

# Metodologie indirette per la conoscenza della struttura del sottosuolo: applicazioni all'area del Mausoleo di Cecilia Metella

## *Subsoil investigation by indirect methods in the Cecilia Metella archeological site*

C. CESI\*, V. EULILLI\*, F. FERRI\*

**RIASSUNTO** - E' noto che il sottosuolo della città di Roma è caratterizzato dall'esistenza di numerose cavità e vuoti sotterranei riconducibili principalmente alle cave di coltivazione di materiali. Vuoti e cavità sotterranei possono produrre fenomeni di crollo e di subsidenza; è quindi importante avere un' adeguata conoscenza della loro ubicazione e profondità per un corretta pianificazione del territorio.

Viene qui presentato uno studio, eseguito in collaborazione con la Sovrintendenza Archeologica di Roma, ed effettuato con metodologie geofisiche integrate nell'area del "Complesso Monumentale di Cecilia Metella- Castello Caetani", sito lungo la Via Appia Antica (tra il secondo ed il terzo miglio). Sono stati eseguiti un rilievo geoelettrico con differenti arrays ed un rilievo microgravimetrico.

Quattro profili elettrici, predisposti con 128 elettrodi ed una spaziatura interelettrodica di 0.5 e 1 metro, sono stati allineati lungo i lati esterni del Mausoleo e del Castrum, effettuando misure di resistività e di polarizzazione indotta con dispositivi Wenner e dipolo-dipolo.

Oltre ad identificare alcune anomalie resistive in corrispondenza di vuoti e tunnel ipogei incontrati in sondaggio ed in alcuni casi direttamente ispezionati, i modelli di inversione hanno suggerito l'esistenza di ulteriori vuoti nell'immediato sottosuolo.

L'analisi combinata dei risultati delle indagini geoelettriche e di quelli derivanti dall'interpretazione di un profilo microgravimetrico passante sulla stessa traccia di uno dei profili elettrici ha permesso di attribuire le anomalie resistive, ubicate rispettivamente allo spigolo settentrionale del Mausoleo ed al limite tra lo stesso Mausoleo ed il Castrum, alla disomogeneità nell'assetto del sottosuolo ed in particolare alle stesse fondamenta del Mausoleo.

**PAROLE CHIAVE:** geofisica, microgravimetria, geoelettrica

**ABSTRACT** - Rome is well-known for being full of cavities and underground voids, which are mainly referred to quarries of pozzolanic materials; it is therefore important to have a suitable knowledge of their location and depth in order to prevent surface instability phenomena and a correct land use planning. In this framework, the employment of indirect methodologies can provide a contribute to the geologic knowledge of the subsurface.

We present an example of a study carried out in cooperation with the Archaeological Suprintendence of Rome with integrated geophysical methodologies in the "Cecilia Metella - Castello Caetani Monumental Complex" area, located along the Appia Antica Road (between the second and the third mile). Various methodologies and devices were applied, in particular multielectrode geoelectric survey with different arrays and a microgravimetric survey.

Four electric profiles, each with 128 electrodes and 0.5 and 1 metre spacing between adjacent electrodes were arranged along the outer sides of the Mausoleum and the Castrum, measuring both resistivity and chargeability with Wenner and dipole-dipole arrays.

The inversion models identified some resistive anomalies which are located close to a few boreholes which met voids in the subsoil and in proximity of some tunnels directly inspected. They also suggested the existence of other cavities.

The combined analysis of these results and the interpretation of a gravimetric profile on the same trace of one of the electric profiles allowed us to attribute some resistive anomalies to the disomogeneity in the subsoil setting due to the foundations of the building.

**KEY WORDS:** geophysics, microgravity, electric survey

\* APAT - Servizio Geologico d'Italia - Dipartimento Difesa del Suolo, Servizio Geofisica, Via Curtatone n° 3, ROMA

## 1 - INTRODUZIONE

La conoscenza dell'assetto geologico del sottosuolo costituisce uno degli elementi caratterizzanti l'utilizzo in piena sicurezza di un territorio. Vuoti e cavità sotterranei sia antropici che naturali possono produrre fenomeni di crollo e di subsidenza e dunque provocare gravi danneggiamenti se il loro sviluppo avviene nell'immediato sottosuolo in corrispondenza di aree urbanizzate o di infrastrutture. Il censimento e la mappatura delle cavità divengono così un elemento discriminante nella pianificazione del territorio.

La geofisica attraverso le sue tecniche di indagine fornisce un contributo alla prevenzione del rischio ambientale connesso a tali fenomeni, in quanto capace di produrre una descrizione più o meno dettagliata del sottosuolo, anche nelle tre dimensioni, in relazione agli schemi di acquisizione dei dati. La presenza di vuoti, in quanto elementi perturbanti la regolare struttura geologica del sottosuolo, può quindi essere accertata fino a definirne e cartografarne gli andamenti.

Il territorio di Roma risulta notoriamente ricco di cavità ipogee riconducibili principalmente alle cave per la coltivazione di materiale pozzolanico, con tecniche di scavo a camere e pilastri, cui si aggiunge la presenza di cunicoli drenanti e di captazione di sorgenti, cisterne, mitrei, catacombe e aree cimiteriali sotterranee (sovente gli ipogei sono costituiti da ambienti di notevole importanza storico-archeologica).

Le potenzialità di rilevamento delle cavità con metodi indiretti sono influenzate dalle caratteristiche intrinseche dell'oggetto, come il rapporto profondità/dimensioni e contrasto delle proprietà fisiche con il mezzo incassante. Limiti all'applicazione e al potere risolutivo dei metodi geofisici sono imposti, soprattutto in aree urbane, da vari tipi di "rumore ambientale", sia di natura elettromagnetica: cavi interrati, linee elettriche, linee ferroviarie, sia dovuti alle vibrazioni per il traffico intenso, i quali disturbano le misure effettuate con i metodi elettrico, magnetico, elettromagnetico e gravimetrico.

In anni recenti ha trovato applicazione il metodo gravimetrico ad alta risoluzione, in grado di risolvere anomalie di modesta estensione ed intensità. La "microgravimetria" è larga-

mente utilizzata nella individuazione di vuoti ipogei in virtù del forte contrasto di densità esistente tra cavità e terreno. Particolare cura è generalmente dedicata alle correzioni da apportare al valore di gravità misurato in ambito urbano a causa delle perturbazioni dovute ai deficit o incrementi di massa degli edifici ubicati in vicinanza del punto di misura. La progettazione dei rilievi viene eseguita valutando, anche con l'ausilio di modelli teorici, la geometria e la densità delle stazioni di misura, in funzione delle dimensioni e della profondità del target e delle condizioni logistiche dei luoghi.

Anche il metodo geoelettrico è particolarmente idoneo all'individuazione di vuoti ipogei, in quanto il contrasto di resistività atteso è generalmente rilevabile in superficie. Moderne tecniche di misura, completamente automatizzate (sistemi multielettrodi) consentono di ottenere un'alta densità di misure, e quindi una elevata risoluzione delle variazioni delle proprietà elettriche del sottosuolo (tomografie elettriche) in tempi brevi e con costi relativamente bassi. Tali tecnologie consentono anche l'acquisizione contemporanea, oltre che del parametro della resistività elettrica, anche di quello della "caricabilità".

Nell'ambito della ricerca di vuoti ipogei va anche evidenziato il metodo elettromagnetico impulsivo, o georadar, di sempre più ampia diffusione. Tramite un sistema di antenne in superficie per l'invio e la ricezione di impulsi elettromagnetici, si registrano i tempi di andata e ritorno delle onde riflesse da parte di superfici di discontinuità geologiche e da parte di eventuali corpi sepolti. Questo tipo di indagine permette di eseguire rilievi ad alta risoluzione con restituzione grafica in tempo reale di una sezione (tempo-distanza) continua del sottosuolo.

La capacità di penetrazione del segnale è funzione della frequenza del segnale impiegato, con limitazioni nella ricerca di cavità in ambiente urbano per lo più dovute alla riflessione del segnale causata da sottoservizi e più in generale dalle non buone caratteristiche dielettriche dei primi strati di terreno. In particolare nel caso "romano" dove si è in presenza di un reticolo di cavità che si sviluppa prevalentemente a circa 15 - 20 m di profondità e di una coltre superficiale a prevalente composizione argillosa o di alterazione tufacea, la penetrazione del segnale difficilmente consente il raggiungimento del target.





