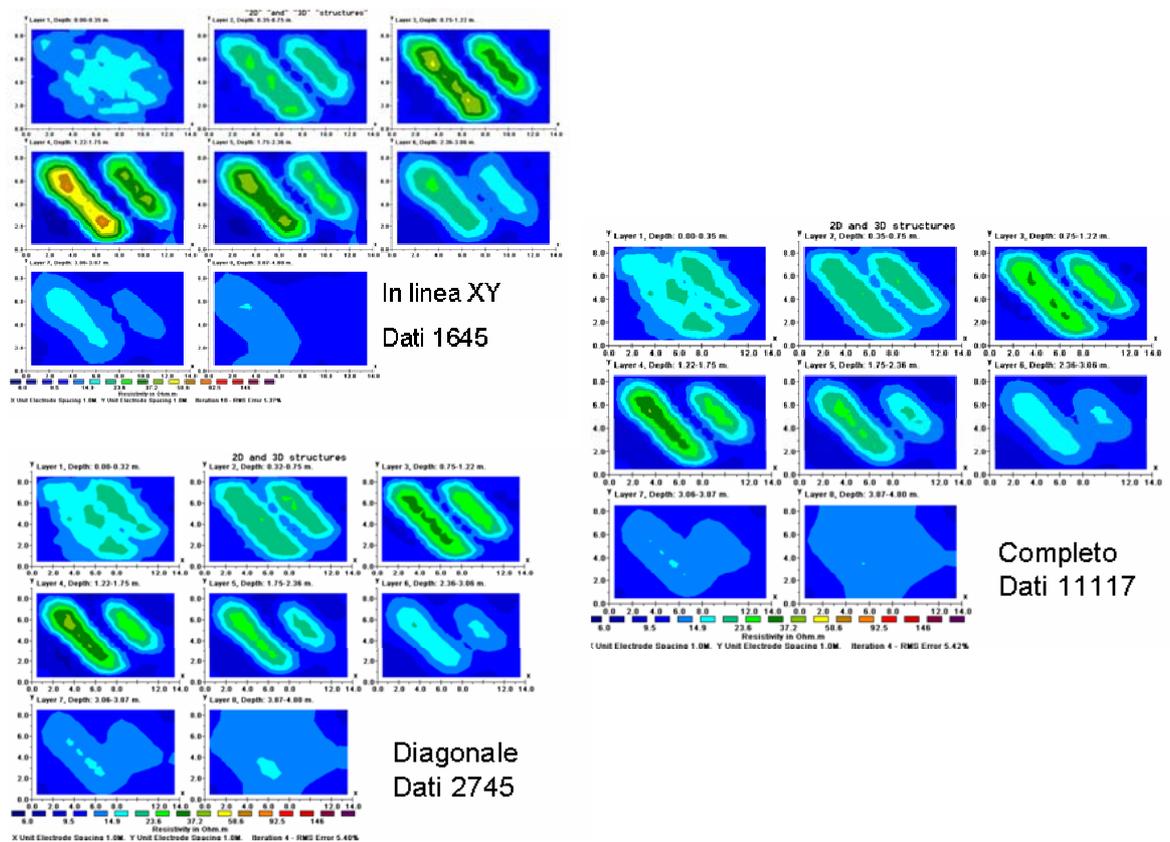
### 3.3.2 Polo-Polo

Le modalità di acquisizioni del dispositivo Polo-Polo sono le stesse descritte per il primo modello e riportate nel paragrafo 3.1.2. Pertanto il primo confronto che è stato eseguito è relativo alle diverse tipologie di acquisizioni che si possono determinare con questo array (fig. 3.43).

Anche in questo caso, cioè anche quando si realizzano profili non perpendicolari alla direzione delle strutture ma inclinati rispetto alle stesse, la risoluzione non dipende dal numero di acquisizione dei dati.

Le ricostruzioni eseguite con dispositivo Polo-Polo in linea, che prevede una elaborazione di 1645, fornisce la stessa risoluzione della ricostruzione eseguita con dispositivo Polo-Polo cross-diagonal, che prevede una elaborazione di 2745 dati. Anche la ricostruzione con il Polo-Polo complete data set, che prevede una elaborazione, in questo caso, di 11117 dati, fornisce quantitativamente la stessa risposta delle precedenti due ricostruzioni eseguite con un numero molto inferiore dei dati.

Questo risultato consente di confermare che per ottenere una buona ricostruzione del sottosuolo con dispositivo Polo-Polo, è possibile realizzare il Polo-Polo in linea in luogo delle altre due tipologie di acquisizioni. In questo modo si riduce notevolmente il tempo e i costi della campagna stessa.



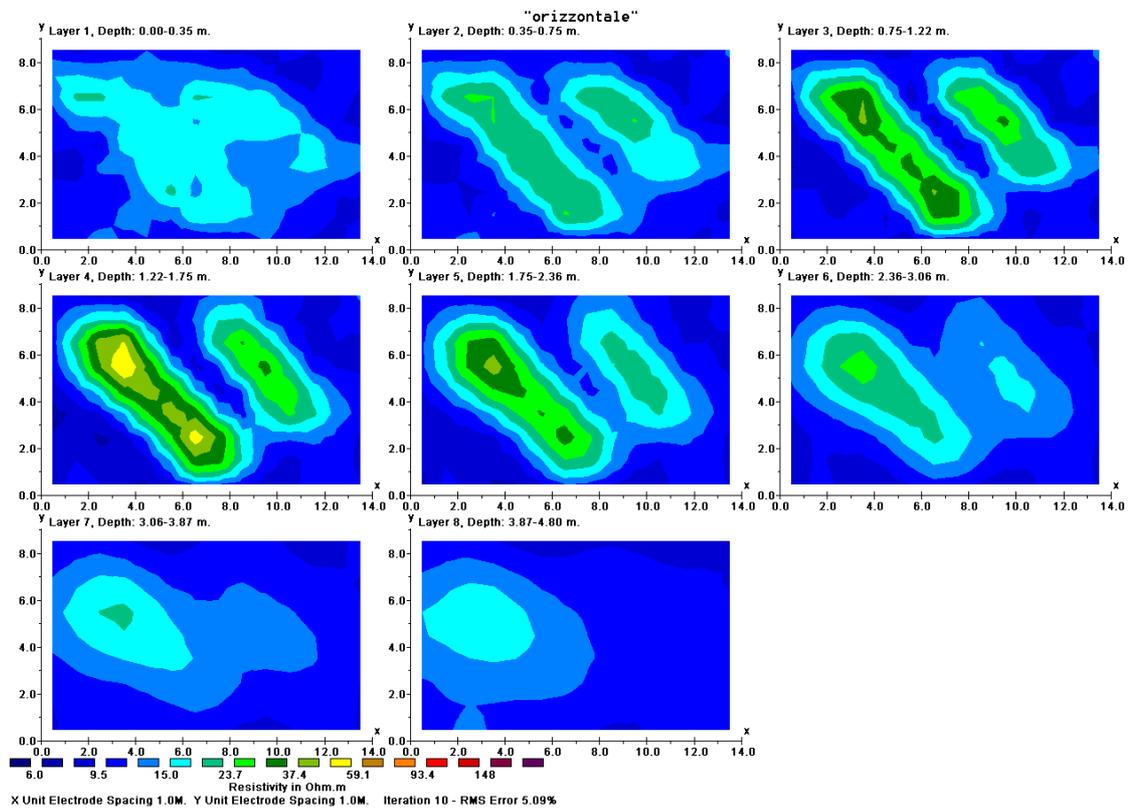
**Fig. 3.43:** Ricostruzioni eseguite con varie disposizioni dell'elettrodo di corrente rispetto a quello di potenziale nell'array Polo-Polo. Il numero si riferisce ai dati che sono stati elaborati per ogni tipologia di acquisizione utilizzata.

I successivi confronti sono stati eseguiti considerando il dispositivo Polo-Polo in linea. In figura 3.44 è riportato il confronto eseguito acquisendo solo lungo la direzione X (fig. 3.44 a), solo lungo la direzione Y (fig. 3.44 b) e su entrambe le direzioni (fig. 3.44 c).

Le ricostruzioni elaborate non dipendono dalla direzione in cui sono state eseguite le misure né dal numero delle acquisizioni considerate. Quando la distanza tra i profili ed il passo di campionatura sono confrontabili (in questo caso particolare le due distanze sono uguali), si può eseguire una campagna di indagine lungo una sola direzione.

Ancora una volta, quindi, il confronto tra la ricostruzione 3D e le pseudo 3D è stata eseguita solo lungo la direzione X dei profili (fig. 3.45). Le due ricostruzioni eseguite sono confrontabili ma nella ricostruzione attraverso le pseudo 3D del sottosuolo, i bordi dei corpi non sono ben delimitati. Nella ricostruzione 3D è possibile discriminare la presenza dei due corpi, definire la profondità alla quale questi sono presenti. I due corpi sono già presenti nella

seconda slice ma, confrontando i valori di resistività con quelli delle slice sottostanti, è possibile distinguere la struttura con l'effetto che essa riproduce (slice 2, 5, 6 della ricostruzione 3D in figura 3.45). Per le strutture inclinate, rispetto alla direzione dei profili, a differenza di quanto accade per gli altri due modelli analizzati, la pseudo 3D non ottimizza la ricostruzione dei dati.



**Fig. 3.44 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X

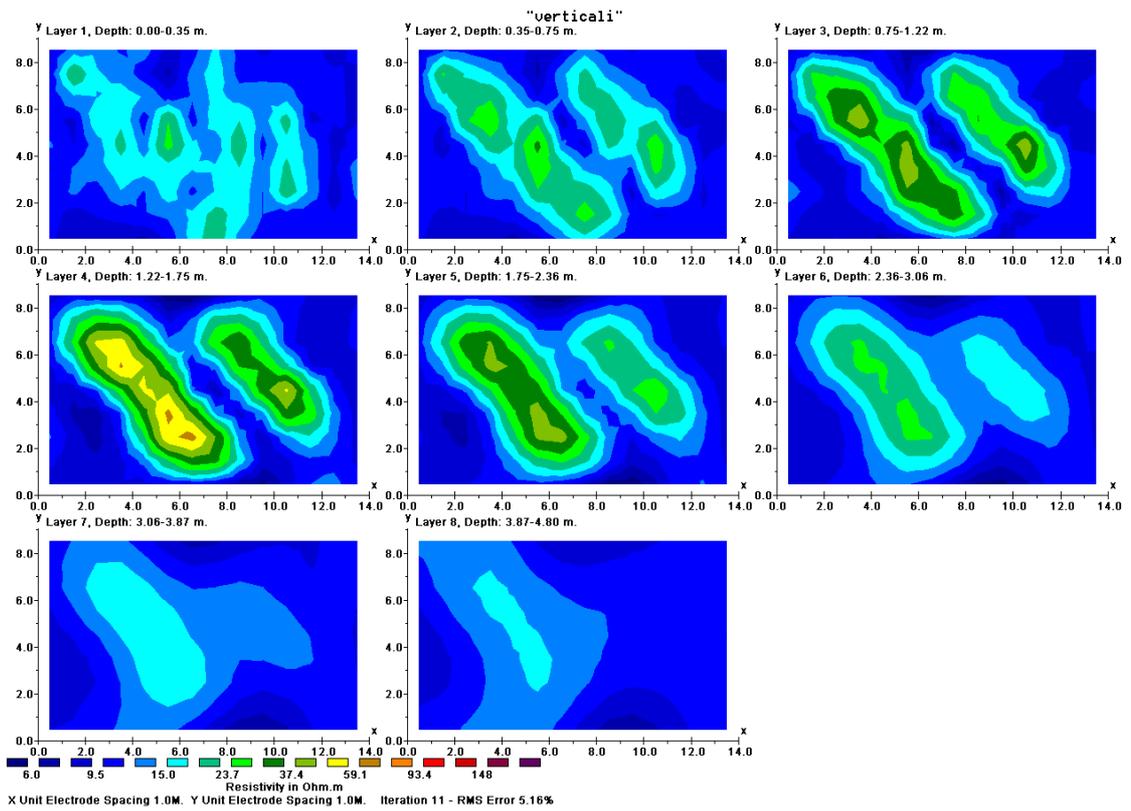


Fig. 3.44 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y

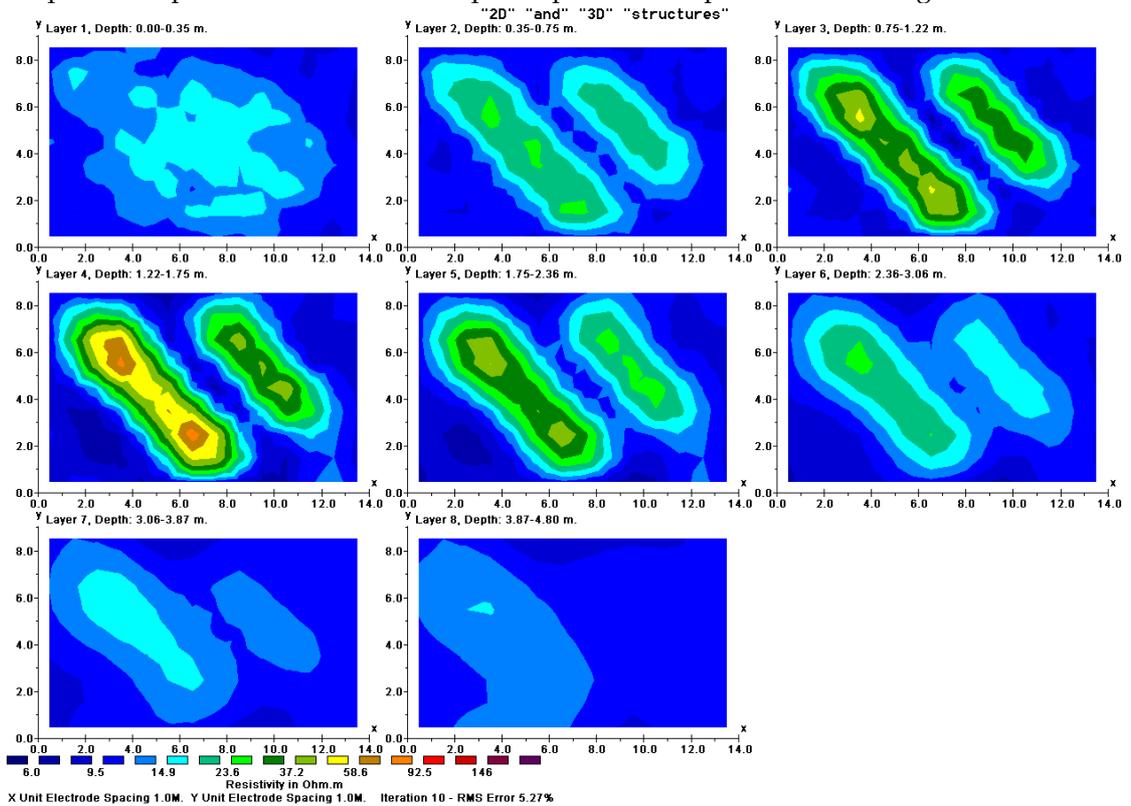
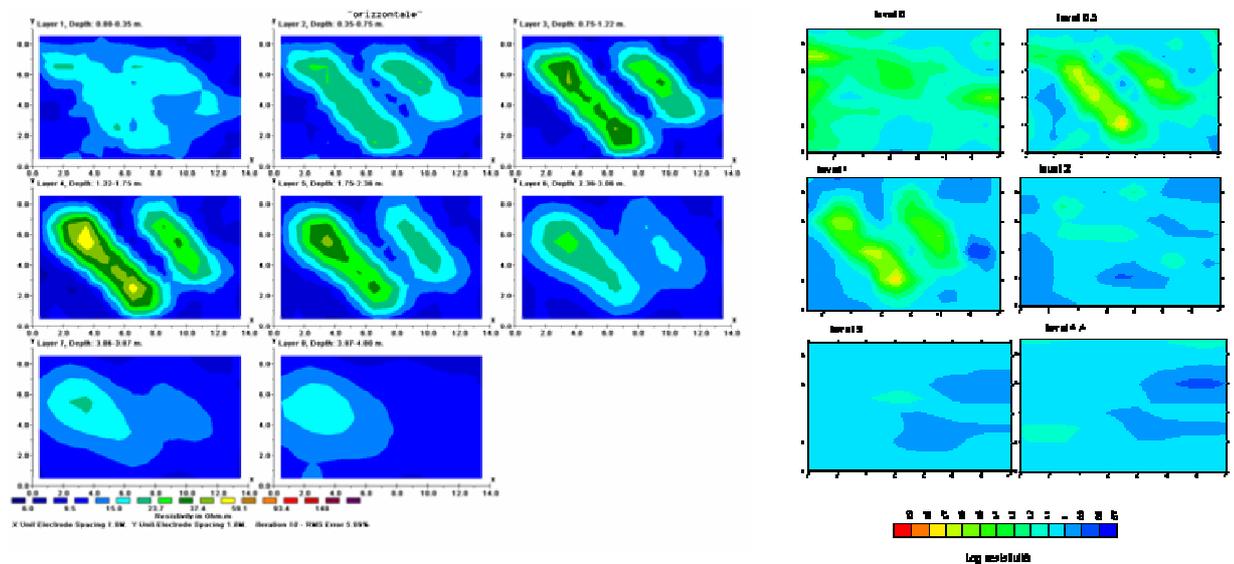


Fig. 3.44 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzioni.



**Fig 3.45:** Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X con dispositivo Polo-Polo in linea con campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m. a sinistra è rappresentata una ricostruzione 3D a destra una ricostruzione di pseudo 3D.

Le ricostruzioni eseguite con un passo di campionatura pari a 1 m ma con distanza tra i profili pari a 2 m (fig. 3.46), consentono di definire una direzione in cui la ricostruzione elaborata (fig. 3.46 a) è confrontabile con quella eseguita nelle due direzioni (fig. 3.46 c). Questo non risulta più evidente con le ricostruzioni elaborate con passo di campionatura pari a 3 m; infatti, in questo caso, è necessario per avere una ricostruzione confrontabile con il modello realizzato, acquisire in entrambe le direzioni (3.47 c).

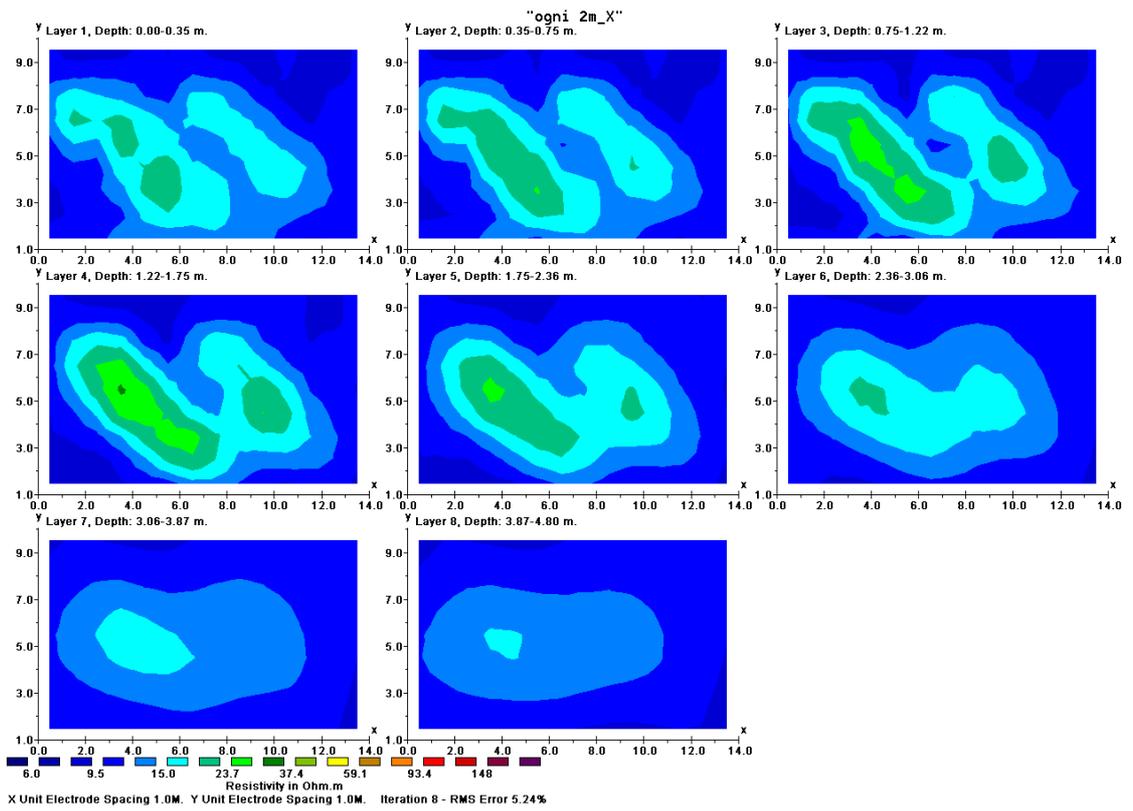


Fig. 3.46 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione X

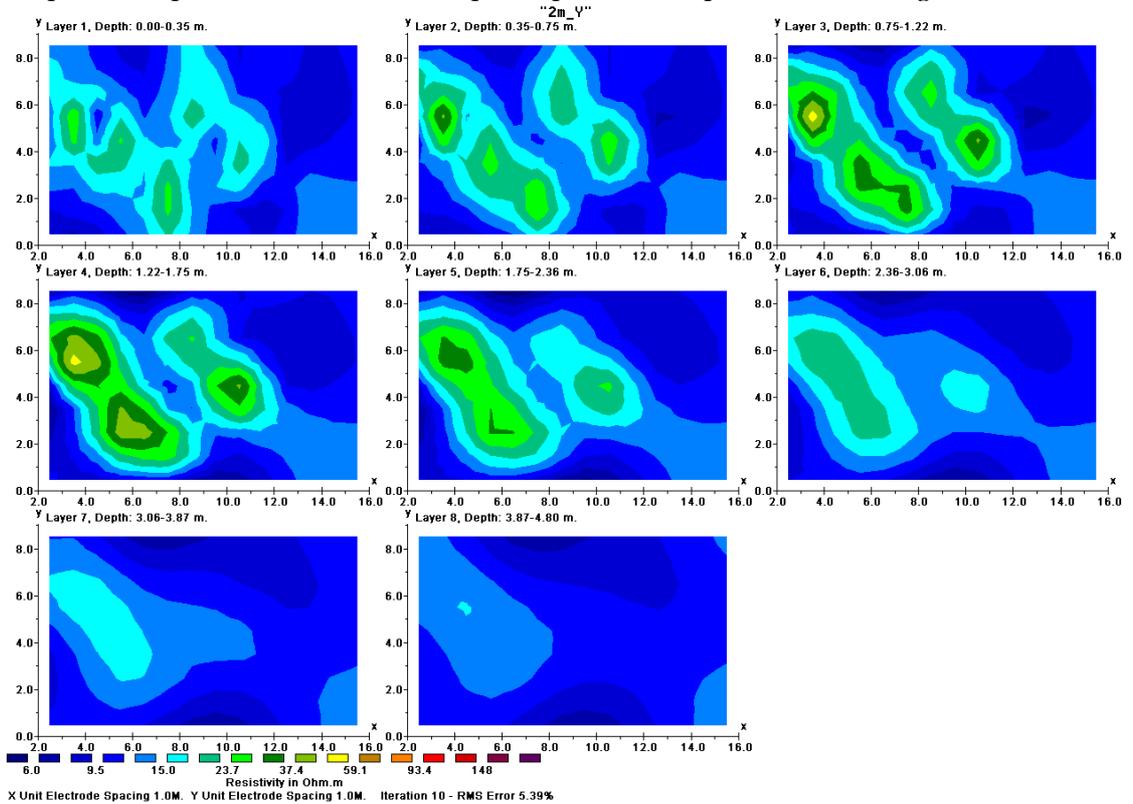


Fig. 3.46 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione Y

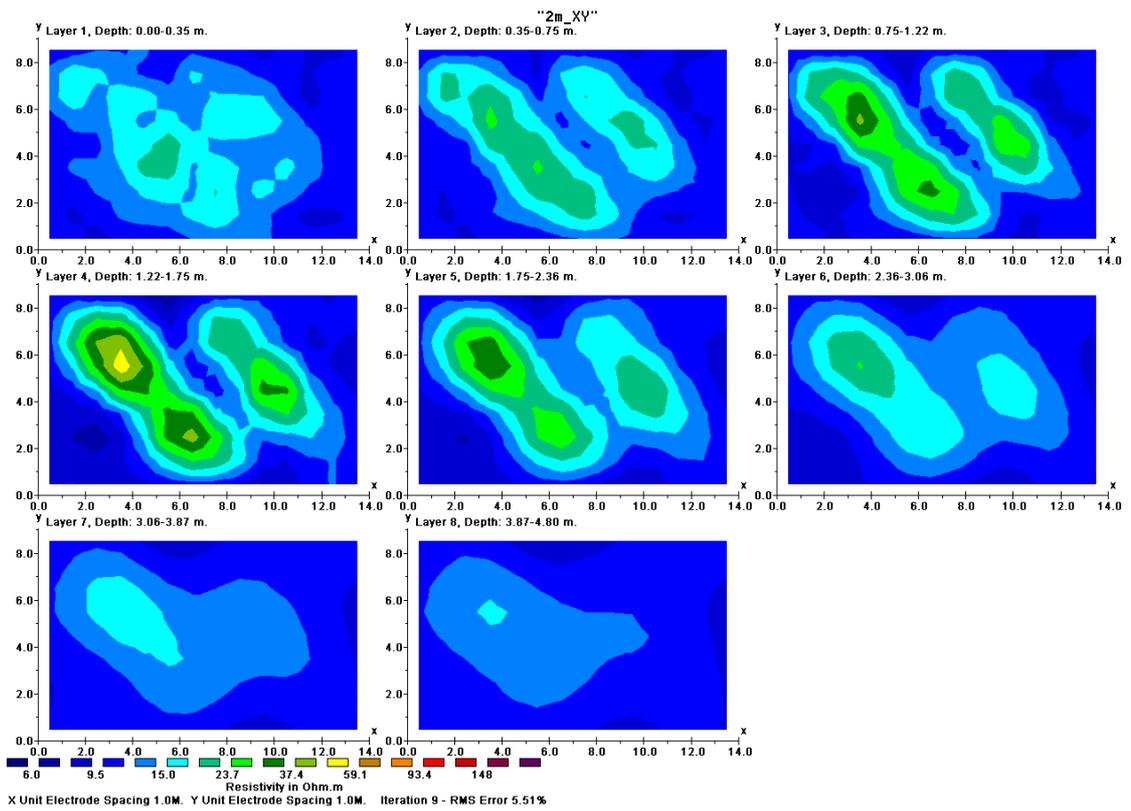


Fig. 3.46 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni lungo le due direzioni.

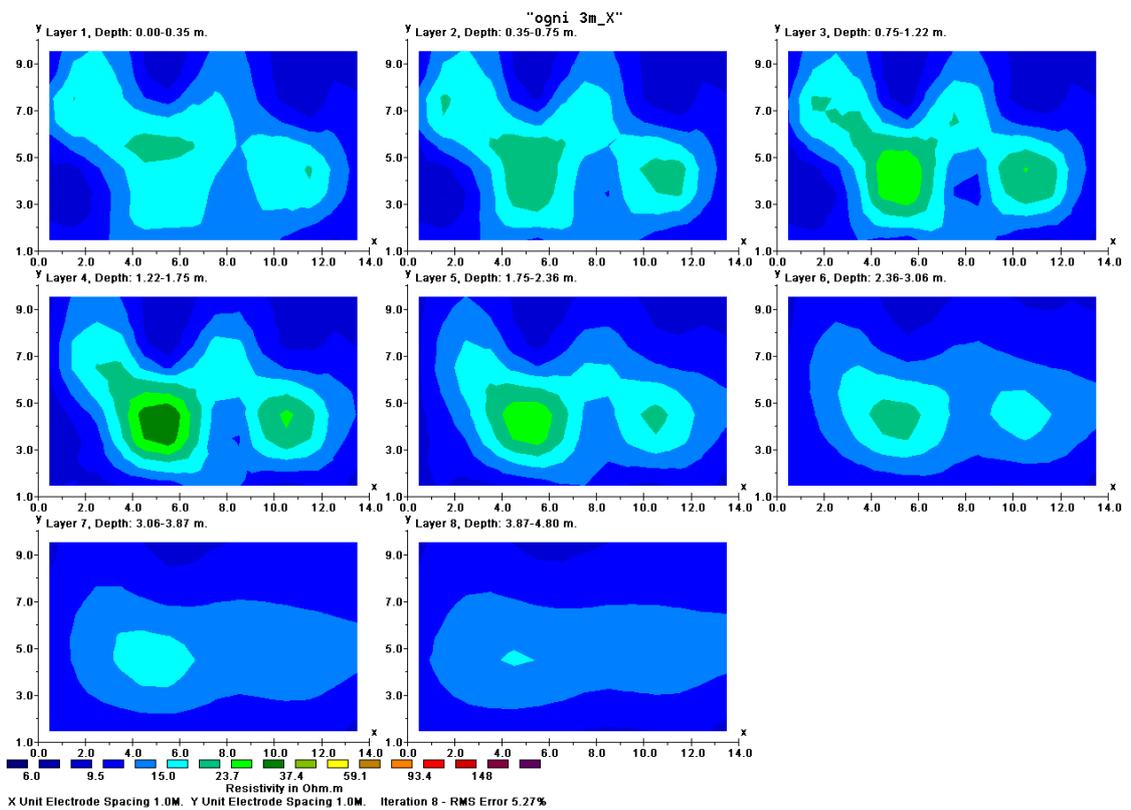


Fig. 3.47 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione X

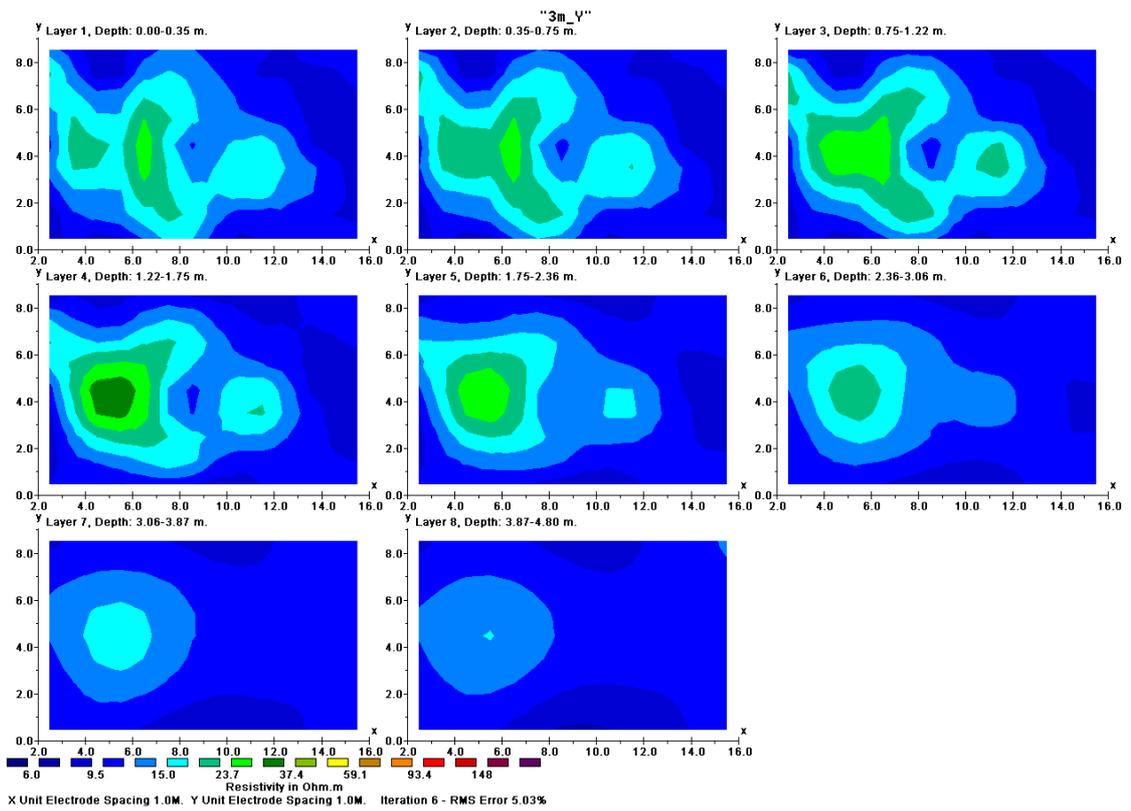


Fig. 3.47 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni solo lungo la direzione Y

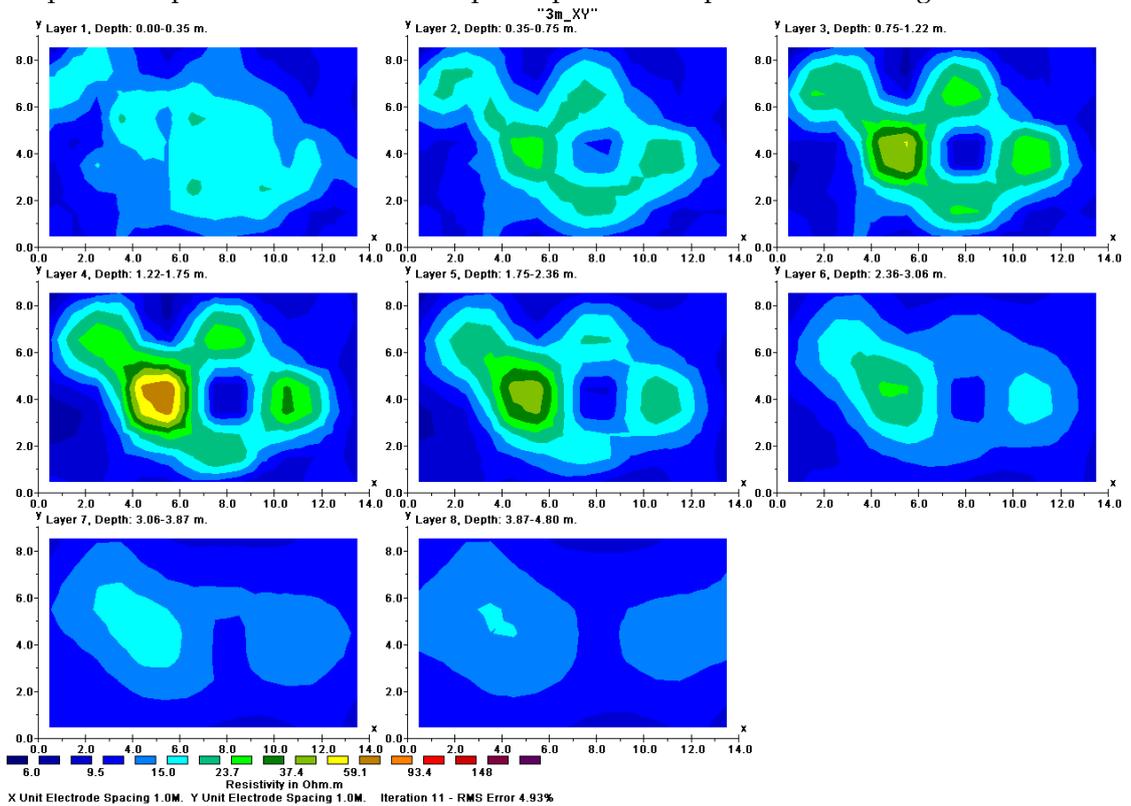


Fig. 3.47 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Polo-Polo in linea con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3m acquisizioni lungo le due direzioni.

