

CERVETERI: TOPOGRAFIA DELLA VIGNA PARROCCHIALE II. METODOLOGIE INTEGRATE PER LO STUDIO DI UN'AREA ARCHEOLOGICA

1. INTRODUZIONE

L'intervento dell'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali (ITABC) del CNR sul sito archeologico di Cerveteri, in località Vigna Parrocchiale, si è svolto nell'ambito del "Progetto Caere"* ed è stato indirizzato alla sperimentazione di nuove tecniche di acquisizione e di integrazione di dati eterogenei relativi allo scavo archeologico e al territorio ad esso circostante.

Infatti, le caratteristiche del sito, solo in parte indagato dallo scavo sistematico ma oggetto da molti anni di ricerche archeologiche e topografiche, sono tali da richiedere un'integrazione delle informazioni raccolte secondo procedure non omogenee (ricognizione archeologiche, saggi di scavo, prospezioni geofisiche ecc.) all'interno di un Sistema Informativo Territoriale. Infatti le potenzialità dei sistemi GIS sono proprio quelle di contenere e di gestire dati di diversa natura evidenziandone il carattere multidisciplinare.

Per queste ragioni il gruppo di ricerca dell'ITABC, da tempo impegnato in questo campo di attività (COLOSI, COSTANTINI *et al.* 2001; COLOSI, D'ANDREA, GABRIELLI 2002, 115-126; COLOSI *et al.* 2002, 181-197), ha impiegato nell'area della Vigna Parrocchiale nuove metodologie di indagine territoriale con l'obiettivo da un lato di individuare tracce archeologiche sepolte che potrebbero indirizzare le future campagne di scavo, dall'altro lato di valorizzare il bagaglio di informazioni già note agli studiosi ricostruendone l'esatta distribuzione spaziale.

Il progetto di studio ha previsto indagini condotte a diversi livelli di scala: partendo da una visione complessiva dell'area dello scavo ottenuta effettuando riprese a bassa quota con un aquilone a forma di delta, si è scesi nel dettaglio delle prospezioni geoelettriche su aree in cui si ipotizzava la presenza di resti archeologici sepolti.

Per quanto riguarda le strutture portate in luce nel corso degli scavi degli anni '80, ed in particolare l'imponente vasca rinvenuta nel settore meridionale dell'area indagata, si è cercato di evidenziarne le caratteristiche specifiche mediante l'esecuzione di un rilievo con scanner tridimensionale terre-

* <http://www.progettoaere.rm.cnr.it>, con bibliografia relativa.

stre. I risultati dell'operazione consistono in una ricostruzione tridimensionale della cavità che ne evidenzia l'impressionante profondità.

In questo processo conoscitivo che, come detto, da una visione d'insieme del sito scende ad un grado sempre più dettagliato d'analisi, è prevista anche la realizzazione di un modello tridimensionale del terreno che ponga in evidenza le caratteristiche morfologiche del sito e la loro relazione con i resti antropici. Poiché per l'area dello scavo è già stato utilizzato il sistema di rilevamento integrato stazione totale e DGPS (Differential Global Positioning System), l'intenzione è quella di effettuare, nel prosieguo delle indagini, il rilievo di tutta l'area con il DGPS; si ritiene, infatti, che tale procedura possa fornire un'alta quantità di dati topografici in un lasso di tempo molto breve.

Il contributo presentato in questa sede consiste in una descrizione tecnica approfondita delle strumentazioni e delle procedure fino ad oggi messe in atto e in una serie di conclusioni che sintetizzano i risultati ottenuti.

F.C., R.G., P.M., D.P.

2. LA FOTOGRAFIA A BASSA QUOTA

2.1 Note introduttive

La possibilità di effettuare delle riprese dall'alto, siano esse prospettiche o zenitali, si è rivelata estremamente interessante per lo studio e la documentazione dei siti archeologici. Infatti, questo tipo di fotografie permette la piena leggibilità dell'area di scavo, semplificando, spesso, l'interpretazione di alcuni elementi architettonici che, fotografati dal tradizionale punto di vista, non sono chiaramente leggibili.

Le fotografie a bassa quota possono essere ottenute con vari metodi scelti in base all'estensione dell'area indagata e al grado di dettaglio che si vuole raggiungere: effettuando riprese con aste telescopiche o ponteggi rimovibili non è possibile superare altezze di 15 o 20 metri, spesso non sufficienti per coprire ampie porzioni di terreno. Per questo motivo si è diffuso anche in campo archeologico l'utilizzo di aeromobili equipaggiati con dispositivi azionabili da terra, con i quali è possibile riprendere agevolmente aree piuttosto estese anche in presenza di terreni impervi.

I "mezzi di trasporto" utilizzati più comunemente per portare in quota l'attrezzatura fotografica sono l'aquilone, il pallone aerostatico frenato e l'elicottero radiocomandato.