## 2 - IL CASO DI STUDIO DI "CECILIA METELLA"

### 2.1 - LE INDAGINI

L'esempio che si propone è relativo alle indagini effettuate nell'area del complesso monumentale "Mausoleo funerario di Cecilia Metella - Castrum Caetani", ubicato lungo la Via Appia Antica (tra il secondo ed il terzo miglio della strada romana). Lo studio esemplifica anche i vantaggi di un impiego combinato di diverse metodologie e dispositivi. Nel caso specifico: geoelettrica multielettrodoica con diverse configurazioni di acquisizione e prospezione microgravimetrica. L'area oggetto di indagine è situata all'estremità della colata di Capo di Bove, la più importante colata di lava del complesso vulcanico dei Colli Albani. I terreni affioranti più antichi sono rappresentati dai depositi di colata piroclastica emessi durante gli ultimi tre cicli della fase eruttiva del Tuscolano - Artemisio (articolata in quattro cicli). Tra i prodotti riconducibili alla seconda fase eruttiva, detta dell'edificio dei Campi di Annibale, affiorano nell'area studiata:

- le piroclastiti di ricaduta dell'attività centrale, costituite da scorie e lapilli sciolti e incoerenti, ma

a luoghi saldate e litoidi, poggiate di solito sulle piroclastiti emesse durante la prima fase;

- le lave leucititico-augitiche e leucitiche grigioscure, fessurate, intercalate ai prodotti piroclastici.

I terreni più recenti sono costituiti da depositi di copertura sciolti dovuti al trasporto e accumulo di sedimenti da parte delle acque superficiali.

### 2.2 - GEOELETTRICA

La prospezione geoelettrica ha interessato il perimetro esterno del complesso monumentale con lo scopo di accertare la prosecuzione nel sottosuolo di cavità o vuoti già individuati per altre vie e di verificare l'eventuale esistenza di altre cavità o cunicoli, nell'ipotesi che queste, dipartendosi dalle mura perimetrali del Complesso si spingessero verso l'esterno, costituendo in tal modo una sorta di accesso "sotterraneo" al complesso monumentale, oggi completamente mascherato.

Gli stendimenti sono stati in qualche misura limitati dalla presenza di infrastrutture. Ad esempio proprio il tracciato dell'Appia Antica non ha consentito l'investigazione del lato a questa parallelo. Per evidenziare le disomogeneità nelle caratteristiche elettriche del sottosuolo si è fatto ricorso al

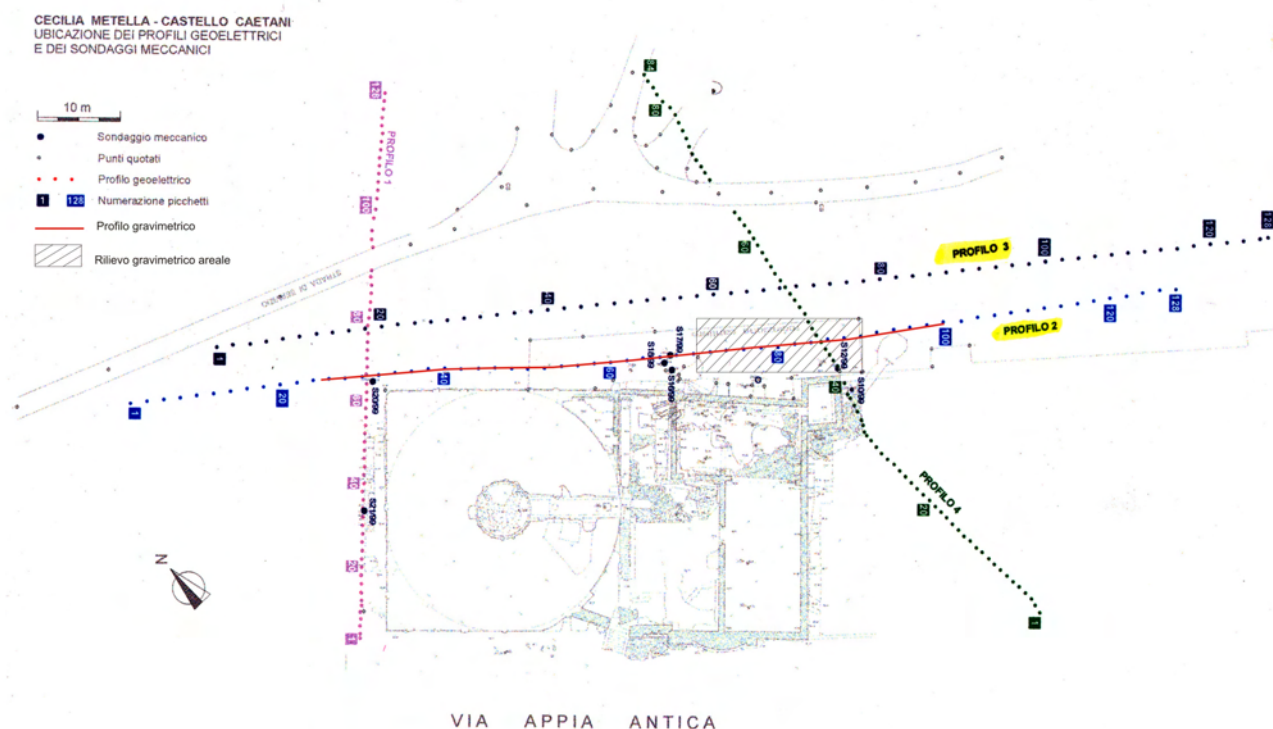


Fig. 1 - Ubicazione delle indagini. - *Surveys location.*

metodo della resistività con dispositivo in configurazione Wenner; in taluni casi ad esso è stato associato il dispositivo dipolo-dipolo. Poiché la strumentazione impiegata consente di acquisire contemporaneamente ai parametri di intensità di corrente e differenza di potenziale anche quelli di polarizzazione indotta, senza comportare un particolare aggravio nei tempi di acquisizione, sono state acquisite anche misure di caricabilità per valutare il loro contributo nella ricostruzione del modello del sottosuolo.

I rilievi sono stati eseguiti con un apparato in grado di operare con la tecnica dell' "electrical imaging" (SYSCAL R2), allineando sul terreno fino a 128 elettrodi gestiti in automatico. Per ciascun profilo migliaia di misure di resistività apparente a vari livelli di profondità, associate a misure di caricabilità, consentono la ricostruzione di una immagine tomografica dell'andamento dei vari parametri lungo il piano verticale passante per il profilo, generando una sezione in termini di "pseudo-profondità".

Le misure sono state realizzate lungo quattro profili (fig 1), progettati anche in funzione della posizione di precedenti fori di sondaggio in modo di avere una taratura delle misure; i profili sono risultati in parte condizionati da una non completa agibilità dei luoghi. L'intersezione tra i profili si è potuta realizzare in due sole zone risultando in tal modo limitato il controllo tridimensionale delle anomalie. Le indagini sono state effettuate in due fasi, calibrando la seconda sui risultati della prima. I primi due profili (n.1 e 2 in fig 1) sono ubicati a

ridosso del mausoleo di Cecilia Metella, il primo perpendicolarmente alla Via Appia Antica, il secondo parallelo alle mura del Castrum Caetani. Gli altri due profili (n. 3 e 4) sono, l'uno parallelo al n.2 ma più distante dalle mura del Castrum Caetani e l'altro orientato N-S, tangente lo spigolo orientale del Castrum. I profili 2 e 4 sono stati eseguiti utilizzando sia la configurazione Wenner sia quella dipolo-dipolo. La distanza interelettroda è mantenuta pari a 1 m, eccetto che per il prof. 1 dove l'equidistanza tra i picchetti è di 0,5 m. Ai fini della correzione dei dati, nonché del posizionamento in mappa dei profili e della loro referenziazione rispetto all'edificio, è stato effettuato un rilevamento plano-altimetrico con Stazione Totale.