### 3.3.3 Wenner-Schlumberger

In figura 3.48 è riportato il confronto fatto considerando le varie ricostruzioni ottenute considerando acquisizioni solo lungo la direzione X, solo lungo la direzione Y e su entrambe le direzioni. Le acquisizioni sono state fatte mediante l'array Wenner-Schlumberger con passo di campionatura minimo tra gli elettrodi pari a 1 m e distanza tra i vari profili realizzati pari a 1 m. Ancora una volta le tre ricostruzioni fatte sono tutte confrontabili tra loro e quantitativamente simili. Pertanto il confronto tra le ricostruzioni 3D e la ricostruzione attraverso le pseudo 3D del sottosuolo, sono state fatte considerando i dati relativi alla direzione X della maglia oggetto di studio (fig. 3.49). Anche in questo caso, come per i modelli analizzati in precedenza, la ricostruzione attraverso le pseudo 3D del sottosuolo non ricostruisce un andamento di anomalie tale da delimitare i due corpi modellizzati.

La ricostruzione 3D, invece, consente tale ricostruzione.

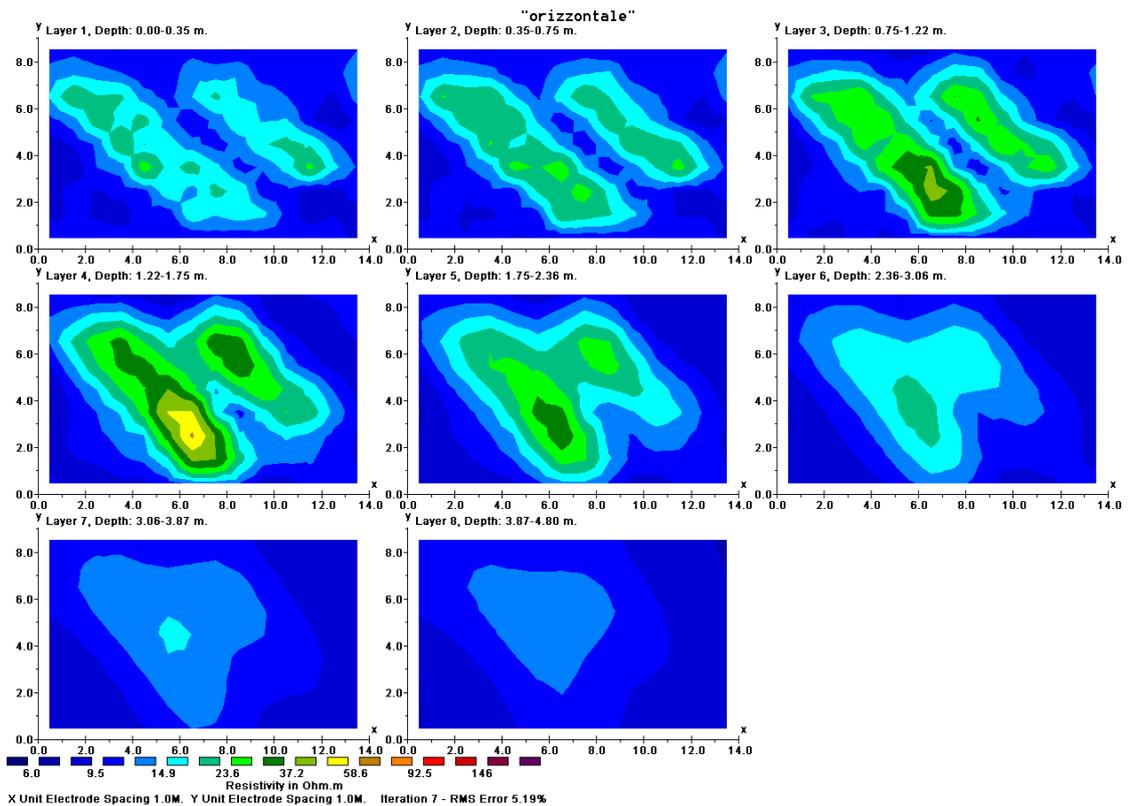


Fig. 3.48 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione X

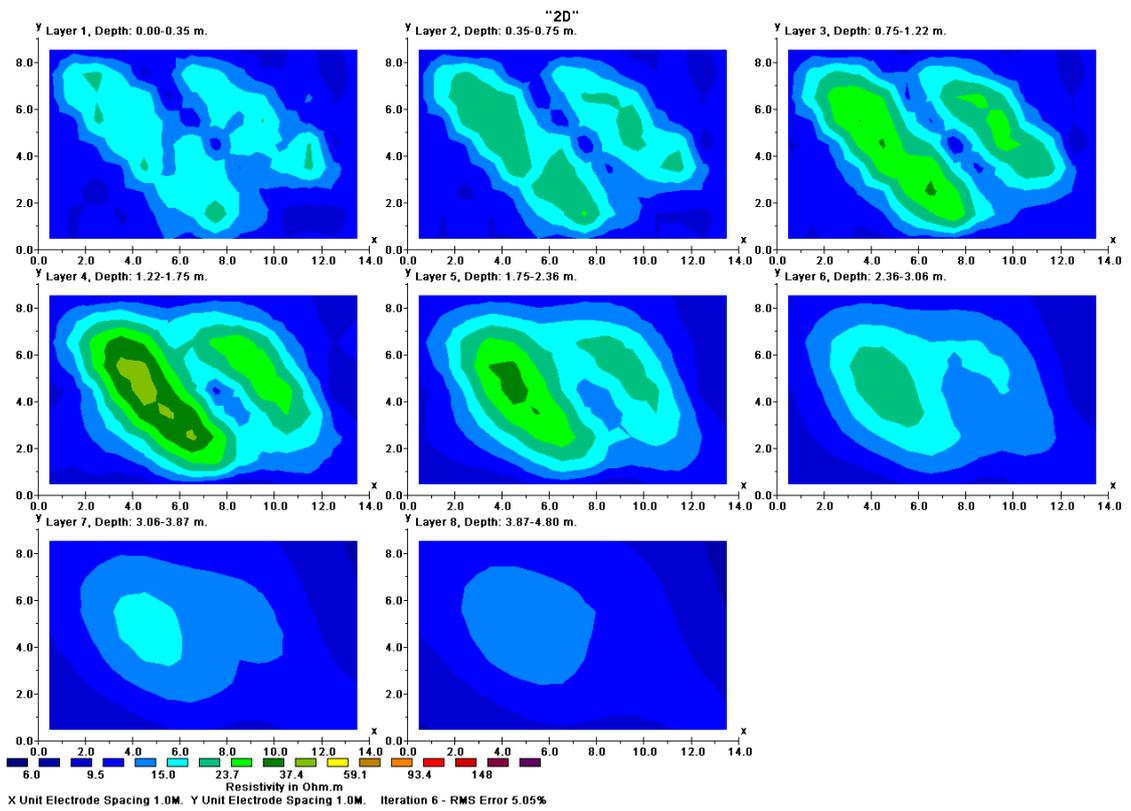


Fig. 3.48 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni solo lungo la direzione Y

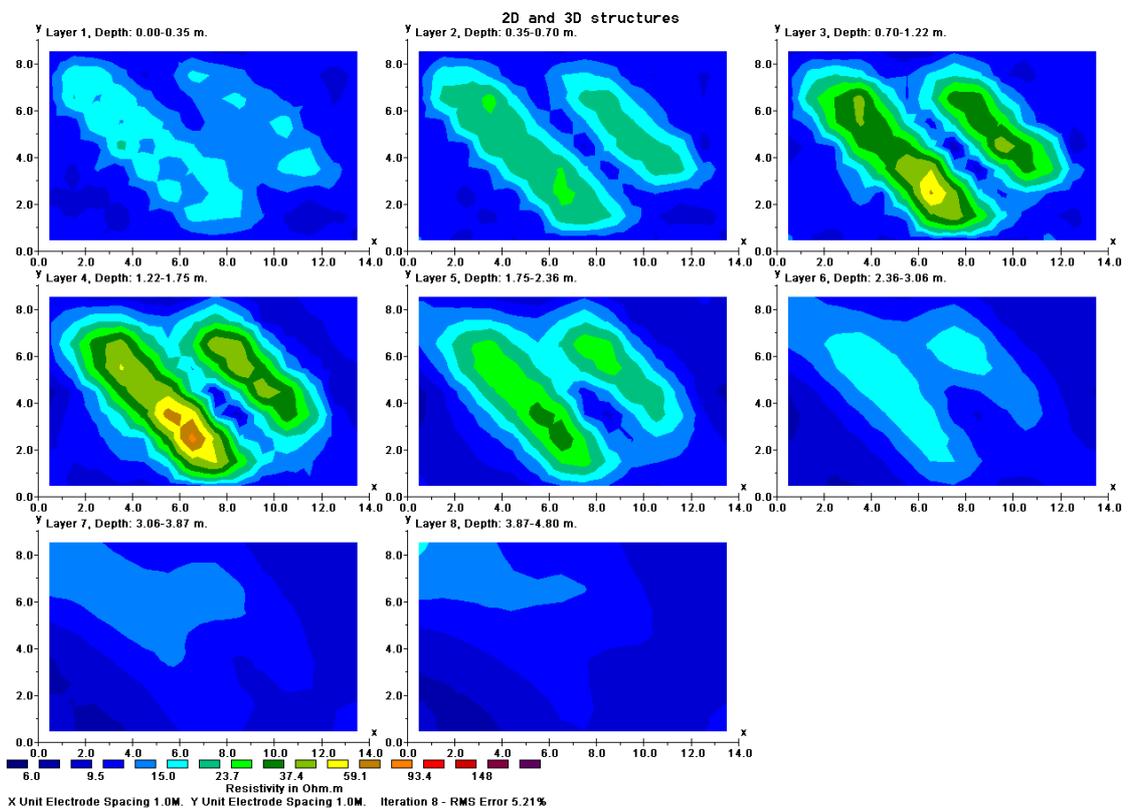


Fig. 3.48 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m acquisizioni lungo le due direzioni.

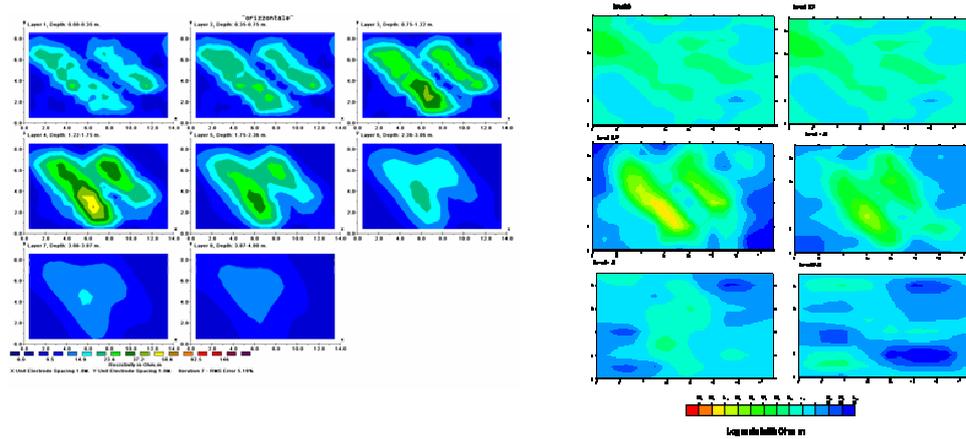


Fig 3.49: Ricostruzione di dati acquisiti lungo la direzione X con dispositivo Wenner-Schlumberger con campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 1m. a sinistra è rappresentata una ricostruzione 3D a destra una ricostruzione di pseudo 3D.

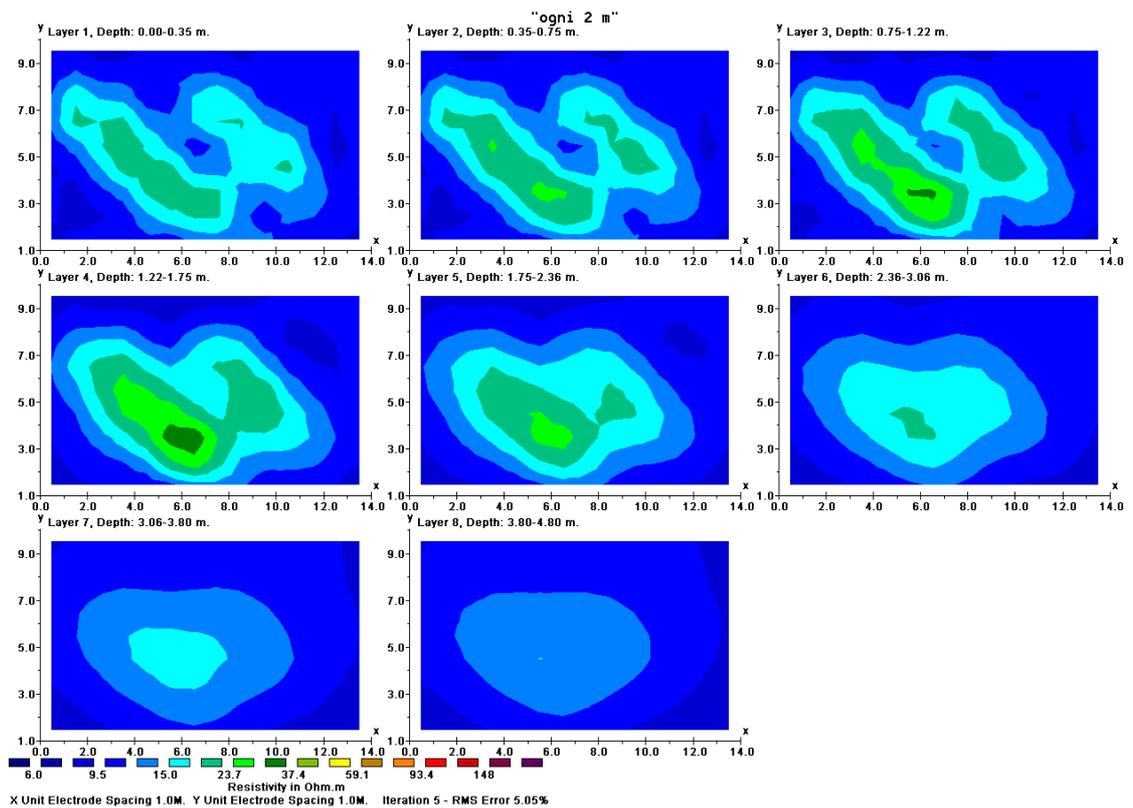


Fig. 3.50 a: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione X

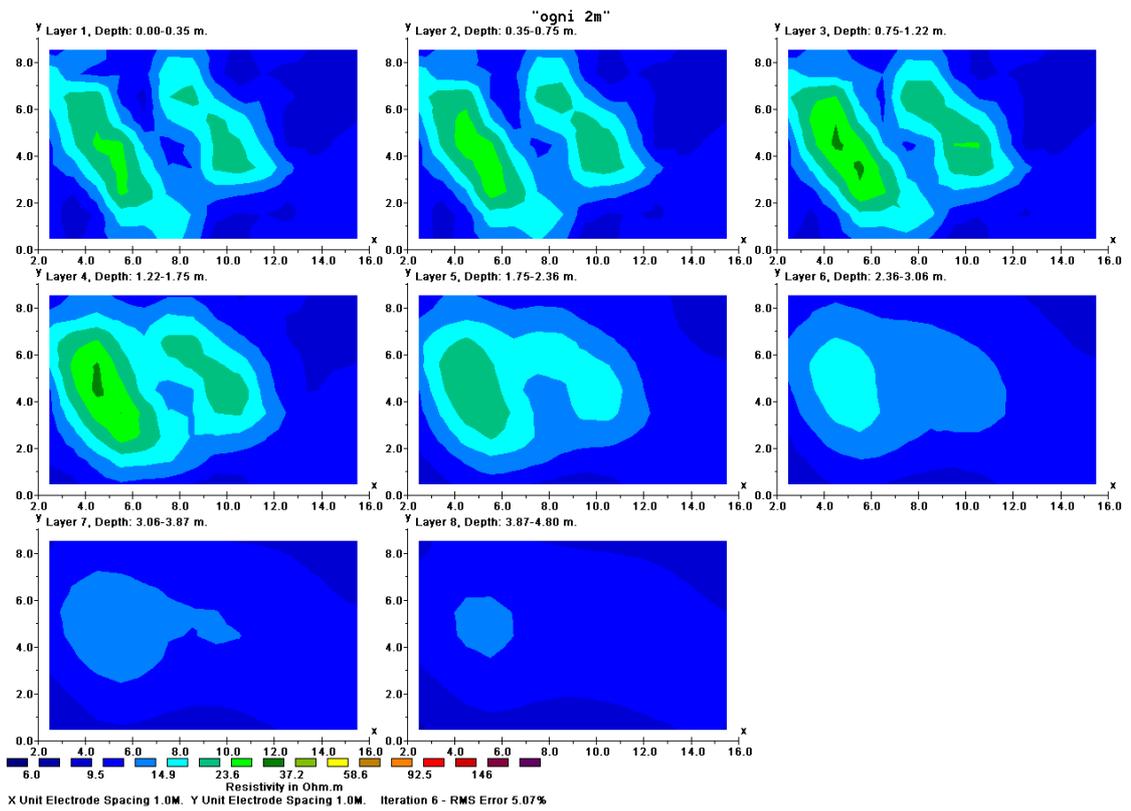


Fig. 3.50 b: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione Y

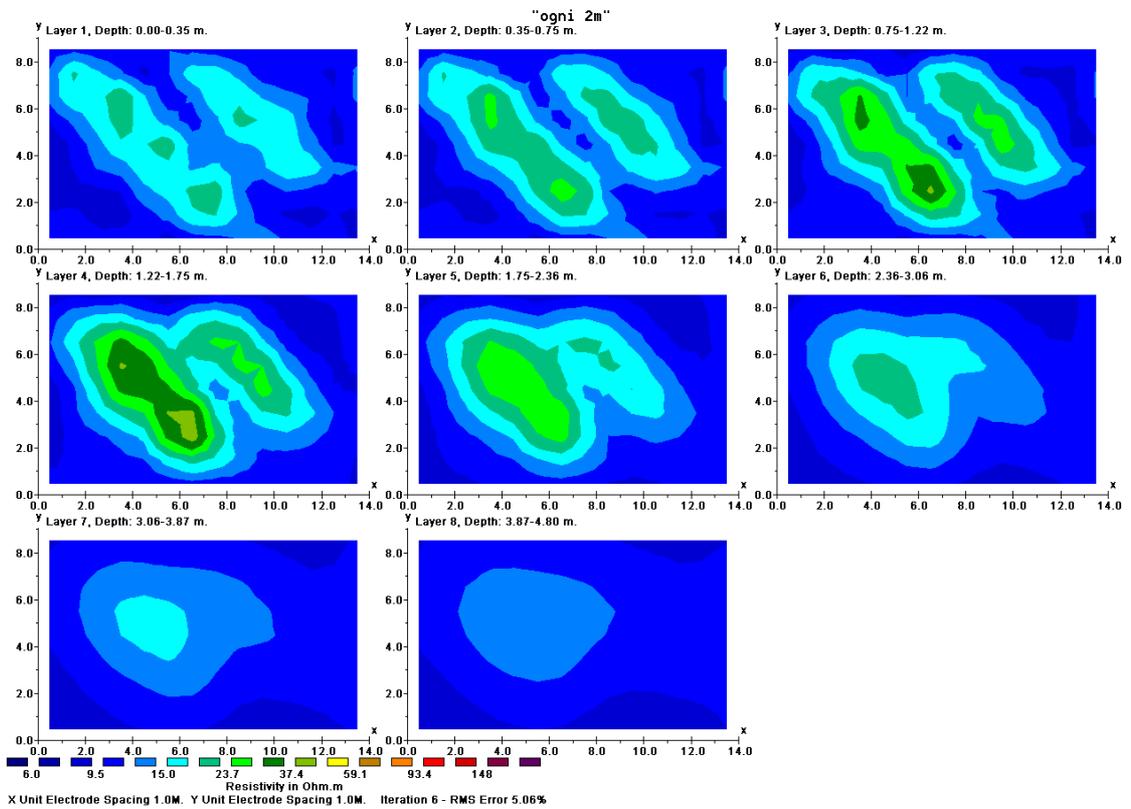
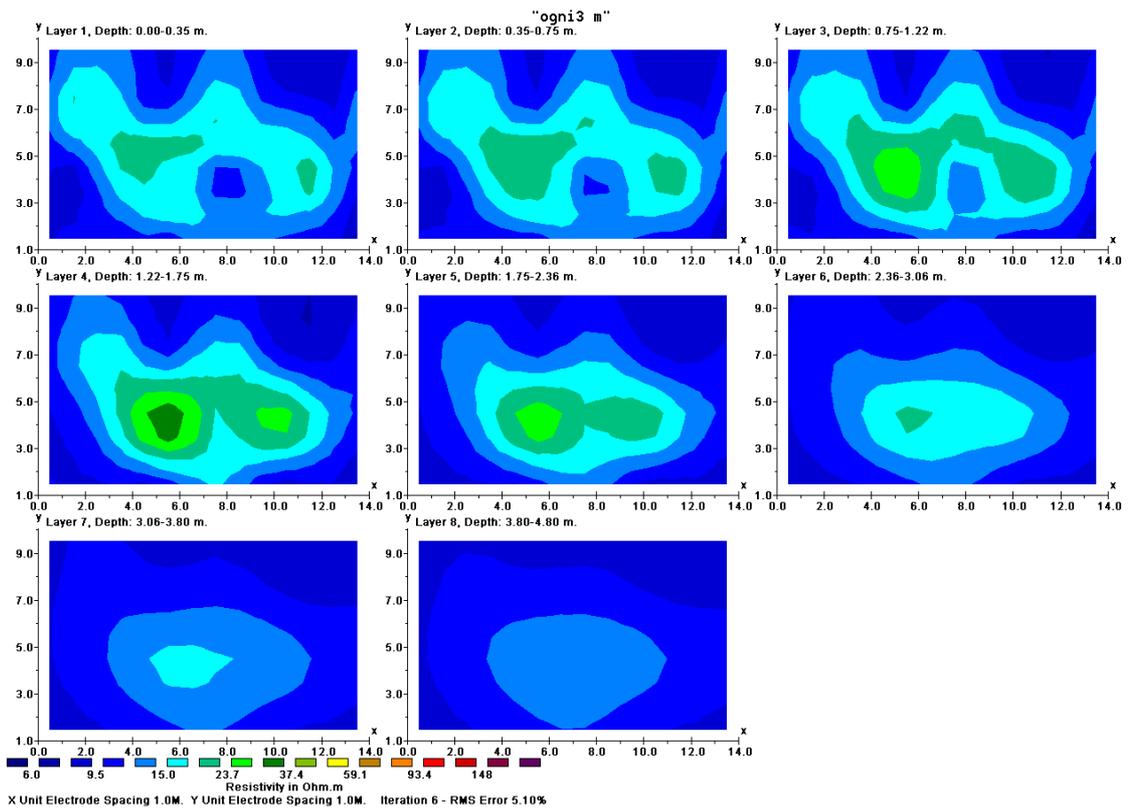
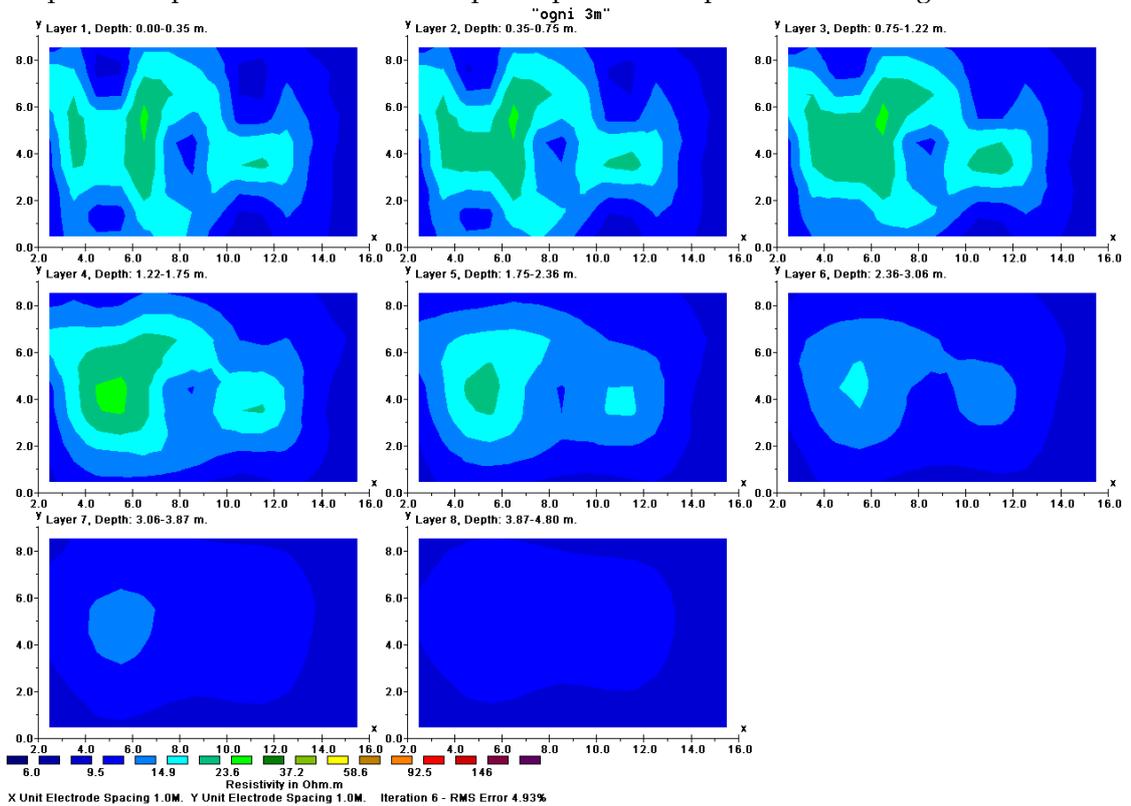


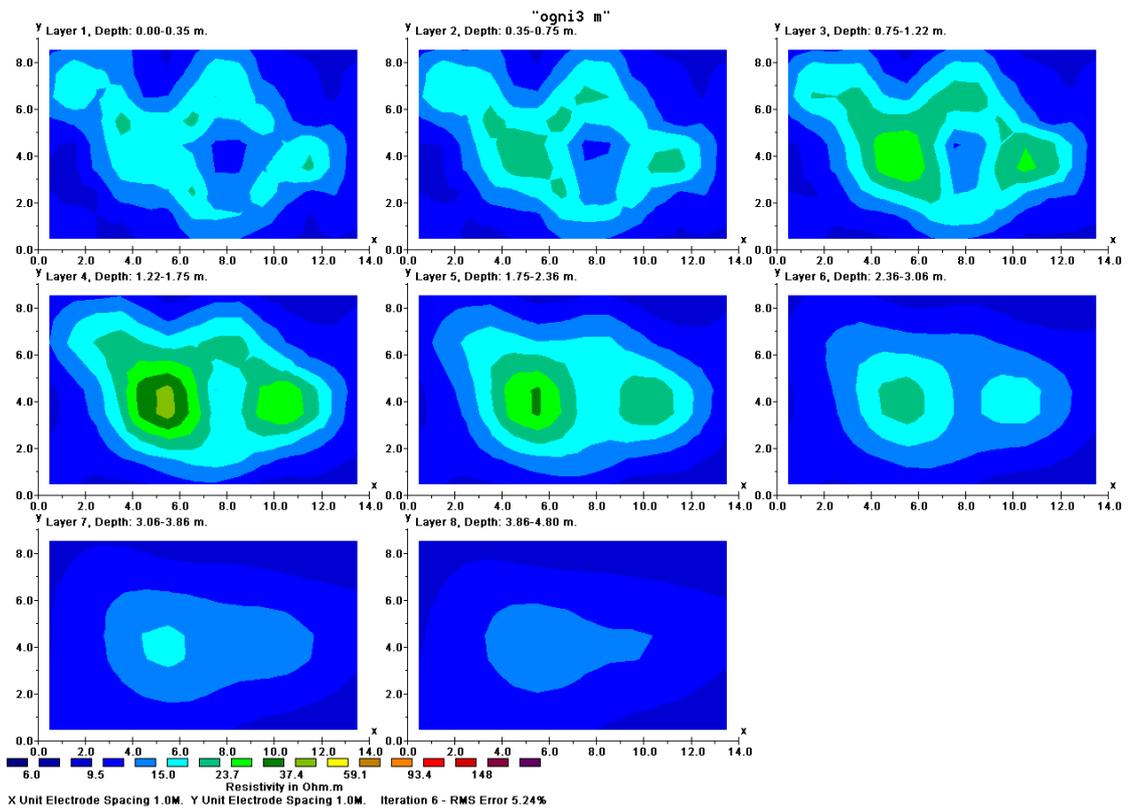
Fig. 3.50 c: Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni lungo le due direzioni.



**Fig. 3.51 a:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione X



**Fig. 3.51 b:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni solo lungo la direzione Y



**Fig. 3.51 c:** Ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Wenner-Schlumberger con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 2m acquisizioni lungo le due direzioni.

Le ricostruzioni eseguite con un passo di campionatura pari a 1 m ma con distanza tra i profili pari a 2 m (fig. 3.50), consentono di definire una direzione in cui la ricostruzione elaborata (fig. 3.50 a) è confrontabile con quella eseguita nelle due direzioni (fig. 3.50 c).

Questo non risulta più evidente con le ricostruzioni elaborate con passo di campionatura pari a 3 m; infatti, in questo caso, è necessario per avere una ricostruzione confrontabile con il modello realizzato, acquisire in entrambe le direzioni (3.53 c) e comunque il confronto risulta essere piuttosto complesso.

Comunque, in questo caso, a differenza di quanto accade per la ricostruzione realizzata con il primo modello in cui i profili sono ortogonali alle strutture, l'acquisizione eseguita in entrambe le direzioni con passo di 3 m (fig. 3.5), le strutture non sono ben evidenziate.

Per queste tipologie di strutture bisogna acquisire in modo fitto lungo una direzione.

### **3.4 Osservazioni sui tre confronti elaborati e scelta del dispositivo e della metodologia da utilizzare in campagna per le ricostruzioni 3D dei dati.**

I confronti riportati nelle figure 3.53, 3.54 e 3.55 sono relativi alle possibili ricostruzioni che possono essere eseguite in campagna attraverso l'acquisizione dei dati con gli array più comunemente adoperati ed eseguendo le acquisizioni su entrambe le direzioni della maglia.

Naturalmente, con tutti i dispositivi utilizzati nei tre diversi modelli ricostruiti è possibile ottenere la ricostruzione del sottosuolo investigato correlabile con la struttura modellizzata. Infatti, la ricostruzione non può dipendere dalla tipologia di array scelta.

E' possibile, però, evidenziare delle differenze comuni ai tre modelli realizzati che consentono di definire la metodologia di acquisizione 3D che consenta di ottenere una migliore ricostruzione rispetto del sottosuolo investigato.

Infatti, è possibile osservare che con le ricostruzioni ottenute mediante il Dipolo-Dipolo Assiale, la posizione delle strutture è più semplice da definire in quanto risulta ben evidente la differenza tra l'effetto della struttura rispetto alla struttura stessa: è possibile quindi delimitare i bordi dei corpi e la profondità alla quale sono presenti le strutture.

Negli altri dispositivi quello che rappresenta l'effetto determinato dalla presenza della struttura, è presente anche a maggiori profondità per cui in fase di interpretazione, dove non si conosce a priori lo spessore della struttura da individuare, risulterebbe più complesso circoscrivere il limite inferiore e la posizione della struttura stessa.

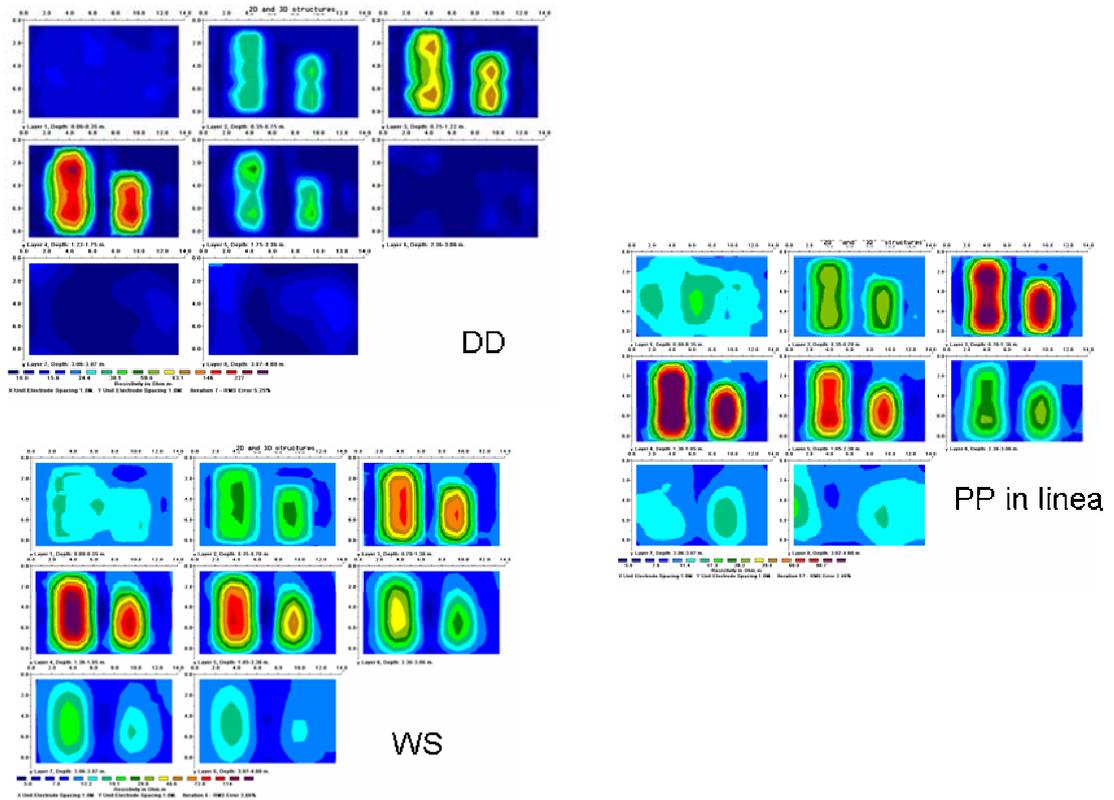
Inoltre, osservando con maggiore dettaglio la ricostruzione elaborata tramite il dispositivo Wenner-Schlumberger e riportata in figura 3.54, il corpo modellizzato a maggiore profondità e posto immediatamente al disotto delle altre strutture, in questo tipo di ricostruzione, l'anomalia correlabile con tale corpo è posta ad una profondità maggiore.