Tra di essi il pallone aerostatico è sicuramente il più produttivo. Infatti, caricato ad elio, il pallone può rimanere in volo per più di 24 ore, ricoprendo vaste aree in pochi giorni lavorativi. Inoltre il dispositivo, in particolari condizioni climatiche, consente riprese fotografiche a diverse quote di volo, fino a qualche centinaio di metri da terra. La strumentazione, però, ha il limite non trascurabile del costo e della reperibilità del suo propulsore.

L'elicottero radiocomandato è molto versatile, anche se meno produttivo del pallone frenato. Esso consente di effettuare riprese anche in aree dove non è possibile arrivare con dispositivi ancorati a corde ed è meno dipendente dall'intensità del vento. Tuttavia, l'utilizzo dell'apparecchiatura non è immediato, ma richiede la presenza di personale specializzato in tecniche di pilotaggio.

In considerazione degli aspetti sopra descritti e date le caratteristiche fisiche dell'area di scavo, sul sito della Vigna Parrocchiale si è scelto di sperimentare la tecnica di ripresa fotografica da aquilone, in virtù della sua economicità, della semplicità di utilizzo e della comodità di trasporto. Infatti il volo con l'aquilone, anche se fortemente condizionato dalla presenza di un vento costante ed omogeneo, fornisce buoni risultati quando viene effettuato su limitate porzioni di territorio che, come nel caso ceretano, siano costituite da ampi spazi aperti privi di vegetazione ad alto fusto e di ostacoli di diversa natura.

2.2 Descrizione del sistema

Il sistema di rilevamento fotografico con aquilone è stato messo a punto tenendo conto delle buone potenzialità dello strumento per realizzare riprese speditive finalizzate al rilievo di dettaglio. Il dispositivo di ripresa è composto dall'aquilone e da un sistema fotografico di tipo semplice e radiocontrollato.

Si è scelto di utilizzare un aquilone Delta (Fig. 1) perché, riuscendo a volare anche con vento debole, si è rivelato più indicato per questo tipo di applicazione rispetto agli aquiloni a cassetta che richiedono un vento più sostenuto e possono sopportare forti velocità.

L'aquilone deve essere corredato da un filo di ritenuta che non sia né troppo sottile, per limitare le difficoltà di manovra, né troppo spesso, in modo da evitare un'eccessiva resistenza al vento; calcolando le forze e le masse in gioco si è optato per un filo di 3,5 millimetri con una resistenza di circa 150 kg ed una lunghezza di almeno 210 metri.

Per eseguire le riprese è stato necessario dotarsi di un sistema composto da una macchina digitale e da una macchina tradizionale a pellicola. Infatti, mentre le immagini digitali permettono di visualizzare immediatamente l'area di interesse, e quindi di georeferenziare un numero elevato di punti fiduciali sul terreno (cfr. *infra*), la macchina tradizionale, caricata con una pellicola fotografica ad alta definizione, è indispensabile per ottenere foto di massimo dettaglio.

Le macchine sono state montate alternativamente su un'apposita struttura, chiamata Picavet, che contiene un sistema di scatto attivato per mezzo di un radiocomando (Fig. 2). Il Picavet effettua la stabilizzazione dell'apparecchiatura fotografica per mezzo di un cavo fatto scorrere su passanti dispo-



Fig. 1 – Il sistema di ripresa aerea utilizzato per la realizzazione di fotografie a bassa quota.

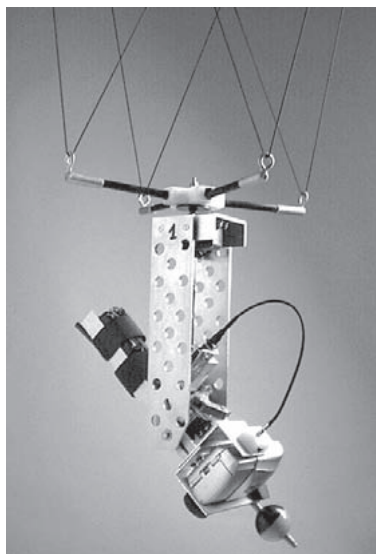


Fig. 2 – Il sistema Picavet per la stabilizzazione delle macchine fotografiche.

sti alle estremità di una croce. Il sistema può essere definito ellittico in quanto, se si tengono fisse le due estremità dei fasci funicolari e si muove la culla sottostante, quest'ultima descrive una curva ellittica. Attraverso un

radiocomando il fotografo può, inoltre, far ruotare la macchina di 360 gradi in orizzontale e di 90 gradi in verticale; può operare con vento fino a 30-35 km/h e con temperature tra 0 e 43 gradi.

Un sistema fotografico di questo tipo (aquilone, Picavet e sistema di ripresa) può essere alzato fino a un centinaio di metri di altezza (il limite di volo libero permesso dalle leggi italiane senza richiedere autorizzazioni è di circa 40 m lontano da aeroporti); la scelta della quota di volo è chiaramente condizionata dall'ampiezza dell'area ripresa.