In fase di analisi ed interpretazione delle misure si è dato maggior peso ai dati di resistività in quanto tale parametro ha fornito maggiori informazioni; va osservato infatti come i dati di resistività presentino una escursione di valori che essendo più ampia rispetto alla caricabilità fornisce una rappresentazione più chiara ed articolata rispetto a quella prodotta dalle variazioni di polarizzazione, agevolando l'analisi qualitativa e l'interpretazione della distribuzione spaziale della resistività. Per una valutazione qualitativa della correlazione tra i risultati della resistività e quelli di polarizzazione, atteso che per una cavità si sia in presenza di elevate resistività e polarizzazione tendente a zero, si è proceduto alla ricostruzione di un modello semplificato del sottosuolo, simulando l'esistenza di un corpo resistivo ed al tempo stesso non polarizzabile situato a piccola profondità. La modellizzazione

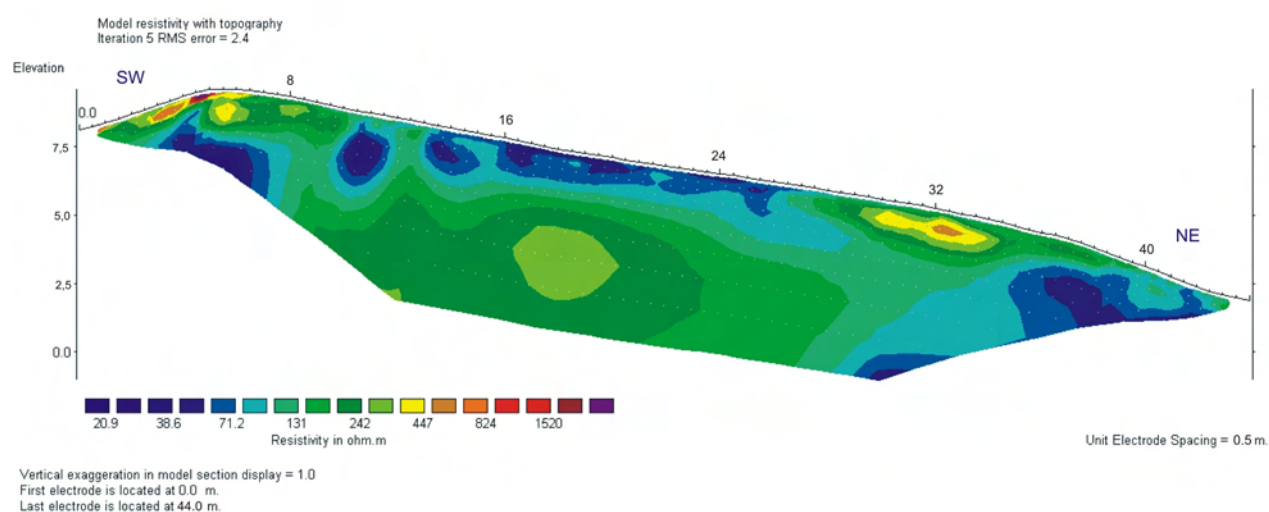


Fig. 2 - Inversione tomografica del Profilo 1 (resistività).  
- Tomographic inversion of Profile 1 (resistivity).





diretta ha prodotto delle pseudo-sezioni di resistività e caricabilità che approssimano sufficientemente quelle ottenute sperimentalmente.

Le pseudosezioni sono state sottoposte ad un processo di inversione dei dati con un software (LOKE, 1998) che utilizza come procedimento di calcolo un metodo deconvolutivo ai minimi quadrati, ottenendo così per i quattro profili una distribuzione effettiva delle resistività (o delle caricabilità) nel sottosuolo. La conoscenza abbastanza dettagliata della geologia locale, ricostruita anche grazie ai sondaggi "archeologici", ha guidato l'interpretazione dei risultati.

Ai dati, come già accennato, è stata apportata la correzione topografica, necessaria poiché i punti di misura lungo le tracce dei profili erano posti a quote diverse.

Nel *Profilo 1* (fig. 2), oltre alle due anomalie sub-superficiali poste in corrispondenza della progressiva 5,5 metri e dello spigolo del mausoleo (progr. 32 metri), è ben individuata e circoscritta l'anomalia resistiva ubicata alla progr. 18 m, a circa 5 metri di profondità dal p.c. Questa posizione coincide approssimativamente con quella della cavità incontrata dal sondaggio S21/99 tra 5,30 e 7 metri di profondità. Anche in corrispondenza dell'anomalia alla progressiva 5,5 metri l'inversione sembra indicare l'esistenza di un vuoto a piccola profondità.

Sul modello di caricabilità, in corrispondenza della anomalia resistiva principale descritta, si evidenzia (fig. 3) la presenza di un minimo relativo, sovrastato da due piccole configurazioni di massimo.

Nel *Profilo 2*, relativamente alla resistività misurata con dispositivo Wenner (fig. 4), l'inversione

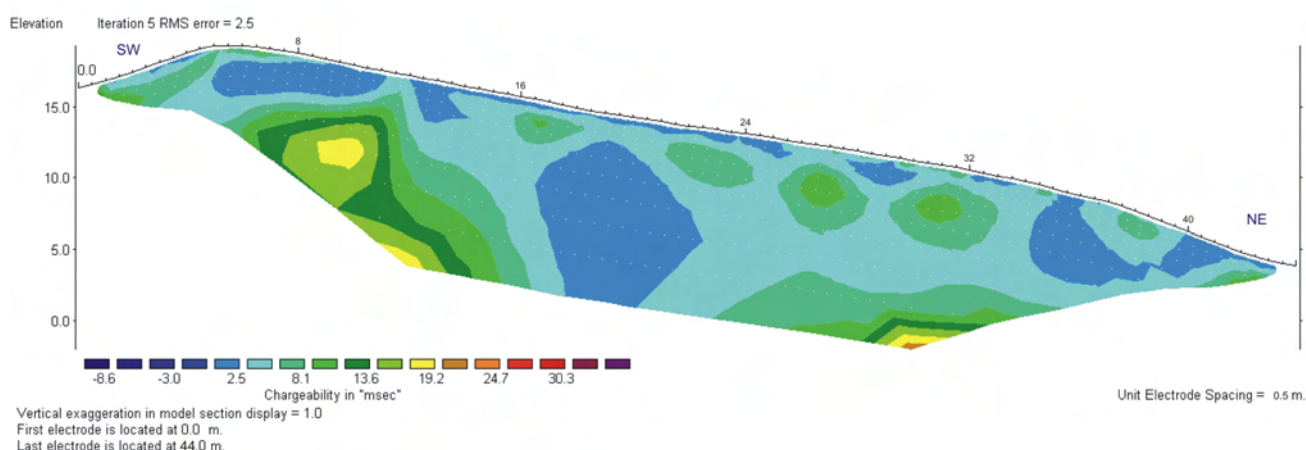


Fig. 3 - Inversione tomografica del Profilo 1 (caricabilità).  
- *Tomographic inversion of Profile 1 (chargeability).*

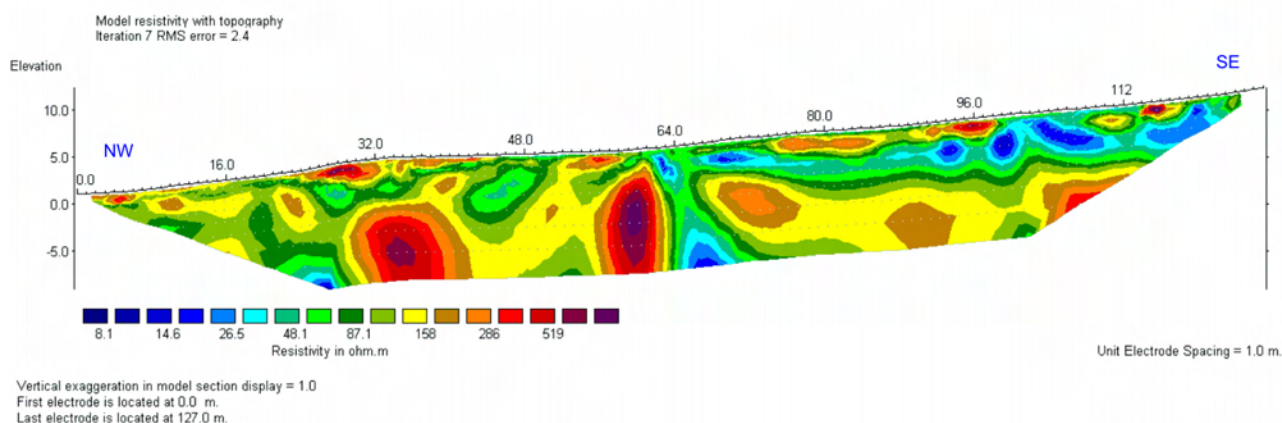


Fig. 4 - Inversione tomografica del Profilo 2 (resistività). Dispositivo Wenner.  
- *Tomographic inversion of Profile 2 (resistivity). Wenner array.*

tomografica identifica nettamente, nella porzione NW del profilo, due intense anomalie resistive: la prima alla progressiva 34 metri, in prossimità dello spigolo settentrionale del Mausoleo, a circa 8-9 metri dal p.c.; la seconda alla progr. 60 metri, a una

profondità di circa 7 metri, in corrispondenza della giunzione tra il corpo del Mausoleo e le mura del Castrum Caetani. Più regolare diventa l'andamento della resistività nella porzione SE del profilo, dove la successione stratigrafica incontrata in son-