Nella stessa figura è possibile osservare anche che le ricostruzioni eseguite con il dispositivo Dipolo-Dipolo è molto simile a quella ricostruita con il dispositivo Polo-Polo in linea. Il numero dei dati elaborati per ottenere la ricostruzione 3D con il dispositivo Dipolo-Dipolo è notevolmente diverso rispetto a quello necessario per ottenere la stessa ricostruzione con il dispositivo Polo-Polo: pertanto il dispositivo Dipolo-Dipolo consente una ricostruzione correlabile con la Polo-Polo ma con un numero di dati da elaborare (e quindi da acquisire) minore.

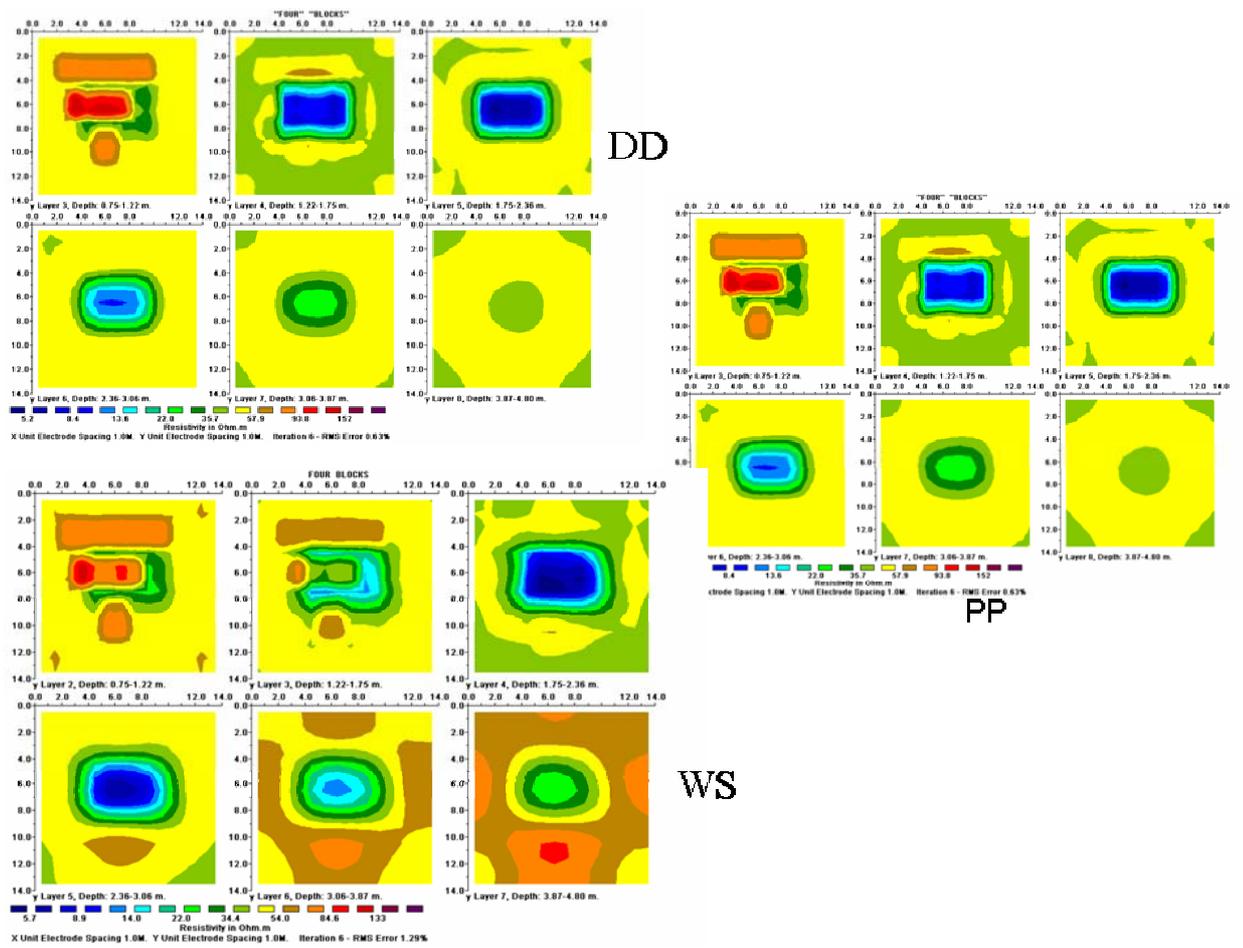
Considerando anche la difficoltà operative in fase di acquisizione dei dati in campagna nel posizionare gli elettrodi remoti, si può ragionevolmente concludere che, per strutture simili a quelle analizzate, il dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale consenta delle buone ricostruzioni 3D.

Non bisogna dimenticare, però, che la distanza tra i vari profili deve essere uguale, o comunque confrontabile, con il passo di campionatura utilizzato lungo i profili stessi.

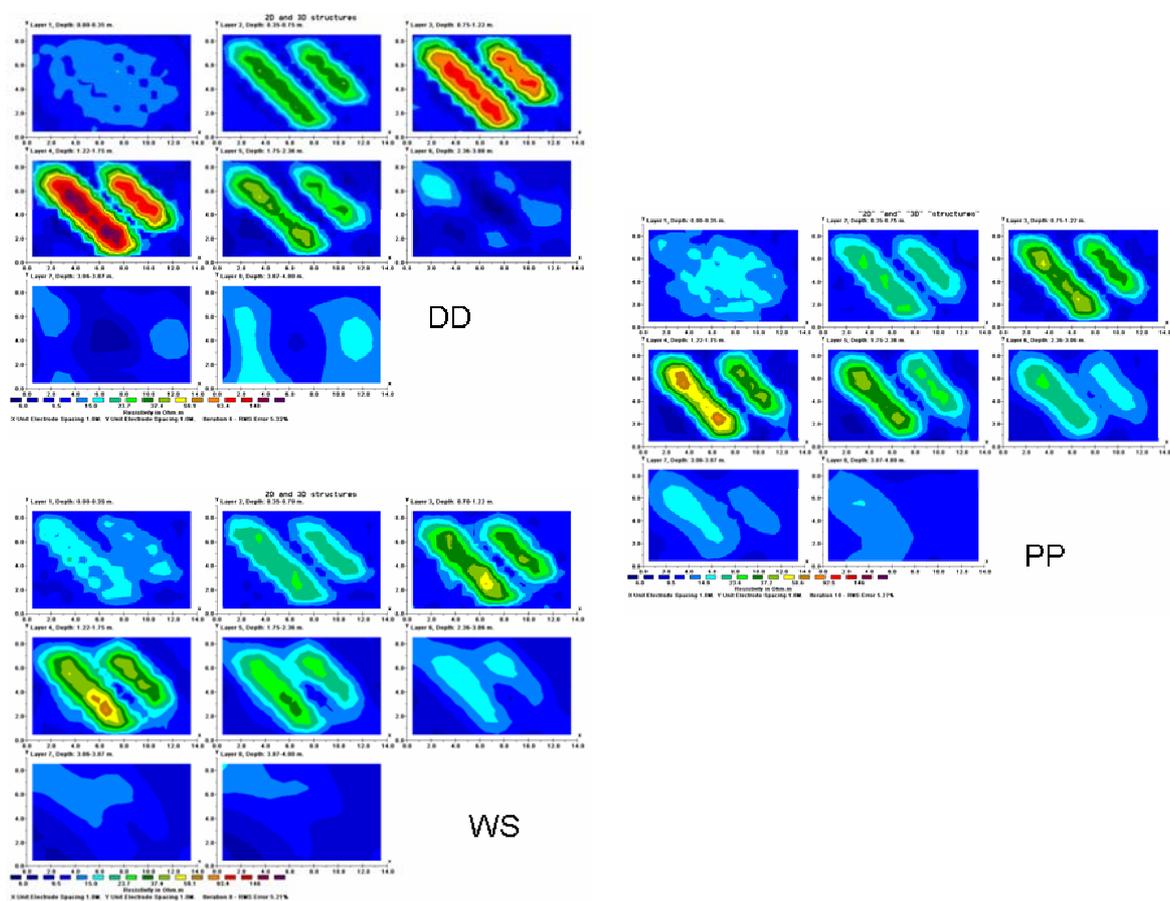
In questo caso, come osservato in tutti i modelli analizzati, è possibile realizzare anche l'acquisizione lungo una sola direzione della maglia, in quanto le ricostruzioni eseguite sono quantitativamente simili a quelle ottenute acquisendo su entrambe le direzioni. Al diminuire della copertura areale dei dati, ottenuta elaborando delle ricostruzioni con maglie in cui la distanza tra i profili è un multiplo intero del passo di campionatura, il dispositivo Dipolo-Dipolo risulta essere molto più sensibile rispetto alle altre due tipologie di array considerati a tale variazione. Questo è possibile osservarlo soprattutto per le ricostruzioni definite per il modello 3.



**Fig. 3.53: Modello 1:** Confronto eseguito tra le varie ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale (DD), Wenner-Schlumberger (WS) e Polo-Polo in linea (PP) con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3 m. Le ricostruzioni riportate si riferiscono ad elaborazioni di dati acquisiti lungo le due direzioni.



**Fig. 3.54: Modello 2:** Confronto eseguito tra le varie ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale (DD), Wenner-Schlumberger (WS) e Polo-Polo in linea (PP) con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3 m. Le ricostruzioni riportate si riferiscono ad elaborazioni di dati acquisiti lungo le due direzioni.



**Fig. 3.55: Modello 3:** Confronto eseguito tra le varie ricostruzioni 3D ottenute mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale (DD), Wenner-Schlumberger (WS) e Polo-Polo in linea (PP) con passo di campionatura pari a 1m e distanza tra i profili pari a 3 m. Le ricostruzioni riportate si riferiscono ad elaborazioni di dati acquisiti lungo le due direzioni.

In tutti e tre i modelli considerati si evince che i confronti eseguiti tra le ricostruzioni 3D e le pseudo 3D dei dati acquisiti con il dispositivo Dipolo-Dipolo non sono quantitativamente simili. Con questi dati è necessario ricostruire il sottosuolo realizzando delle tomografie 3D.

Dall'analisi di dettaglio eseguita per il secondo modello, dove sono state realizzate e confrontate diverse maglie di acquisizioni, considerando anche il numero di volte e le modalità con le quali le varie strutture presenti, sono state campionate (figg. 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 per acquisizioni con dispositivo Dipolo-Dipolo, figg. 3.27, 3.28, 3.29 per acquisizioni con dispositivo Polo-Polo e figg.

3.33, 3.34, 3.35 per acquisizioni Wenner-Schlumberger), si evince chiaramente che, a parità di profili da realizzare, risulta essere più opportuno eseguire dei profili scegliendo una campionatura fitta lungo una sola direzione piuttosto che realizzare profili in entrambe le direzioni.

Infatti, realizzando profili su entrambe le direzioni risulta molto importante ai fini di una buona ricostruzione, come e quante volte i profili intercettano la struttura, la cui posizione, a priori, non è nota.

## Capitolo IV

### *Inversione dei dati.*

#### **Premessa**

I dati ricavati da un'indagine geoelettrica forniscono informazioni sulla distribuzione del potenziale o, analogamente, sulla distribuzione della resistività apparente nel sottosuolo. Per avere la resistività reale, e quindi per poter ricostruire l'andamento delle resistività reali nel sottosuolo, è necessario realizzare un'inversione dei dati.

In generale il metodo inverso è un insieme organizzato di tecniche matematiche usate per analizzare i dati al fine di ottenere informazioni utili sulla realtà fisica che ha determinato l'andamento del dato misurato.

A seconda della tecnica matematica usata, si possono avere diversi tipi di inversione; la maggior parte delle tecniche di inversione nelle indagini geoelettriche tridimensionali sono rappresentati da metodi approssimati oppure da metodi iterativi che richiedono un'elevata potenza di calcolo (*Loke e Barker, 1996b*).

Per esempio, Li e Oldenburg hanno usato una tecnica di inversione basata sull'approssimazione di Born, che fornisce per il sottosuolo un modello preliminare che può essere migliorato usando un metodo iterativo (*Li e Oldenburg, 1992*).

Un'altra tecnica di inversione approssimata è la *back projection*: essa, usando una somma pesata delle misure di potenziale, tenta di ricostruire la distribuzione di resistività nel sottosuolo, delineando aree di alta e bassa resistività (*Noel e Xu, 1991; Cosentino, 2000*). Anche in questo caso il risultato ottenuto può essere utilizzato come modello iniziale in un metodo iterativo.

Contrariamente a quanto accade per le tecniche appena menzionate, le inversioni con i metodi iterativi dei minimi quadrati (*Park e Van, 1991; Sasaki,*

1994; Loke e Barker, 1996a e 1996b) o robusto (Morelli e LaBrecque, 1996; Wolke R. e Schwetlick H., 1988, Loke e Barker, 1996a e 1996b) o del gradiente coniugato (Zhang e al., 1995), si basano sulla modellizzazione del sottosuolo mediante il metodo delle differenze o degli elementi finiti. I risultati ottenuti in questo modo, naturalmente, sono più accurati rispetto a quelli ottenuti con una tecnica che usa un metodo approssimato per la modellizzazione della resistività apparente.

Nel corso di questo capitolo, dopo aver definito alcune informazioni generali sulla teoria dell'inversione, sono descritti dettagliatamente i metodi di inversione ai minimi quadrati e robusto, ponendo particolare attenzione alla loro formulazione nel caso tridimensionale. Inoltre saranno discussi i diversi modi per ottenere una discretizzazione del sottosuolo e l'algoritmo di Loke and Barker che rappresenta l'algoritmo utilizzato per il trattamento dei dati.

#### **4.1 Generalità sul problema inverso**

Il problema inverso può essere schematizzato nel seguente modo:

**dati (input) → modello (filtro inverso) → stime dei parametri del modello (output)**

dove tra parentesi è riportata la corrispondente terminologia utilizzata per la *Teoria dei Segnali*. Lo scopo di questa teoria è quello di stimare, mediante delle misure eseguite in superficie (input), i parametri del modello (output) attraverso la caratterizzazione di un particolare modello (filtro inverso).

In realtà il ruolo della teoria inversa consente di fornire informazioni relative ai parametri sconosciuti da inserire nel modello, piuttosto che di fornire il modello stesso e può essere il metodo attraverso il quale analizzare la correttezza di un dato modello o discriminare fra diversi modelli possibili. Infatti, cambiando opportunamente i parametri del modello, possono essere ottenuti diversi modelli che riproducono lo stesso andamento dei dati

acquisiti. E' solo attraverso informazioni a priori e/o informazioni di carattere geologico-geofisico-geoarcheologico, che è possibile discriminare i vari modelli; è necessario utilizzare come parametri per il modello, dei vincoli. Questi possono essere determinati dalle caratteristiche specifiche dell'area in cui sono state eseguite le misure.

I dati da analizzare, possono essere rappresentati tramite vettori; se si eseguono N misure, si possono considerare i valori ottenuti come gli N elementi di un vettore  $\mathbf{d}$ . Indicando con  $d$  i dati del problema da studiare e con  $m$  i parametri del modello, questi possono essere convenientemente rappresentati sotto forma di vettori colonna, come riportato di seguito:

$$\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T, \quad \mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_M]^T.$$

In tutti i problemi inversi i parametri del modello e i dati sono collegati da una qualche relazione fisico-matematica, definita *modello* (filtro inverso) e descritto da un determinato numero di equazioni. La risposta del modello è costituita dai valori *sintetici* prodotti da una particolare scelta dei parametri; anche questi valori possono essere considerati come gli elementi di un vettore  $\mathbf{r}$  di dimensione N.

Lo scopo dell'inversione è quello di trovare quei valori dei parametri che restituiscono la risposta del modello che più si adatta ai valori misurati.

A seconda del problema in studio, la teoria inversa può avere diverse caratteristiche (Menke, 1989).

Se le relazioni matematiche che descrivono il problema fisico sono funzioni lineari, il problema inverso è di tipo lineare. In questo caso, se per il corrispondente problema diretto vale la relazione  $[\mathbf{A}]\mathbf{p} = \mathbf{d}$ , in cui  $[\mathbf{A}]$  è la matrice di coefficienti che lega il vettore  $\mathbf{p}$  dei parametri al vettore  $\mathbf{d}$  dei dati, allora il problema inverso potrà essere descritto dalla relazione  $\mathbf{p} = [\mathbf{A}]^{-1}\mathbf{d}$ .

Al contrario, se la funzione che lega i parametri ai dati è non lineare, si deve risolvere un problema inverso non lineare. In questo caso se il problema diretto è descritto dalla relazione  $[\mathbf{F}(\mathbf{p})]=\mathbf{d}$ , uno dei modi per risolvere il problema inverso consiste nell'esplicitare  $\mathbf{p}$  linearizzando

l'operatore  $F(\mathbf{p})$ : in questo modo ci si riconduce al caso del problema inverso lineare, che è più semplice da risolvere.

Un sistema di equazioni come quello che descrive il problema diretto lineare (teorema di Rouchè-Capelli), può essere determinato, sotto-determinato o sovra-determinato, a seconda della relazione esistente fra il numero di dati e il numero di incognite; nello stesso modo il problema in studio si dirà determinato, sotto-determinato o sovra-determinato, rispettivamente.

Nel caso della geoelettrica si deve risolvere un problema sovra-determinato, non lineare, che utilizza parametri realmente discreti o che possono essere considerati tali.

Se l'inversione è basata sulla suddivisione del sottosuolo in voxel omogenei, i parametri da determinare sono i valori di resistività reale, i dati sono i valori di resistività apparente misurati in superficie e le risposte del modello sono le resistività apparenti calcolate tramite il modello.

## **4.2 Metodologie per la risoluzione del problema inverso**

### **4.2.1 Il metodo dei minimi quadrati**

Il metodo di ottimizzazione ai minimi quadrati è uno dei metodi di inversione più usati in quanto è stato dimostrato essere una tecnica che converge rapidamente (*deGroot-Hedlin e Constable, 1990; Sasaki, 1994*). Tuttavia il principale svantaggio di questo metodo è la grande quantità di tempo richiesta per l'elaborazione dei dati.

Il metodo ai minimi quadrati convenzionale può essere usato per determinare, dopo un certo numero di iterazioni, le resistività delle celle che minimizzeranno lo scarto fra i valori di resistività apparente calcolati e quelli misurati.

Si è già detto che il problema inverso per la geoelettrica è non lineare. L'equazione che descrive il problema diretto è quindi:

$$\mathbf{r} = F(\mathbf{p}) \quad [4.1]$$

Al contrario di quel che accade per la teoria inversa non lineare, il modo di procedere per i problemi lineari è ben noto; pertanto, una delle metodologie per risolvere questa tipologia di problema consiste nel cercare di linearizzare il problema stesso utilizzando l'espansione in serie di Taylor al primo ordine di punto iniziale  $\mathbf{p}^0$ . Come punto iniziale dell'espansione si può usare una stima iniziale del parametro  $\mathbf{p}$ , che, in genere, è la media dei valori di resistività apparente misurati.

Applicando la formula di Taylor, attorno al punto  $\mathbf{p}^0$  si ha:

$$[F(\mathbf{p}^1)] = [F(\mathbf{p}^0)] + \left. \frac{\partial [F(\mathbf{p})]}{\partial \mathbf{p}} \right|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}^0} (\mathbf{p}^1 - \mathbf{p}^0) \quad [4.2]$$

dove  $\mathbf{p}^1$  è il valore dei parametri del modello risultanti dalla prima iterazione.

Considerando la [4.1], la [4.2] diventa:

$$\mathbf{r}^1 = \mathbf{r}^0 + \left. \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{p}} \right|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}^0} (\mathbf{p}^1 - \mathbf{p}^0) \quad [4.3]$$

in cui  $\mathbf{r}^i$  è la risposta del modello i cui parametri sono pari a  $\mathbf{p}^i$ .

La derivata  $\frac{\partial r}{\partial p}$  rappresenta la matrice Jacobiana  $[\mathbf{J}^1]$ , di dimensioni  $N \times M$ , della

funzione  $F(\mathbf{p}^1)$  alla prima iterazione; gli elementi di  $[\mathbf{J}^1]$  sono  $J_{ij}^1 = \frac{\partial r_i}{\partial p_j}$ .

$[\mathbf{J}]$  è la matrice di sensibilità di cui si discuterà di seguito e già introdotta nel paragrafo 2.6.

Il vettore  $\mathbf{p}^1 - \mathbf{p}^0$ , che indicheremo per brevità con  $\delta^1$ , ha per elementi gli scostamenti di ogni parametro del modello alla prima iterazione dalla sua stima iniziale:

$$\delta_j^1 = p_j^1 - p_j^0$$

Considerando quanto detto, la [4.3] può essere riscritta nel seguente modo:

$$\mathbf{r}^1 = \mathbf{r}^0 + [\mathbf{J}^1] \delta^1 \quad [4.4]$$

I problemi inversi geofisici sono in genere mal posti in quanto la matrice Jacobiana è spesso non quadrata,  $N \neq M$ , poiché il numero di dati supera il numero dei parametri del modello (problema sovradeterminato).

Inoltre quando il rango di  $[\mathbf{J}]$  è minore del minimo fra  $M$  ed  $N$  esistono tecniche adatte a risolvere il problema risultante.

Il calcolo di questa matrice è piuttosto complesso in quanto è una matrice che presenta una dimensione molto grande: una matrice Jacobiana calcolata per un sistema con 100 misure e 80 parametri è costituita da 8000 componenti.

L'espressione riportata di seguito rappresenta tale matrice:

$$S_{ij(N \times M)} = \frac{\partial \ln \rho_{ai}}{\partial \ln \rho_j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \ln \rho_{a1}}{\partial \ln \rho_1} & \frac{\partial \ln \rho_{a1}}{\partial \ln \rho_2} & \dots & \dots & \frac{\partial \ln \rho_{a1}}{\partial \ln \rho_M} \\ \frac{\partial \ln \rho_{a2}}{\partial \ln \rho_1} & \frac{\partial \ln \rho_{a2}}{\partial \ln \rho_2} & \dots & \dots & \frac{\partial \ln \rho_{a2}}{\partial \ln \rho_M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \ln \rho_{aN}}{\partial \ln \rho_1} & \frac{\partial \ln \rho_{aN}}{\partial \ln \rho_2} & \dots & \dots & \frac{\partial \ln \rho_{aN}}{\partial \ln \rho_M} \end{pmatrix}$$

Nota la dipendenza tra la resistività apparente ed il potenziale elettrico calcolato tra due punti in superficie,  $\rho_a = \mathbf{k}^{-1} \Delta V / I$  e stabilito che la conduttività è pari all'inverso della resistività, il valore della matrice di sensibilità può essere determinato considerando le seguenti relazioni:

$$\frac{\partial V}{\partial \sigma} = \frac{I}{K} \frac{\partial \rho_a}{\partial \sigma} = \frac{I}{K} \frac{\rho_a}{\sigma} \frac{\partial \ln \rho_a}{\partial \ln \sigma} = - \frac{I}{K} \frac{\rho_a}{\sigma} \frac{\partial \ln \rho_a}{\partial \ln \sigma} = \frac{I}{K} \frac{\rho_a}{\sigma} S$$

da cui si ricava che:  $S = -\frac{K}{I} \frac{\sigma}{\rho_a} \frac{\partial V}{\partial \sigma}$

da cui si evince che questo parametro dipende:

- Dai parametri del modello (conducibilità o resistività)
- dalla risposta elettrica
- dalla variazione di potenziale elettrico rispetto ai parametri definiti in ogni nodo della maglia.

#### 4.2.2 Metodo Gauss-Newton

Il metodo Gauss-Newtonon risolve problemi di tipo lineare attraverso la tecnica dei minimi quadrati. Se il problema non è di tipo lineare si utilizzano dei processi che consentono di approssimare il problema ad un problema di tipo lineare.

Introduciamo il vettore  $\mathbf{e}^1$  che rappresenta la differenza fra le resistività apparenti calcolate dal modello alla prima iterazione e le resistività apparenti misurate:

$$\mathbf{e}^1 = \mathbf{d} - \mathbf{r}^1 = \mathbf{d} - \mathbf{r}^0 - [\mathbf{J}^1]\delta^1 = \mathbf{g}^0 - [\mathbf{J}^1]\delta^1 \quad [4.1]$$

dove  $\mathbf{g}^0$  è il vettore differenza fra i dati misurati e la risposta del modello iniziale ed è detto *vettore discrepanza*.

La somma dei quadrati degli scarti fra i dati e le risposte del modello alla prima iterazione è dato da:

$$S(\delta^1) = \mathbf{e}^{1T}\mathbf{e}^1 = \{\mathbf{g}^0 - [\mathbf{J}^1]\delta^1\}^T\{\mathbf{g}^0 - [\mathbf{J}^1]\delta^1\} \quad [4.2]$$

Per trovare il minimo di  $S^1$  dobbiamo risolvere l'equazione  $\partial S^1 / \partial (\delta^1) = 0$  dalla quale otteniamo la così detta *equazione normale* (Lines e Treitel, 1984)

$$[\mathbf{J}^1]^T[\mathbf{J}^1]\delta^1 = [\mathbf{J}^1]^T\mathbf{g}^0$$

che restituisce il seguente valore di  $\delta^1$

$$\delta^1 = ([\mathbf{J}^1]^T[\mathbf{J}^1])^{-1} [\mathbf{J}^1]^T\mathbf{g}^0 \quad [4.3]$$

Una volta noto  $\delta^1$ , si possono calcolare i valori dei parametri del modello per la prima iterazione ricordando che  $p_j^1 = p_j^0 + \delta_j^1$ .

Il vettore  $\mathbf{p}^1$  così ottenuto è usato come nuovo punto iniziale nella [4.2]

per la seconda iterazione, in modo da calcolare  $\mathbf{p}^2$  che diventerà il nuovo punto iniziale per la terza iterazione, e così via, fino ad avere il migliore adattamento fra resistività apparenti calcolate e misurate.

La soluzione della [4.1] è ottenuta da una semplice minimizzazione della somma dei quadrati degli scarti. Il metodo Gauss-Newton è un metodo *mal condizionato* e presenta molte difficoltà per quando concerne la risoluzione.

Infatti, può accadere che:

- la matrice  $[ \mathbf{J} ]^T [ \mathbf{J} ]$  è una matrice singolare e quindi non ha l'inversa;
- esiste l'inversa di  $[ \mathbf{J} ]^T [ \mathbf{J} ]$  ma la soluzione ottenuta può essere divergente o troppo lentamente convergente (questo accade ogni volta che  $\mathbf{p}^0$  è mal stimato, *Draper e Smith, 1981*);
- $[ \mathbf{J} ]^T [ \mathbf{J} ]$  diventa quasi-singolare, il vettore  $\delta$  comincia a crescere senza limiti, restituendo un valore di  $\mathbf{p}$  molto differente da qualsiasi valore accettabile (*Smith e Shanno, 1971*).

Per evitare, o almeno ridurre, queste difficoltà si possono imporre delle condizioni vincolanti al problema; queste possono essere delle limitazioni alla variabilità di  $\delta$  o all'errore commesso nell'adattamento dei dati o, ancora, all'asperità del modello o altri tipi di vincoli.

#### 4.2.2 Metodo del gradiente

Il metodo del gradiente è un algoritmo matematico con il quale è sempre possibile determinare un minimo locale di una determinata funzione. La funzione da minimizzare è la stessa di quella utilizzata nel metodo Gauss-Newton, la somma quadratica della differenza tra i dati osservati rispetto a quelli valutati teoricamente, ma in questo caso questa funzione deve essere uguale al gradiente discendente della funzione da minimizzare.  $F$ , (*Smith e Shanno, 1971*):

$$\Delta \vec{p} = - \frac{\partial(F)}{\partial \Delta \vec{p}} = - \frac{\partial}{\partial \Delta \vec{p}} \left[ \left( \vec{y}_{obs} - \vec{y}_{cal} \right)^T \left( \vec{y}_{obs} - \vec{y}_{cal} \right) \right]$$

Per cui il problema inverso da risolvere è del tipo:  $\Delta \vec{p} = \alpha \cdot S^T \cdot \Delta \vec{y}$

Questo metodo è utilizzato quando il modello e i dati ad esso relativo sono fortemente discordanti per cui si determina un vettore di perturbazione molto grande. Quando quest'ultimo invece risulta essere piuttosto piccolo, la soluzione che si ottiene è instabile. L'inconveniente di questa tecnica consiste nel fatto che il tempo necessario per giungere alla convergenza è molto alto in quanto sono necessarie molte iterazioni (Lines e Treitel, 1984).

### 4.2.3 Metodo di Marquardt-Levenberg (ridge regression)

Per ridurre le difficoltà quando la matrice  $[J]^T[J]$  è quasi-singolare si impone la condizione che la somma dei quadrati degli elementi del vettore  $\delta$  non sia maggiore di una quantità  $\delta_0^2$  fissata a priori. Questo approccio, introdotto da Levenberg nel 1944 e ripreso poi da Marquardt nel 1964, ha l'effetto di impedire oscillazioni illimitate nella soluzione.

E' definito un metodo ibrido in quanto utilizza i vantaggi del metodo Gauss Newton e del metodo del gradiente (fig. 4.5).

A causa della condizione imposta, la funzione  $S(\delta)$  non è più definita su tutto  $Z$ , ma soltanto sull'insieme chiuso e limitato  $\delta^T\delta \leq \delta_0^2$ . Per trovare il suo minimo, quindi, dobbiamo ricorrere al moltiplicatore di Lagrange, ovvero minimizzare la funzione

$$S(\delta, \lambda) = \mathbf{e}^T\mathbf{e} + \lambda\{\delta^T\delta - \delta_0^2\} \quad [4.4]$$

dove  $\lambda$  è il moltiplicatore di Lagrange e  $\delta^T\delta - \delta_0^2 = 0$  è l'equazione della frontiera del dominio sul quale è definita  $S$ .

Con la variazione di questo parametro è possibile determinare il minimo sulla frontiera.

Per ogni valore di  $\lambda$  la funzione  $S$  è stazionaria quando la sua derivata rispetto a  $\delta$  è nulla. Tenendo conto dell'espressione di (e), la minimizzazione della [4.8] al variare di  $\delta$  porta alla seguente forma modificata dell'equazione normale (Lines e Treitel, 1984):

$$\{[J]^T[J] + \lambda[I]\}\delta = [J]^T\mathbf{g}$$

(in cui, per comodità, abbiamo ommesso gli indici indicanti l'iterazione) e quindi:

$$\delta = \{ [ J ]^T [ J ] + \lambda [ I ] \}^{-1} [ J ]^T g$$

[4.5]

Poiché  $\lambda$  non è nota, l'equazione [4.5] non risolve completamente il problema;  $\lambda$  deve essere scelta in modo tale che la [4.5] restituisca un valore di  $\delta$  che soddisfi l'equazione della frontiera  $\delta^T \delta = \delta_0^2$  (ottimizzazione di  $\lambda$ ).

Levenberg (1944) chiama il moltiplicatore di Lagrange  $\lambda$  *fattore di damping* poiché di fatto smorza i cambiamenti nel vettore delle resistività.

Il metodo di Marquardt-Levenberg è stato usato con successo nell'inversione di dati di resistività con modelli interpretativi monodimensionali costituiti da un numero di strati non eccessivamente alto. E' utilizzato per risolvere i problemi inversi in cui sono presenti situazioni geologiche piuttosto complesse in quanto il metodo riproduce una soluzione stabile (Marquardt, 1973; Imman 1975; Petrick 1977). Questa caratteristica è importante nel momento in cui sono presenti valori di resistività fortemente diversi dai valori medi. Applicando in questi casi questo metodo di inversione è possibile definire una soluzione analitica che sia anche una soluzione geologica: consente di definire dei parametri di un modello che giustifichi l'andamento dei dati osservati.

Tuttavia, quando il numero dei parametri è maggiore come nel caso di modelli di inversione 2D e 3D, il modello generato da questo metodo può contenere anomalie (positive o negative) non giustificate dai dati sperimentali (Martorana, 2001).

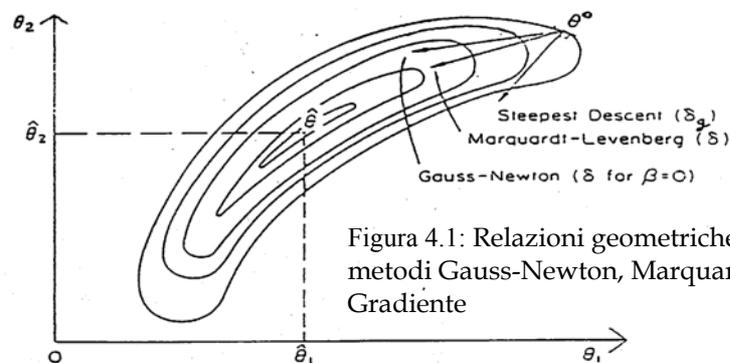


Figura 4.1: Relazioni geometriche tra le soluzioni dei metodi Gauss-Newton, Marquardt-Levenberg e Gradiente

#### 4.2.4 Metodo dello smooth constrain

Un altro possibile vincolo da imporre alla variazione dei parametri  $\delta$  per assicurare stabilità al processo iterativo è la minimizzazione dell'asperità

(roughness) del modello (Sasaki, 1994).