Per un utilizzo in ambito archeologico, è importante che le immagini abbiano una buona definizione e che, soprattutto, siano il più possibile perpendicolari al terreno. La profondità di campo non costituisce un particolare problema e quindi, qualora si utilizzi un automatismo, è meglio impostare l'esposizione a priorità di tempi. I filtri, invece, possono rivelarsi utili per accentuare i contrasti di tono nella fotografia in bianco e nero e correggere l'equilibrio cromatico nelle riprese a colori.

Un aspetto fondamentale nella fotografia di siti e scavi archeologici è quello relativo alla giusta illuminazione: fin dall'inizio dei lavori il fotografo deve studiare le condizioni di luce nelle varie ore del giorno e tenerne conto per l'attività sul campo. In base all'esperienza, è quasi sempre opportuno evitare la piena luce solare: la fotografia di una lunga trincea perde definizione se la parte superiore è illuminata violentemente e quella inferiore si trova in ombra profonda. È bene, quindi, effettuare le riprese la mattina presto o subito dopo il tramonto oppure, qualora si presentino, in condizioni di sole velato.

2.3 Georeferenziazione e fotorettifica

La fase finale del sistema di rilevamento impiegato è quella di georeferenziare, ortorettificare e mosaicare le fotografie. Per svolgere questa parte di lavoro è stato utilizzato un software specialistico per il trattamento delle immagini telerilevate. Tale software (ER Mapper 6.3) permette, infatti, sia di georeferenziare e rettificare le singole foto, sia di mosaicare l'intera area di ripresa (Fig. 3). Il software, inoltre, è indicato per l'elaborazione vera e propria, tramite l'applicazione di filtri specifici che esaltano determinate caratteristiche spaziali e spettrali delle immagini. In questa sede verranno presentati i risultati preliminari di questo lavoro.

Normalmente, per georeferenziare le foto aeree, si dispone una serie di mire sul terreno in modo omogeneo, cercando di fare in modo che in ogni fotografia le mire siano distribuite geometricamente, ad esempio quattro ai vertici ed una al centro. Questo sistema, molto utile nelle foto aeree, dove la macchina da ripresa è disposta su supporti giroscopici, consente di riprendere il terreno in modalità azimutale.

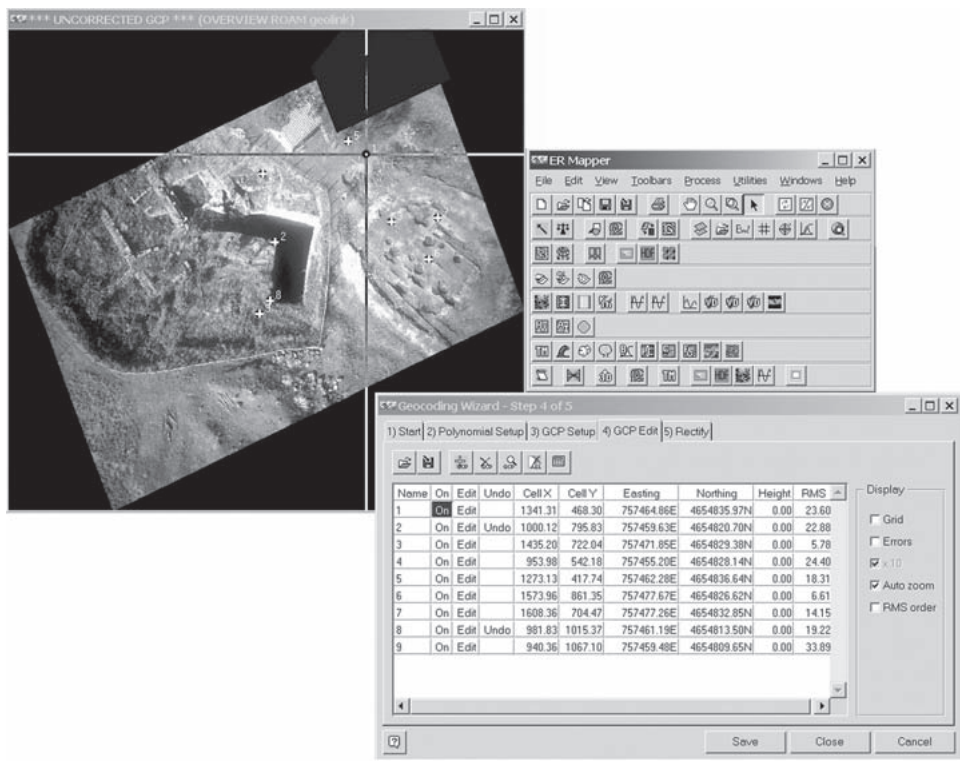


Fig. 3 – Procedimento di georeferenziazione e rettificazione di un singolo fotogramma.