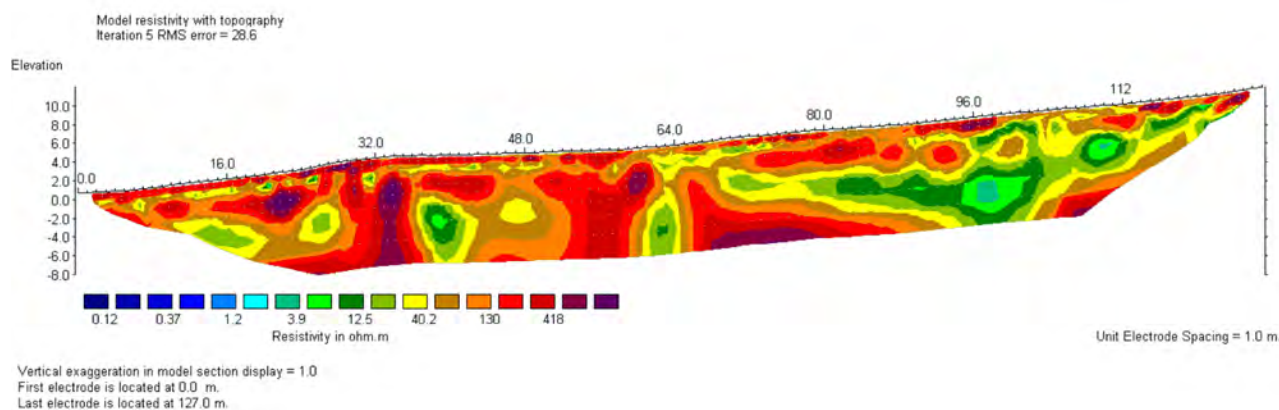


Fig. 5 - Inversione tomografica del Profilo 2 (resistività). Dispositivo dipolo-dipolo.  
- *Tomographic inversion of Profile 2 (resistivity). Dipole-dipole array.*

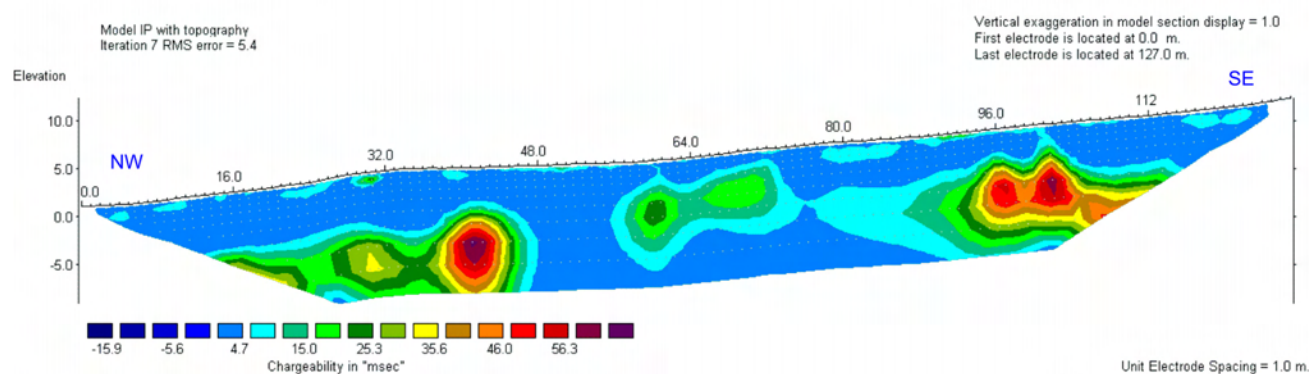


Fig. 6 - Inversione tomografica del Profilo 2 (caricabilità). Dispositivo dipolo-dipolo.  
- *Tomographic inversion of Profile 2 (chargeability). Dipole - dipole array.*

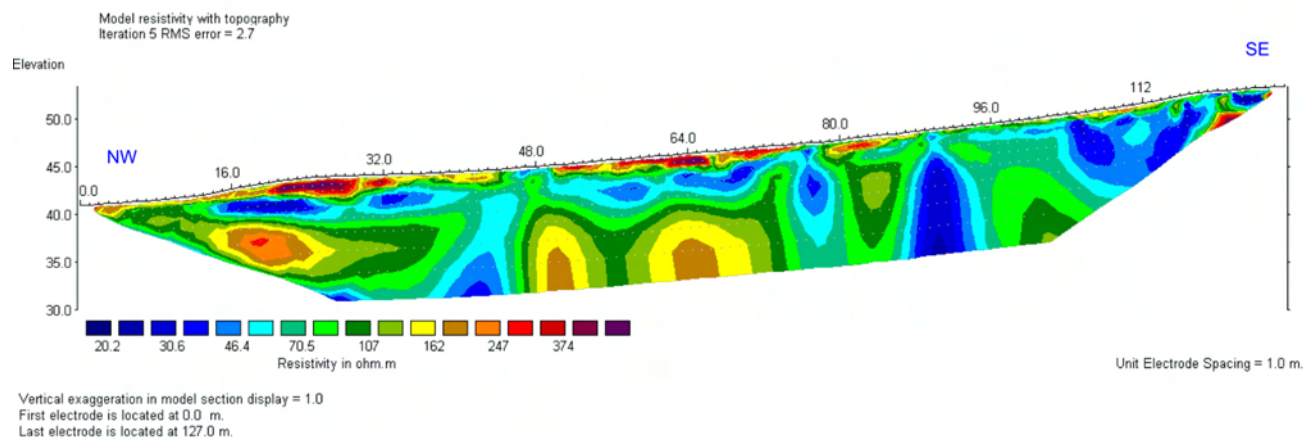


Fig. 7 - Inversione tomografica del Profilo 3 (resistività). Dispositivo Wenner.  
- *Tomographic inversion of Profile 3 (resistivity). Wenner array.*





daggio trova ottima corrispondenza nell'andamento delle resistività. In tale area si riconosce una banda a più alta resistività in cui si individuano tre nuclei di massimo. Uno si colloca alla progr. 70 metri quasi in corrispondenza delle piccole cavità intercettate dai sondaggi S16/99, S17/99, S18/99; quello ubicato alla progressiva 92 metri trova corrispondenza con la posizione della cavità ispezionata direttamente, sebbene ad una profondità leggermente maggiore. Il modello della distribuzione della resistività ottenuto dal dispositivo dipolo-dipolo è illustrato in fig. 5. Le tre anomalie resistive evidenziate in precedenza con il metodo Wenner trovano qui ulteriore conferma. Per quanto concerne la ricostruzione del modello di carica-bilità, nella (fig. 6) si nota la presenza di tre configurazioni anomale composte da coppie di massimi

molto ravvicinati che si dispongono in corrispondenza dei margini esterni delle anomalie di resistività. Tale risultato è compatibile con l'esistenza di una certa filtrazione di fluidi a livello delle pareti delle eventuali cavità.

Nel *Profilo 3* (fig. 7), più distante dalle mura del Mausoleo, si riconoscono anomalie resistive analoghe a quelle evidenziate dal profilo 2, anche se con intensità attenuate: in particolare quelle alle progressive 18 m (circa 6 metri dal p.c), 50 m e 64 metri. L'inversione tomografica della carica-bilità effettuata per il *Profilo 3* (fig. 8) non consente di distinguere alcuna correlazione con l'immagine relativa alla resistività in corrispondenza con le anomalie precedentemente descritte.

L'inversione tomografica del *Profilo 4* (fig. 9) ben evidenzia le caratteristiche lito-stratigrafiche sub-

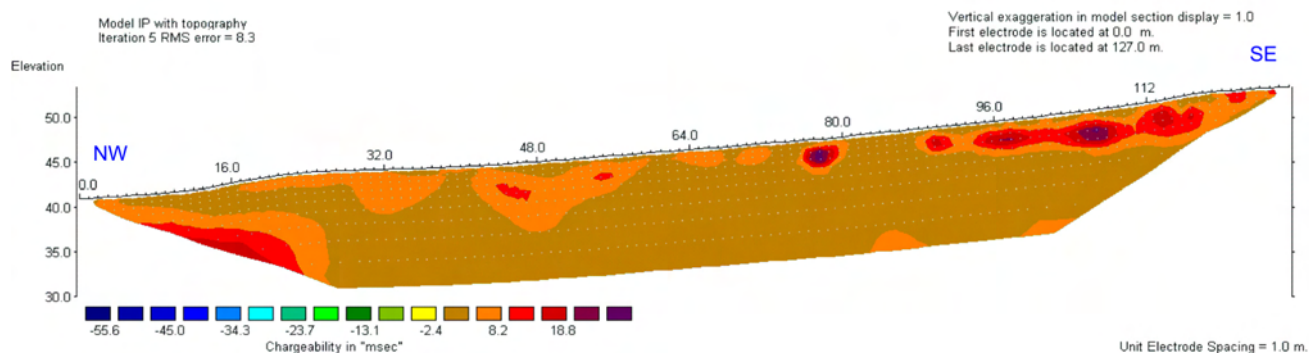


Fig. 8 - Inversione tomografica del Profilo 3 (caricabilità). Dispositivo Wenner.  
- *Tomographic inversion of Profile 3 (chargeability). Wenner array.*