L'asperità totale è stata definita da Constable e al. (1987) per modelli discreti monodimensionali in cui la resistività varia secondo la resistività dell'asse z:

$$R = \sum_{j=1}^{M-1} (p_{j+1} - p_j)^2$$

o, in forma matriciale,

$$R = \{[C]\mathbf{p}\}^T \{[C]\mathbf{p}\}$$

dove [C] è la matrice di dimensione MxM, con solo due diagonali diverse da zero

$$[C] = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \ddots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

In pratica l'asperità è data dalla somma quadratica delle differenze fra la resistività di uno strato e quella dello strato adiacente (superiore o inferiore).

Nel nostro caso, cioè per modelli tridimensionali, indichiamo con asperità la somma quadratica della media delle differenze fra le correzioni della resistività di un blocco e quelle dei sei blocchi adiacenti, ovvero:

$$R = \sum_{j=1}^M \left[ \frac{(\delta_j^N - \delta_j) + (\delta_j^S - \delta_j) + (\delta_j^E - \delta_j) + (\delta_j^W - \delta_j) + (\delta_j^U - \delta_j) + (\delta_j^D - \delta_j)}{6} \right]^2$$

in cui gli indici N, S, E, W, U o D servono per denotare le correzioni fra una iterazione e la successiva per il blocco a nord, sud, est, ovest, sopra o sotto, rispettivamente, del blocco con resistività  $p_j$ ; come di consuetudine sono omessi gli indici per il numero di iterazione.

In forma matriciale la precedente può essere scritta come segue:

$$R = \{[C]\boldsymbol{\delta}\}^T \{[C]\boldsymbol{\delta}\} \quad [4.6]$$

dove [C] è una matrice di dimensioni MxM con solo sette diagonali diverse da zero; Considerando, per esempio un modello costituito da 4x4x2 celle, la matrice [C] sarà:

$$[C] = \begin{bmatrix} -1 & 1/6 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/6 & -1 & 1/6 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/6 & -1 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/6 & 0 & 0 & -1 & 1/6 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/6 & 0 & 1/6 & -1 & 1/6 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/6 & 0 & 1/6 & -1 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & -1 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 1/6 & -1 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 1/6 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 \\ 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1/6 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & -1 & 1/6 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & -1 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & -1 & 1/6 & 0 & 1/6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 1/6 & -1 & 1/6 & 0 & 1/6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 1/6 & -1 & 0 & 1/6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & -1 & 1/6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 1/6 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 1/6 & -1 \end{bmatrix}$$

Con il metodo dello smooth constrain si cerca di definire un modello che minimizzi sia gli scarti fra dati calcolati e dati misurati che le differenze fra le resistività di una cella e quelle delle celle circostanti in modo da avere il minimo scarto con un modello quanto più smussato possibile.

La funzione da minimizzare diventa (*Sasaki, 1994*):

$$S(\delta, \lambda) = \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \lambda R$$

dove  $\lambda$  è ancora un moltiplicatore di Lagrange e determina le stesse conseguenze viste nel precedente. Per questo metodo di inversione, per molti tipi di indagine, il valore del parametro  $\lambda$  è inizialmente scelto grande ( $\lambda_0$ ) ed è poi progressivamente ridotto dopo ogni iterazione fino a raggiungere il limite minimo ( $\lambda_{\min}$ ) fissato a priori (*Loke e Barker, 1996a*). Il valore minimo per  $\lambda$  è usualmente pari a un decimo del valore iniziale; tale valore dipende dal livello di rumore random presente nei dati: valori maggiori

corrispondono a livelli di rumore più alti. È stato trovato (Loke e Dahlin, 2002) che un valore di  $\lambda_0$  compreso fra 0.10 e 0.20 dà risultati soddisfacenti per la maggior parte dei dati sia di campo che sintetici. Il valore del fattore di damping è ridotto di circa 2.5 volte dopo ogni iterazione e raggiunge il valore minimo dopo la quarta iterazione; dopodiché il suo valore è mantenuto costantemente pari al valore minimo scelto.

Sostituendo le espressioni per  $\mathbf{e}$  e per  $R$  nella precedente equazione e imponendo la sua derivata rispetto a  $\delta$  uguale a zero, si ottiene il seguente valore per il vettore correzione da una iterazione alla successiva:

$$\delta = \{[J]^T[J] + \lambda[C]^T[C]\}^{-1} [J]^T \mathbf{g}$$

Il modello ottenuto con il metodo dello smussamento obbligato in genere dà risultati soddisfacenti, anche se a volte può non tener conto di piccole anomalie presenti nel sottosuolo, tendendo a smussare tutte le discontinuità (Constable e al., 1987).

#### 4.2.5 Il metodo quasi-Newton

Nei precedenti metodi si è visto che ad ogni iterazione, per avere il nuovo valore di  $\delta$ , è necessario calcolare, oltre che ai vettori  $\mathbf{g}$  e  $\mathbf{p}$ , anche la matrice  $[J]$ . Per il calcolo della matrice Jacobiana possono essere usati i metodi degli elementi finiti o delle differenze finite già utilizzati per calcolare le resistività apparenti del modello; ma già con un numero moderato di dati (1000-2000) il calcolo di tale matrice può essere il passo più dispendioso, in termini di tempo, di tutto il processo di inversione (Loke e Dahlin, 2002).

Per ridurre i tempi di calcolo Loke e Barker (1996a) hanno usato il metodo quasi-Newtoniano per stimare i valori delle matrici  $[J]$  ad ogni iterazione: in pratica, calcolata una prima matrice, hanno sfruttato una equazione di aggiornamento per calcolare le successive.

Come modello iniziale è stato usato un modello di terra omogeneo, per il quale i valori della matrice possono essere calcolati analiticamente; la matrice per l'iterazione successiva è poi stimata tramite la seguente equazione (in cui l'indice indica il numero di iterazione):

$$[J^{k+1}] = [J^k] + \mathbf{u}^k \mathbf{p}^{kT}$$

dove

$$\mathbf{u}^k = \frac{\{\Delta \mathbf{r}^k - [J^k] \mathbf{p}^k\}}{\mathbf{p}^{kT} \mathbf{p}^k} \quad \text{e} \quad \Delta \mathbf{r}^k = \mathbf{r}^{k+1} - \mathbf{r}^k$$

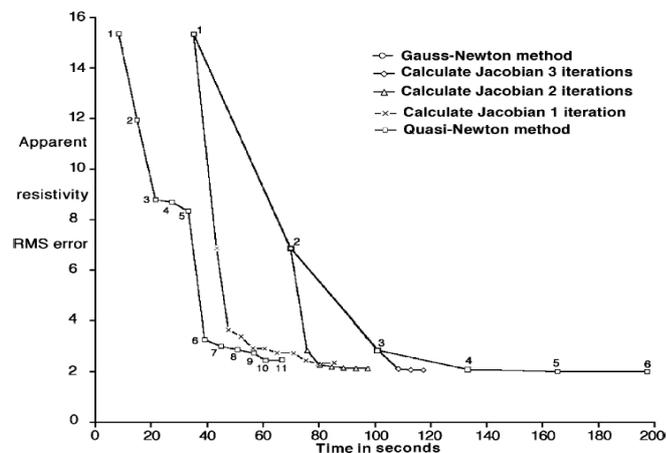
In teoria, la velocità di convergenza del metodo quasi-Newtoniano è minore di quella del metodo Gauss-Newtoniano (*Burden* e al., 1981) ma, mentre il metodo quasi-Newton può richiedere un numero maggiore di iterazioni per convergere, il tempo richiesto per ognuna di queste iterazioni può essere molto minore rispetto a quello richiesto da ogni iterazione nel metodo di Gauss-Newton che resta, comunque, il più accurato (Figura 4.2).

La Figura 4.2 mostra anche la variazione dell'errore commesso nelle inversioni che usano un metodo dato dalla combinazione dei metodi Gauss-Newton e quasi-Newton: la matrice  $[J]$  è calcolata con il metodo delle differenze finite per la prima iterazione (o le prime due o tre) e stimata con l'equazione di aggiornamento per le successive.

Le curve della variazione dell'errore per il metodo combinato si sistemano fra le curve degli altri due metodi, in modo tale che quando la matrice Jacobiana è calcolata per le prime tre iterazioni la sua curva quasi coincide con quella per il metodo Gauss-Newtoniano. Questo è dovuto al fatto che dopo le prime due o tre iterazioni le variazioni dei valori della matrice  $[J]$  sono molto più piccoli di quelli che si hanno per le prime due iterazioni.

Si può quindi concludere che calcolare la matrice  $[J]$  solo per le prime due o tre iterazioni e stimarla per le successive può essere un buon compromesso fra la riduzione del tempo necessario ai calcoli e la certezza di ottenere risultati sufficientemente accurati.

Per modelli con piccoli contrasti di resistività (minori di 10:1) non ci sono significative differenze fra i risultati ottenuti con i due metodi, anche se il tempo di calcolo per il metodo quasi-Newton è di gran lunga il minore (Figura 4.2).



**Figura 4.2:** Variazione dell'errore al variare del numero di iterazione per differenti metodi nell'inversione di un modello di dati con bassi contrasti in resistività (Loke e Dahlin, 2002)

Poiché questo metodo usa come matrice Jacobiana iniziale quella relativa ad un modello di terra omogeneo, la differenza fra matrice stimata e matrice vera probabilmente tende a crescere quando aumentano i contrasti di resistività nel modello di sottosuolo. Infatti per grandi contrasti di resistività il metodo Gauss-Newton dà risultati significativamente più accurati rispetto al metodo quasi-Newton (Figura 4.4). Tuttavia, anche in questi casi, le principali caratteristiche dei modelli ottenuti con i due metodi sono le stesse; allora il metodo quasi-Newton può essere usato per avere un rapido modello preliminare del sottosuolo, soprattutto nel corso di un'indagine di campo 3D.

### 4.3 Inversione di Occam

Un risultato migliore è ottenuto utilizzando l'inversione di Occam. L'idea guida di tale inversione è ancora la minimizzazione di una funzione vincolata, ma stavolta il vincolo è rappresentato dallo scarto quadratico medio, mentre la funzione da minimizzare è l'asperità del modello.

Introduciamo brevemente la nuova grandezza in gioco.

Lo scarto quadratico medio  $\chi^2$  è definito in modo analogo alla funzione S, ma nella sua definizione tiene conto anche degli errori che, inevitabilmente, sono associati ad ogni dato misurato; se, quindi,  $\sigma_j$  è l'errore associato alla misura  $d_j$ ,

allora  $\chi^2$  sarà definito da (Constable e al., 1987):

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^N \frac{(d_j - r_j)^2}{\sigma_j^2}$$

o, analogamente, da:

$$\chi^2 = \{[W]\mathbf{d} - [W]\mathbf{r}\}^T \{[W]\mathbf{d} - [W]\mathbf{r}\} \quad [4.11]$$

in cui  $[W]$  è la matrice diagonale che ha per elementi i reciproci degli errori ( $W_{jj} = 1/\sigma_j$ ) e, per brevità, abbiamo ommesso sia l'indice per il numero di iterazione, sia l'espressione linearizzata estesa di  $\mathbf{r}$ .

Il problema matematico da risolvere può essere espresso nel seguente modo: per un dato insieme di dati e di incertezze ad essi associati, bisogna definire il modello che renda R quanto più piccola possibile, mentre  $\chi^2$  raggiunge un valore accettabile, che indicheremo con  $X^2$ ; l'inversione di Occam, quindi, fornisce il modello più smussato possibile compatibile con i dati sperimentali entro un margine di errore stabilito. Invece di adattare i dati sperimentali al modello nel miglior modo possibile (cosa che potrebbe massimizzare i gradienti di resistività e/o le asperità del modello), viene scelto il modello più smussato che è compatibile con i dati entro un margine di errore atteso.

A causa della non linearità, non ci sono garanzie che ogni modello sarà adatto a rendere  $\chi^2$  piccolo abbastanza, ed è comunque certo che in qualsiasi caso pratico sia impossibile avere un fitting esatto ( $\chi^2 = 0$ ). È per questo che

per  $X^2$  deve essere scelto un valore non troppo vicino al più piccolo valore raggiungibile.

Come nei metodi precedenti, per eseguire la minimizzazione dobbiamo ricorrere al moltiplicatore di Lagrange  $\lambda$ ; la funzione da minimizzare, dunque, è:

$$U = R + \lambda(\chi^2 - X^2)$$

che, sfruttando la [4.10], la [4.11] e la [4.5], diventa

$$U = \{[C]\delta\}^T\{[C]\delta\} + \lambda\{[W]g - [W][J]\delta\}^T\{[W]g - [W][J]\delta\} - \lambda X^2$$

La minimizzazione della precedente porta al seguente risultato per  $\delta$  (Constable e al., 1987):

$$\delta = \{[C]^T[C] + \lambda\{[W][J]\}^T\{[W][J]\}\}^{-1} \lambda\{[W][J]\}^T\{[W]g\} \quad [4.7]$$

Anche in questo caso, poiché  $\lambda$  non è noto, la precedente espressione non risolve completamente il problema;  $\lambda$  deve essere scelto in modo tale che quando l'equazione [4.12] è sostituita nella [4.11] si possa ottenere il valore di  $\chi^2$  desiderato ( $X^2$ ). Una volta fissato  $\lambda$  e calcolata  $\delta$ , si possono aggiornare i valori dei parametri del modello e passare all'iterazione successiva.

Per interpretare correttamente il ruolo del moltiplicatore di Lagrange, riscriviamo la [4.12] nel seguente modo:

$$\delta = \{\mu[C]^T[C] + \{[W][J]\}^T\{[W][J]\}\}^{-1} \{[W][J]\}^T\{[W]g\}$$

dove con  $\mu$  abbiamo indicato il reciproco di  $\lambda$ . È utile interpretare  $\mu$  come una sorta di parametro di smussatezza: quando il suo valore è grande, vediamo dalla definizione di  $U$  che la soluzione  $\delta$  non è influenzata molto dallo scostamento fra dati calcolati e misurati e si ha quindi una soluzione molto smussata; se, al contrario,  $\mu$  tende a zero il termine di asperità è di poca importanza nel problema di minimizzazione e si avrà un modello che sarà in grande accordo coi dati a scapito della sua smussatezza.

Abbiamo visto che anche in questo metodo si è risolto il problema inverso per la funzione linearizzata attorno ad una stima iniziale del vettore dei parametri del modello. Se l'approssimazione iniziale non è sufficientemente vicina alla soluzione, però, sono necessarie un gran numero

di iterazioni, con conseguente dispendio di tempo, per avere una soluzione spesso non soddisfacente.

Constable e al. hanno allora proposto uno schema alternativo che è molto efficace nella pratica (Constable e al., 1987). Supponendo di aver compiuto tutti i calcoli fino alla k-esima iterazione, si ha:

$$\delta^k = \{\mu[C]^T[C] + \{[W][J^k]\}^T\{[W][J^k]\}\}^{-1} \{[W][J^k]\}^T\{[W]g^{k-1}\}$$

Si fa variare il valore di  $\mu$  calcolando per ogni valore il vero scostamento del k-esimo modello dai dati:

$$\chi^k(\mu) = \|[W](d) - [W][F(p^k\mu)]\|$$

Nella fase iniziale dei calcoli il compito principale è quello di ridurre il misfit, infatti la supposizione iniziale in genere è distante da un modello che è in un adeguato accordo con i dati osservati e, quindi, per un qualsiasi valore di  $\mu$ ,  $\chi^k(\mu)$  è più grande di  $X$ . Un ovvio modo di procedere è quello di scegliere un valore per  $\mu$  che minimizzi  $\chi^k(\mu)$ .

Sebbene non ci sia nessuna garanzia che il modello che minimizza  $\chi^k(\mu)$  sia migliore del modello ottenuto dall'iterazione precedente, gli autori hanno trovato che questo modo di procedere dà risultati soddisfacenti.

Dopo un certo numero di iterazioni il valore di  $\mu$  può essere scelto in modo da far eguagliare esattamente  $\chi$  e  $X$ . Di fatto, può avvenire che ci siano più valori di  $\mu$  tali da far soddisfare questa uguaglianza; in tal caso si sceglie il più grande fra questi in modo da minimizzare l'asperità del modello.

Poiché è cercato uno specifico modello ben definito (il più smussato possibile), lo schema iterativo dell'inversione di Occam è molto stabile e, quindi, il modello trovato ad ogni iterazione non conterrà forti discontinuità della conduttività, a meno che non siano espressamente richieste per il fit dei dati.

#### 4.4 Robust inversion.

Le tecniche precedentemente descritte tendono a generare un modello in

cui la resistività varia gradualmente. Queste metodologie danno eccellenti risultati soltanto nei casi in cui la resistività del sottosuolo indagato varia realmente in modo continuo.

Negli altri casi esse tendono a mal delineare i contorni dei corpi anomali e a sottostimare i contrasti di resistività (*LaBrecque* e al., 1996).

Nel caso in cui siamo in presenza di un sottosuolo costituito da zone internamente quasi omogenee ma con brusche variazioni di resistività fra una zona e l'altra, l'equazione di inversione viene modificata in modo da rendere minime le variazioni *assolute* delle resistività del modello.

Tecnicamente, questo è chiamato metodo di ottimizzazione a norma  $l_1$  (il metodo di ottimizzazione ai minimi quadrati è a norma  $l_2$ ) o, più semplicemente, metodo di *inversione a blocchi* o metodo *robusto*.

Esistono diverse tecniche numeriche che permettono di effettuare l'inversione robusta e sono tutte finalizzate a rendere minima la somma dei valori assoluti delle variazioni spaziali delle resistività del modello. I modelli risultanti tendono ad essere costituiti da zone in cui la resistività è pressoché costante ma varia bruscamente quando si passa da una zona ad un'altra.

Una maniera semplice di implementare questo metodo di ottimizzazione utilizza la seguente equazione (*Wolke* e *Schwetlick*, 1988):

$$([J]^T[J] + \lambda[C]^T[R_m][C])\delta = [J]^T[R_d]g \quad [4.8]$$

dove  $[R_d]$  ed  $[R_m]$  sono matrici peso introdotte in modo che elementi differenti del vettore discrepanza e della matrice asperità del modello contribuiscano con lo stesso peso al processo di inversione.

L'equazione [4.8] fornisce un metodo generale che può essere modificato ulteriormente includendo, quando necessario, informazioni note sulla geologia del sottosuolo. Ad esempio, se si è a conoscenza del fatto che le variazioni della resistività del sottosuolo sono limitate ad una regione, il fattore di smorzamento può essere modificato per far sì che, limitatamente a quella regione di sottosuolo, siano permesse grosse variazioni di resistività (*Ellis* e *Oldenburg*, 1994a).

## 4.5 Discretizzazione del modello del sottosuolo

In un lavoro di Spitzer et Wurmstich del 1996 sono stati esaminati dettagliatamente cinque differenti sistemi di discretizzazione utilizzando schemi alle differenze finite e confrontando i risultati rispetto alla risoluzione analitica del problema stesso. La differenza tra i vari metodi confrontati consiste nel diverso modo di definire la matrice che rappresenta il sottosuolo oggetto di indagine in quanto varia il punto a cui si riferisce la misura calcolata.

Le condizioni al contorno sono quelle di Neumann,  $\partial V/\partial z=0$ , per la continuità della componente normale del campo e quelle di Dirichlet,  $V=0$ , per la continuità del potenziale lungo le superfici di discontinuità.

Altro problema per la risoluzione di tali equazioni, discusso sempre nello stesso lavoro, consiste nel cercare di individuare un metodo con il quale il sistema converga nel più breve tempo possibile. A questo scopo sono state confrontate varie tecniche in particolare la tecnica del *conjugate gradient* e del *conjugate residual methods*.

### 4.5a Brewitt-Taylor and Weaver (1976)

Lo schema descritto da questi autori è stato definito per risolvere i problemi magneto-tellurici ed è stato riadattato ad un modello di resistività da Mundry (1984). Spitzer ha riadattato lo stesso schema per un approccio 3D combinandolo con il *preconditioned conjugate gradient* per la risoluzione delle equazioni.

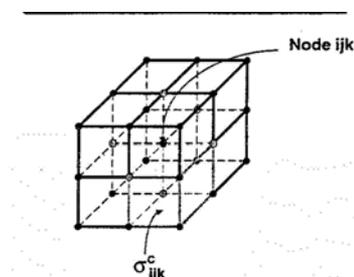


Fig.4.3: Discretizzazione secondo il metodo di Brewitt-Taylor and Weaver.

L'equazione che descrive il problema è l'equazione di continuità definita da:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = Q = -I\delta(x - x_q)\delta(y - y_q)\delta(z - z_q)$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica,  $V$  è il potenziale elettrico e  $Q$  è la sorgente.

$Q$  è definito dalla corrente elettrica  $I$  e dalla funzione  $\delta$  di Dirac.

Dato che  $\sigma$  è una funzione scalare dello spazio, segue:

$$\sigma \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial \sigma}{\partial z} \frac{\partial V}{\partial z} = -I \delta(x - x_q)(y - y_q)(z - z_q)$$

Dall'espansione di Taylor del secondo ordine si ottengono la discretizzazione FD del potenziale ed i valori delle derivate del potenziale ai nodi.

Le conducibilità  $\sigma_{ijk}$  nei punti della griglia sono calcolate mediante la media aritmetica ponderata e normalizzata rispetto al volume partendo dal valore di conducibilità assegnato alle celle della griglia  $\sigma_c$ . La sorgente è discretizzata considerando utilizzando un volume sorgente finito pari a:

$$\tau = \frac{(\Delta x_{i_q-1} + \Delta x_{i_q})(\Delta y_{j_q-1} + \Delta y_{j_q})\Delta z_1}{8}$$

Dove  $i_q, j_q$  sono gli indici della sorgente e  $\Delta x_i, \Delta y_j$  e  $\Delta z_k$  sono le spazature della griglia rispetto alle tre direzioni dello spazio.

Nel caso in cui la sorgente si trova sulla superficie si ottiene che:

$$Q \approx \frac{I}{\tau}$$

In questo modo la discretizzazione e i coefficienti ricavati scritti solo lungo la direzione  $x$  e per il nodo  $(i-1, j, k)$  sono rappresentati, rispettivamente, dalle seguenti formule:

$$C1_{i,j,k} V_{i-1,j,k} + C2_{i,j,k} V_{i+1,j,k} + \dots + C6_{i,j,k} V_{i,j,k+1} = C0_{i,j,k} V_{i,j,k} - Q$$

$$C1_{ijk} = \frac{2\sigma_{ijk} - \frac{\partial \sigma_{ijk}}{\partial x} \Delta x_i}{\Delta x_{i-1} (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}$$

#### 4.5b Dey and Morrison(D&M1) (1979a)

Questo metodo è stato introdotto per studiare un modello di resistività 2D ed fu denominato *discretization by points*. Per la risoluzione di strutture 2D in uno spazio 3D il problema è stato risolto attraverso la trasformata di Fourier nel dominio delle frequenze. Per risolvere il problema in termini di 3D bisogna nuovamente discretizzare l'equazione di continuità che, con dei semplici calcoli vettoriali, diviene:

$$\nabla^2(\sigma V) + \sigma \nabla^2 V - V \nabla^2 \sigma = -2Q$$

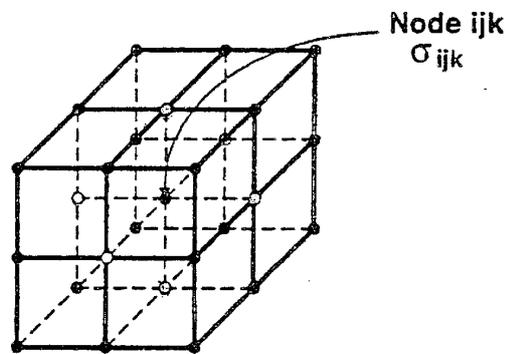


Fig. 4.4: Discretizzazione dei punti secondo Dey & Morrison (1979a)

Le conducibilità  $\sigma_{ijk}$  sono assegnate ai nodi. Ad ogni nodo l'operatore  $\nabla^2$  e per ogni distribuzione  $P_{ijk}$  l'operatore è approssimato dalla seguente equazione FD:

$$\begin{aligned} \nabla^2 P_{ijk} = & \frac{2}{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}} \left[ \frac{P_{i-1jk} - P_{ijk}}{\Delta x_{i-1}} + \frac{P_{i+1jk} - P_{ijk}}{\Delta x_i} \right] \\ & + \frac{2}{\Delta y_i + \Delta y_{i-1}} \left[ \frac{P_{ij-k} - P_{ijk}}{\Delta y_{i-1}} + \frac{P_{ij+1k} - P_{ijk}}{\Delta y_i} \right] \\ & + \frac{2}{\Delta z_i + \Delta z_{i-1}} \left[ \frac{P_{ijk-1} - P_{ijk}}{\Delta z_{i-1}} + \frac{P_{ijk+1} - P_{ijk}}{\Delta z_i} \right] \end{aligned}$$

dove  $P_{ijk}$  è funzione del potenziale e della conducibilità. I coefficienti sono definiti dal valore medio delle conducibilità dei punti della griglia rispetto alla spaziatura della griglia:

$$C1_{ijk} = \frac{\sigma_{i,j,k} + \sigma_{i,j,k}}{\Delta x_{i-1}(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}$$

La formula su esposta è definita solo per la direzione x.

#### 4.5c Dey and Morrison (1979b)

Dey and Morrison (1979a) hanno descritto un altro schema FD detto *discretization by area* dal quale sono partiti per descrivere nel lavoro del 1979b come eseguire la discretizzazione in 3D definito dagli stessi come *discretization by elemental volume*. Le conducibilità sono assegnate alle celle della griglia.

L' equazione differenziale che regola questo problema è dato dall'integrale di volume dell'equazione di continuità:

$$\iiint_{\Delta v_{ijk}} \Delta \cdot (\sigma \Delta V) dv_{ijk} = - \iiint_{\Delta v_{ijk}} I \delta(x - x_q) \delta(y - y_q) \delta(z - z_q) dv_{ijk}$$

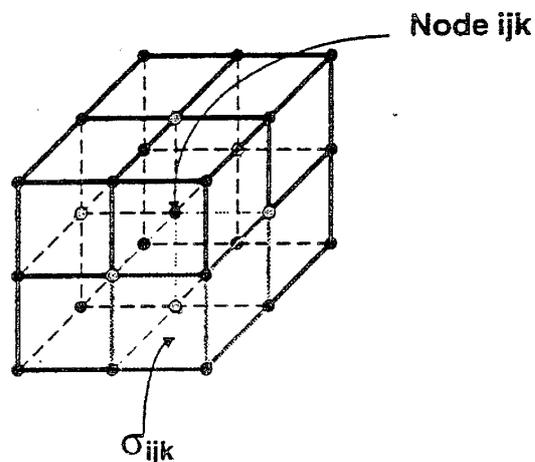


Fig.4.5:Discretizzazione con elementi di volume, secondo Dey & Morrison (1979b)

Usando il teorema di Green, il termine a sinistra può essere scritto in termini di integrale di superficie mentre il termine a destra viene approssimato da  $I/\tau$  seguendo le stesse approssimazioni suggerite da Brewitt et Al. Si ottiene quindi:

$$\iint_{s_{ijk}} \sigma \frac{\partial V}{\partial \eta} ds_{ijk} = - \iiint_{\Delta v_{ijk}} I / \tau dv_{ijk}$$

dove  $\eta$  è la normale esterna.

In corrispondenza della sorgente il termine a destra è pari a  $-2I$ . Il coefficiente 2 compare perché in superficie tale termine è diviso. In questo caso si ottengono i seguenti coefficienti definiti sempre per i nodi  $(i-1,j,k)$  e  $(i,j,k)$ :

$$C_{ijk} = \frac{1}{\Delta x_{i-1}} \left( \sigma_{i-1,j-1,k-1} \frac{\Delta y_{j-1} \Delta z_{k-1}}{4} + \sigma_{i-1,j,k-1} \frac{\Delta y_j \Delta z_{k-1}}{4} + \sigma_{i-1,j-1,k} \frac{\Delta y_{j-1} \Delta z_k}{4} + \sigma_{i-1,j,k} \frac{\Delta y_j \Delta z_k}{4} \right)$$

#### 4.5 d Wurmistich and Morgan (1994)

Un ulteriore metodo di approccio FD è descritto da Wurmistich and Morgan (1994). Questo metodo fu adottato per simulare cavità attraverso l'utilizzo di una griglia usando il principio di conservazione della carica. Le conducibilità sono assegnate alle celle della griglia; i punti nodali sono collocati al centro di ogni cella.

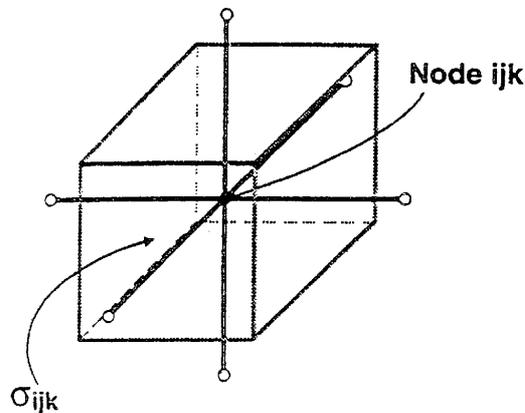


Fig. 1.6: Discretizzazione secondo Wurmstich & Morgan (1994).

In base alla legge di Kirchoff le correnti parziali  $I_l = A_l j_l$  con  $l = 1 \dots 6$  sono sommate per ogni nodo alla sorgente di corrente  $I_Q$

$$\sum_{l=1}^6 A_l j_l = I_Q$$

$A_l$  è la  $l$ -esima faccia della cella della griglia attraverso la quale passa la corrente di densità  $j_l$ . La conducibilità  $\sigma_{i,j,k}$  tra due nodi di due celle contigue,

è calcolata come valore medio di conducibilità. L'esempio di calcolo riportato si riferisce alla direzione x per il nodo (i,j,k) e (i+1,j,k):

$$\overline{\sigma}_{ijk} = 2 \frac{\sigma_{ijk} \sigma_{i+1,j,k}}{\sigma_{ijk} + \sigma_{i+1,j,k}}$$

Il coefficiente corrispondente è pari a:

$$C1_{ijk} = 4 \frac{\overline{\sigma}_{ijk}}{\Delta x_{i-1} (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}$$

#### 4.5 e Zhang et Al (1995)

Questo approccio è basato sullo schema di resistività di Madden (1972) e discretizza la legge di Kirchoff come

$$\sum_{l=1}^6 I_l = I_Q$$

definendo le impedenze Rx, Ry, Rz.

Rx per esempio o il suo valore reciproco è pari a:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{\frac{\Delta x_i \rho_{i,j,k}}{\Delta y_j \Delta z_k} + \frac{\Delta x_{i-1} \rho_{i-1,j,k}}{\Delta y_j \Delta z_k}} + \frac{1}{\frac{\Delta x_i \rho_{i,j,k-1}}{\Delta y_j \Delta z_{k-1}} + \frac{\Delta x_{i-1} \rho_{i-1,j,k-1}}{\Delta y_j \Delta z_{k-1}}}$$

in questo modo si può valutare il coefficiente C1<sub>ij,k</sub>. I<sub>Q</sub> è la corrente sorgente risultante sommando le sei correnti parziali di ogni ramo lungo gli assi principali. Le conducibilità sono assegnate ad ogni cella della griglia; i punti nodali sono localizzati al top e al bottom al centro della faccia superiore e al centro della faccia inferiore di ogni blocco.

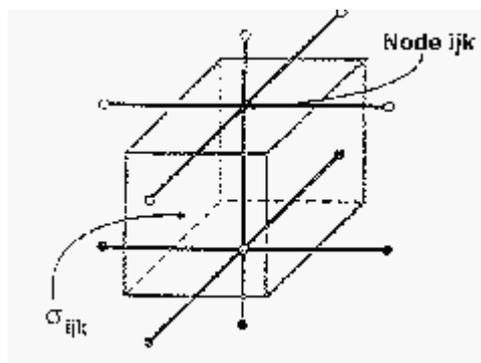


Fig.4.7: discretizzazione secondo Zhang et Al. (1995)

#### 4.5 f Risultati del lavoro

Il confronto dei cinque metodi è stato testato considerando tre casi: semispazio omogeneo, dicco (rappresentativo di una variazione laterale di resistività) e un sottosuolo stratificato (variazioni di resistività con la profondità di indagine).

Sono state utilizzate le stesse dimensioni delle griglie e l'array utilizzato per valutare i vari dati è lo Schlumberger. I dati sono stati riportati su un diagramma semilogaritmico riportando i valori di resistività in funzione di  $AB/2$ . I primi due casi sono stati confrontati rispetto alla soluzione analitica mentre il caso a tre strati è confrontato con i risultati ottenuti applicando un filtro lineare 1D.

Poiché i risultati di BT&W sono identici a D&M2 sono state omesse dal grafico, le curve relative alla risoluzione di D&M2.

Nel caso di semispazio omogeneo i primi metodi riportano lo stesso risultato mentre l'ultimo presenta dei risultati migliori:

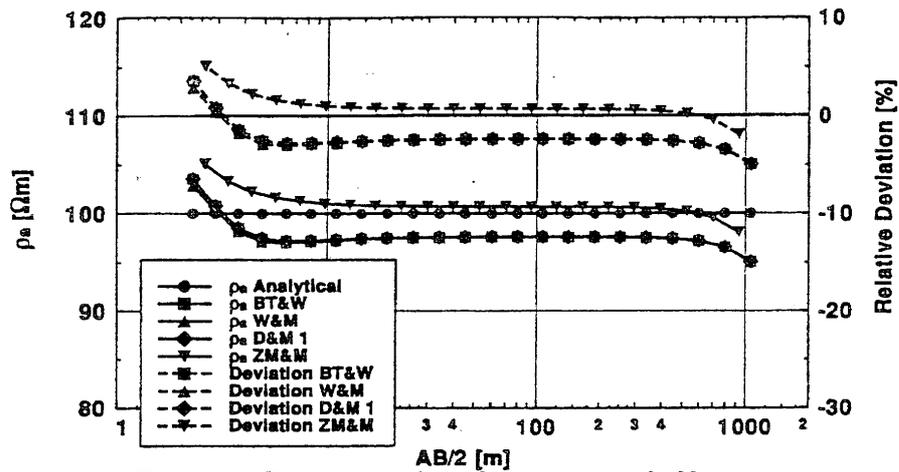


Figure 6: Comparison for a homogeneous halfspace.