Per le riprese da aquilone queste accortezze non sono sufficienti, perché la non perfetta ortogonalità di ripresa è accompagnata dalle oscillazioni procurate dal vento: questa è la ragione che ci ha spinto ad usare il doppio dispositivo fotografico. La possibilità, quindi, di avere direttamente sul campo la visione del territorio ripreso ha permesso di riconoscere un numero molto elevato di punti a terra detti punti fiduciali (Ground Control Point, GCP); mediamente un numero compreso tra 10 e 30 GCP per fotogramma permette una corretta ortorettifica delle fotografie.

Le mire, numerate e sistemate a una distanza non superiore ai 5-7 metri, sono servite sia per riconoscere le varie parti del territorio ripreso, sia come riferimento per una prima georeferenziazione. Alle mire poste a terra e ai GCP sono state attribuite coordinate geografiche mediante l'utilizzo di un DGPS in modalità RTK. È stato scelto un DGPS (mod. Laica SR 530 RT) rispetto a strumenti topografici tradizionali, che ha consentito una maggiore velocità di rilevazione a prescindere dalla complessità orografica del suolo.

Infatti, considerando i diversi piani altimetrici dell'area indagata, l'applicazione di una strumentazione ottica tradizionale (stazione totale) avrebbe reso necessario effettuare numerosi cambi di stazione e di conseguenza costruire lunghe poligonali.

L'equipaggiamento GPS normalmente utilizzato è uno strumento d'ultima generazione dotato di due ricevitori doppia frequenza (L1+L2) e di radio modem per il collegamento in real time (COLOSI, GABRIELLI, ROSE 2000; GABRIELLI 2001).

I singoli fotogrammi ripresi sono stati georeferenziati e rettificati mediante due principali algoritmi di interpolazione: triangolare e polinomiale.

Il primo metodo richiede che i punti georeferenziati GCP per ogni fotografia siano disposti in modo omogeneo e siano sufficientemente numerosi. La correzione è effettuata soltanto all'interno dell'area compresa dai punti più periferici: ciò implica di dover effettuare ritagli per eliminare tutte le aree esterne a tali punti, ottenendo immagini più piccole di quelle effettivamente riprese e quindi possibili buchi sulla copertura totale.

Al contrario, l'interpolazione polinomiale consente una correzione sull'intero fotogramma; per questa sua caratteristica di intervento omogeneo e mediato sull'intera immagine, la correzione finale è sicuramente meno forte, quindi anche meno distorta. Il polinomio interpolante può essere di diverso grado, in generale I, II oppure III, e fornisce diversi fattori di correzione. Maggiore è la correzione cercata, tanto più elevato deve essere il grado del polinomio e tanto più alto deve essere il numero di punti GCP scelto.

Per maggiore completezza, è il caso di sottolineare che il metodo più idoneo per una correzione dei fotogrammi sarebbe stato quello di utilizzare un algoritmo orto-azimutale. In generale tali algoritmi forniscono un'ottima rettifica ma richiedono un numero di parametri di cui non sempre è possibile disporre, come ad esempio il modello digitale del terreno, la quota strumentale, l'angolo di ripresa e alcune caratteristiche tecniche della macchina fotografica. Per tali ragioni si è scelto il compromesso della rettifica mediante polinomi (Fig. 4).

F.C., R.G.

3. APPLICAZIONE DELLO SCANNER TRIDIMENSIONALE

Nello sviluppo dei lavori nell'area centrale del pianoro urbano dell'antica Cerveteri, di fondamentale importanza è stata la realizzazione del rilievo di alcune strutture emergenti e complesse relative agli scavi condotti negli anni '80, al fine di sperimentare nuove forme di documentazione grafica e di visualizzazione scientifica. La presenza, infatti, nell'area dello scavo di una situazione archeologica assai articolata per la lunga stratificazione e di un



Fig. 4 – Particolare del fotomosaico di fotografie a bassa quota. In evidenza la presenza di macchie anomale nell'area oggi occupata dalla vigna.

complesso monumentale caratterizzato da diverse fasi edilizie, che richiedono un elevato grado di dettaglio, ha offerto un'occasione ideale per la sperimentazione di un sistema laser a scansione da terra, uno dei sistemi di rilevamento più innovativi e versatili in numerosi settori d'impiego: in quello del CAD-CAM industriale, dove in genere vengono trattati oggetti di piccole dimensioni; in quello topografico, per il rilevamento dell'edificato urbano; in quello architettonico per rilevare strutture geometricamente complesse che richiedono un elevato grado di dettaglio e in generale nell'ambito dei Beni Culturali per scopi di monitoraggio, di rilievo e di catalogazione.

Il principio di funzionamento di questi sistemi consiste nel misurare distanze per mezzo di un raggio laser, il quale, mediante opportuni sistemi ottico-meccanici in rotazione, viene inviato verso l'oggetto variando, per passi precedentemente stabiliti, gli angoli azimutale e zenitale. La distanza tra il centro strumentale e il primo punto che il raggio incontra e da cui viene riflesso è determinata dalla misura del "tempo di volo" (*tof*, *time of flight*) che intercorre tra l'emissione e la ricezione; la distanza, insieme alla conoscenza dei due angoli di emissione del raggio, consentono di determinare per coordinate polari la posizione del punto in questione. Nel caso di rilevamento di strutture complesse e articolate occorre, inoltre, effettuare più acquisizioni da scansioni diverse, allo scopo di coprire eventuali lacune.