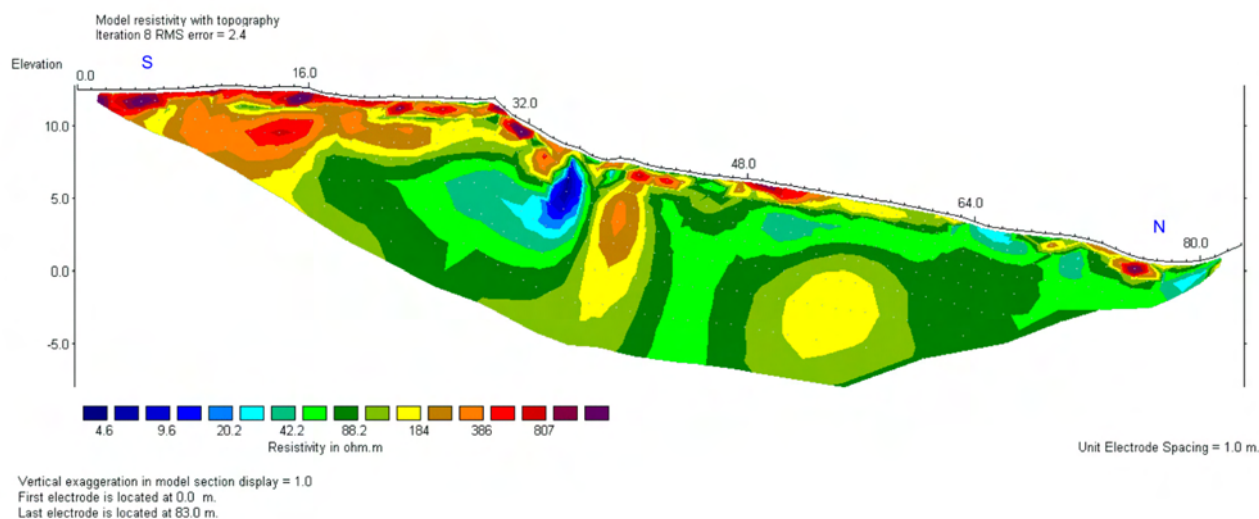


Fig. 9 - Inversione tomografica del Profilo 4 (resistività). Dispositivo Wenner.  
- *Tomographic inversion of Profile 4 (resistivity). Wenner array.*

superficiali della porzione S del profilo, dove affiorano dei piastroni lavici, chiaramente identificabili nella ricostruzione del modello attraverso la serie di massimi ad elevata resistività. Altre due anomalie resistive sono posizionate rispettivamente a profondità di 4-5 metri (progressiva 39 metri) e profondità di 7 - 8 metri ( progressiva 54 metri). La prima anomalia si posiziona fra le cavità incontrate nei sondaggi S10/99 e S12/99 ed in prossimità della cavità ispezionata posta in corrispondenza del torrione. La seconda anomalia resistiva sembra trovare corrispondenza con quelle incontrate nel pro-

filo 2 (progr. 70 metri) e nel profilo 3 (progr. 64 metri). L'intenso minimo di resistività (progr. 35) è invece riconducibile alla dispersione nel terreno di acque superficiali provenienti da un impianto di irrigazione. Il modello di resistività ottenuto con dispositivo dipolo-dipolo è rappresentato in fig. 10. Risultano anche qui evidenti le anomalie resistive legate agli affioramenti delle lave leucititiche e trovano conferma le anomalie di resistività nel settore settentrionale. Il modello relativo alla caricabilità (fig. 11) segnala tre massimi di anomalia di cui solamente quello situato alla progressiva 35 sembra

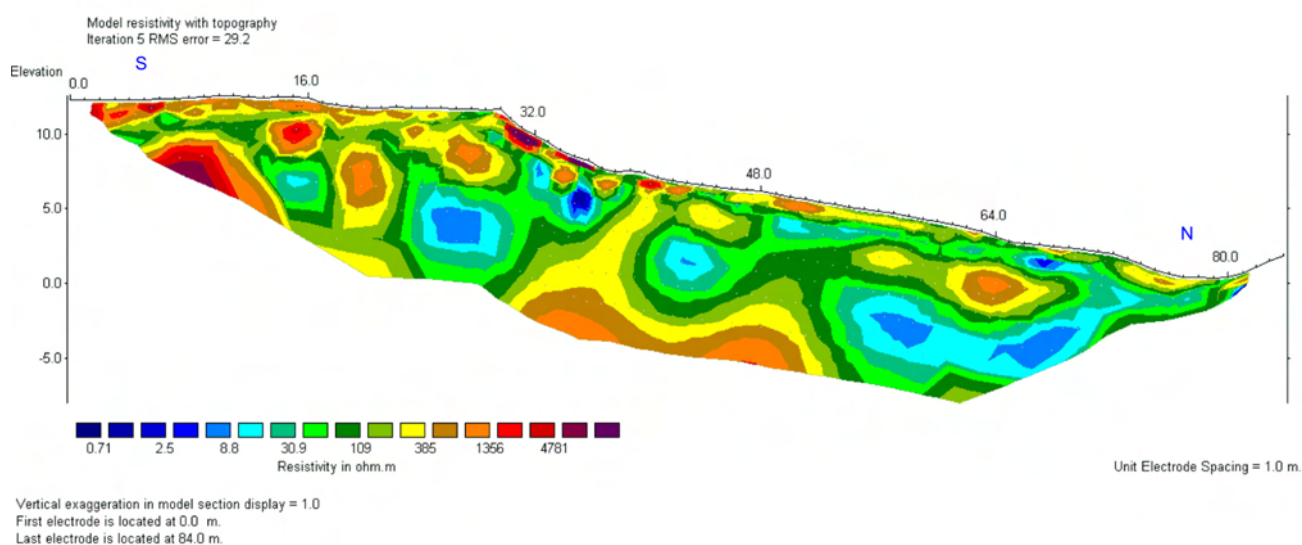


Fig. 10 - Inversione tomografica del Profilo 4 (resistività). Dispositivo dipolo-dipolo.  
- *Tomographic inversion of Profile 4 (resistivity). Dipole-dipole array.*

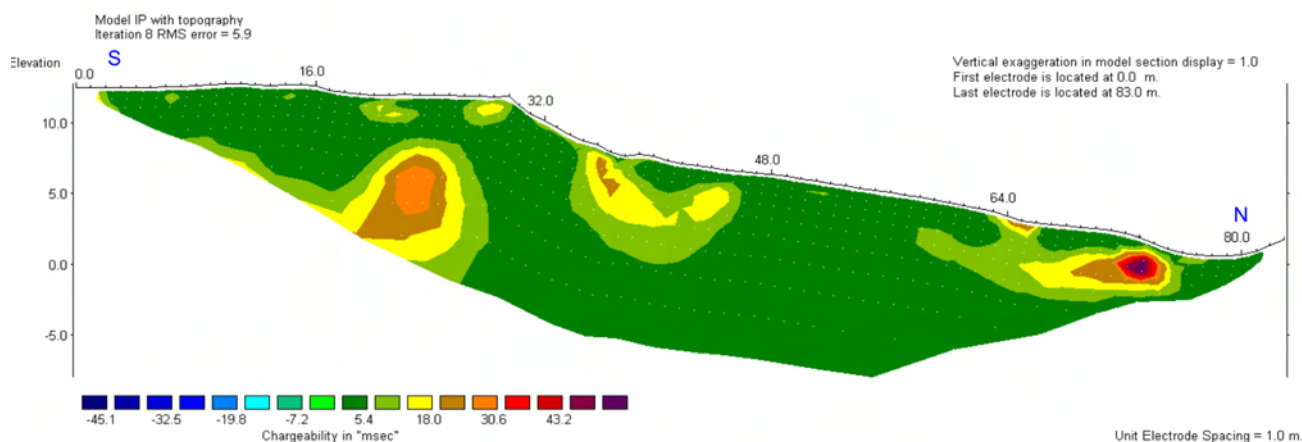


Fig. 11 - Inversione tomografica del Profilo 4 (caricabilità). Dispositivo Wenner.  
- *Tomographic inversion of Profile 4 (chargeability). Wenner array.*





avere una relazione, inversa, con quanto evidenziato tramite il parametro della resistività. Ciò potrebbe essere legato, come ipotizzato in precedenza, a perdite idriche nell'impianto di irrigazione.