L'accuratezza dei metodi è in funzione dei contrasti di conducibilità. Se infatti è presente nel sottosuolo a resistività pari a 100 un dicco conduttivo pari a 10, i metodi D&M1 e W&M mostrano significative variazioni rispetto alla presenza del contrasto, mentre BT&W e ZM&M non subiscono alcuna variazione:

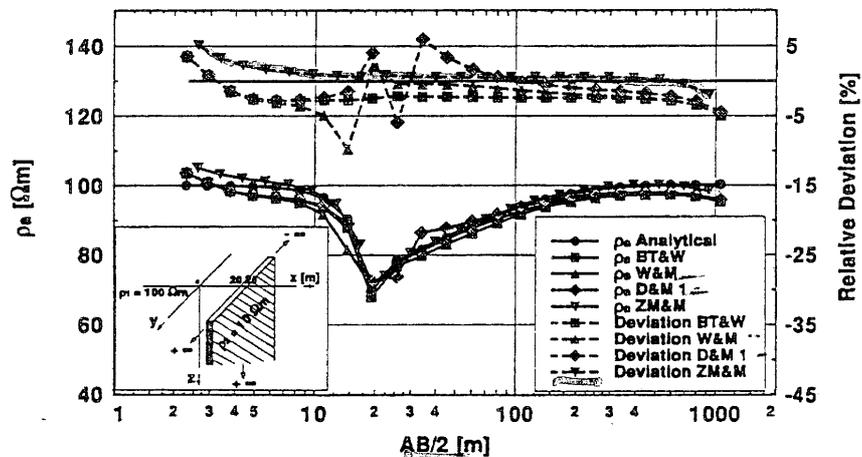


Figure 7: Comparison for a dike model.

Il terzo caso confrontato avvalorava i precedenti risultati; ancora una volta i risultati di BT&W e ZM&M sono più accurati rispetto agli altri in quanto essi risultano particolarmente adatti a discretizzare un sottosuolo non interessato da contrasti di resistività laterali ma a variazioni di resistività con la profondità.

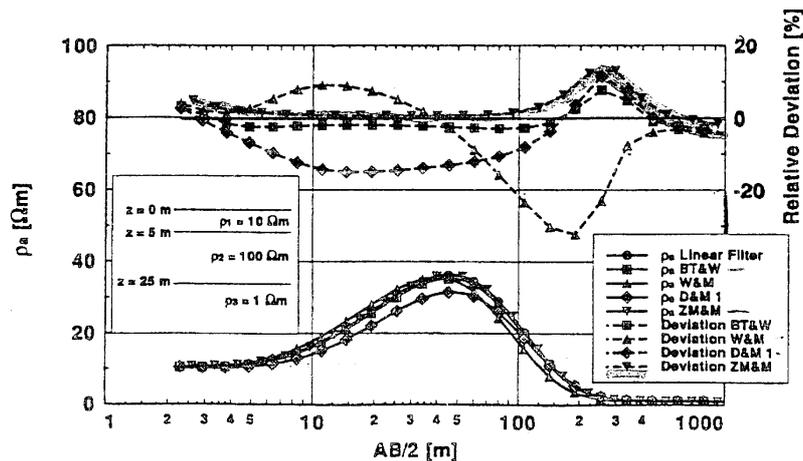


Figure 8: Comparison for a 3 layered earth.

Le differenze tra i vari metodi sono associati al diverso modo di assegnare i valori di conducibilità nelle varie celle.

Per BT&W e D&M2 i valori di conducibilità sono assegnati alle celle delle griglie per cui i valori di conducibilità lungo le linee della griglia risultano essere ben definite.

D&M1 e W&M hanno una accuratezza minore in quanto definendo i valori di conducibilità lungo i punti della griglia, i limiti di conducibilità non risultano essere ben definiti.

Questo lavoro rende particolarmente significative alcune problematiche. In particolare si evince che non è possibile definire una griglia che sia ugualmente valida per le diverse strutture che possono essere presenti nel sottosuolo da investigare.

E' possibile solo stabilire, note le strutture presenti, quale discretizzazione consente di giungere ad una migliore ricostruzione. Inoltre le discretizzazioni eseguite, sono state confrontate considerando dei contrasti di resistività particolari e le osservazioni fatte sono sicuramente valide solo per le strutture così modellizzate: variando i contrasti di resistività da determinare, variando gli spessori degli strati o variando le dimensioni e le profondità del disco, i risultati raggiunti in precedenza possono non essere necessariamente gli stessi.

Riuscire a stabilire una casistica che tenga conto di più situazioni sarebbe utile ma non è semplice da realizzare data il numero molto grande di

situazioni in cui si deve operare. Il confronto andrebbe eseguito di volta in volta a seconda della situazione che bisogna affrontare.

Tuttavia, le differenze analizzate non sono tali da compromettere il risultato dell'analisi dei dati per cui la discretizzazione dei corpi è un parametro da considerare ma non determinate ai fini di una corretta ricostruzione del sottosuolo.

## 4.6 Loke and Barker

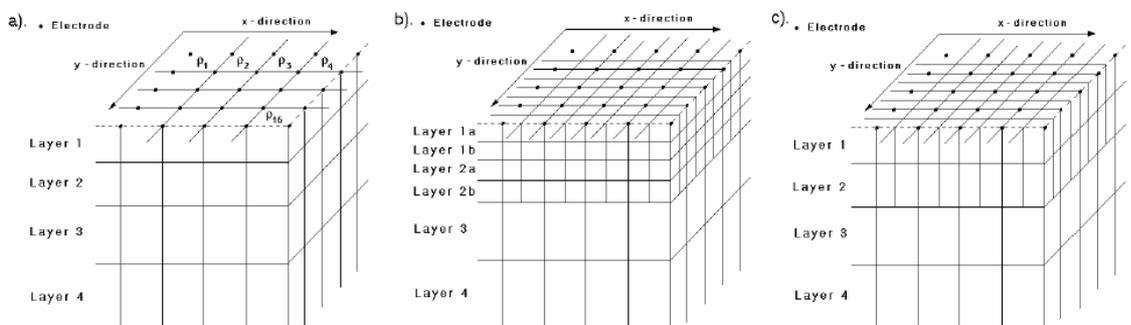
### 4.6.1 Teoria

La discretizzazione del sottosuolo prevista dall'algoritmo scritto da Loke and Barker del 1996 per ottenere una ricostruzione 3D del sottosuolo è riportata in figura 4.8. Il sottosuolo è diviso in diversi strati e ogni strato è a sua volta suddiviso in celle a forma di parallelepipedo. Lo spessore di ciascuno strato si ottiene dalla seguente forma:

$$\Delta z_k = ia[1 + kc]$$

in cui  $i$  è la distanza interelettrodica,  $a$  è un coefficiente caratteristico di ciascun dispositivo elettrodico ( $<1$ ) e  $c$  è un fattore di incremento ( $<1$ ).

Gli elettrodi in superficie individuano i vertici della faccia superiore dei parallelepipedi del primo strato (Loke e Barker, 1996b).



**Fig. 4.8:** Tre possibili discretizzazioni del sottosuolo: modello primario (a); modello con i primi strati divisi sia orizzontalmente che verticalmente (b); modello con i primi strati divisi solo orizzontalmente (c).

In Figura 4.1b e 4.1c sono mostrate altre due possibili discretizzazioni che possono essere usate nell'inversione: nella seconda discretizzazione si suddividono a metà i primi strati superficiali, sia orizzontalmente che verticalmente; la terza discretizzazione li suddivide solo orizzontalmente (Loke, 2002).

Normalmente sono utilizzati dei modelli in cui la larghezza delle celle è uguale alla spaziatura tra gli elettrodi adiacenti. Quando, però, in prossimità della superficie ci sono forti variazioni di resistività, per ottimizzare i risultati possono essere utilizzate delle spaziature più piccole. Naturalmente ridurre le dimensioni delle celle, significa aumentare il numero dei parametri da definire facendo aumentare il tempo di elaborazione dei dati. E' possibile verificare che, nella maggior parte dei casi, utilizzare celle di larghezza pari a metà della spaziatura tra gli elettrodi sembra dare migliori risultati; utilizzare celle di larghezza pari a 1/3 della spaziatura sono efficaci solo per gli stendimenti eseguiti con dispositivo polo-dipolo e dipolo-dipolo con valori di  $n$  molto grandi; diminuendo ancora le celle si giunge ad una instabilità nei valori del modello. Il miglior compromesso si raggiunge utilizzando, quando i dati non sono molti, utilizzare una cella le cui dimensioni sono pari alla metà del passo di campionamento.

Con questo algoritmo i dati possono essere elaborati considerando varie tipologie di inversione. Il metodo utilizzato nella maggior parte dei casi è quello definito come smoothness-constrained least-squares method (deGroot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992) descritta in precedenza. Può essere utilizzata anche una tecnica basata sull'ottimizzazione del metodo quasi-Newton (Loke and Barker 1996): quando è necessario analizzare molti dati (come nel caso del 3D) questa tecnica consente di ridurre i tempi di elaborazione ed è necessario avere meno memoria disponibile sul PC per ottenere le inversioni. Ancora possono essere eseguite inversioni utilizzando il metodo optimally smooth model e robust model inversion quando i corpi da definire hanno delle dimensioni ben definite. La scelta del metodo da

utilizzare è da ponderare in relazione alle conoscenze geologiche dell'area da investigare.

## Capitolo V

### ***Dati acquisiti in campagna.***

#### **Premessa**

Il lavoro di modellizzazione eseguito e discusso nel terzo capitolo, ha consentito di definire una tecnica di acquisizione dei dati per le ricostruzioni 3D che è stata utilizzata in diverse campagne di misura eseguite nel corso di questo dottorato.

Le varie campagne realizzate sono state effettuate nell'ambito delle attività del Laboratorio mobile di archeogeofisica, del *Centro Regionale di Competenza per lo Sviluppo ed il Trasferimento dell'Innovazione Applicata ai Beni Culturali e Ambientali* (Innova) il cui responsabile scientifico è il prof. Maurizio Fedi del Dipartimento di Scienze della Terra.

Le misure sono state eseguite con il *Syscal Pro* della Iris Instrument che rappresenta il più moderno e raffinato georesistivometro per le indagini geoelettriche presente sul mercato. Questo strumento ha assemblati sia il sistema ricevente che quello energizzante; consente di eseguire misure contemporanee su più canali (fino a 10 acquisizioni per il dispositivo Dipolo-Dipolo); consente una acquisizione dei dati mediante il sistema multielettrodo; presenta un voltaggio massimo 800 V; presenta una compensazione automatica dei potenziali spontanei; misura la resistenza di contatto da 0,1 a 1000 K $\Omega$ ; esegue misure contemporanee di resistività e caricabilità. E' possibile definire direttamente in campagna la sequenza di misure da realizzare anche se questa è meglio definirla prima di andare in campagna per pianificare il lavoro con maggior precisione, anche perché, naturalmente, costruendo la sequenza utilizzando direttamente lo strumento, ci sono dei limiti nella costruzione stessa che possono non rendere ottimale la costruzione della sequenza stessa.

Sono stati studiate sia problematiche di tipo ambientale che archeologico.

## **5.1 PROBLEMATICHE ARCHEOLOGICHE**

### **5.1 1 Pontecagnano-Faiano-Faiano**

L'area comprende i resti di un antico abitato etrusco-campano, sviluppatosi dal IX fino al IV secolo a.C., su cui fu successivamente fondata la città romana di Picentia nel 268 a.C., riportato in minima parte alla luce dagli scavi svolti nel corso degli ultimi anni.

All'interno del parco, sono presenti circa 300 metri quadrati di scavo, che comprendono un intero isolato dell'antico centro, il corso principale, largo circa 9 metri (decumano), che attraversava la città nella sua larghezza, e una delle strade minori disposte nel senso della lunghezza (cardines).

A Sud e a Est l'abitato antico era circondato da vasti sepolcreti che hanno restituito più di 7500 tombe con i loro corredi funebri, oggi conservati nel Museo Nazionale dell'Agro Picentino. Nel settore occidentale del sito sono stati individuati anche due santuari ubicati agli opposti margini meridionali e settentrionali della città antica (la seconda area investigata, esterna al parco). La loro localizzazione periferica rispetto al centro abitato è tipica degli insediamenti Etruschi dove costituivano un luogo d'incontro e scambio tra stirpi e popoli diversi. Quello meridionale è dedicato ad Apollo come dimostrato dal rinvenimento, tra i resti di materiale votivo, di un vaso di bucchero per vino con la scritta Apollo in greco (facendo supporre che il culto del dio fosse amministrato dai sacerdoti greci), ed anche di un coccio con il nome "Mant", Apollo in etrusco.

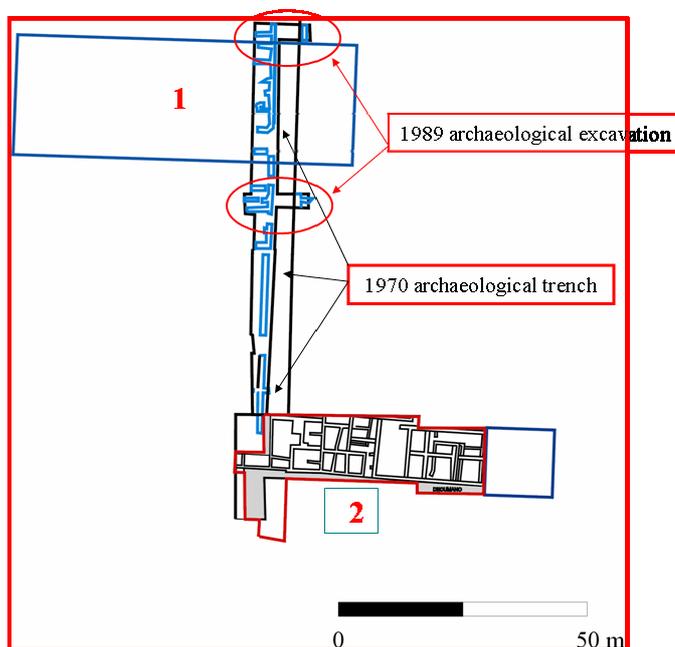
### **5.1 1 a Pontecagnano-Faiano Parco**

La zona analizzata con diverse metodologie di indagine di prospezione geofisica, è riportata in figura 5.1 ed è una zona compresa tra

due scavi già aperti all'interno del parco. Nella stessa figura è stato riportato anche un saggio di prova eseguito dagli archeologi, per definire le zone di maggiore interesse. In blu sono rappresentate le strutture evidenziate dallo scavo. E' stato realizzato anche un confronto tra queste strutture e le anomalie di resistività reale riscontrate nell'area investigata.

Su gran parte del parco sono state eseguite prospezioni magnetiche e di georadar. Sono state realizzate le rispettive mappe di anomalie dalle quali è stato possibile individuare una zona di particolare interesse. Quest'area corrisponde a quella compresa tra i due scavi (riportata in fig. 5.1) e solo in questa zona è stata realizzata una ricostruzioni di tomografie elettriche 3D.

In questa zona sono stati realizzati dei profili 2D con passo di campionamento pari ad 1 m e distanza tra i profili di 2 m lungo una sola direzione. Con questa tipologia di acquisizione, si ottengono, in relazione a quanto dedotto dal capitolo III, delle ricostruzioni confrontabili con quelle che si sarebbero ottenute acquisendo lungo le due direzioni di una maglia.



**Fig. 5.1:** Pianta dell'area oggetto di studio. Area 1 indica la zona tra i due scavi e l'area 2 la zona in cui sono stati eseguiti i confronti tra le ricostruzioni con due diversi schemi di acquisizioni. Il tratto in blu rappresenta una trincea scavata nel 1989.

L'obiettivo consiste nel definire la presenza di eventuali edifici costituiti da una serie di camere di diverse dimensioni, così come si evince da uno scavo aperto nello stesso parco.

In particolare, in accordo con quanto definito nel terzo capito, sono stati eseguiti dei profili paralleli tra di loro in un'area di 70 x 24 m; i profili presentano una lunghezza di 71 m. Le elaborazioni dei dati sono state eseguite sia ricostruendo una maglia 3D dei dati e utilizzando quindi l'algoritmo di inversione 3D di Loke and Barker e sia elaborando i dati lungo i profili con l'algoritmo di inversione 2D di Loke and Barker e poi, con i dati così elaborati, sono state ricostruite, alle varie profondità, delle slice 3D del sottosuolo.

Come si evince nelle figure 5.2 a e 5.2 b, in entrambe le ricostruzioni è possibile definire una zona anomala a profondità maggiori di 1 m. Nella ricostruzione pseudo-3D è possibile definire la presenza di un'altra zona anomala nei primi 50 cm del sottosuolo che con la ricostruzione 3D non si riesce a definire. Pertanto, nel caso analizzato, si possono ottenere delle informazioni utili anche dalle ricostruzioni con le slice 3D. Il confronto con la mappa delle anomalie ricostruite con il radar, conferma la presenza di aree anomale più superficiali evidenziate con la ricostruzione delle slice 3D anche se le profondità in cui sono posizionate le anomalie elettriche sono minori rispetto a quelle individuate attraverso gli studi dei vari radargrammi acquisiti in questa stessa zona.

Le anomalie presenti a profondità maggiori sono sicuramente meglio definite e ricostruite con la ricostruzione 3D rispetto a quella pseudo 3D. Per poter confrontare le due ricostruzioni ed individuare eventuali direzioni di anomalie nelle due mappe, ho rappresentato i dati con due scale diverse: ho utilizzato una scala naturale nelle ricostruzioni 3D e una scala logaritmica nella ricostruzione dello pseudo 3D. Con la scala logaritmica è possibile rappresentare i contrasti con maggiore definizione.

Nonostante questo, le sorgenti sono meglio individuate nella ricostruzione 3D. Infatti, la presenza di sorgenti anomale in profondità nella ricostruzione dello pseudo 3D, non sembrano rappresentative di strutture reali in quanto non è possibile delineare dei particolari andamenti: per come si presenta l'anomalia nella ricostruzione elaborata, sembra meglio correlabile ad una anomalia di carattere geologico.

Con l'analisi 3D dei dati e con il confronto tra questa e le analisi del radar realizzato in questa zona, è possibile, invece, definire degli andamenti che gli archeologi hanno indicato come probabili direzioni di mura di fabbricati.

In figura 5.3 e 5.4 è riportato un confronto tra il saggio di prova eseguito dagli archeologi e le ricostruzioni di resistività reali realizzate. E' possibile evidenziare delle correlazioni tra le strutture sepolte e le anomalie di resistività individuate.

In particolare sono correlabili delle anomalie di resistività reali con i bordi di alcune strutture individuate. Grazie a queste correlazioni è possibile interpretare anche le anomalie presenti in tutta la zona investigata e correlarle con l'esistenza di eventuali strutture murarie presenti nel sottosuolo investigato.

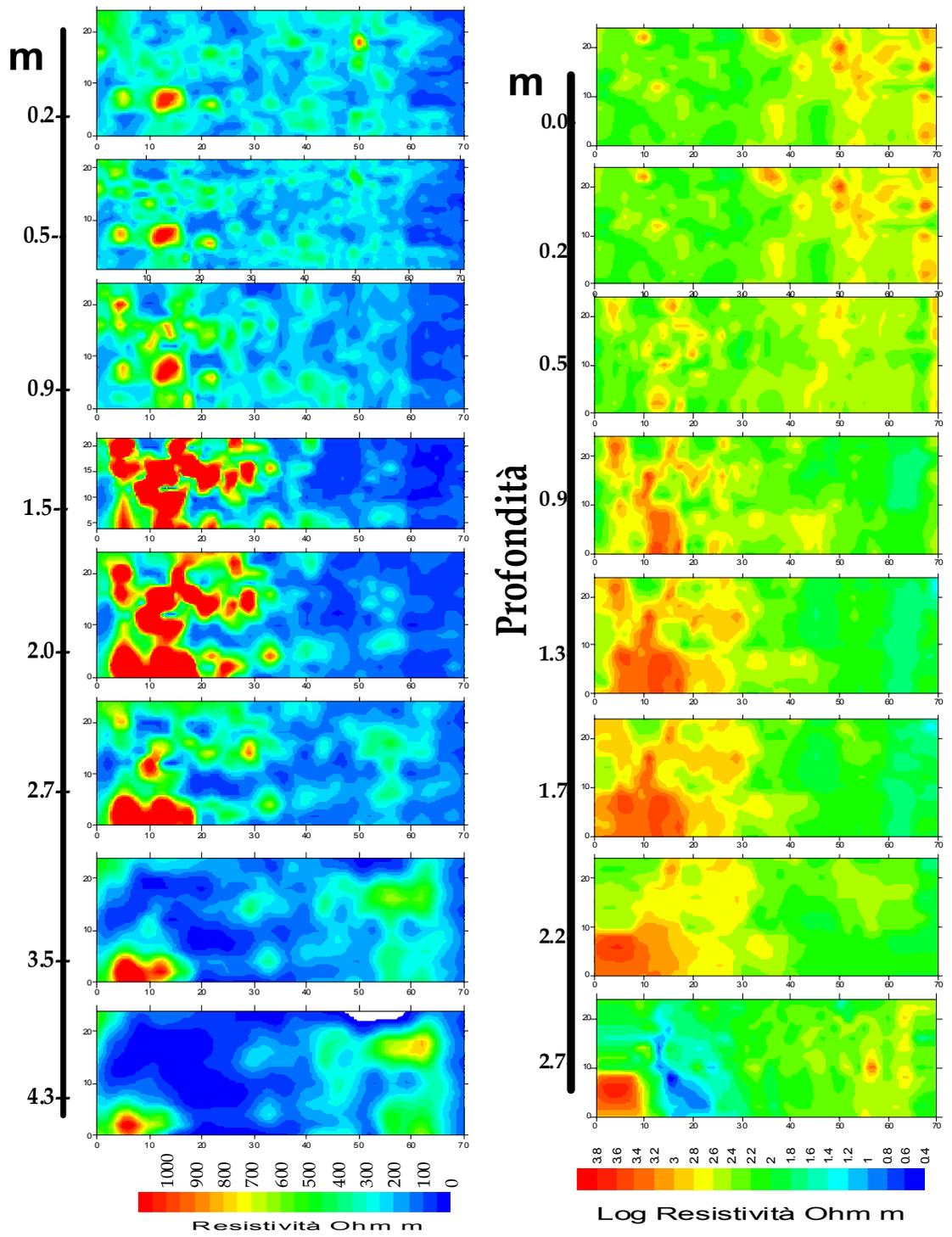
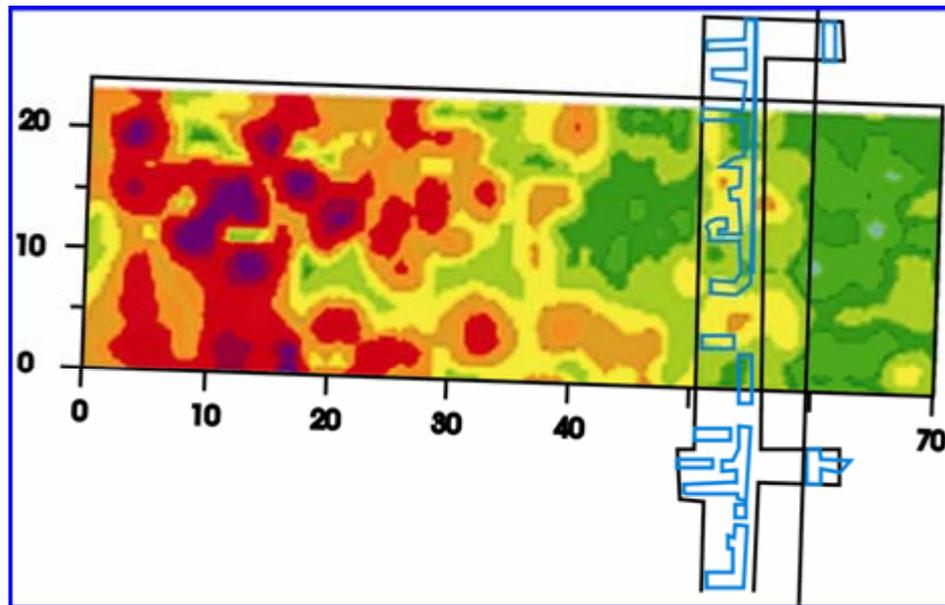
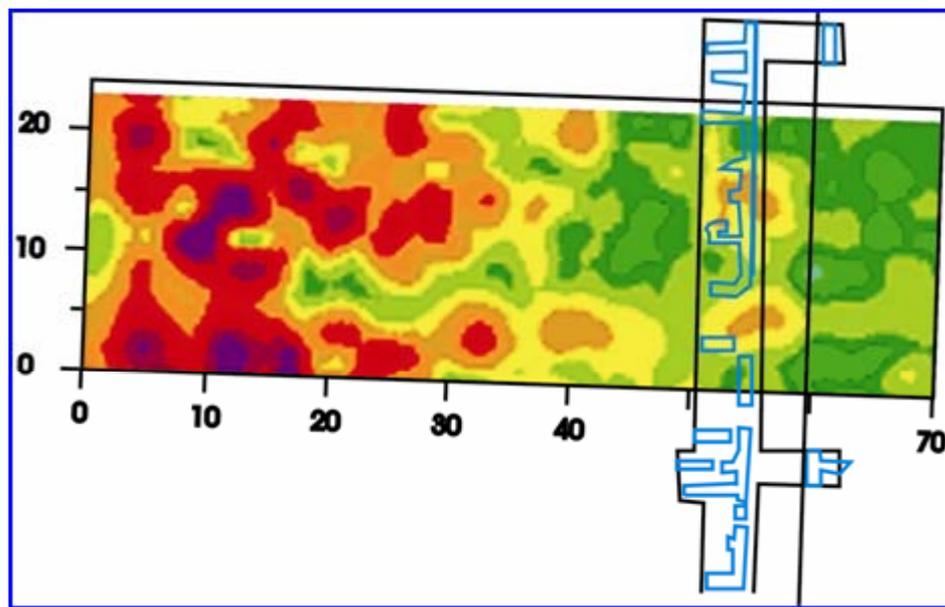


Fig. 5.2: Ricostruzione di tomografie 3D (a sinistra) pseudo 3D (destra) del sottosuolo investigato.



**Fig. 5.3:** Confronto tra lo scavo archeologico e la ricostruzione di resistività reali corrispondenti alla profondità di 1.22m-1.75m.



**Fig. 5.4:** Confronto tra lo scavo archeologico e la ricostruzione di resistività reali corrispondenti alla profondità di 1.75m-2.36m.

In considerazione al fatto che sono stati individuati due corpi nel sottosuolo ben definiti, sono state confrontate anche due tipologie di inversione dei dati. Infatti, quando le variazioni di resistività nel sottosuolo sono nette, è possibile ottimizzare l'inversione utilizzando il metodo robust inverison.

In questo caso, però, le due ricostruzioni sono quantitativamente simili. Da ciò si può desumere che, in realtà, le variazioni di resistività con la

profondità non sono nette e quindi l'anomalia di resistività evidenziata può essere correlata con la presenza di un edificio che si estende fino alla profondità di circa 3,00 m.

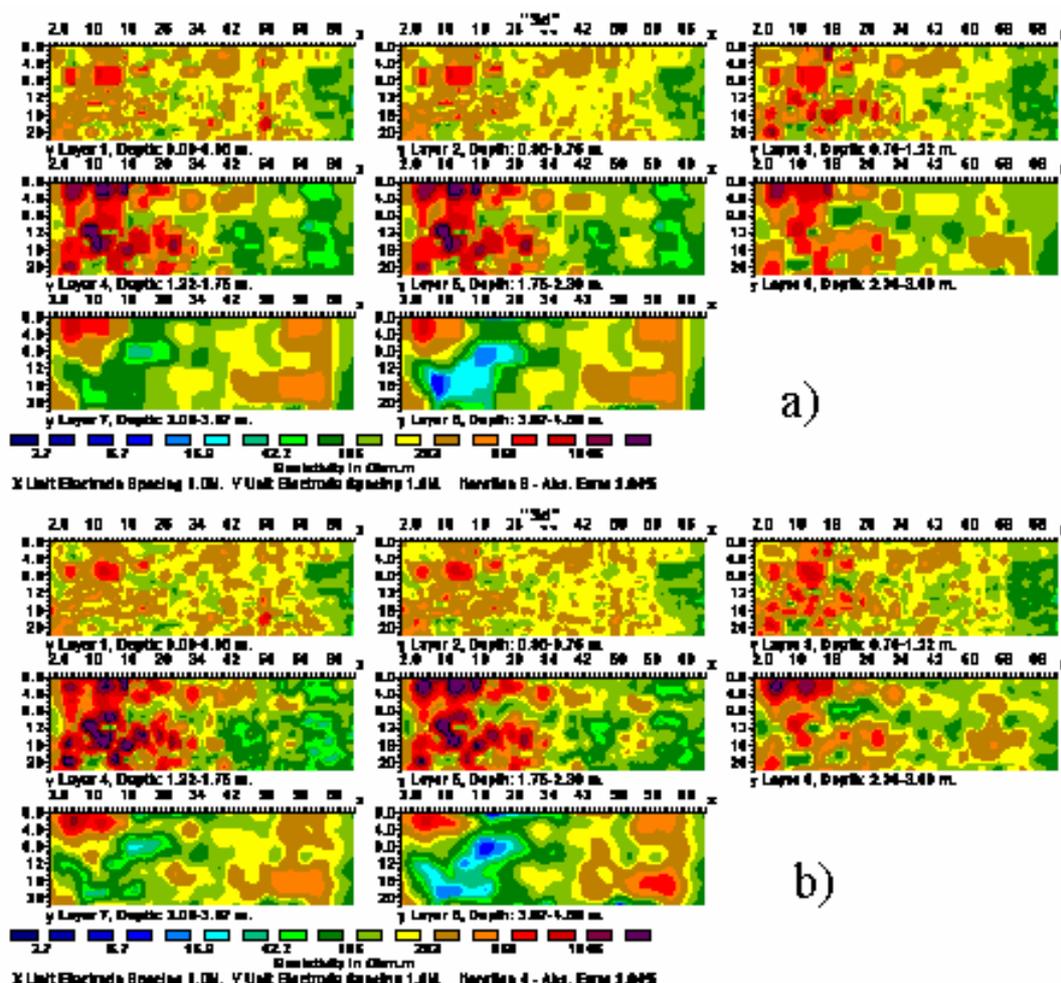


Fig. 5.3: Confronti tra due diverse tipologie di inversioni dei dati: a) Robust inversion b) Standard inversion.

In un'altra zona del parco posta vicino alla zona dello scavo aperto, sono stati eseguiti due particolari confronti. Sono state realizzate due tipologie di sequenze attraverso l'ausilio di due diversi programmi: *electre III* e *seq*. La differenza tra questi due programmi consiste nel fatto che mentre con *electre III* è possibile realizzare delle sequenze 3D facendo variare la posizione dei vari elettrodi solo lungo profili, con il *seq* è possibile definire delle sequenze in cui gli elettrodi sono posizionati anche lungo le diagonali. Le misure sono state eseguite con passo di campionatura pari a 1 m e passo

tra i profili di 1 m; è stata ricostruita una maglia 17 m x 4 m utilizzando 68 elettrodi.

I confronti sono stati fatti considerando sia acquisizioni Dipolo-Dipolo che Wenner-Schlumberger (figg. 5.4 e 5.5). In accordo con quanto desunto nel terzo capitolo, le ricostruzioni sono quantitativamente simili: quando il campionamento è tale che il passo di campionatura ed il passo tra i profili è lo stesso, le misure eseguite lungo le diagonali non sono significative ai fini della ricostruzione da eseguire.

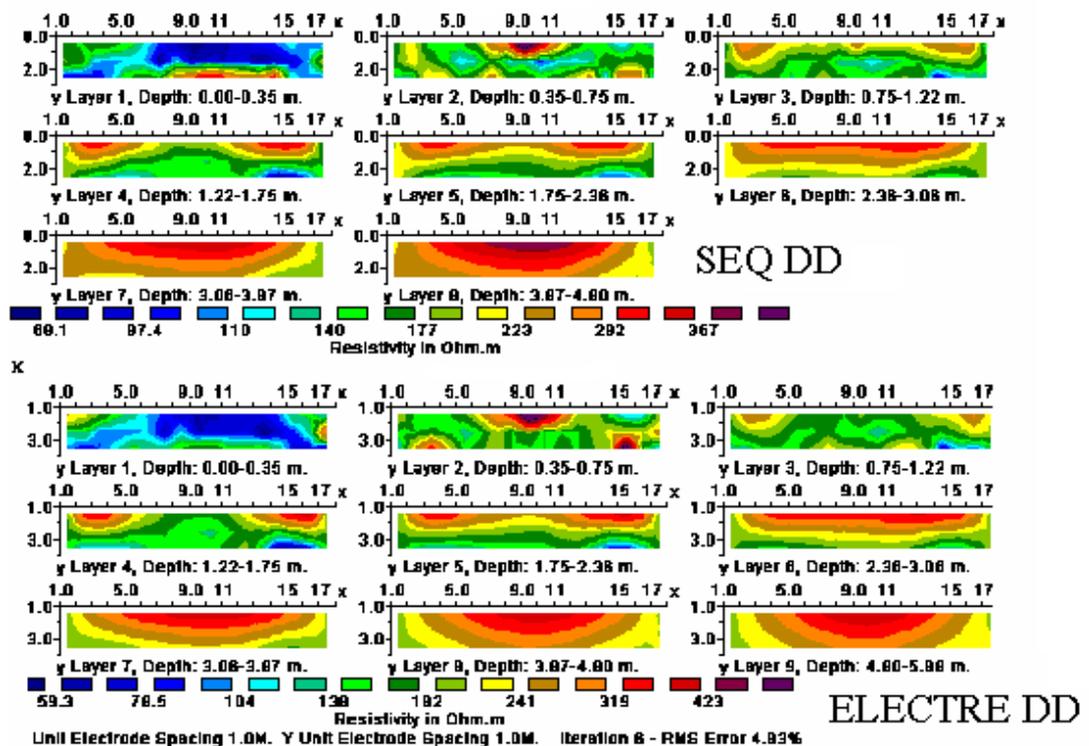


Fig. 5.4: Confronti tra due diverse sequenze di acquisizioni con Dipolo-Dipolo Assiale.