Fig. 5 – Scanner 3D Callidus 3.1 (TRIBLE-Italia).

Il sistema utilizzato è il sensore Callidus 3.1 (distribuito dalla TRIBLE-Italia), costituito da un'unità laser che presenta le seguenti caratteristiche (Fig. 5):

- range, 80 metri con superfici naturali riflettenti
- velocità di scansione 77scans/sec

range di scansione:

- orizzontale, piano – 400gon
- verticale, linea – 166gon dalla verticale

accuratezza:

- distanza Z, circa 5mm
- lettura dell'angolo azimutale, piano – circa 17mgon
- lettura dell'angolo zenitale, linea – circa 3mgon

Le rotazioni angolari hanno diverse risoluzioni: da un minimo di 62.5mgon a un massimo di 1000mgon in orizzontale; da un minimo di 250mgon a un massimo di 1000mgon in verticale.

3.1 Acquisizione e georeferenziazione dei dati

Il risultato della scansione, condotta in particolare nell'area dello scavo caratterizzata dalla presenza della grande e profonda vasca scavata nel tufo, è

costituito da una o più “nuvole” di punti ad altissima densità che descrivono con estremo dettaglio la superficie dell’oggetto e di quanto compare nel campo di vista strumentale. Per georeferenziare le informazioni così ottenute e per concatenare diverse scansioni (che indicheremo come modelli) si utilizza un prisma mobile, che viene riconosciuto anche dallo scanner, e uno posizionato sulla testa dello strumento. Ogni singola posizione del prisma viene successivamente registrata con strumentazione topografica tradizionale per generare un frame di rilevamento locale e anche al fine di consentire un puntuale controllo metrico sui punti, comparando le due differenti metodologie (topografica e laser scanner).

Tali dispositivi di acquisizione sono solitamente corredati di software specifici per la gestione dei dati registrati (utilizzando formati proprietari), al fine di eseguire le principali operazioni di elaborazione, filtraggio di elementi estranei e trattamento dei disturbi dovuti al rumore di fondo causato dall’imprecisione strumentale.

3.2 *Elaborazione dei dati*

I dati così rilevati possono essere modellati mediante livelli differenti di interesse: uscita del modello in formato VRML, uscita del modello in formato dxf e uscita del modello in formato ASCII per essere utilizzato con altri software. I sistemi laser scanner, comunque, hanno posto il grande problema dell’utilizzo e della gestione delle nuvole di qualche milione di punti che si ottengono dalle operazioni di misura.

L’obiettivo di tali metodologie dovrebbe essere quello di costruire modelli 3D in cui singole porzioni possono essere modellate e successivamente mosaicate. I dati ottenuti a Cerveteri, infatti, sono stati utilizzati come supporto metrico nella creazione di un modello di navigazione 3D (Tav. Ib) allo scopo di rendere più immediata ed efficace la visualizzazione nel contesto di scavo della cavità ricavata nella roccia.

Nella fase di acquisizione si è applicato un sistema di gestione di modelli puntuali in grado di produrre superfici o “mesh” di tipo triangolare. Si è sperimentato il software Tn-3D 2.2 che permette la creazione di mesh triangolari 3D, utilizzando come dati di input le coordinate di punti in formato ASCII.

Il modello così ottenuto può essere utilizzato per la produzione di ortofoto digitali; un ulteriore ausilio è dovuto al fatto che, conoscendo la posizione spaziale dei punti rappresentati, ci si può muovere all’interno della ricostruzione.

In questo modo è possibile creare un catalogo virtuale di infrastrutture od oggetti di vario genere, di cui si ha a disposizione il contenuto metrico e radiometrico; ciò costituisce un notevole aiuto nello studio e nell’interpretazione di un oggetto, anche perché in molte situazioni l’immagine fotografica

contiene informazioni estremamente preziose sullo stato di conservazione del bene, sui colori, sulle tracce di umidità, su eventuali piccole lesioni, ecc. Inoltre, congiuntamente alla misura della distanza, questi strumenti sono, generalmente, in grado di misurare anche la riflettanza di ciascun punto-oggetto alla frequenza propria del raggio (in genere nella zona spettrale dell'infrarosso).

R.G., D.P.

4. TOMOGRAFIA GEOELETRICA NELL'AREA DELLA VIGNA PARROCCHIALE

L'interpretazione delle fotografie a bassa quota, presso il sito di Cerveteri, si è rivelata di grande importanza in quanto ha dato la possibilità di evidenziare gli allineamenti delle strutture messe in luce durante gli scavi degli anni '80. Particolari di alcuni fotogrammi hanno rivelato, inoltre, la presenza di macchie anomale sulla vegetazione che hanno suggerito l'impiego di indagini geofisiche, fondamentali per produrre dati sulla stratificazione sepolta, che non possono essere ottenuti altrimenti, e per la comprensione dell'articolazione interna del sito.