### 2.3. - MICROGRAVIMETRIA

Nell'area di Cecilia Metella esistevano le condizioni per l'applicazione del metodo gravimetrico ad alta risoluzione, al fine di correlare gli andamenti della distribuzione di densità nel sottosuolo ricavabili dalla metodologia con quelli della resistività. Il metodo si basa sulla individuazione delle anomalie del campo gravitazionale terrestre attraverso la misurazione della accelerazione di gravità (anomalie di Bouguer); consentendo tali anomalie di delineare le disomogeneità nella struttura del sottosuolo, questo metodo è adatto alla individuazione di vuoti ipogei a causa del contrasto di densità esistente tra una teorica cavità ed il terreno.

In fase di progettazione del rilievo è stato verificato che la capacità risolutiva del metodo fosse adeguata al target da conseguire, procedendo al calcolo teorico dell'effetto gravimetrico di una cavità presunta, delle dimensioni attese. Il modello illustrato in fig. 12 descrive l'effetto di una cavità, assimilata ad una sfera, di 3 metri di raggio, il cui centro è posizionato a 5 metri di profondità. Le anomalie sono espresse in mGal ( $10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ ).

Si è assegnata una densità di  $2.0 \text{ g/cm}^3$  alla formazione geologica incassante. Il calcolo dell'anomalia è stato effettuato nella ipotesi di cavità vuota (densità  $0 \text{ g/cm}^3$ ). Sulla verticale di tale cavità sferica si è fatto passare un profilo fittizio di stazioni di misura di cui una situata nella posizione ottimale

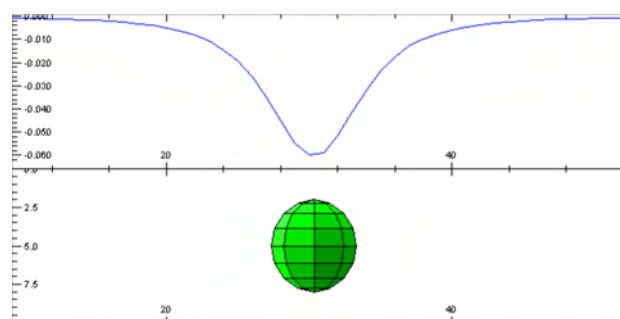


Fig. 12 - Caso di cavità sferica con densità =  $0 \text{ g/cm}^3$ , raggio 3 m, profondità centro 5 metri, contrasto di densità =  $2.0 \text{ g/cm}^3$ .  
- Spherical cavity with density =  $0 \text{ g/cm}^3$ , 3 m radius, 5 m deep, density contrast =  $2.0 \text{ g/cm}^3$ .

in corrispondenza del centro della cavità.

Il minimo valore di anomalia è di  $-0.059 \text{ mGal}$ , sulla verticale del centro della sfera. Tale valore decresce a  $-0.020 \text{ mGal}$  a soli 5 metri di distanza, per ridursi a  $-0.005 \text{ mGal}$  a 12 metri di distanza. Supponendo che la cavità abbia un raggio di 1,5 metri e mantenendo inalterata la profondità, il suo effetto gravimetrico si ridurrebbe a  $-0.007 \text{ mGal}$  già in corrispondenza del centro, ed a  $-0.003 \text{ mGal}$  alla distanza di 5 metri; questi ultimi valori sono generalmente confrontabili con gli errori di misura per cui va posta la massima cura nell'esecuzione dei rilievi e nella riduzione delle misure (fig. 13). Anomalie di maggiore entità vengono prodotte dalla modellazione gravimetrica di un "tunnel" di sezione analoga.

### 2.4. - PROSPEZIONE GRAVIMETRICA

Nell'ambito degli studi geologici curati dal Laboratorio geologico-cartografico e di aerofotointerpretazione della Soprintendenza Archeologica di Roma (LabGCA-SAR) volti a stabilire le cause di alcuni dissesti delle strutture murarie del Complesso Monumentale, era stata effettuata in precedenza una campagna di sondaggi geognostici che avevano portato alla individuazione di una cavità di modeste dimensioni (circa 1.5 metri in altezza), ubicata in corrispondenza del torrione Sud del Castello Caetani. Per indagarne l'estensione fu commissionata una prospezione microgravimetrica (Novembre 1998), eseguita su una griglia regolare di stazioni, con misure effettuate ogni due metri lungo 7 profili paralleli (78 misure). I dati sono stati riorganizzati nel contesto delle nuove

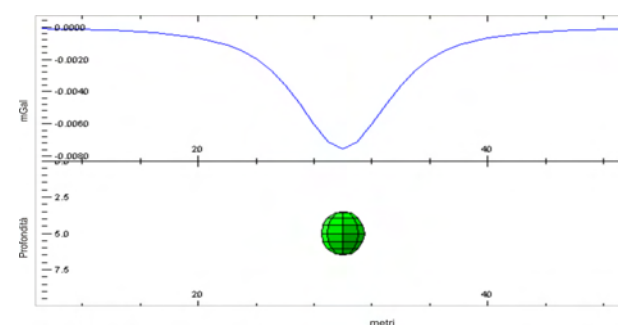


Fig. 13 - Caso di cavità sferica con densità =  $0 \text{ g/cm}^3$ , raggio 1.5 m, profondità centro 5 metri, contrasto di densità =  $2.0 \text{ g/cm}^3$ .  
- Spherical cavity with density =  $0 \text{ g/cm}^3$ , 1.5 m radius, 5 m deep, density contrast =  $2.0 \text{ g/cm}^3$ .

indagini e la mappa delle Anomalie di Bouguer viene riproposta in fig. 16. Essa evidenzia la presenza di 3 aree anomale di minimo gravimetrico. La prima è in pratica coincidente con la cavità riscontrata in sondaggio (A), la B è ubicata al margine meridionale della mappa e per tale motivo non è possibile attribuire la sua presenza univocamente all'effetto di una cavità, la terza (C) è anch'essa posizionata al limite della mappa. Per quanto di estensione limitata, il rilievo ha conseguito dei risultati che ne hanno confermato la validità nell'ambito di indagini di identificazione di cavità di dimensioni modeste, poste ad una profondità non eccessiva.

#### 2.4.1 - PROFILO GRAVIMETRICO

Ad integrazione dell'indagine geoelettrica, il Servizio Geofisica ha eseguito un rilievo microgra-

vimetrico, utilizzando il gravimetro LCR D138, che offre una risoluzione nominale di  $1 \mu\text{Gal}$ . Le misure sono state effettuate lungo una traccia orientata SE- NW e coincidente con un segmento del profilo elettrico n° 2, parallelo alla parete nord-occidentale del Mausoleo e del Castrum. Avendo mantenuto un passo di campionamento di 1 metro, è stato misurato il valore di gravità su 76 stazioni gravimetriche. Le misure sono state eseguite per circuiti chiusi, corrette della deriva strumentale e quindi compensate.

A ciascun valore di accelerazione di gravità misurato sono state apportate la riduzione in aria libera o di Faye, la riduzione di Bouguer a densità  $1.7 \text{ g/cm}^3$  e la correzione topografica (CT) calcolata impiegando il modello digitale del terreno (DEM) rappresentato da un grigliato regolare di quote generato dall'orografia digitale con passo di scansione 20;

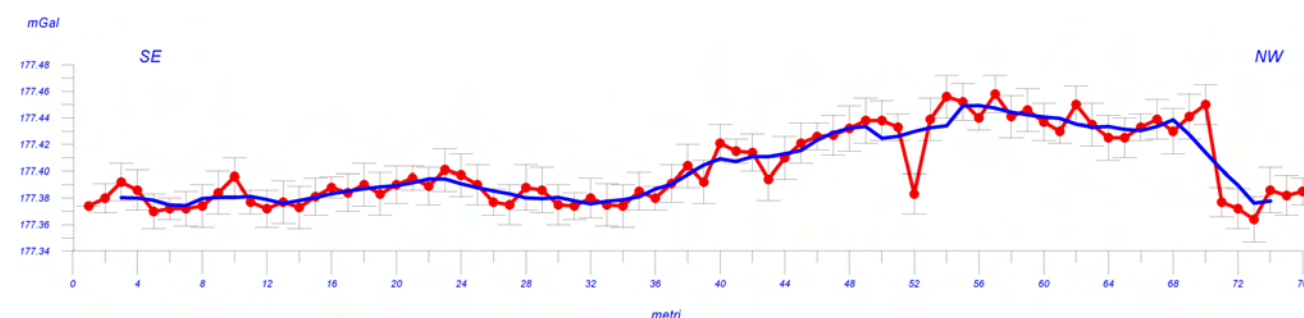


Fig. 14 - Profilo gravimetrico. Linea rossa: plot dei valori; linea blu: media mobile.  
- Gravimetric profile. Red line: values plot line; blue line: running average.