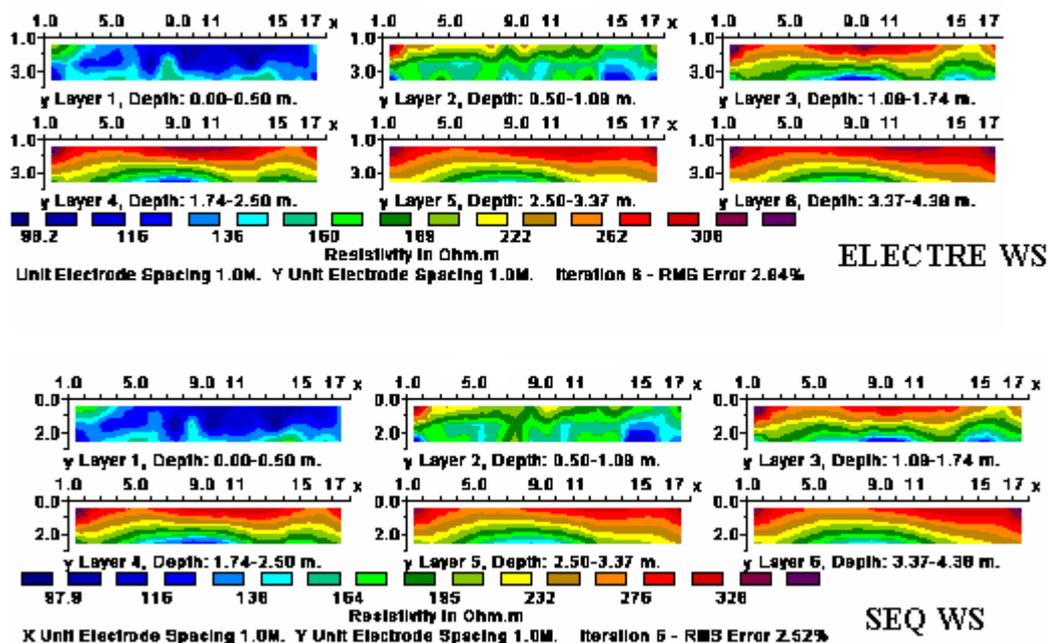
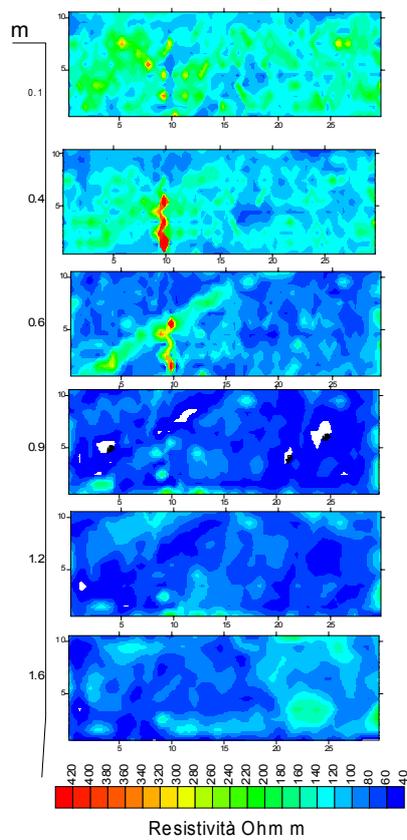


Fig. 5.5: Confronti tra due diverse sequenze di acquisizioni con Wenner-Schlumberger.

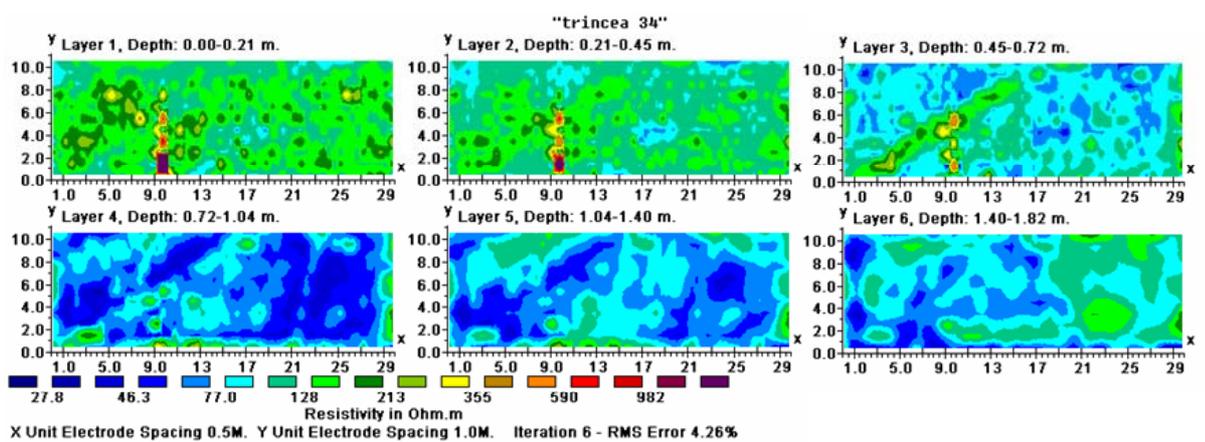
### 5.1. 1 b Pontecagnano-Faiano-Autostrada.

In un tratto dell'Autostrada Salerno-Reggio Calabria, corrispondente al settore occidentale definito nel paragrafo introduttivo nel quale è stato riportato un breve inquadramento archeologico del sito oggetto di studio, sono in corso degli scavi archeologici. L'obiettivo di tali scavi consiste nel definire l'esistenza di alcune strutture di età etrusca; in particolare sono alla ricerca di un santuario, prima che i lavori dell'autostrada cancellino ogni traccia. Tutto il tratto autostradale oggetto di studio, è stato suddiviso in trincee. Risultati particolarmente significativi sono stati ottenuti analizzando la trincea 34 e riportati in figura 5.6 e in figura 5.7. In questa zona sono stati eseguiti dei profili con passo di campionatura pari a 0.5 m e distanza tra i profili di 1 m ed è stato utilizzato il dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale. In entrambe le ricostruzioni valutate, sia la ricostruzione di slice 3D (fig. 5.6) che le tomografie 3D del sottosuolo (ricostruita eseguendo profili lungo una sola direzione), consentono di delineare due strutture che si intersecano tra loro.

Data la forma e la dimensione di questa struttura in entrambe le ricostruzioni, è stato possibile discriminare la stessa struttura.



**Fig. 5.6:** Ricostruzione di slice 3D relativa alla trincea 34 ottenuta mediante acquisizione di dati con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale.



**Fig. 5.7:** Ricostruzioni 3D relative alla Trincea 34 ottenuta mediante acquisizioni Dipolo-Dipolo Assiale.

In questo caso, le due ricostruzioni sono quantitativamente simili in quanto la struttura da definire è allungata lungo tutta la maglia.

La ricostruzione ottenuta mediante l'elaborazione dei vari radargrammi acquisiti in questa stessa area e con una minore distanza tra i vari profili realizzati, è possibile evidenziare la stessa tipologia di struttura (fig. 5.8).

Anche questi dati sono stati ottenuti nell'ambito delle attività del Laboratorio mobile di archeogeofisica ed in particolare questi dati sono stati acquisiti ed elaborati dal dott. Bartolomeo Garofalo.

Come dimostrato nel terzo modello sintetico analizzato nel terzo capitolo, anche se le strutture da individuare presentano una certa inclinazione rispetto alla direzione dei profili realizzati, nel caso in cui si realizza un campionamento è fitto, le ricostruzioni di queste strutture sono ben definite.

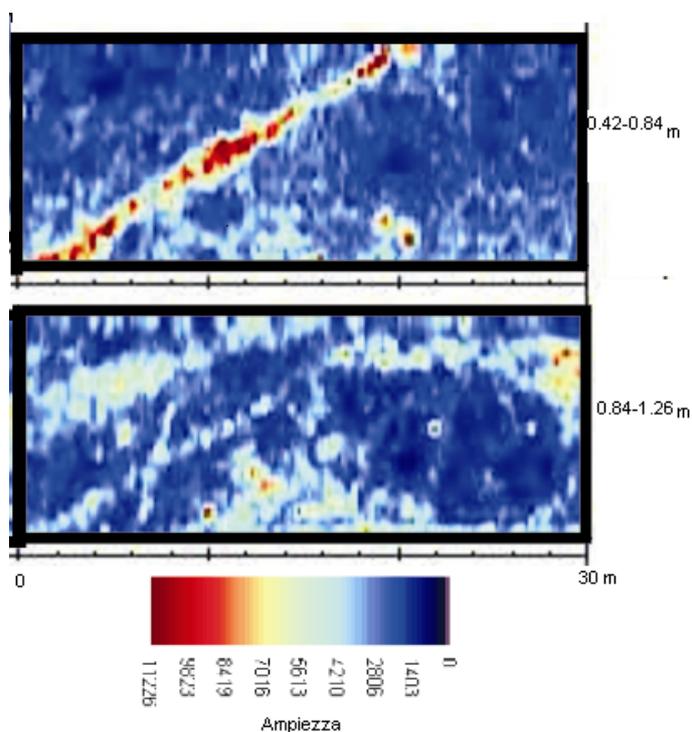


Fig. 5.8: Ricostruzione attraverso misure di georadar nella trincea 34 eseguite dal dott. Bartolomeo Garofalo.

### **5.1. 2 Pompei – inquadramento archeologico e analisi eseguita.**

L'inquadramento archeologico dell'edificio in esame è stato redatto dal dott. Mario Grimaldi. Da questo studio si evince che pur essendo stato scavato in anni recenti, l'edificio non è stato ancora pubblicato e non è quindi agevole illustrarne le caratteristiche, anche perché la mancanza di uno studio planimetrico lascia qualche incertezza sui confini di proprietà: attualmente è infatti possibile passare dal primo piano sotterraneo di questa casa alla Casa VII 16 (Ins. Occ.), 17, di Castricius (cfr. pp. 887 ss.), ma i due complessi vanno considerati separatamente.

Si tratta di un grande complesso su più piani costruito sfruttando il dislivello tra la città e il piano di campagna antico a ridosso del lato occidentale delle mura, che la casa ingloba e oblitera utilizzandole come muro perimetrale S-O del piano terra, aprendovi ampie finestre e proseguendolo in alzato; si conservano quattro livelli digradanti verso il mare, la cui linea di costa correva in antico più all'interno.

Anche il tratto meridionale delle mura, come quello occidentale, è stato sfruttato per la costruzione di case su più piani, e l'occupazione della struttura difensiva è stata da sempre posta in relazione con il venir meno della sua funzione, e quindi con la deduzione della colonia, negli anni successivi alla guerra sociale. La datazione della casa al 1 sec. a.C. che deriverebbe da queste considerazioni trova conferma nell'esistenza di un'estesa fase decorativa tardorepubblicana, assegnabile al II stile. L'ipotesi che vedeva la conclusione della guerra sociale e la deduzione della colonia come premessa per l'occupazione delle mura è stata rinforzata da un'altra ipotesi (cfr. ora Zevi 1996), che individua nelle grandi ville che occupano il territorio pompeiano e in queste case costruite sulle pendici 0 delle mura, con importanti fasi decorative di II stile, le case dei maggiorenti della colonia, la identificazione delle quali - in un'ottica che privilegiava la continuità rispetto alla rottura - mancava finora di un modello. Le pitture di II stile sono state peraltro quasi ovunque abolite nelle stanze del piano terreno della casa - in

significativo contrasto con l'adiacente casa VI 17 (Ins. Occ.), 41 (cfr. vol. VI, pp. 14-15, figg. 10-14). Nell'atrio (2), un saggio eseguito al di sotto del pavimento ne ha portato in luce una porzione di eccezionale qualità, abolita dal potente interro su cui posa il pavimento dell'atrio che tipologicamente rientra ancora nel panorama tardorepubblicano. Conservata nei piani pavimentali, la fase di II stile è stata quasi ovunque abolita nei piani sotterranei, che conservano rivestimenti a imitazione marmorea non molto significativi negli ambienti (68) e (80).

L'alta qualità della decorazione di alcuni ambienti in questa fase, si deduce da un relitto conservatosi nell'ambiente (71) (cfr. figg. 317-394 che ci presenta una decorazione al livello dei grandi complessi attestati nelle Ville di Boscoreale e di Oplontis.

Questa stessa alta qualità presentano anche i pavimenti in *opus sectile* di alcuni ambienti che, sia al piano terra che al primo sotterraneo, offrono soluzioni di ricchezza e modernità non frequentemente attestate a Pompei. Non sappiamo in quale epoca essi siano stati depredati, se in antico, dopo l'eruzione, o in epoca moderna ma, almeno alcuni degli ambienti del piano superiore, sembrano essere stati spogliati nel Settecento. La casa infatti, come quelle vicine e come altri edifici che si trovano lungo la linea delle mura, è stata raggiunta dagli scavatori borbonici (cfr. fig. 344) e, a più riprese nelle relazioni dell'epoca, si trova menzione - insieme al distacco di frammenti di intonaco - del rinvenimento e distacco di elementi marmorei (26 febbraio 1759: Fiorelli PA\_H 1, p. 87; 10 marzo: *ibid.*, pp. 89-90; 17 marzo: *ibid.*, p. 91. 28 marzo: *ibid.*, p. 92). La casa, della quale sono notevoli anche le soluzioni architettoniche particolarmente innovative quali il salone absidato, la terrazza e il giardino non accessibile, e in generale lo sviluppo planimetrico, senza confronti nelle grandi case di età repubblicana, ha certo mantenuto fino alla fine di Pompei, anche nei rifacimenti, un livello qualitativo molto alto: lo dimostrano le decorazioni parietali di IV stile in alcuni degli ambienti del piano terra [l'atrio (2), lo *oecus* (10), l'ambiente (32)] che, pur di difficile valutazione a causa dell'intervento borbonico e del bombardamento che la

zona ha subito, non trovano facilmente confronto, per la qualità e la novità dei loro schemi con le altre testimonianze di IV stile conservate.

L'ambiente (32), costruito murando le colonne di un precedente peristilio (che a sua volta aveva abolito due ambienti più antichi, con decorazione di II stile) è aperto a E tramite una grande finestra con davanzale di marmo affacciata sul *viridarium* (23); esso aveva pavimento e zoccolo rivestiti in *opus sectile* (non conservato), sopra il quale è ancora visibile una decorazione parietale di IV stile di grande qualità (cfr. figg. 38-39). Orientamento opposto aveva la grandiosa sala (21), aperta su tre lati e affacciata sul porticato dal quale prendono luce gli ambienti del lato O del piano terreno, fiancheggiata da due ambienti [ (20) e (30)] ai quali possiamo attribuire la funzione di cubicoli diurni. Essa aveva - oltre al pavimento - le pareti integralmente rivestite nella stessa tecnica [come lo *oecus* (46) della Casa dei Dioscuri, VI 9, 6, v. vol. IV p. 9.56, fig. 1851: allestimento che documenta la tendenza ad un progressivo arricchimento degli apparati che porterà, in breve, alla dissoluzione di un sistema che univa 'centro' e periferia (il sistema detto degli stili pompeiani), la cui sopravvivenza non sarà più possibile nella società della piena età imperiale, percorsa da diversificazioni sociali, economiche ed ideologiche ormai non più ricomponibili.

A questo livello notevole della decorazione del piano terra ancora in età imperiale non sembrano corrispondere le pitture di IV stile del piano inferiore che - pur gradevoli nell'alternanza degli ambienti che si succedono come scatole monocrome e che in alcuni casi [l'ambiente (48) o il salone (62), con pavimenti in *opus sectile* esibiscono decorazioni di buon livello - non appaiono di qualità particolare.

Se ne deduce che - almeno in età imperiale - il maggior impegno decorativo è stato riservato agli ambienti di rappresentanza del piano superiore, mentre gli ambienti con pavimento ad *opus sectile* del piano inferiore - alcuni dei quali ne conservano solo le impronte - che non trovano confronto nel repertorio decorativo tardorepubblicano, potrebbero essere assegnati alla fase decorativa di II stile che, pur difficile da ricostruire, era certo di qualità assai alta e paragonabile alle migliori realizzazioni delle grandi ville di

quest'epoca (Boscoreale, Oplontis, Villa dei Misteri). Una datazione che tenga distinta la fase attestata dai pavimenti in opus *sectile* da quella attestata dalle pitture di Al stile sembra adattarsi meglio, alla natura dell'evidenza, ma una valutazione più approfondita di questo aspetto, come più in generale degli altri problemi suscitati da una casa eccezionale, deve necessariamente attendere l'edizione del complesso.

In particolare nella zona oggetto di indagine, gli archeologi sono interessati ad individuare una vasca, presente anche in altri giardini vicini.

Per l'individuazione di tale vasca, è stata realizzata una maglia di misura il cui passo di campionatura tra ogni profili è pari alla distanza tra gli stessi ed è uguale a 1 m; per ogni maglia sono stati utilizzati 72 elettrodi costruendo 4 profili di 18 elettrodi cadauno; sono state realizzate 3 maglie.

Pertanto l'area totale investigata è pari a 18 m x 12 m.

I dati sono stati acquisiti sia con dispositivo Wenner-Schlumberger che con Dipolo-Dipolo Assiale e, in accordo con quanto esposto nel terzo capitolo, sono state ottenute diverse ricostruzioni di dati.

In figura 5.9 è riportata la ricostruzione 3D ottenuta invertendo i dati acquisiti con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale. Nelle varie slices riportate, è possibile individuare ed associare le diverse anomalie riscontrate ai vari riempimenti che sono stati eseguiti nell'area. Nella slices corrispondente alla profondità di circa 1.40 m è possibile discriminare la presenza di una struttura diversa, le cui dimensioni sono correlabili con quelle della vasca di cui gli archeologi hanno ipotizzato la presenza. Nella slices successiva, nella stessa zona si evidenzia la stessa anomalia con la stessa forma ma con contrasto diverso. Ciò potrebbe essere spiegato dal fatto che, a questa profondità non è più presente la struttura che ha determinato tale contrasto ma se ne riconosce ancora l'effetto.

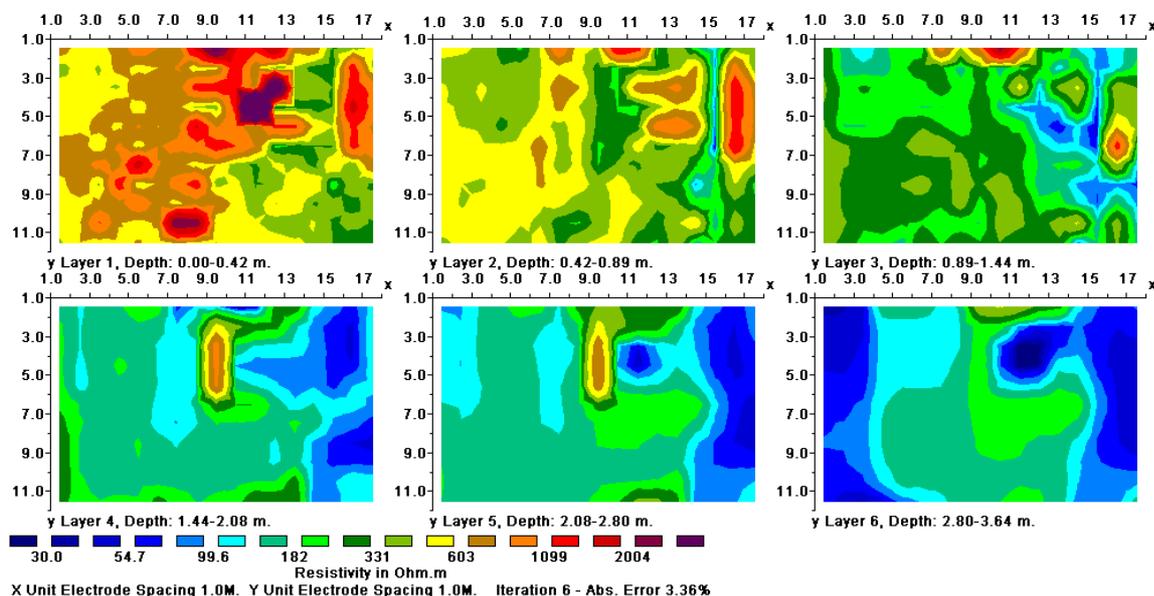
Delimitata questa anomalia, sono state elaborate i dati facendo variare la distanza tra i vari profili: l'obiettivo è quello di verificare, come ricostruito con i modelli, la relazione tra passo di campionatura e distanza tra i profili.

La distanza tra i profili è stata fatta variare secondo multipli interi del passo di campionatura utilizzato.

In figura 5.10, è riportata la ricostruzione ottenuta considerando sempre la stessa maglia di misura ma la distanza tra i profili della maglia è pari a 2 m. Nella stessa zona descritta nella prima maglia, è possibile discriminare la stessa struttura che presenta le stesse dimensioni ma un contrasto minore rispetto all'anomalia delimitata nella prima maglia. Pertanto, considerando un passo pari al doppio del passo di campionatura utilizzato lungo i profili, in accordo con quanto desunto dai modelli, è ancora possibile distinguere le anomalie presenti.

In figura 5.11, dove è riportata la ricostruzione realizzata considerando una distanza tra i profili pari a 3 m, anche se si evidenzia nelle prime slices una correlazione tra le anomalie definite e la direzione dei profili, è possibile ancora definire la stessa struttura.

Pertanto, non avendo modificato il passo di campionatura lungo ogni profilo, è stato possibile ricostruire la struttura anche diminuendo la copertura areale dei dati.



**Fig. 5.9:** Ricostruzione 3D ottenuta acquisendo i dati lungo la direzione X con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale

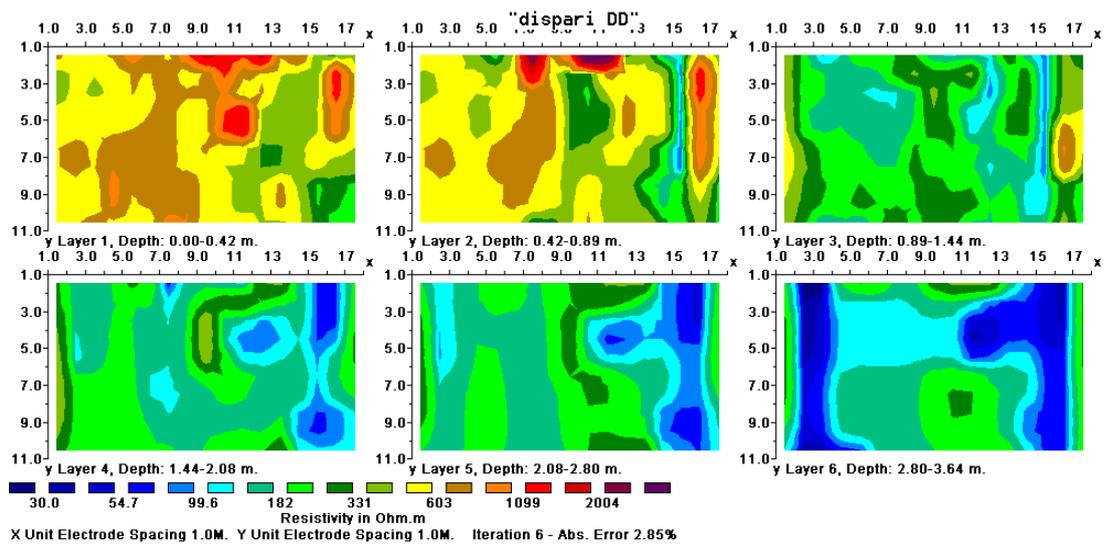


Fig. 5.10: Ricostruzione 3D ottenuta acquisendo i dati lungo la direzione X con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale. La distanza tra i profili è pari al doppio del passo di campionatura.

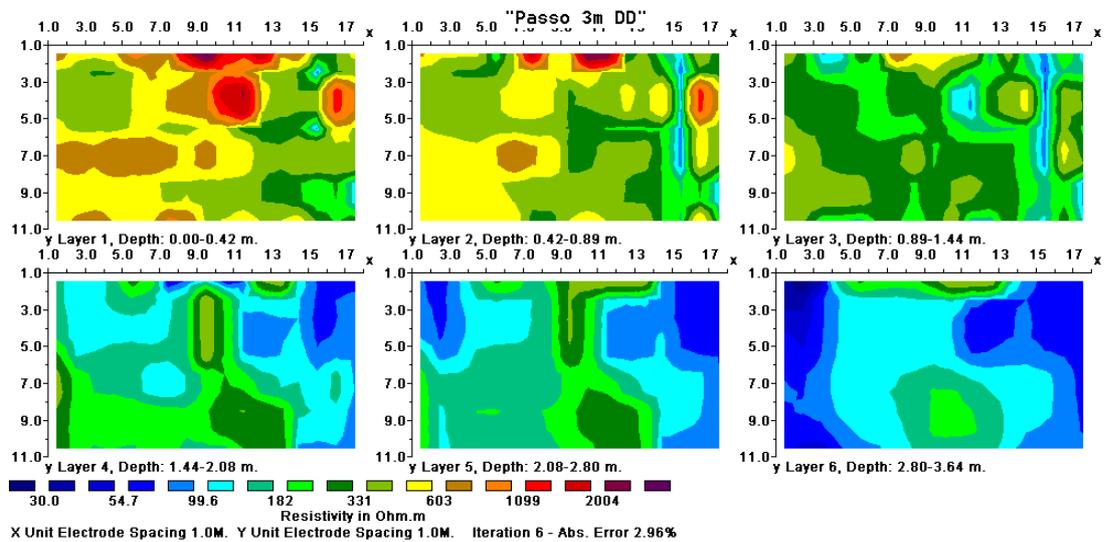


Fig. 5.11: Ricostruzione 3D ottenuta acquisendo i dati lungo la direzione X con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale. La distanza tra i profili è pari al triplo del passo di campionatura.

La stessa zona è stata investigata anche utilizzando il dispositivo Wenner-Schlumberger e sono state eseguite le stesse modalità di elaborazione dati, realizzate per il Dipolo-Dipolo Assiale.

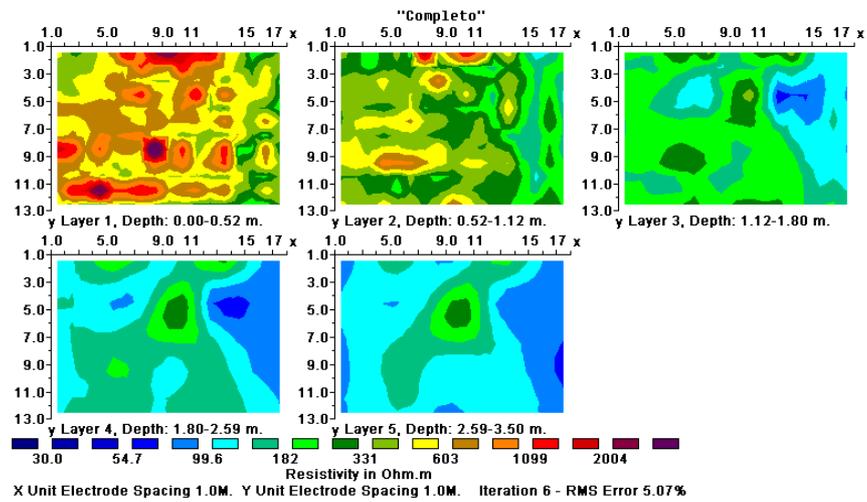


Fig. 5.12: Ricostruzione 3D ottenuta acquisendo i dati lungo la direzione X con dispositivo Wenner-Schlumberger. La distanza tra i profili è uguale al passo di campionatura.

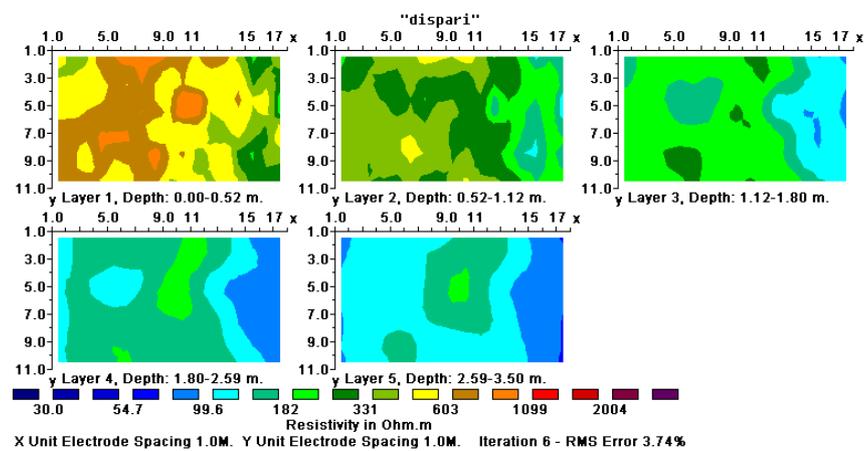
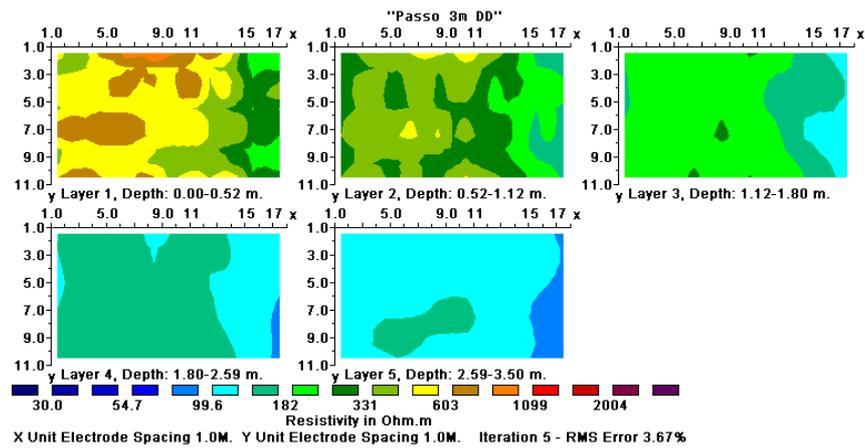


Fig. 5.13: Ricostruzione 3D ottenuta acquisendo i dati lungo la direzione X con dispositivo Wenner-Schlumberger. La distanza tra i profili è pari al doppio del passo di campionatura.

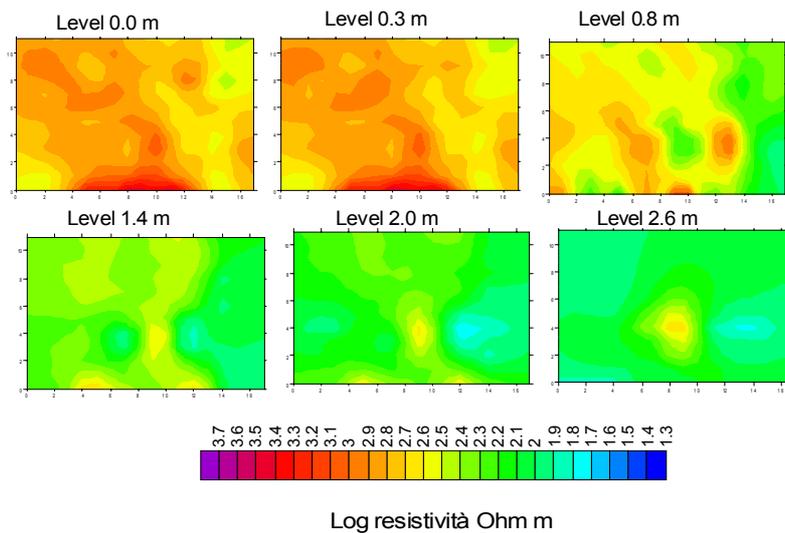


**Fig. 5.14:** Ricostruzione 3D ottenuta acquisendo i dati lungo la direzione X con dispositivo Wenner-Schlumberger. La distanza tra i profili è pari al triplo del passo di campionatura.

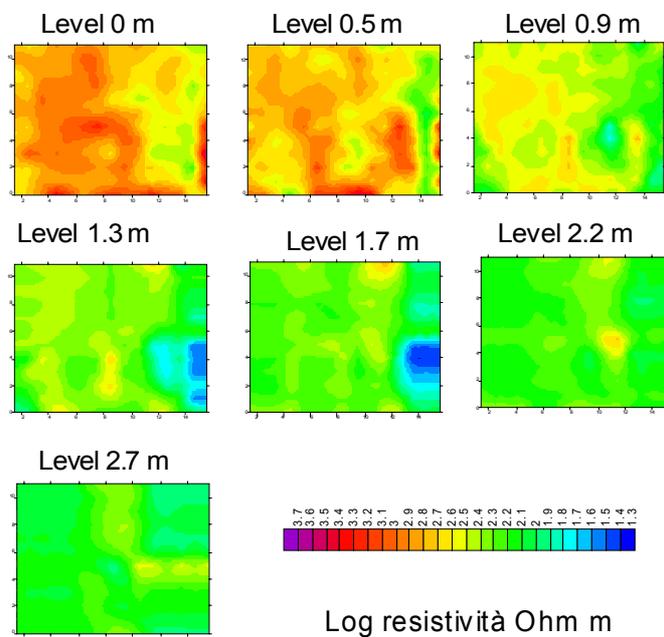
Nelle figure 5.12, 5.13 e 5.14 sono riportate le ricostruzioni definite con passo di campionatura sempre pari a 1 m ma con distanza tra i profili, rispettivamente pari a 1 m, 2 m e 3 m. Con questo dispositivo l'anomalia considerata non è ben definita come nel Dipolo-Dipolo Assiale. Infatti, nella ricostruzione riportata in figura 5.12, la zona considerata presenta una anomalia ma non è possibile associarla alla vasca di cui sopra date le diverse dimensioni che essa presenta.

Nelle altre ricostruzioni eseguite non si evidenzia più la presenza di una zona anomala.

Nelle ricostruzioni pseudo-3D, si conferma quanto verificato nella analisi modellistica eseguita: le ricostruzioni eseguite con l'elaborazione ottenuta mediante i dati acquisiti con dispositivo Wenner-Schlumberger (fig. 5.15) sembra essere più definito rispetto a quello ottenuto con il dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale (5.16).



**Fig. 5.15:** Ricostruzione pseudo 3D con dispositivo Wenner-Schlumberger. Le maglie sono capovolte rispetto a quelle rappresentate sopra.



**Fig. 5.16:** Ricostruzione pseudo 3D con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale. Le maglie sono capovolte rispetto a quelle rappresentate sopra e la scala di colore con la quale sono rappresentati i dati è la stessa.