In generale, i metodi di prospezione dimostrano che tramite lo studio della distribuzione spaziale di una determinata grandezza fisica, cioè lo studio di quelle che vengono chiamate "anomalie di superficie", si cerca di determinare qual è la sorgente, nella sua forma e dimensione, che può averla prodotta. Infatti, ogni corpo possiede determinate caratteristiche fisiche e produce intorno a sé un'interazione con il mondo fisico esterno, creando una variazione sul resto del sistema misurabile attraverso una grandezza detta "osservabile". Tale misura, quindi, sarà in stretta relazione sia al fenomeno fisico in esame sia alla presenza, forma, geometria, dimensione e caratteristica fisica di ciò che c'è nel sottosuolo. Il punto principale è quello della scelta della metodologia da adoperare.

Nel caso delle prospezioni a Cerveteri, per il fatto che le strutture emergenti finora scavate sono di tufo come il piano litologico su cui poggiano, si è preferito procedere ad una serie di prospezioni geoelettriche; pur essendo in generale meno speditive di altre indagini, quali ad esempio quelle georadar, esse hanno una notevole profondità di investigazione ed un buon potere risolutivo delle variazioni laterali.

Il metodo geoelettrico è basato sulla determinazione sperimentale della distribuzione di resistività caratterizzante la struttura elettrica del sottosuolo. Il principio fisico consiste nell'inviare una corrente elettrica nel sottosuolo tramite una coppia di elettrodi energizzanti (indicati con A in Fig. 6) e la risultante distribuzione di potenziale elettrico indotto è determinata tramite una coppia di elettrodi riceventi (indicati con B sempre in Fig. 6).



Fig. 6 – Dispositivo elettrodico applicato a Cerveteri durante la campagna di tomografia geoelettrica.

Ogni disomogeneità presente nel sottosuolo, e per disomogeneità s'intendono in generale corpi a diversa capacità di conduzione elettrica, viene rilevata dal fatto che essa deflette le linee di corrente e distorce pertanto la normale distribuzione di potenziale elettrico. Quindi, misurando la caduta di potenziale su due punti del terreno, si è in grado di ottenere informazioni sulla resistività elettrica del sottosuolo valutando il rapporto tra la caduta di potenziale e la corrente inviata. Variando poi la posizione del dispositivo elettrodico in maniera regolare su tutta l'area da investigare, si ottengono gli andamenti della distribuzione di resistività nel volume indagato e quindi delle mappe areali o sezioni verticali, in cui sarà possibile evidenziare la presenza di strutture di interesse archeologico tramite la forma e l'intensità delle anomalie rilevate.

È noto che a questo metodo di prospezione vengono spesso preferite altre metodologie d'indagine geofisica, quali ad esempio il georadar o la magnetometria, che possiedono una maggiore velocità di acquisizione. È nostra opinione, tuttavia, che il metodo geoelettrico, sia per la possibilità di raggiungere profondità di investigazioni notevoli relativamente ai problemi di interesse archeologico, che per l'efficienza nella risoluzione delle strutture sepolte, possa dare un contributo decisivo nell'ambito di un progetto archeologico. Per raggiungere questo obiettivo anche nel caso della prospezione di Cerveteri, ci siamo mossi in due direzioni: 1) utilizzo di una strumentazione più compatta e leggera delle normali strumentazioni geoelettriche; 2) utilizzo di tecniche di tomografia per l'elaborazione dei dati.

Per quanto riguarda il primo punto, per ovviare al problema della limitata velocità delle operazioni di campagna, nella prospezione in esame è stato utilizzato un sistema di acquisizione dei dati interamente progettato all'interno dell'ITABC. Il sistema è composto da:

– un generatore di onde quadre a frequenza di 33Hz (in modo da evitare

qualunque disturbo dovuto alle linee elettriche e di ottenere tempi di misura rapidissimi);

– un ricevitore di segnali con integrati un filtro passa-banda e una scheda di acquisizione ed elaborazione;

– un dispositivo di trasmissione tramite radio-modem dei segnali di controllo tra ricevitore e generatore: ciò ha permesso di eliminare qualsiasi tipo di cavo tra le due unità, rendendo il sistema di acquisizione estremamente compatto e maneggevole.

Per quanto riguarda il secondo punto, è stata adoperata una procedura di tomografia di probabilità (MAURIELLO, PATELLA 1999) che consiste nel restituire come risultato finale la probabilità di occorrenza a varie profondità nel sottosuolo delle anomalie di resistività. Contrariamente ai tradizionali algoritmi di trattamento dati, questa procedura non necessita di alcun vincolo a priori ed è totalmente svincolata dal particolare sistema geometrico di misura e dalle condizioni del terreno. È in tal modo possibile correlare tra loro profili geoelettrici effettuati in tempi diversi e con condizioni diverse del terreno. Gli elementi fondamentali di questa procedura sono descritti nell'Appendice 2.