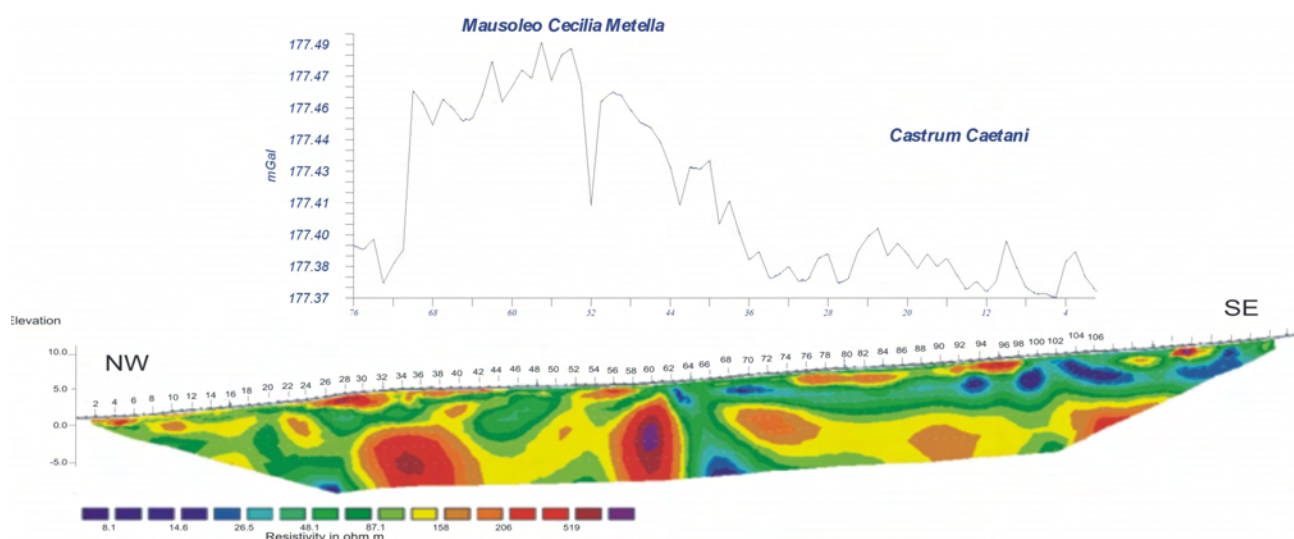


Fig. 15 - Profilo gravimetrico sull'inversione tomografica del profilo elettrico corrispondente  
- Gravimetric profile on the tomography of the electric profile n. 2





il DEM è stato integrato, nelle zone vicine al punto stazione, con i dati altimetrici dell'area misurati con un rilievo topografico di dettaglio.

I valori di gravità osservata sono stati poi confrontati con i corrispondenti valori teorici al fine di ottenere l'andamento delle anomalie di Bouguer lungo il profilo.

Poiché le misure sono state eseguite quasi a ridosso del Complesso Monumentale, si è reso necessario calcolare il contributo, sul valore misurato della accelerazione di gravità, delle strutture murarie del "castello" più vicine. Il mausoleo vero e proprio è stato invece considerato nella sua totalità, data la grande massa perturbante. Nel calcolo eseguito in base alle formule di D. Plouff (1975, 1976) le strutture sono state assimilate a prismi verticali, di dimensioni e numero di lati opportuni, alle quali è stata attribuita una densità di  $1.8 \text{ g/cm}^3$ .

L'andamento dell'anomalia di Bouguer lungo il profilo misurato è ricostruito nel grafico di fig. 14. Innanzitutto viene evidenziato come i valori di anomalia si collochino in un intervallo piuttosto ristretto, pari a  $121 \mu\text{Gal}$ ; inoltre tali valori delimitano due settori - più o meno in corrispondenza della metà del profilo - di cui quello a SE, corrispondente all'area prospiciente il Castello Caetani,

individua valori di anomalia mediamente inferiori a quelli relativi al settore prossimo al Mausoleo di Cecilia Metella.

Anche l'indagine elettrica ha riscontrato una differenza nei valori di resistività tra i due settori, come si vede in fig. 15. Si può supporre che ciò sia dovuto ad una disomogeneità nell'assetto del sottosuolo delle due aree ed in particolare ai materiali che costituiscono le fondamenta del Mausoleo di Cecilia Metella. Tenuta in considerazione sia la validità intrinseca delle misure, sia le piccole variazioni di gravità misurate, le aree di minimo gravimetrico che interessano un numero significativo di stazioni adiacenti sono risultate piuttosto limitate: una prima area si colloca tra le SG 4 e 15, disturbata da un picco positivo, all'inizio del profilo gravimetrico, ed una seconda tra le SG 71 e 76, all'estremità del profilo. E' comunque da notare che le aree individuate dalle stazioni menzionate corrispondono entrambe con aree resistive del profilo elettrico, e che la prima di queste si correla anche con l'esistenza di una cavità ispezionata.

Il confronto tra i risultati del profilo e della gravimetria areale, indagini eseguite da Soggetti diversi ed in tempi differenti, fornisce nell'area di sovrapposizione una notevole concordanza. (fig. 16).

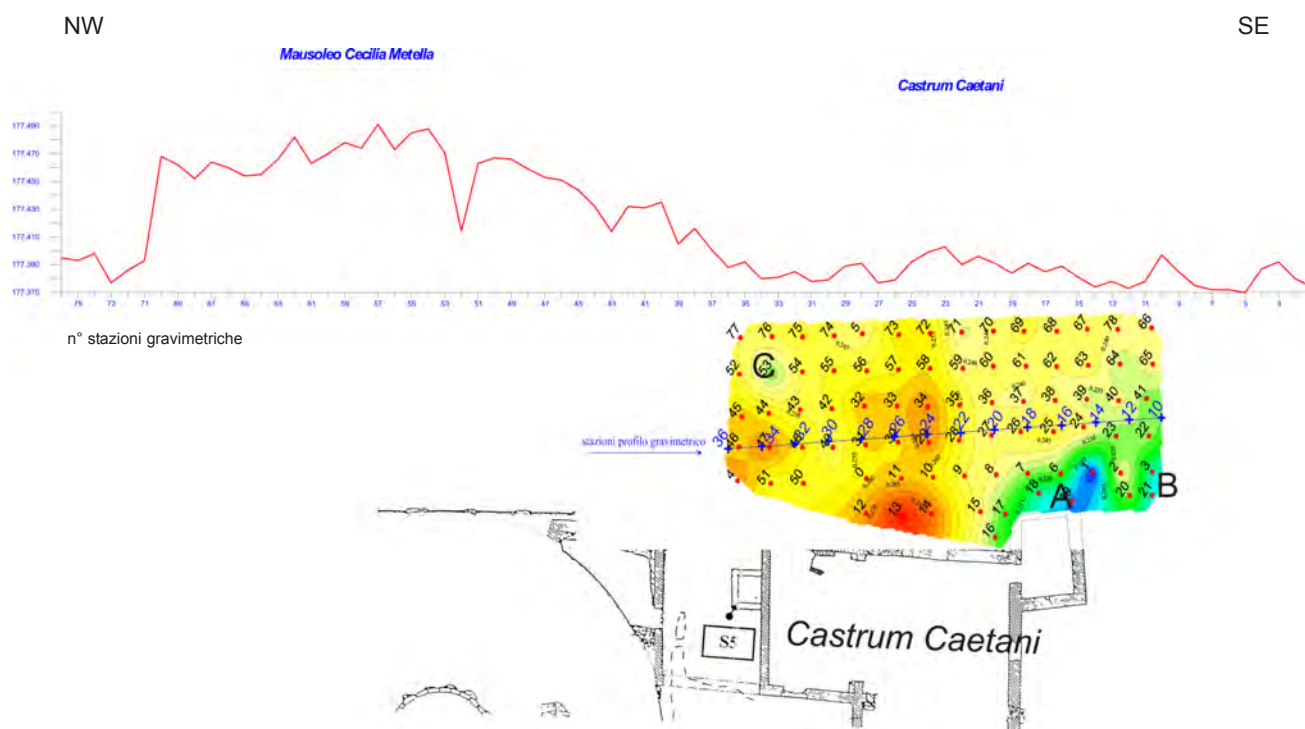


Fig. 16 - Profilo gravimetrico e confronto con la Mappa di Bouguer relativo al settore prospiciente il Castrum Caetani.  
- Gravimetric profile section, related to the sector in front of Castrum Caetani and comparison with the Bouguer Anomaly Map.