## 5.2 PROBLEMATICHE AMBIENTALI

In questo settore la metodologia geoelettrica fornisce in ottimo contributo in diverse problematiche. Infatti, attraverso questa tipologia di prospezione è possibile discriminare le dimensioni di una discarica, definire la presenza di eventuali inquinanti nel sottosuolo, definirne le caratteristiche

dello stesso (attraverso misure di caricabilità), le direzioni di flusso e/o la dimensioni della zona inquinata. E' possibile, ancora, determinando le variazioni di resistività nelle tre direzioni dello spazio, ottenere delle ricostruzioni elettrostratigrafiche del sottosuolo dalle quali poter ricostruire gli andamenti litologici delle strutture presenti nel sottosuolo. Questo consente, ad esempio, di delimitare gli spessori di acquiferi o di individuare gli spessori di zone particolarmente a rischio. Infatti, ad esempio, quando bisogna procedere alla messa in sicurezza di un versante, per definire l'opera di intervento più adeguato, è necessario stabilire il volume di materiale che presenta una certa instabilità: ricostruendo l'andamento di resistività nel sottosuolo nelle tre direzioni dello spazio, è possibile ottenere questo dato.

Di seguito sono riportati due esempi relativi allo studio di una discarica (dove sono state eseguite sia ricostruzioni di resistività elettrica che di caricabilità) e lo studio di individuazione di una falda in prossimità del mare.

### **5.2 1 Discarica - Inquadramento geologico e ricostruzione elettrostratigrafica dell'area.**

La zona oggetto di studio ricade nel territorio comunale di Petina che si compone per la maggior parte, di formazioni carbonatiche di età mesozoica che costituiscono prevalentemente la parte montuosa.

Tali formazioni, per lo più costituite da calcari micritici a luoghi dolomitizzati, si presentano ben stratificate con strati aventi uno spessore variabile da 0.50 m a 1.50 m con immersione degli strati preferenzialmente a SW. I litotipi carbonatici recano evidenti i segni dei movimenti epirogenetici che hanno interessato la piattaforma carbonatica; un sistema di faglie verticali armoniche ha determinato lo sbloccamento dei massicci mesozoici.

Tra le località La Pila, lungo il Vallone S.Onofrio e località S.Giovanni, una faglia normale conforme con direzione WNW-EST, ha determinato il ribassamento dell'area subpianeggiante che si estende lungo la strada Sicignano-Petina e Petina-Polla formando una specie di gradino morfologico.

Nelle località S.Maria e Pantane si rilevano intervalli torbidityci composti da alternanze di arenarie quarzoso-micacee a loghi molassiche, a grana minuta o grossolana, in strati o banchi con intercalati livelli di argille e strati di calcari marnosi o marne biancastre.

Tali intervalli, di età miocenica, risultano essere trasgressivi sui litotipi mesozoici.

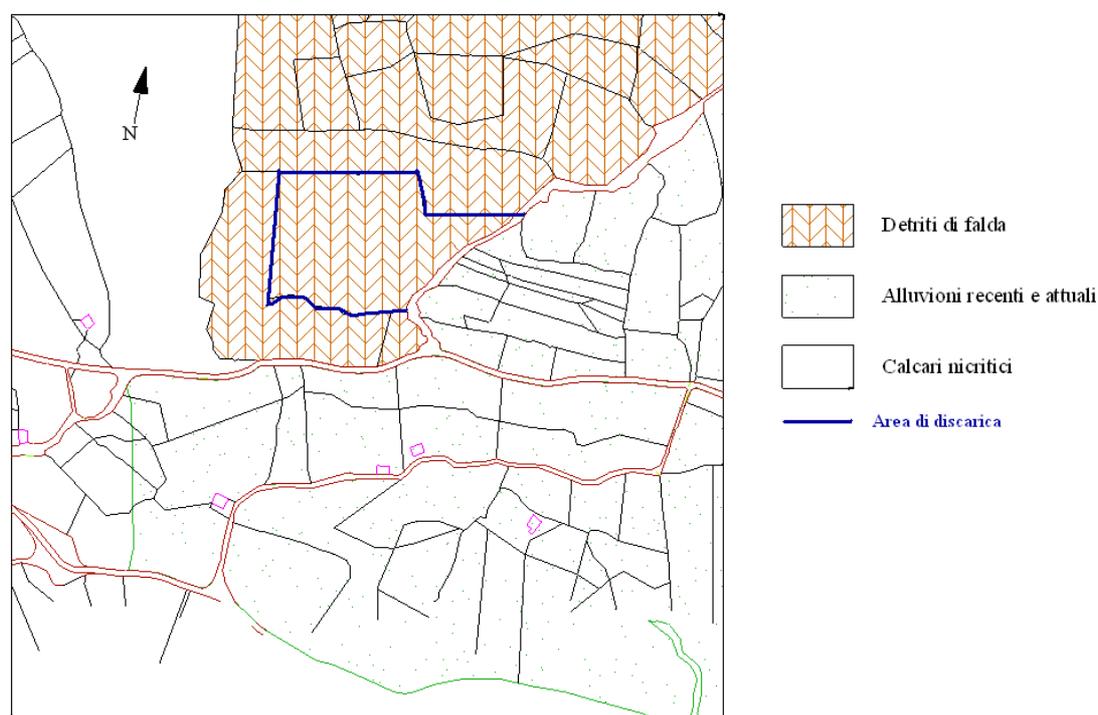
Lungo la strada Petina-Polla, affiorano terreni composti da alternanze di calcari marnosi-arenarie con frequenti intercalazioni siltitiche ed argillitiche.

Nella parte Nord-Orientale del territorio si rinvencono potenti coltri di conglomerati poligenici di origine deltizia che si estendono fino al Fiume Tanagro ove passano lateralmente ad alluvioni recenti ed attuali.

Lungo la strada Petina-Sicignano, si rileva un potente cono detritico: alle falde del massiccio del M.Alburno si rinvencono potenti falde detritiche e brecce cementate.

In particolare nella zona oggetto di indagine le litologie presenti sono rappresentate da detrito di falda sciolto in matrice argilloso-sabbiosa, spesso includente grossi blocchi calcarei isolati. La composizione litologica dei depositi è estremamente variabile come anche la successione stratigrafica. Generalmente si rinviene in superficie un primo strato di circa 2 metri composto da detrito sciolto in matrice sabbiosa che poggia sul substrato calcareo. Questi depositi sono altamente permeabili per porosità e fessurazione. Nella figura riportata di seguito, sono riportate le diverse litologie presenti nell'area e l'area oggetto delle indagini di prospezione geoelettrica.

### Ricostruzione schematica della zona oggetto di indagine:



La discarica analizzata è una discarica controllata di Rifiuti solidi Urbani (RSU) aperta nel 1981 e chiusa ormai da oltre 5 anni. Si tratta di una discarica di piccole dimensioni. Ricopre, infatti, un'area complessiva di circa 1300 mq.

La problematica che si intende analizzare, è relativa alla possibilità di ottimizzare una ricostruzione 3D del sottosuolo nel caso in cui si debbano studiare discariche di piccole dimensioni e non sia possibile realizzare degli stendimenti troppo lunghi. Infatti, se fosse possibile realizzare stendimenti lunghi, la problematica oggetto di studio è ben discussa in letteratura. Il problema si pone quando non è possibile realizzare stendimenti lunghi.

Nel caso in esame, è possibile eseguire dei profili di lunghezza massima di 50 m.

Dalle carte che sono state messe a disposizione dall'ingegnere che ha diretto i lavori di tale discarica, non è chiaro lo spessore di rifiuti della discarica stessa. Pertanto per cercare di raggiungere la maggiore profondità possibile, considerando le problematiche dell'area, sono state ricostruite tre differenti maglie. In realtà per utilizzare lo stesso passo di campionatura

lungo tutta l'area da investigare, avremmo dovuto utilizzare, per superare le varie difficoltà logistiche presenti in questo ambiente (quali, ad esempio, la presenza di diversi cumuli di RSU), un multicavo il cui passo di campionatura fosse pari a 10 m.

La difficoltà operativa relativa all'utilizzo di questa tipologia di cavo, risulta essere facilmente comprensibile. Pertanto abbiamo deciso di utilizzare un multicavo il cui passo di campionatura è di 5 m e ricostruire diverse maglie in relazione alle diverse problematiche relative all'area da investigare.

La prima maglia presenta un passo tra i profili pari a 1 m e un passo di campionatura di 5 m; su entrambi i bordi è visibile il telo della geomembrana. La seconda maglia è costituita da profili distanti tra loro 2.5 m ed un passo di campionatura di 4.4 m; il telo è presente solo su un bordo; si è dovuto ridurre il passo in quanto sull'altro bordo è presente uno strato di cemento. Nella terza maglia è stato utilizzato un passo di campionatura pari a 4 m e distanze tra i profili pari a 5 m; ancora una volta è visibile un solo bordo ed il profilo non intercetta l'altro lato della discarica.

Anche in questo caso sono state realizzate acquisizioni sia su maglie che lungo profili per verificare la modalità di acquisizione più idonea per la ricostruzione in questa tipologia di problema.

I forti contrasti di resistività, determinati dalla presenza del telo impermeabile, e il numero limitato di dati che è stato possibile acquisire con il passo di campionatura scelto su ogni profilo, non consente di ottenere una buona ricostruzione dei dati lungo i profili. Dalle interpretazioni eseguite l'errore RMS su ciascun profilo è molto alto (in fig. 5.17 sono riportati solo alcuni dei risultati ottenuti elaborando i dati mediante l'algoritmo di inversione di Loke and Barker, Res2Dinvi).

Le ricostruzioni 2D consentono di ottenere una ricostruzione qualitativa del sottosuolo in quanto comunque è possibile discriminare il comportamento dei rifiuti rispetto al materiale circostante. Naturalmente se avessimo scelto un passo di campionamento più basso tra i profili, sarebbe stato possibile ottenere delle migliori ricostruzioni sul profilo; ma come già detto, il passo è stato scelto in funzione della profondità di investigazione da

raggiungere. Non essendo molto chiara, dalle carte tematiche che sono state messe a disposizione, lo spessore di tali rifiuti, è stato utilizzato il maggior passo di campionatura che poteva essere utilizzato in relazione alla massima lunghezza dei profili stessi.

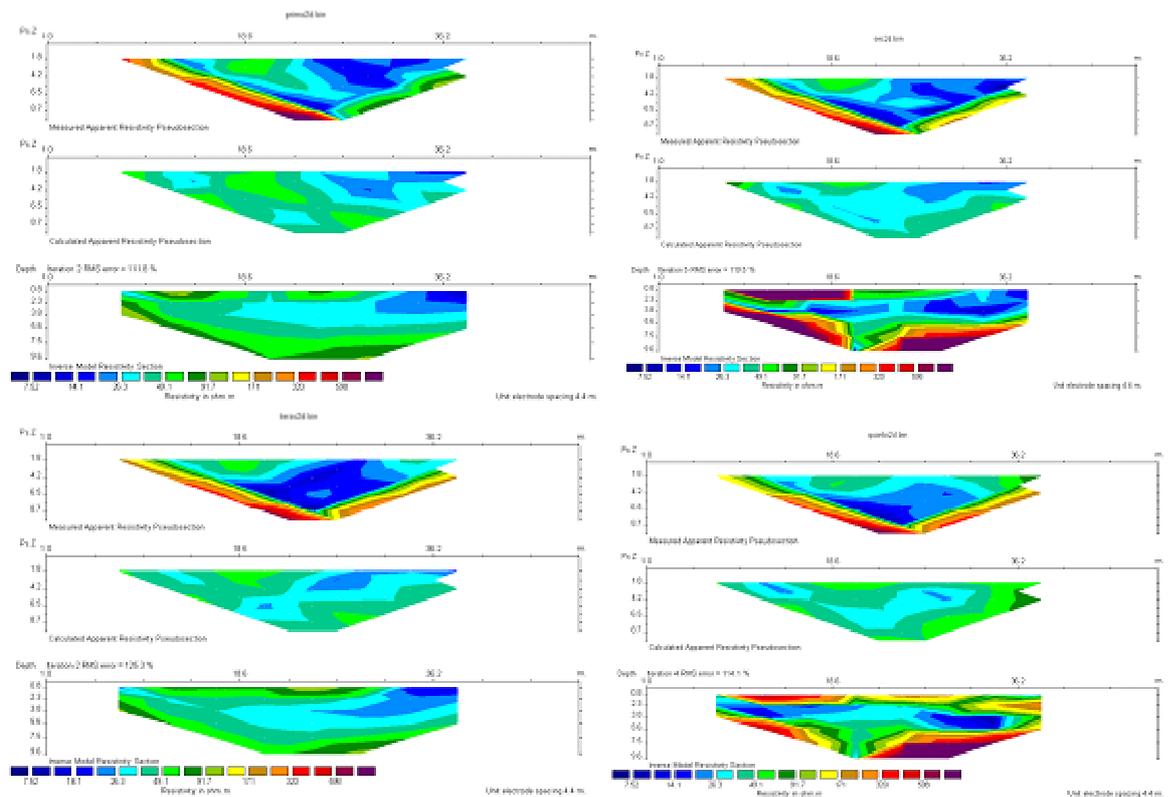


Fig. 5.17: Elaborazione dei dati dei profili relativi alla seconda maglia ricostruita.

Diversa invece la ricostruzione fatta con i dati acquisiti su maglie 3D.

Innanzitutto, guardando i dati lungo il piano XZ di ogni maglia (fig. 5.18) è possibile chiaramente distinguere il corpo dei rifiuti, caratterizzato da valori di resistività molto bassi. E' chiaramente evidente la presenza di un forte resistivo, nel quale tali rifiuti sono inglobati.

Questo resistivo può essere associato al telo della geomembrana.

Nella prima maglia eseguita, i vari profili realizzati bordando entrambi i lati della discarica e nella ricostruzione riportata in figura 5.18 in alto, è possibile discriminare l'andamento di un resistivo che interessa tutte e tre le sezioni della stessa maglia. Nella seconda e nella terza maglia, i profili

intersecano solo uno dei due bordi e pertanto nella ricostruzione si evidenzia un resistivo che non si chiude con l'altro bordo della discarica stessa.

In particolare in questa stessa figura e osservando le singole sezioni ricavate, è ben visibile il fatto che i rifiuti risultano essere circoscritti in una zona ben definita testimoniando che il telo posto al di sotto del corpo dei rifiuti è ancora integro e non consente al percolato di fuoriuscire.

La formazione di percolato è ancora presente, in quanto la discarica controllata è stata chiusa ma non è stato ancora effettuato il piano di bonifica dell'area stessa; le acque piovane continuano a percorrere il corpo dei rifiuti e quindi si continua a formare il percolato.

Per rendere più chiara l'interpretazione, dopo aver elaborato i dati per ogni maglia ho ricostruito gli andamenti con tutti i dati (fig. 5.19). Ancora una volta si evince, sicuramente in modo più chiaro in questa rappresentazione, la possibilità di discriminare il telo della geomembrana e l'effetto che esso riproduce rispetto ai rifiuti molto più conduttivi. Inoltre dalle analisi di resistività eseguite, appare evidente che il percolato risulta essere ben raccolto all'interno della discarica stessa.

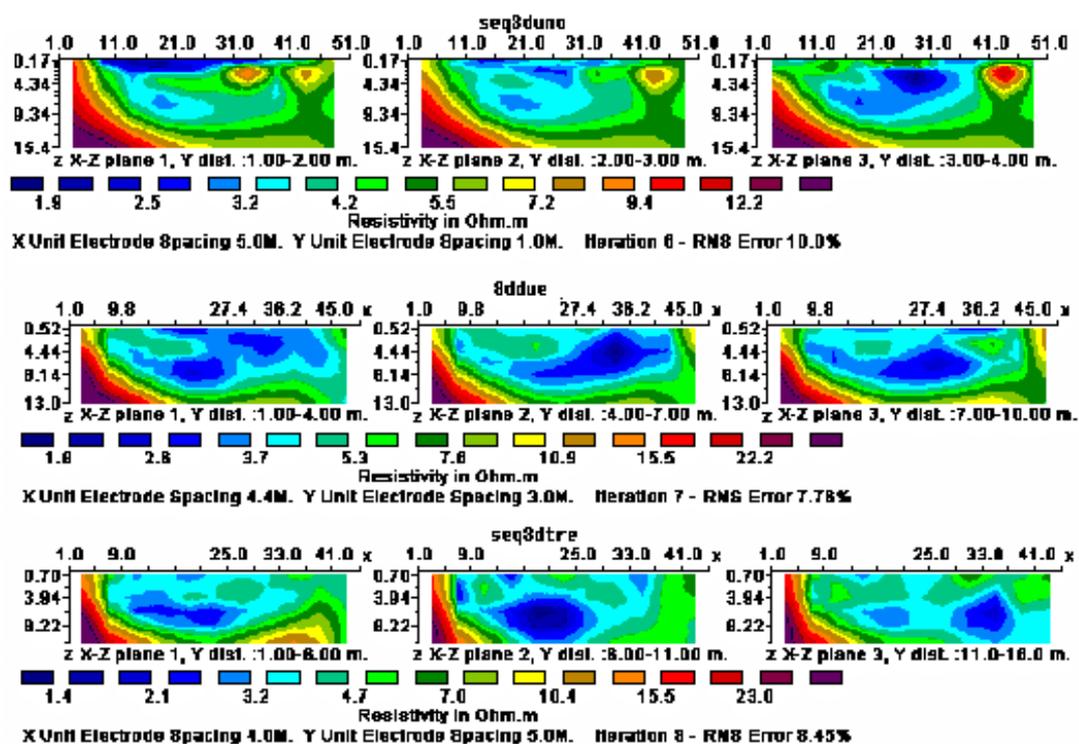
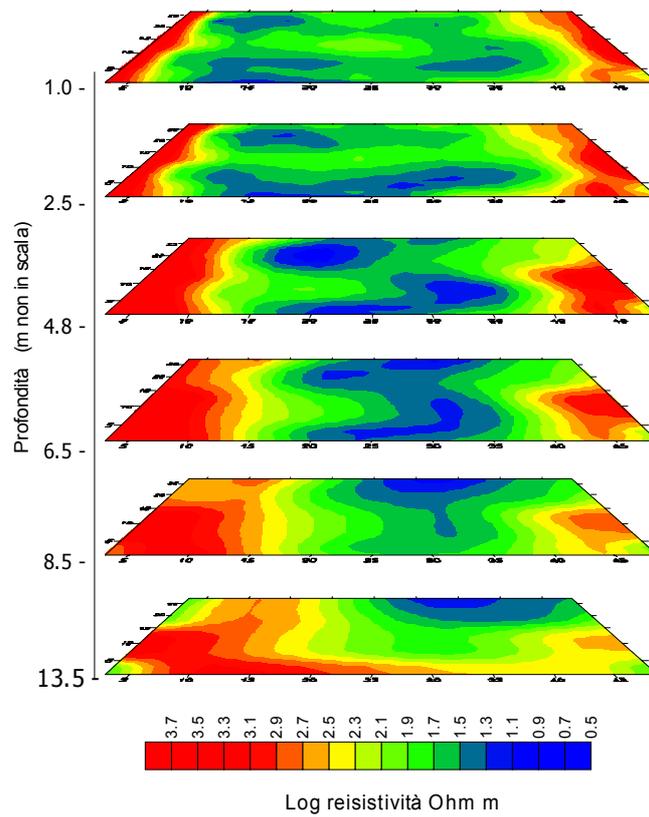


Fig. 5.18: Visualizzazione sul piano XZ delle tre maglie eseguite per la ricostruzione della zona di discarica.

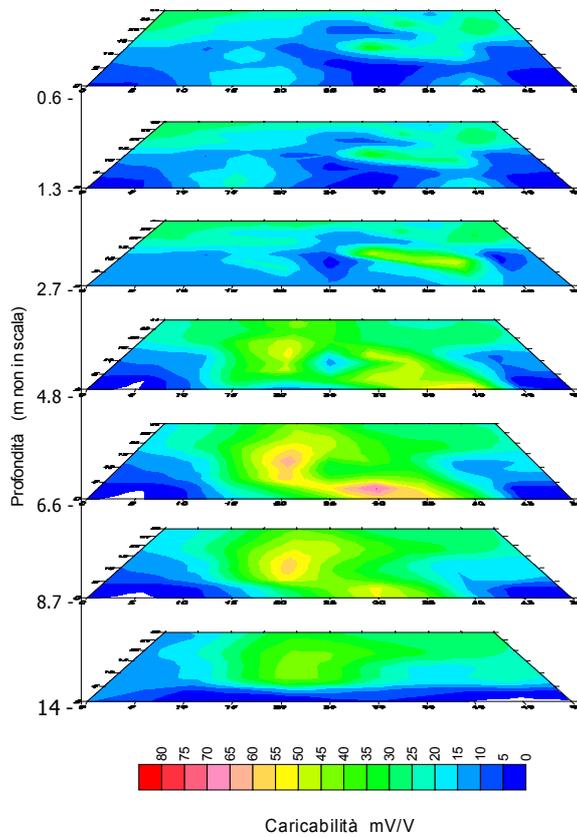
La conferma di questo risultato è data dalla ricostruzione dell'andamento della caricabilità eseguita in questa stessa zona.

Con l'analisi di questo parametro è possibile discriminare i rifiuti dal terreno circostante in quanto i rifiuti solidi urbani sono caratterizzati da alti valori di caricabilità mentre il terreno circostante è caratterizzato da bassi valori di caricabilità. In figura 5.20 si evidenzia il fatto che la caricabilità tende a diminuire con la profondità in accordo con il fatto che il percolato sia ben raccolto nel telo e che quindi, non ci sono problemi di infiltrazione.

I dati di caricabilità sono stati acquisiti contemporaneamente ai dati di resistività ma le due inversioni sono state eseguite con un numero di dati diverso. Infatti, per l'elaborazione dei dati di caricabilità è stato necessario eliminare un numero maggiore di dati rispetto a dati analizzati per la ricostruzione degli andamenti di resistività nel sottosuolo. Sono state invertite due diverse serie di dati ma la correlazione fatta, ha consentito di ottenere delle informazioni aggiuntive sulla problematica in esame. E' opportuno sottolineare che le osservazioni di cui sopra, sono da considerarsi valide per lo studio di discariche di piccole dimensioni e quando non si possono realizzare profili lunghi.



**Fig. 5.19:** ricostruzione della tomografia elettrica della discarica controllata di rifiuti solidi urbani di Petina mediante dati di resistività.



**Fig. 5.20:** Ricostruzione della tomografia elettrica della discarica controllata di rifiuti solidi urbani di Petina mediante dati di caricabilità.

## 5.2 2 Falda freatica

### 5.2. 2 Inquadramento geologico e ricostruzioni geoelettriche dell'area.

Le indagini sono state eseguite in località Baia Tirrena, immediatamente a nord di Torre del Telegrafo, nel territorio comunale di Ascea.

Questa rappresenta una piccola baia circondata da rilievi, spesso con pareti subverticali, con altezze che arrivano mediamente sui 70-80 *m* sul livello del mare, in cui affiorano terreni ascrivibili alla Formazione del Saraceno (BONARDI *et alii*, 1988). Si tratta di una successione costituita da torbiditi calcaree e calcareo-marnose, spesso silicizzate, con porzioni, soprattutto nella parte alta, in cui prevale la frazione silicoclastica, di età eocene-oligocene superiore; la successione si presenta fortemente deformata, con una serie di sistemi di pieghe isoclinali, di faglie e di clivaggi.

Alla base dei rilievi si rinviene una falda detritica costituita da ciottolame derivanti dall'alterazione e dal disfacimento delle rocce suddette, immersi in una matrice sabbiosa grossolana, passante nella parte più interna della baia a depositi di conoide torrentizia, originatisi allo sbocco degli impluvi a regime torrentizio sulla piana; tali conoidi attualmente si presentano reincise e in alcune porzioni terrazzate e coltivate a uliveto.

Procedendo verso la costa si rinvencono depositi sabbiosi di duna mobile e di spiaggia, che costituiscono una fascia continua lungo tutto il litorale di Marina di Ascea fino a Punta del Telegrafo. Si tratta di sabbie in genere giallastre o grigiastre, a composizione prevalentemente quarzosa, a granulometria medio-grossolana con qualche ciottoletto ben arrotondato di dimensioni centimetriche, in cui si evidenziano strutture sedimentarie tipo laminazioni o ripples. La morfologia che questi depositi restituiscono è sub-pianeggiante, debolmente degradante verso mare, interrotta da un cordone a debole rilievo, morfologicamente ben definito. Su questa fascia si rinvencono ancora piccoli lembi di vegetazione tipica della macchia mediterranea. La

piana, inoltre, è interrotta da due canali artificiali che raccolgono le acque provenienti dagli impluvi torrentizi che scendono dai rilievi presenti lungo il bordo della baia.

Oltre il cordone si passa alla spiaggia attuale, che si presenta con una pendenza leggermente più accentuata ed è costituita da sabbie giallastre grossolane passanti a ghiaiette lungo la battigia.

I sondaggi eseguiti nell'area sono stati ubicati tutti nella zona di duna mobile, oltre il cordone o al margine interno dello stesso, con due in particolare a ridosso del canale di deflusso delle acque, e con azimuth sub-parallelo alla linea di costa, nel limite ovviamente delle possibilità operative.

Tale area è stata scelta al fine di identificare la metodologia di acquisizione dei dati di resistività attraverso la quale ottenere una buona ricostruzione dell'andamento della falda freatica presente nella zona oggetto di indagine.

A tal proposito, sono stati realizzati dei profili con passo di 1 m e le acquisizioni sono state fatte sia con il dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale che il Wenner-Schlumberger.

E' stato riportato poi il confronto tra le due elaborazioni realizzate.

Il dispositivo Wenner-Schlumberger, secondo quanto definito nel paragrafo 2.1.4, fornisce in questi casi, una ricostruzione migliore in quanto si tratta di individuare il livello di falda in una zona in cui la pendenza della stessa non è molto pronunciata; la discontinuità da definire presenta le stesse caratteristiche che si hanno quando bisogna ricostruire una stratificazione i cui livelli sedimentari da determinare presentano una stratificazione piano-parallela.

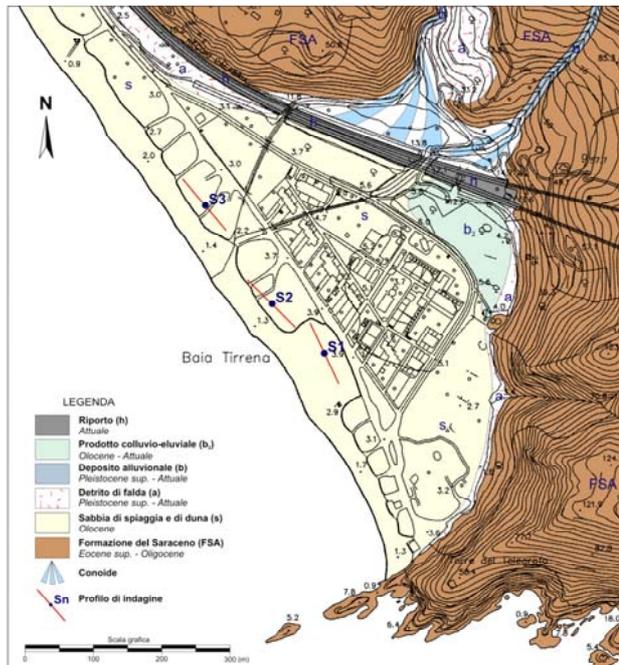


Fig. 5.21: Schema geologico dell'area d'indagine con ubicazione dei profili realizzati.

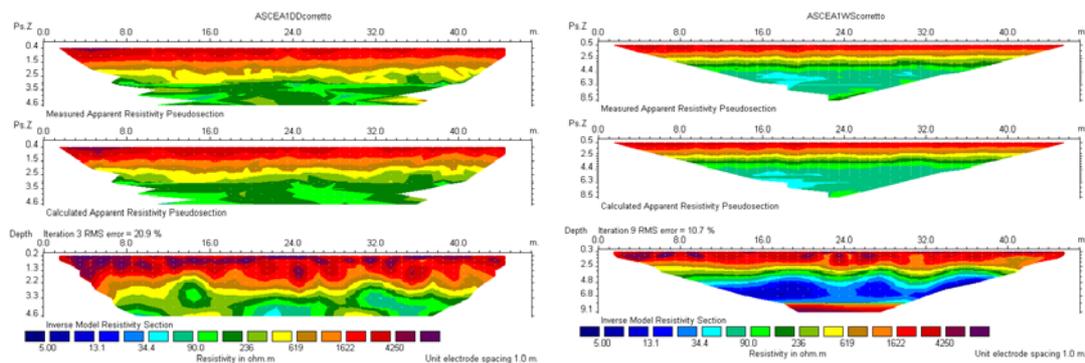
Sono stati realizzati due profili in due zone poste alla stessa quota ma posti ad una distanza di circa 50 m (fig. 5.21).

In entrambi i profili esaminati, e rappresentati con la stessa scala di colore per rendere più immediato il confronto, è possibile evidenziare come con i dati acquisiti con il dispositivo Wenner-Schlumberger è possibile ottenere una migliore ricostruzione del livello di falda che in questa zona non dovrebbe presentare, significative variazioni di pendenza.

Il profilo, naturalmente, è stato realizzato perpendicolare al flusso della falda stessa.

In particolare nel primo profilo (fig. 5.22) è possibile anche ricostruire lo spessore dell'acquifero presente.

E' da precisare che anche attraverso la ricostruzione eseguita elaborando i dati acquisiti con dispositivo Dipolo-Dipolo, è possibile discriminare un andamento che può essere correlato ed interpretato come un livello di falda, ma questa struttura, risulta essere individuata in maniera più semplice attraverso la ricostruzione analizzata con l'elaborazione dei dati acquisiti con dispositivo Wenner-Schlumberger.

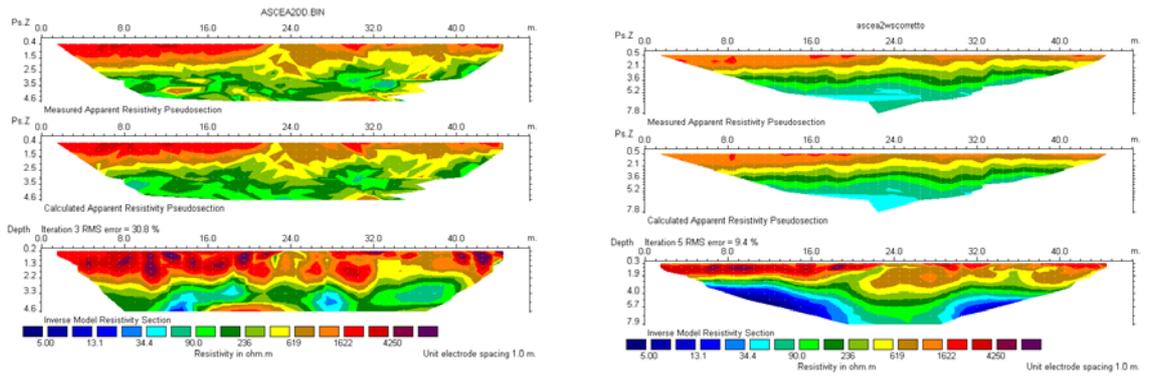


**Fig. 5.22:** Profilo 1. Confronto tra ricostruzioni con dati acquisiti con dispositivo Dipolo-Dipolo (a sinistra) e dati acquisiti con dispositivo Wenner-Schlumberger (a destra).

Nel secondo profilo (fig. 5.23), invece, solo attraverso la ricostruzione con i dati acquisiti con dispositivo Wenner-Schlumberger si riesce a delimitare una particolarità nella ricostruzione dell'andamento di resistività con la profondità. La discontinuità nelle linee di iso-resistività può essere associata a delle particolari strutture geologiche che modificano anche il percorso nella falda nel sottosuolo investigato.

E' presente una discontinuità nell'andamento di falda che con i dati di Dipolo-Dipolo, ancora una volta, è ricostruibile ma non in modo immediato così come è possibile fare con i dati di Wenner-Schlumberger.

Pertanto queste tipologie di strutture geologiche è più opportuno analizzarle attraverso una acquisizione dei dati con dispositivo Wenner-Schlumberger.



**Fig. 5.23:** Profilo 2. Confronto tra ricostruzioni con dati acquisiti con dispositivo Dipolo-Dipolo (a sinistra) e dati acquisiti con dispositivo Wenner-Schlumberger (a destra).

## OSSERVAZIONI CONCLUSIVE.

Il crescente interesse verso le problematiche ambientali e/o archeologiche e, soprattutto, lo specifico contributo che il geofisico può fornire nel redimere un progetto di riqualificazione ambientale o nella determinazione delle strutture presenti nel sottosuolo per ottimizzare uno scavo archeologico, ha fornito degli importanti input per questa tesi di dottorato.

Infatti, fine ultimo di questa tesi di dottorato è stato quello di definire, mediante l'utilizzo della metodologia geoelettrica ed in particolare del metodo della resistività, la possibilità di ottimizzare la risoluzione in varie problematiche geologiche e/o archeologiche sia in termini di acquisizione che di elaborazione e ricostruzione del sottosuolo investigato. Pertanto, sono state modellizzate diverse situazioni geologiche ed archeologiche al fine di individuare lo schema di acquisizione dei dati che consentisse una buona ricostruzione delle strutture da definire riducendo il numero di misure da eseguire.

Le prospezioni geoelettriche, rispetto ad altre tipologie di prospezione geofisiche, prevedono dei tempi di acquisizione dei dati sicuramente molto più lunghi rispetto a quelli necessari per investigare una zona attraverso, ad esempio, il metodo magnetico o il metodo elettromagnetico. Il vantaggio della metodologia geoelettrica, risiede nel fatto che l'applicabilità risulta essere molto ampia: è possibile realizzare prospezioni geoelettriche in qualsiasi tipo di zona e per diverse tipologie di problematiche.

Ancora, è importante sottolineare che, il dettaglio con cui le informazioni sul sottosuolo possono essere determinate confrontando diverse metodologie di prospezione geofisica, è di notevole importanza nel momento in cui bisogna delineare delle problematiche piuttosto complesse. Pertanto è necessario individuare delle metodologie che consentano di ottimizzare anche i tempi di acquisizione e di elaborazione dei dati di resistività apparente, in modo da rendere questa metodologia maggiormente competitiva.

In quest'ottica sono state delineate in questa tesi di dottorato, alcune particolari osservazioni, riportate di seguito.

Dopo una attenta analisi sulle diverse modalità di acquisizione dei dati di resistività, sono state confrontate diverse tipologie di acquisizione 3D. Sono state realizzate delle ricostruzioni del sottosuolo considerando acquisizioni 3D (i dati sono acquisiti contemporaneamente lungo la direzione X, Y e XY di una maglia), acquisizioni 3DX o 3DY (acquisizioni eseguite solo lungo una direzione e i dati poi sono stati elaborati con algoritmi di inversione 3D) e pseudo 3D (acquisizioni eseguite lungo profili, inversione dei dati mediante l'utilizzo di algoritmi 2D e visualizzazione pseudo 3D dei dati). Le ricostruzioni 3D e 3DX o 3DY, sono state confrontate anche riducendo il numero di profili acquisiti realizzando delle maglie in cui non si è fatto variare il passo di acquisizione su ogni profilo ma si è variata la copertura areale di acquisizione aumentando la distanza tra i profili secondo multipli interi del passo di campionatura.