La campagna di tomografia geoelettrica a Cerveteri si è svolta nel mese di ottobre 2002 e marzo 2003. L'elaborazione dei dati è riassunta nella Tav. IIa, in cui si riportano i risultati più significativi relativi a una sezione orizzontale di resistività con estensione orizzontale di circa 5000 m² e profondità di 1.5 m.

Una prima anomalia, riscontrata nell'area indagata e indicata in cartografia con la lettera A, è costituita dalla parte conduttiva di forma molto regolare ed allungata in direzione nord-ovest/sud-est. In mancanza di saggi di scavo, non è possibile stabilire a che tipo di struttura corrisponda questa anomalia. Nel caso particolare, la brusca e netta diminuzione di resistività, con la conseguente evidenza di un'anomalia molto ben definita, lascia presumere la presenza di una struttura antropica, piuttosto che una semplice variazione geologica del materiale. L'ipotesi che per il momento possiamo fare è quella di un deficit del tufo in questa zona, riempito, ad esempio, di materiale più conduttivo (sedimenti o terreni sciolti e più umidi) o comunque di strutture caratterizzate da resistività più basse. Non è da escludere che questa situazione sia da collegare con le operazioni di scavo descritte da G. Nardi al n. 6 (NARDI, in questo volume). Come vedremo in seguito, anche nell'area indicata nella Tav. IIa con la lettera B, in corrispondenza della vigna, sono state rilevate alla stessa profondità anomalie conduttive in corrispondenza di anomalie rilevate con la fotografia a bassa quota (Fig. 4).

Scendendo nell'analisi della mappa (Tav. IIa, lettera C), si possono notare, invece, delle anomalie resistive di forma squadrata e ben regolare, con l'evidenza di alcuni spigoli (per i risultati di precedenti prospezioni magnetiche nell'area, cfr. l'Appendice all'articolo di G. NARDI, in questo volume).

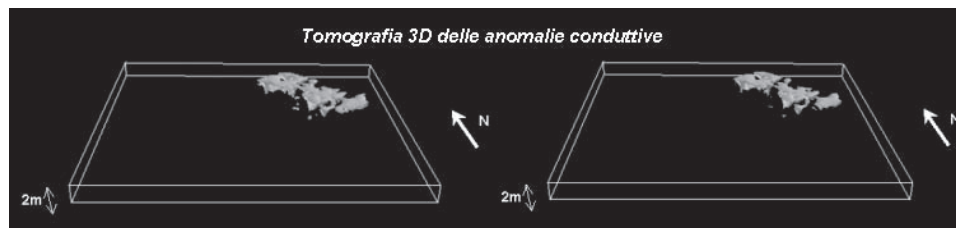


Fig. 7 – Tomografia 3D delle anomalie conduttive.

Proprio queste anomalie più resistive si manifestano in continuità con strutture scavate da R. Mengarelli agli inizi del Novecento ed in questo caso si può, dunque, presumere che esse siano legate a strutture murarie in tufo come quelle ritrovate nell'area di scavo. Nella medesima zona interessata dalle prospezioni, infatti, sono state riportate segnalazioni di strutture antropiche (NARDI, in questo volume, n. 3), caratterizzate da angoli formati da pareti ortogonali di blocchi di tufo. Particolarmente interessante è inoltre, sempre nella zona C, l'anomalia conduttiva che interrompe l'insieme di anomalie resistive ed assume una forma geometrica ben definita con un allineamento all'incirca perpendicolare all'anomalia conduttiva al punto A.

Il fatto, poi, di aver ritrovato delle geometrie così nette dimostra l'efficacia della metodologia applicata in situazioni difficili come su terreni molto conduttivi, con la presenza di strutture di tufo su tufo. Per meglio mettere in risalto lo sviluppo delle anomalie, nella Tav. IIb e nelle Figg. 7 e 8 si riporta una sequenza tridimensionale di sezioni in rilievo in cui i dati sono stati sottoposti ad una procedura di inversione tomografica 3D con il risultato finale della restituzione di sezioni reali di probabilità di occorrenza di anomalie di resistività nel sottosuolo. La ricostruzione 3D viene fatta per diversi valori della resistività in modo da definire la geometria delle aree sia conduttive che resistive. In particolare la Fig. 7 mostra la tomografia delle anomalie conduttive tra la superficie e 2 m di profondità. Si osserva nella parte a Nord del volume investigato lo sviluppo dell'anomalia conduttiva descritta come punto A. Analogamente, nella Fig. 8, viene riportato lo sviluppo 3D delle anomalie resistive del punto C. Anche in questo caso, si tenta con la tomografia del volume dalla superficie fino a 2 m di profondità di dare una migliore visione delle nette geometrie probabilmente associate alle strutture sepolte.