### 3 - CONCLUSIONI

L'applicazione di metodologie geofisiche integrate ha costituito un notevole miglioramento della conoscenza geologica delle aree su cui insiste il Complesso Monumentale. Le rappresentazioni tomografiche hanno indagato una profondità di circa 6 - 7 metri con il profilo n. 1 e circa 12 - 14 metri con gli altri profili. La chiara ricostruzione degli elementi elettrostratigrafici vale soprattutto per la porzione di terreno più superficiale, in cui risultano ben individuati, al di sotto del primo strato costituito da terreno di riporto o suolo aerato, degli orizzonti riconducibili ai prodotti eruttivi presenti nell'area e, in corrispondenza del settore meridionale del profilo n.4, rimane accertata la presenza di un corpo resistivo a geometria tabulare riconducibile alla porzione terminale della colata lavica di Capo di Bove. Tra le anomalie resistive più superficiali si è posta l'attenzione su quella evidenziata nel profilo 1 alla progressiva 5,5 metri che sembra correlarsi alla presenza di una possibile struttura antropica sepolta a piccola profondità. In generale, al di sotto dei 3 - 4 metri di profondità dal p.c., la ricostruzione degli andamenti stratigra-

fici attraverso le misure elettriche delinea la presenza di porzioni del sottosuolo che potrebbero costituire elementi di possibile interesse ai fini dell'indagine condotta. L'andamento delle elettrostratigrafie appare infatti articolarsi delineando zone di più alta resistività, come è ben visibile in tutti i profili eseguiti, che potrebbero anche essere messe in relazione con attività antropiche che abbiano modificato sostanzialmente l'assetto naturale del sottosuolo. Talvolta, tali aree "anomale" si identificano molto nettamente a causa del loro elevato contrasto di resistività con le zone circostanti, mentre in altri casi sono più debolmente delineate. Alcune di queste potrebbero costituire il *target* cui ha mirato l'effettuazione della presente indagine, rappresentando l'immagine elettrica di corpi riconducibili a cavità.

L'integrazione del metodo gravimetrico alla indagine, anche se limitato, ha permesso una rivisitazione dell'interpretazione tomografica riguardo l'attribuzione di alcune anomalie elettriche. In particolare, tutto il settore resistivo in corrispondenza del Mausoleo, comprese le due anomalie individuate rispettivamente allo spigolo settentrionale del Mausoleo e al limite tra Mausoleo e Castrum

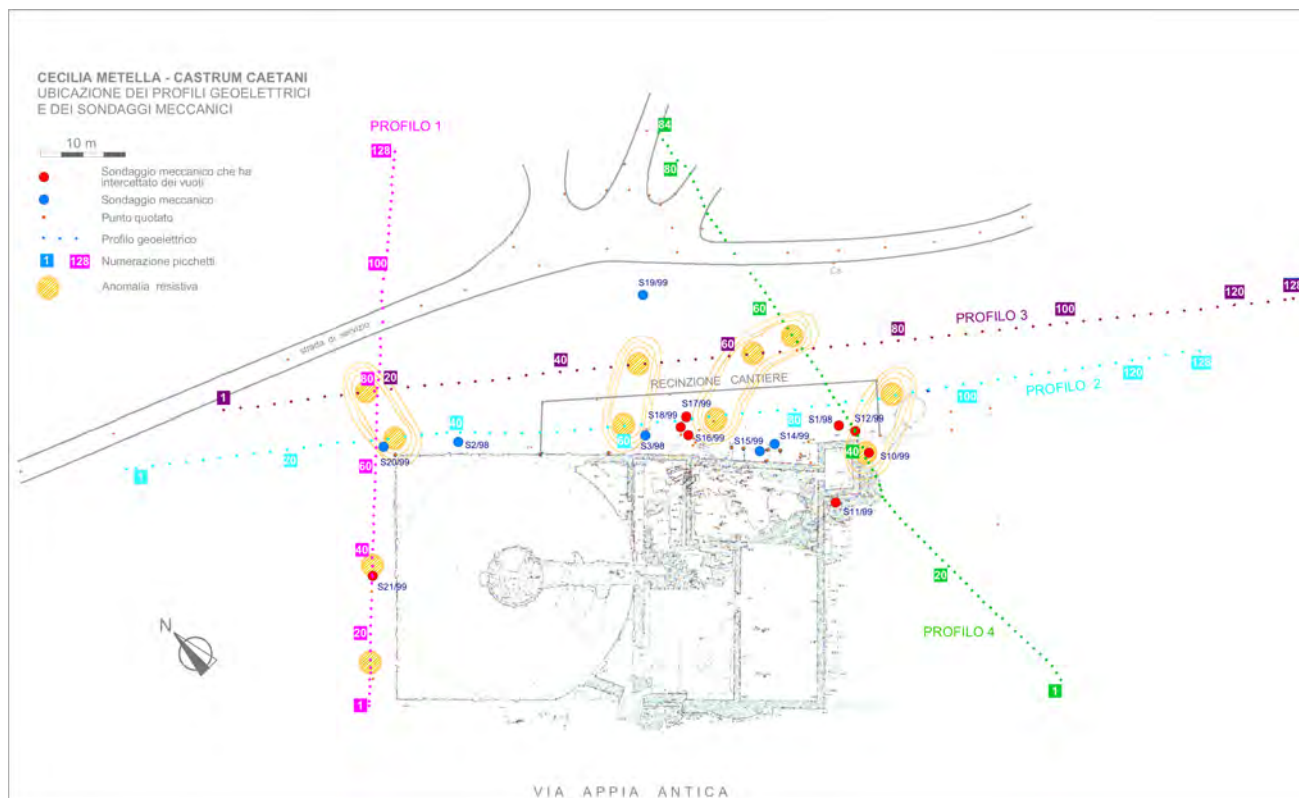


Fig. 17 - Risultati delle indagini. - Survey results.





Caetani, potrebbe essere correlabile alla presenza di fondamenta particolarmente compatte del Mausoleo, come farebbero supporre i valori più elevati dell'anomalia di Bouguer rispetto al settore del Castrum.

Come si può notare dalla fig. 17 alcune delle anomalie resistive individuate dalla prospezione elettrica vengono a situarsi in prossimità di sondaggi che hanno intercettato vuoti nel sottosuolo e in settori dove l'ispezione in sotterraneo ha accertato lo sviluppo di gallerie. In altri casi, a determinare l'esistenza di tali aree anomale potrebbe essere la diversa natura dei materiali costituenti il basamento del mausoleo. Per quanto riguarda invece l'even-

tualità di una prosecuzione delle cavità nel sottosuolo, la lettura della fig. 17 potrebbe suggerire l'individuazione di alcuni allineamenti. Uno di questi, ad esempio, potrebbe essere individuato in corrispondenza della zona prossima al torrione est, dove tre anomalie appartenenti ai profili 2, 3 e 4 appaiono all'incirca allineate.

Questo caso di studio non solo testimonia l'utilità delle indagini indirette nella ricerca di cavità poste a debole profondità, ma evidenzia anche come solo l'integrazione di diverse metodologie geofisiche possa contribuire alla definizione di un modello realistico ed attendibile del sottosuolo investigato.

## RINGRAZIAMENTI

*Si ringraziano per la collaborazione sia durante le operazioni di campagna che nel corso delle elaborazioni dei dati geofisici e topografici: il Dr. Stefano CALCATERRA, il Geom. Amedeo LUCIDI, il perito Francesco VULLO, il perito Claudio PULSINELLI, il Sig. Domenico MATARAZZO.*

*Un particolare ringraziamento va inoltre al Dr. R. MATTEUCCI ed al Dr. R. SEBASTIANI del Laboratorio geologico-cartografico e di aerofotointerpretazione della Soprintendenza Archeologica di Roma (LabGCA-SAR).*

## BIBLIOGRAFIA

SOPRINTENDENZA ARCHEOLOGICA DI ROMA. (1999) - *Prospezione microgravimetrica presso il Mausoleo di Cecilia Metella Castello Caetani - Via Appia Antica - Rapporto tecnico della "DG Rilievi s.r.l."*

LOKE M.H. & BARKER R.D. (1996) - *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method.* Geophysical Prospecting, Vol. 44: 131-152

PLOUFF D. (1975) - *Derivation of formulas and Fortrand programs to compute gravity anomalies of prisms:* U.S. Geological Survey Report, 90 p. Available from National Technical Information Service N° PB-243-526, U.S. Department of Commerce, Springfield, VA 22161

PLOUFF D. (1976) - *Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections,* Geophysics., 41: 727-741

SOPRINTENDENZA ARCHEOLOGICA DI ROMA (Maggio 1999) - *Laboratorio Geologico-Cartografico e di aerofotointerpretazione. Indagini geognostiche.*

UFFICIO GEOFISICA - SERVIZIO GEOLOGICO NAZIONALE (2000) - *Indagini geoelettriche nell'area del Complesso Monumentale di Cecilia Metella e Castrum Caetani - Rapporto tecnico.*