Queste ricostruzioni sono state fatte analizzando 3 modelli sintetici. Da questa analisi è possibile evidenziare le seguenti osservazioni:

- Quando il passo di campionatura tra i dati è confrontabile con la distanza tra i vari profili da realizzare, è possibile ottenere una ricostruzione 3D del sottosuolo che non dipenda dalla direzione di acquisizione dei dati: la ricostruzione 3D è correlabile sia con quella 3DX che 3DY. Non è necessario acquisire i dati lungo entrambe le direzioni della maglia. Questa osservazione è possibile verificarla anche quando i profili da realizzare presentano un certo azimuth rispetto alle strutture da individuare (modello 3, pag. 79).
- Quando la distanza tra i profili aumenta ed in particolare è pari al doppio del passo di campionatura utilizzato lungo ogni profilo, è possibile individuare una direzione per la quale è ancora possibile affermare che la ricostruzione non dipenda dal numero dei dati acquisiti: esiste una direzione, ortogonale alla direzione di massimo allungamento della struttura da

individuare, la cui ricostruzione è correlabile con quella ottenuta utilizzando dati acquisiti su entrambe le direzioni di una maglia. Questa direzione è possibile individuarla se e quando esistono informazioni a priori di carattere geo/archeologico sulla zona oggetto di indagine. E' stato possibile osservare quanto esposto, in relazione a tutti e tre i modelli sintetici ricostruiti.

- Quando la distanza tra il profili è pari al triplo del passo di campionamento, è necessario acquisire lungo entrambe le direzioni per avere una buona ricostruzione del sottosuolo. Infatti, quando la copertura areale dei dati diminuisce, è importante ai fini di una corretta ricostruzione delle strutture, anche il numero di volte e le modalità con le quali le anomalie dovute alla presenza delle diverse strutture presenti, sono state campionate. Dalle ricostruzioni eseguite sul secondo modello sintetico realizzato, si evince chiaramente che, a parità di profili da realizzare, risulta essere più opportuno eseguire dei profili scegliendo una campionatura fitta lungo una sola direzione piuttosto che realizzare profili in entrambe le direzioni (figg. 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 per acquisizioni con dispositivo Dipolo-Dipolo, figg. 3.27, 3.28, 3.29 per acquisizioni con dispositivo Polo-Polo e figg. 3.33, 3.34, 3.35 per acquisizioni Wenner-Schlumberger).

Per quanto riguarda i diversi dispositivi che sono stati utilizzati per elaborare i vari confronti (Polo-Polo, Dipolo-Dipolo e Wenner-Schlumberger), è possibile osservare che:

- Il confronto tra le tre diverse modalità di acquisizione del dispositivo Polo-Polo (in linea, complete data set data e cross-diagonal data) consente di evidenziare che nelle ricostruzioni 3D non esista una proporzionalità diretta tra numero di acquisizione dei dati e ricostruzioni ottenute.
- Le ricostruzioni ottenute elaborando i dati acquisiti con dispositivo Polo-Polo in linea, sono correlabili con le ricostruzioni ottenute con dati acquisiti con dispositivo Dipolo-

Dipolo; pertanto, considerando le difficoltà logistiche relative al posizionamento dei due poli remoti, è preferibile utilizzare per l'acquisizione dei dati in campagna, il dispositivo Dipolo-Dipolo.

- Quando sono presenti nel sottosuolo diverse strutture a varie profondità, sovrapposte tra loro e di diverse dimensioni, e non è possibile realizzare un campionamento fitto dei dati, è preferibile utilizzare in luogo del dispositivo Dipolo-Dipolo il Wenner-Schlumberger in quanto questo dispositivo risulta essere meno sensibile alla variazione della copertura areale di misure (secondo modello sintetico).

I risultati raggiunti attraverso l'analisi dei modelli sintetici sono stati verificati anche con dati reali. Infatti, grazie alla collaborazione con il Laboratorio mobile di archeogeofisica, del *Centro Regionale di Competenza per lo Sviluppo ed il Trasferimento dell'Innovazione Applicata ai Beni Culturali e Ambientali* (Innova), è stato possibile realizzare diverse campagne di acquisizione.

Sono state affrontate sia problematiche di tipo archeologico che ambientale.

I risultati, dettagliatamente descritti nel quinto capitolo, hanno consentito di ottenere delle chiare ricostruzioni tridimensionali del sottosuolo attraverso una acquisizione di dati, con dispositivo Dipolo-Dipolo Assiale, lungo una sola direzione e con distanza tra i vari profili confrontabile con il passo di campionatura scelto.

Sono state confrontate, tra l'altro, anche diverse modalità con le quali ottenere le varie sequenze di acquisizioni. Il confronto tra le sequenze ricostruite attraverso il programma Seq 3D (con il quale è possibile definire delle acquisizioni facendo variare le posizioni degli elettrodi anche lungo le diagonali della maglia di misure) e quelle ottenute mediante l'utilizzo del programma Electre III (con il quale si ricostruiscono sequenze in cui la posizione dei vari elettrodi varia solo lungo i profili), hanno consentito di confermare che le acquisizioni lungo le diagonali non forniscono, nei casi

esaminati, dei contributi significativi ai fini delle ricostruzioni 3D del sottosuolo investigato (figg. 5.4 e 5.5).

In tutte le ricostruzioni elaborate con dati reali, dal confronto eseguito tra le ricostruzioni 3D e quelle pseudo 3D, si evince che le ricostruzioni pseudo 3D non permettono una buona ricostruzione del sottosuolo nel caso in cui le strutture da analizzare risultino essere piuttosto complesse. Infatti, nel caso in cui bisogna individuare delle strutture allungate rispetto ad una direzione, è possibile ottenere una buona ricostruzione anche attraverso ricostruzioni pseudo 3D (figg. 5.6 e 5.7). Quando invece, bisogna definire delle strutture di tipo diverso in cui la forma è ben definita nelle tre direzioni dello spazio, è necessario elaborare delle ricostruzioni 3D (figg. 5.9 e 5.15 - 5.16). Le ricostruzioni 3DX nelle zone di discarica, hanno consentito di delimitare dettagliatamente il limite tra il corpo di rifiuti e l'effetto dovuto alla presenza del telo (figg. 5.18 - 5.19 - 5.20). Il confronto con i dati di caricabilità, ha consentito di confermare che il percolato risulta essere circoscritto all'interno del corpo di discarica. È possibile infatti, osservare che i valori di caricabilità tendono ad assumere valori sempre più bassi procedendo verso il basso. I valori alti di caricabilità sono associati alla presenza di materiale di origine organica o a solfuri.

Le ricostruzioni elaborate, consentono di affermare che il telo, posto al di sotto del corpo dei rifiuti, risulta essere ancora integro.

## BIBLIOGRAFIA

**APPUNTI DEL CORSO DI AGGIORNAMENTO STS** *organizzato dall'Ordine degli ingegneri di Salerno (2004-2005).*

**BIBBY AND HOHMANN** – *Three-dimensional interpretation of multiple-source Bipole-Dipole resistivity data using the apparent resistivity tensor*, in **Geophysical Prospecting**, vol. 41, 1993

**BING AND GREENHALGH** – *Finite element three-dimensional direct current resistivity modelling: accuracy and efficiency consideration*, in **Geophysical Journal Int**, 2001

**BORIS AND MERRIAM** – *Azimuthal Resistivity to Characterize fractures in a glacial till*

**CANDANSAYAR AND BASOKUR** – *Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey*, in **Geophysical Prospecting**, vol. 49, 2001

**CARRARA, RAPOLLA E ROBERTI** – *Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici*. Ed. **Liquori**, 1992.

**COLLINS, BROWN ET AL** – *A new survey design for 3D IP inverting modelling at Copper Hill*

**DAHLIN** – *A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode array*, **Symposium di Geofisica Applicata**, Copyright, 1997

**DAHLIN** – *Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi electrode array*, in **Geophysical Prospecting**, vol. 48, 2000

**DAHLIN AND LOKE** – *Quasi 3D resistivity imaging-mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques*, 3° Meeting di Environmental and Engineering Geophysics, September 1997.

**DARBOUX-AFOUDAA AND LOUIS** – *Contribution des mesures de l'anisotropie électrique à la recherche des aquifères de fracture en milieu cristallin au Bénin*, in **Geophysical Prospecting**, vol. 37, 1989

**DAS AND PARASNIS** – *Resistivity and induced polarization responses of arbitrarily shaped 3D bodies in a two-layered earth*, in **Geophysical Prospecting**, vol. 35, 1987

**DEY AND MORRISON** – *An analysis of the Bipole-Dipole method of resistivity surveying*, in **Geothermics**, 1997

**ELLIS, R. G., AND OLDENBURG, D. W., 1994a** - *The pole-pole 3-D DC resistivity inverse problem: A conjugate-gradient approach* - in **Geophys. J. Internat.**, 119, 187-194.

- Estella A. Atekwana, et Al.** -*In-situ apparent conductivity measurements and microbial population distribution at a hydrocarbon-contaminated site*, in **Geophysics**, **69**, N° **1**, **56-63**, **2004**
- FINOTTI, ILLICETO ET AL.** - *Capacità risolutive di differenti dispositivi elettrodici nell'ambito del sistema ERS (electrical resistivity system) sperimentazione su modelli ridotti* - **Ann. Museo civico di Rovereto**, vol. **16**, **2000**.
- FURNESS** - *Gradient array profiles over thin resistive veins*, in **Geophysical Prospecting**, vol. **41**, **1993**.
- GASULLA AD YARDANA** - *2D and 3D subsurface resistivity imaging using a constrained least-squares algorithm*
- GILBERT ET ALII** - *Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: Application to self-potential profiles*, in **Geophysical research letters**, vol. **28**, **2001**.
- JACKSON, EARL AND REECE** - *3D resistivity inversion using 2D measurements of the electric field*, in **Geophysical Prospecting**, vol. **49**, **2001**
- KONSTANTIN V. TITOV ET AL** - *Combined application of surface geoelectrical methods for groundwater-flow modeling: A case history*, in **Geophysics**, **70**, N° **5**, **H21-H31**, **2005**
- LABRECQUE, D. J.**, 1991 - *IP tomography* - in **61st Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts**, **413-416**.
- LABRECQUE, D. J., AND MORELLI, G.**, 1996 - *3-D electrical resistivity tomography for environmental monitoring* - **Symp. on Appl. Geophys. to Engin. and Environ. Problems, Proceedings**.
- Lee D. Slater, Jaeyoung Choi, and Yuxin Wu** - *Electrical properties of iron-sand columns: Implications for induced polarization investigation and performance* - in **Geophysics**, **70**, N° **4**, **G87-G94**, **2005**
- LI AND OLDENBURG** -*approximate inverse mappings in dc resistivity problems-* in **Geophys. J. Int.**, **1992**
- LI, Y., AND OLDENBURG, D.W.**, 1994 - *Inversion of 3-D DC resistivity data using an approximate inverse mapping* - in **Geophys. J. Internat.**, **116**, **527-537**.
- LOKE AND BARKER** - *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*, in **Geophysical Prospecting**, vol. **44**, **1996**

**LOKE AND BARKER** – *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*, in **Geophysical Prospecting**, vol. 44, 1996

**MORRISON, H. F.**, 1979 - *Resistivity modelling for arbitrarily shaped three-dimensional structures* – in **Geophysics**, 44, 753–780.

**MUTTON, A. J.**, 1997 - *The application of geophysics during evaluation of the Century zinc deposit* – in **4th Decennial Internat. Conf. Min. Expl., Proceedings**, 599–614.

**OLDENBURG, D. W., AND LI, Y.**, 1994 - *Inversion of induced polarization data* - in **Geophysics**, 59, 1327-1341.

**OLDENBURG, D. W., LI, Y., AND ELLIS, R. G.**, 1997 - *Inversion of geophysical data over a copper-gold porphyry deposit: A case history for Mt. Milligan* - in **Geophysics**, 62, 1419–1431.

**OLDENBURG, D. W., MCGILLIVARY, P. R., AND ELLIS, R. G.**, 1993 - *Generalized subspace method for large scale inverse problems* - in **Geophys. J. Internat.**, 114, 12–20.

**OLDENBURG, D.W., AND ELLIS, R. G.**, 1991 - *Inversion of geophysical data using an approximate inverse mapping* – in **Geophys. J. Internat.**, 105, 325–353.

**PARK, S. K., AND VAN, G. P.**, 1991 - *Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes* – in **Geophysics**, 56, 951–960.

**PATELLA** – *Self-potential global tomography including topographic effects*, in **Geophysical prospecting**, vol. 45, 1997

**RECELLI-SNYDES, STAHL** – *A method for identifying potential Collapse and other Karst features Near Roadways*, in **Scienze Applications International Corporation, Pennsylvania**

**RELAZIONE GEOLOGICA** allegata al progetto: Adeguamento impianto ed attrezzature per smaltimento rifiuti urbani del dott. Eugenio Guglielmotti.

**RIJO** – *Modelling of electric and electromagnetic data*, in **UMI**, 1977.

**SAILHAC ET AL II** – *Analytic potentials for the forward and inverse modelling of SP anomalies caused by subsurface fluid flow*, in **Geophysical research letters**, vol. 0, 2001.

**SASAKI, Y.**, 1994 - *3-D resistivity inversion using the finite-element method* – in **Geophysics**, 59, 1839–1848.

**SEICHTER,FRANGOS WELLER**-*Three-dimensional inversion of induce polarization data from simulate waste-* in **Journal of Applied Geophysics**, vol. 41

SEIGEL, H. O., 1959 - *Mathematical formulation and type curves for induced polarization* - in *Geophysics*, 24, 547-565.

SHARMA - *Environmental and engineering geophysics*. Ed. Cambridge, 1997.

SPITZER AND KUMPEL - *3D FD resistivity modelling and sensitivity analyses applied to a highly resistive phonolitic body* -in *Geophysical Prospecting*, vol. 45, 1997

SPITZER AND LI -*Three-dimensional DC resistivity forward modelling using finite elements in comparison with finite-difference solutions-* in *Geophys. J. Int*, 2002

SPITZER AND WURMSTICH -*Speed and Accuracy in 3D resistivity modelin-*

STALEY H.WARD - *Resistivity and Induced Polarization methods*

ZHANG, J., MACKIE, R. D., AND MADDEN, T. R., 1995 - *3-D resistivity forward modelling and inversion using conjugate gradients-* in *Geophysics*, 60, 1313-1325.

**BIBLIOGRAFIA relativa alla ricostruzione della Casa di Marco Fabio Rufo a Pompei a cura del dott. Mario Grimaldi**

Barbet 1985 . . . . . A. BARBET, *La peinture murale romaine. Les stiles décoratifs pompéiens*, Paris 1985

Bragantini 1997a . . . . . I. BRAGANTINI, VII, 16 (*Ins. Occ.*), 22. *Casa di M. Fabius Rufus*, in: PPM VII, Roma 1997, pp. 947-1125

Brunn 1991 . . . . . CHR. BRUNN, "*Fistulae aquariae*" di Roma e dell'Italia centrale, in: Rendiconti Pontificia Accademia romana di Archeologia 64, 1991-1992, pp. 235-249

Castrén 1975 . . . . . P. CASTRÉN, *Ordo Populusque Pompeianus. Polity and Society in Roman Pompeii*, Roma 1975

Cerulli Irelli 1981 . . . . . G. CERULLI IRELLI, *Le case di M. Fabio Rufo e di C. Giulio Polibio*, in: Pompei 1748-1980. I tempi della documentazione (Mostra Roma - Pompei, luglio - ottobre 1981), Roma 1981, pp. 22-33

Chiaramonte Treré 1986 . . . . . C. CHIARAMONTE TRERÉ, *Nuovi contributi sulle fortificazioni pompeiane* (Quaderni di ACME, 6), Milano 1986

Coarelli 2000 . . . . . F. COARELLI, *Pompei: il Foro, le elezioni, le circoscrizioni elettorali*, in:

Annali dell'Istituto Universitario Orientale di Napoli, Dipartimento di Studi del Mondo Classico e del Mediterraneo antico, Sezione di Archeologia e Storia Antica VII, 2000, pp. 87-111

Coarelli 2002 . . . . . F. COARELLI (a cura di), *Pompei. La vita ritrovata*, Udine 2002

Coralini 2003 . . . . . A. CORALINI, *Hercules domesticus*, Roma 2003

d'Ambrosio 1993 . . . . . A. D'AMBROSIO, in: L. Franchi dell'Orto, A. Varone (a cura di), *Riscoprire Pompei* (Catalogo Mostra Roma 13 novembre 1993 - 12 febbraio 1994), Roma 1993, pp. 304-311, cat. nn.232-233

De Caro 1979 . . . . . S. DE CARO, *Attività a Pompei*, in: *Cronache Pompeiane V*, 1979, pp.174-179

De Caro 1985 . . . . . S. DE CARO, *Nuove indagini sulle fortificazioni di Pompei*, in: *Annali dell'Istituto Universitario Orientale di Napoli, Dipartimento di Studi del Mondo Classico e del Mediterraneo antico, Sezione di Archeologia e Storia Antica VII*, 1985, pp. 75-114, figg. 1-28

De Caro 1992 . . . . . S. DE CARO, *L'urbanistica della città*, in: F. Zevi (a cura di), *Pompei*, vol. II, Napoli 1992, pp. 11-38

De Caro 1994 . . . . . S. DE CARO, *Il Museo Archeologico Nazionale di Napoli*, Napoli 1994

De Carolis 1997a . . . . . E. DE CAROLIS, *Scena di paesaggio*, in: *Pompeii - Picta Fragmenta* (Catalogo della Mostra), Torino 1997, scheda n. 55 p. 105, (II ed. Tokyo 1997)

Elia 1962 . . . . . O. Elia, *Lo stibadio dionisiaco in pittura pompeiana*, in *Römische Mitteilungen*, 63, 1962, pp. 118-127

Eschebach 1979 . . . . . H. ESCHEBACH, *Die Gebrauchswasserversorgung des antiken Pompeji*, in: *Antike Welt* 10, 1979, pp.3-24

- Eschebach 1993 . . . . . L. ESCHEBACH, *Gebäudeverzeichnis und Stadtplan der antiken Stadt Pompeji*, Köln-Böhlau 1993
- Esposito 1999 . . . . . D. ESPOSITO, *La Bottega dei Vettii: vecchi dati e nuove acquisizioni*, in: *Rivista di Studi Pompeiani X*, 1999, pp. 23-61
- Esposito 2004 . . . . . D. ESPOSITO, *Un curioso esempio di II stile nella Casa di C. Iulius Polybius*, in: *Rivista di Studi Pompeiani XV*, 2004, pp. 51-61
- Fiorelli 1860 . . . . . G. FIORELLI, *Pompeianarum Antiquitatum Historiae nunc primum collegit indicibusque instruxit*, Napoli 1860-1864
- Fiorelli 1875 . . . . . G. FIORELLI, *Descrizione di Pompei*, Napoli 1875 (ristampa Napoli 2001)
- Franchi dell'Orto - Ciarallo - Capaldo 1993 . L. FRANCHI DELL'ORTO - A. CIARALLO - L. CAPALDO, in: L. Franchi dell'Orto, A. Varone (a cura di), *Riscoprire Pompei (Catalogo Mostra Roma 13 novembre 1993 - 12 febbraio 1994)*, Roma 1993, pp. 315-335, cat. nn. 240-241
- Frölich 1991 . . . . . T. FRÖLICH, *Lararien und Fassadenbilder in den Vesuvstädten. Untersuchungen zur "volkstümlichen" pompeianischen Malerei*, Mainz 1991
- Giordano 1966 . . . . . C. GIORDANO, *Le iscrizioni della casa di M. Fabio Rufo*, in: *Rendiconti della Accademia di Archeologia, Lettere e Belle Arti in Napoli* 41, 1966, pp. 73-89
- Giordano 1982 . . . . . C. GIORDANO, *Poppea e Nerone tra Oplonti e Pompei*, in: *Sylva Mala* 3, 1982, pp.2-8
- Guidobaldi - Olevano - Trucchi 1994 . . F. GUIDOBALDI - F. OLEVANO - D. TRUCCHI, *Classificazione preliminare dei Sectilia Pavimenta di Pompei*, in: *Actas VI Colloquio internacional sobre el mosaico antiguo*, Valencia - Mérida 1990, Guadalajara 1994, pp. 49-61
- Guidobaldi - Olevano 1998 . . . . . F. GUIDOBALDI - F. OLEVANO, *Sectilia pavimenta dell'area vesuviana*, in: P. Pensabene (a cura di), *Marmi antichi II. Cave, tecnica di lavorazione provenienze e distribuzione (Studi Miscellanei 31)*, Roma 1998, pp.223-240, tavv.1-18

- Guidobaldi 1994 . . . . . F. GUIDOBALDI, *Sectilia pavimenta: la produzione più antica in materiali non marmorei o fittili*, in: R. Farioli (a cura di), Atti I° Colloquio AISCOM (Ravenna 1993), Ravenna 1994, pp.451-471
- Guzzo 2003 . . . . . P.G. GUZZO, *Pompei, Ercolano, Stabiae, Oplontis, Le città sepolte dal Vesuvio / The cities buried by Vesuvius*, Napoli 2003, pp.73-79
- Heinrich 2002 . . . . . E. HEINRICH, *Der zweite Stil in pompejianischen Wohnhäusern*, München 2002
- Helbig 1868 . . . . . W. HELBIG, *Wandgemälde der vom Vesuv verschütteten Städte Campaniens*, Leipzig 1868
- Hoffmann 1983 . . . . . A. HOFFMANN, *L'architettura*, in: F. Zevi (a cura di), *Pompei 79*, Napoli 1983, pp. 97-118
- Jashemski 1993 . . . . . W. JASHEMSKI, *The Gardens of Pompeii, Herculaneum and the villas destroyed by Vesuvius*, New Rochelle 1993
- Kockel 1986 . . . . . V. KOCKEL, *Archäologische Funde und Forschungen in den Vesuvstädten II*, in: *Archäologischer Anzeiger* 1986, pp.443-569
- Krischen 1941 . . . . . F. KRISCHEN, *Die hellenistische Kunst in Pompeji, VII. Die Stadtmauern von Pompeii und griechische Festungsbaukunst in Unteritalien und Sizilien*, Berlin 1941
- Leach 1991 . . . . . E.W. LEACH, *The Iconography of the Black Salone of the Casa di Fabio Rufo*, in: *Kölner Jahrbuch für Vor- und Frühgeschichte* 24, 1991, pp.105-112
- Maiuri 1930 . . . . . A. MAIURI, *Studi e ricerche sulle fortificazioni di Pompei*, in: *Monumenti Antichi dei Lincei* XXXIII, 1930, coll. 113-286
- Maiuri 1939 . . . . . A. MAIURI, *Muro della fortificazione*, in: *Notizie degli Scavi di Antichità* 1939, pp. 232-238
- Maiuri 1943 . . . . . A. MAIURI, *Isolamento della cinta murale tra Porta Vesuvio e Porta Ercolano*, in: *Notizie degli Scavi di Antichità* 1943, pp. 275-294

- Maiuri 1951 . . . . . A. MAIURI, *Gli scavi di Pompei nel programma della Cassa per il Mezzogiorno, Ente Provinciale per il Turismo*, Napoli 1951
- Maiuri 1957 = . . . . . A. MAIURI, *Una nuova pittura nilotica a Pompei*, in: *Atti dell'Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di scienze morali, storiche e filologiche. Memorie s.8, 7, 1957*, pp.65-80
- Maiuri 1958 . . . . . A. MAIURI, *Navalia pompeiana*, in: *Rendiconti della Accademia di Archeologia, Lettere e Belle Arti in Napoli*, n.s. XXXIII, 1958, pp.7-34
- Maiuri 1959 . . . . . A. MAIURI, *Portali con capitelli cubici a Pompei*, in: *Rendiconti della Accademia di Archeologia, Lettere e Belle Arti in Napoli XXXIII*, 1959, pp. 203-218
- Maiuri 1960 . . . . . A. MAIURI, *Pompei, sterro dei cumuli e isolamento della cinta murale*, in: *Bollettino d'Arte I-II*, 1960, pp. 166-179
- Maiuri 1961 . . . . . A. MAIURI, *Due pannelli vitrei figurati da Pompei*, in: *Bollettino d'Arte 46*, 1961, pp. 18-23
- MANN . . . . . Museo Archeologico Nazionale di Napoli
- Mastroroberto 1997 . . . . . M. MASTROROBERTO, *La pittura di giardino*, in: *Pompeii - Picta Fragmenta (Catalogo della Mostra)*, Torino 1997, pp.61-62, 83-84, 166-167
- Mastroroberto 1999 . . . . . M. MASTROROBERTO, *Dioniso e Arianna e Parete con pittura di giardino*, in: *Pitture nella reggia dalle città sepolte, Catalogo della Mostra, Palazzo Reale di Portici 12 marzo - 4 luglio 1999, Napoli 1999*, p. 71, 78-79, cat. nn.38, 43
- Pompei, Ercolano, Oplontis (Catalogo della mostra, Napoli 20 marzo - 31 Agosto 2003), Milano 2003, pp. 398 - 420
- Mau 1882 . . . . . A. MAU, *Geschichte der dekorativen Wandmalerei in Pompeji. Herausgegeben von der Redaktion der archäologischen Zeitung*, Berlin 1882

- Mau 1908. . . . . A. MAU, *Pompeji in Leben und Kunst*, Leipzig 1908 (2a ediz.)
- Mazois 1824 . . . . . F. MAZOIS, *Les Ruines de Pompéi*, Paris 1824.
- Mazzoleni - Pappalardo 2004 . . . . . D. MAZZOLENI - U. PAPPALARDO, *Domus. Pittura e architettura d'illusione nella casa romana*, Verona 2004
- Moormann - Peters 1995 . . . . . E.M. MOORMANN - W.J.T PETERS, *I pittori della Casa di Marcus Lucretius Fronto a Pompei. Riflessioni un anno dopo*, in: *Mededelingen van het Nederlands Historisch Instituut te Rome* 54, 1995, pp.167-173  
n.66
- Nissen 1877 . . . . . H. NISSEN, *Pompejanischen Studien zur Städtekunde des Altertums*, Leipzig 1877
- Noack - Lehmann Hartleben 1936 = . F. NOACK - K. LEHMANN HARTLEBEN, *Baugeschechtliche Untersuchungen am Stadtrand von Pompeji*, Berlin-Leipzig 1936
- Overbeck - Mau 1884 . . . . . J. Overbeck, A. Mau, *Pompeji in seinen Gebäuden, Alterthümern und Kunstwerken*, Leipzig 1884 (4a ediz.)
- Paderni rist. . . . . C. PADERNI, *Monumenti antichi rinvenuti ne reali scavi di Ercolano e Pompei & c delineati e spiegati da D. Camillo Paderni Romano*, Napoli 2000 (stampa anastatica, trascrizione e note di U. Pannuti)
- PAH . . . . . G. FIORELLI, *Pompeianarum Antiquitatum Historiae nunc primum collegit indicibusque instruxit*, Napoli 1860-1864
- Pagano 1993 . . . . . M. PAGANO, *Su una fistula di piombo dalla casa di M. Fabio Rufo*, in: *Rivista di Studi Pompeiani* VI, 1993-94, p.219
- Peinture de Pompéi . . . . . *La peinture de Pompéi. Témoignages de l'art romain dans la zone enseveile par Vésuve en 79 ap. J.-C.*, I-II, Paris 1993
- Pernice 1938 . . . . . E. PERNICE, *Pavimente und figürlische Mosaiken* (Die hellenistische Kunst in Pompeji,

- VI), Berlin 1938
- Pesando 1997 . . . . . F. PESANDO,  
*"Domus" edilizia privata e società pompeiana fra III e I secolo  
a.C.,*  
Roma 1997
- Phillips 1968 . . . . . K.M. JR PHILLIPS,  
*Perseus and Andromeda*, in: *American Journal of Archaeology*  
72.1, 1968, pp.1-21, tavv.1-20
- Pocchetti 1986 . . . . . P. POCCHETTI, Note  
sulla toponomastica urbana di Pompei preromana, in *Lineamenti  
di storia linguistica della Campania antica*, 1. I dati  
etnotoponomastici, Napoli 1986,  
pp. 39-64
- PPM . . . . . I.  
BALDASSARRE (coordinamento di), *Pompei Pitture e Mosaici*, I-VIII,  
Istituto della  
Enciclopedia Italiana, Roma 1990-1998
- PPM Disegnatori . . . . . AA.VV., La  
documentazione nell'opera di pittori e disegnatori dei secoli XVIII e  
XIX,  
*Pompei Pitture e Mosaici*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma  
1995
- PPP . . . . . I.  
BRAGANTINI, M. DE VOS, F. PARISE BADONI, *Pitture e pavimenti di  
Pompei.*  
*Repertorio delle fotografie del Gabinetto Fotografico Nazionale*,  
Parte I-III, Roma  
1981-1987
- Richardson 1977 . . . . . L.R. RICHARDSON, *The  
Library of Pompeii*, in: *Archaeology* 30.6, 1977, pp.397-399
- Romana Pictura 1998 . . . . . A. DONATI (a cura di),  
*Romana Pictura. La pittura romana dalle origini all'età bizantina*,  
Milano 1998
- Sakai et alii 1994 . . . . . S. Sakai - Y. Niwa  
- V. Iorio - T. Yokoyama - H. Etani, *Archeological investigation  
at Porta Capua, Pompeii - First Season* (September - December, 1993),  
in: *Opuscula*

- Pompeiiana IV, 1994, pp.25-62, tavv.I-X
- Salvi 1991 . . . . . S. SALVI (a cura di), *Il giardino dipinto nella Casa del Bracciale d'oro a Pompei e il suo restauro*, Firenze 1991
- Sampaolo 1989 . . . . . V. SAMPAOLO, *Le pitture*, in: *Le Collezioni del Museo Nazionale di Napoli*, vol. I, Roma 1989, pp.38-75 e 124-173
- Sampaolo 1995 . . . . . V. SAMPAOLO, *I decoratori del tempio di Iside a Pompei*, in: *Mededelingen van het Nederlands Historisch Instituut te Rome* 54, 1995, pp.200-213
- Sampaolo 1996a . . . . . V. SAMPAOLO, VI, 17 *Ins. Occ. 41*, in: *Pompei Pitture e Mosaici VI*, Roma 1996, pp.10-43
- Sampaolo 1998 . . . . . V. SAMPAOLO, *Candelabro vegetale* in: A. DONATI (a cura di), *Romana Pictura. La pittura romana dalle origini all'età bizantina*, Milano 1998, p. 276, cat. n. 21
- SAP . . . . . Soprintendenza Archeologica di Pompei
- Schefold 1957 . . . . . K. SCHEFOLD, *Die Wände Pompejis. Topographisches Verzeichnis der Bildmotive*, Berlin 1957
- Schmaltz 1989 . . . . . B. SCHMALTZ, *Andromeda. Ein campanisches Wandbild*, in: *Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts* 104, 1989, pp.259-281
- Seiler 2001 . . . . . F. SEILER, Karl Lehmann-Hartleben e la "nuova" ricerca su Pompei, in: P.G. Guzzo (a cura di), *Pompei. scienza e società*, Convegno Internazionale, Napoli 25-27 novembre 1998, Napoli 2001, pp.63-71
- Settis 2002 . . . . . S. SETTIS - F. DONATI, *La pareti ingannevoli. La Villa di Livia e la pittura di giardino*, Milano 2002
- Sgobbo 1938 . . . . . I. SGOBBO, *Un complesso di edifici sannitici e i quartieri di Pompei per la prima volta*

*riconosciuti*, in: Rendiconti della Accademia di Archeologia, Lettere e Belle Arti in  
 Napoli XVI, 1938, pp.5-29  
 Sichtermann 1974 . . . . . H. SICHTERMANN,  
*Gemalte Gärten in pompejanische Zimmern*, in: Antike Welt 5,  
 1974, n.3, pp.41- 51  
 Solin 1975 . . . . . H. SOLIN, *Die Wandinschriften im sog. Haus des M. Fabius Rufus*, in: B. Andreae, H. Kyrieleis (a cura di), *Neue Forschungen in Pompeji (Kolloquium Essen 1974)*,  
 Recklinghausen 1975, pp.243-266  
 Spinazzola 1953 . . . . . V. SPINAZZOLA,  
*Pompei alla luce degli scavi nuovi di Via dell'Abbondanza*, Roma 1953  
 Stewart 1993 . . . . . A. STEWART, *Faces of power. Alexander's image and Hellenistic politics*, Berkeley 1993  
 Strocka 1993 . . . . . V.M. STROCKA,  
*Pompeji VI, 17, 41: ein Haus mit Privatbibliothek*, in: *Römische Mitteilungen* 100, 1993, pp.321-351, tavv.69-75  
 Strocka 1994 . . . . . STROCKA, *Casa del Labirinto (VI 11, 8-10)*, München 1991 van Buren 1925 . . . . .  
 . . . . . A.W. VAN BUREN, *Further Studies in Pompeian Archaeology, III, The original Porta Marina and the adjacent portion of the City wall*, in: *Memoirs of American Academy in Rome* V, 1925, pp.3-4, tav.58  
 Vanacore 2003 . S. VANACORE, *La Casa del Bracciale: appunti di restauro*, in: A. d'Ambrosio, P.G. Guzzo, M. Mastroberto (a cura di), *Storie da un'eruzione. Pompei, Ercolano, Oplontis (Catalogo della mostra, Napoli 20 marzo - 31 Agosto 2003)*, Milano 2003, pp.534-536  
 Varone 1988 . . . . . A. VARONE, *Notiziario*, in: *Rivista di Studi Pompeiani* 2, 1988, pp. 143-154  
 Zevi 1991 . . . . . F. ZEVI, *Il terremoto del 62 e l'edilizia privata pompeiana*, in: F. Zevi (a cura di), *Pompei II*, Napoli 1991, pp.39-58  
 Zevi 1996 . . . . . F. ZEVI, *Pompei. Dalla città sannitica alla colonia sillana: per una interpretazione*

*dei dati archeologici, in Les élites municipales de l'Italie péninsulaire, dès Gracques à Néron (Actes de la table ronde internationale de Clermont-Ferrand 1991), Naples-Rome 1996, pp. 125-138*