Per concludere, passando ad una breve analisi dei dati in corrispondenza della vigna, anche se nella zona le indagini dovranno continuare nei prossimi mesi, al punto B si evidenziano allineamenti più conduttivi, mentre al punto D della nostra area di indagine un insieme di anomalie più resistive si va a mettere in corrispondenza ed in continuità con le strutture dello scavo.

La continuazione dei lavori è prevista nei prossimi mesi, grazie all'ap-

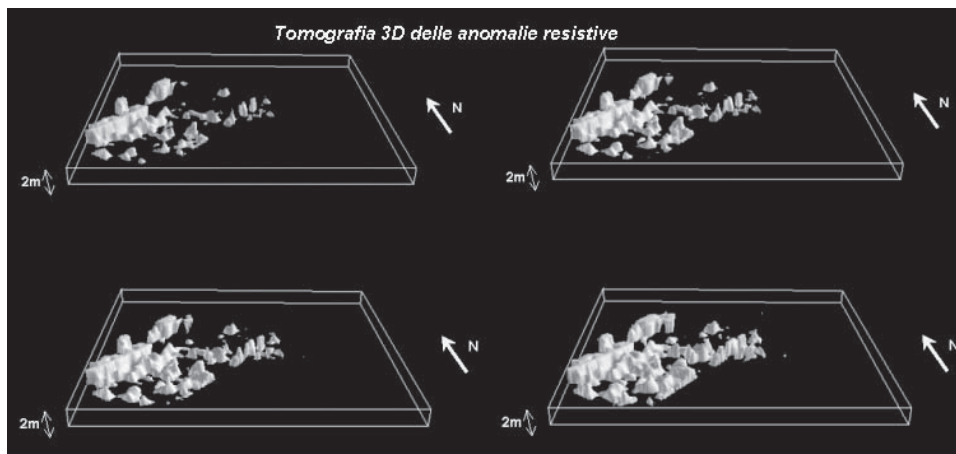


Fig. 8 – Tomografia 3D delle anomalie resistive.

plicazione di un nuovo prototipo di acquisizione dei dati sviluppato all'interno dell'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali del CNR di Roma con la collaborazione dell'Agenzia Spaziale Ucraina, Lviv Centre of Institute of Space Research, che permetterà di effettuare misure di conducibilità senza contatto col terreno fino a circa 5-6 m di profondità.

Si tratta di un sistema a sorgente elettromagnetica controllata, in grado di concentrare tutta l'energia del campo elettromagnetico irradiato in una banda di frequenza molto stretta. Tecnicamente, un campo elettromagnetico a frequenza di 100kHz viene generato dall'antenna trasmittente ed il risultante campo elettromagnetico, dovuto all'interazione della sorgente con le strutture del sottosuolo, è misurato dall'antenna ricevente. Istante per istante i segnali raccolti passano per l'unità centrale che tramite un radio modem interno li trasferisce ad un PC esterno collegato anch'esso ad un radio modem. Il sistema è in grado di misurare le tre componenti del campo elettromagnetico sia "in fase" che "in quadratura di fase". La prima procedura è quella più indicata per la ricerca di oggetti metallici, la seconda per la ricerca di anomalie resistive quali possono essere muri o cavità.

Il vantaggio di questo sistema è di essere fisicamente indipendente e di poter essere adoperato da un unico operatore. Il PC che raccoglie i dati può infatti essere posizionato all'esterno dell'area investigata anche a centinaia di metri di distanza dal sistema di misura e tenuto fermo per tutta la durata della prospezione. Inoltre, il sistema può essere fatto muovere dall'operatore in modo continuo sulla zona da investigare con una velocità non superiore a 50 cm al secondo. In tal modo, siccome il sistema riesce a campionare almeno un dato al secondo, è possibile ottenere risoluzioni spaziali dell'ordine di 30-50 cm.

Tale dispositivo sarà applicato nella zona a nord-est dell'intera area studiata, delimitata a nord da una strada comunale ed a ovest da un'area a pascolo, dove l'assenza di ostacoli ne garantirà la massima funzionalità.

5. CONCLUSIONI

L'importanza di ogni singolo intervento è stata concepita per la possibilità di creare, correlando dati di natura eterogenea provenienti da diversi settori applicativi, un modello reale che tenga conto della "visione attuale" per descrivere il passato; di utilizzare il GIS come un vero strumento d'analisi, capace di fornire informazioni, nonché rinnovati spunti interpretativi e di ricerca; di poter accogliere dati che siano ottenuti dall'applicazione di metodologie scientifiche e dall'impiego di diverse strumentazioni di misura, consentendo potenti modalità d'elaborazione e d'analisi, generando rapporti numerici e grafici d'alta qualità e possibilità interpretativa.

L'ampia utilizzazione del GIS, quindi, impone una profonda consapevolezza delle potenzialità d'uso degli strumenti informatici, di metodologie scientifiche e tecnologiche, fondamentali alla valorizzazione ed integrazione in modo dinamico del patrimonio archeologico. Infatti, come dimostrato, i frequenti interventi a scale diverse che si sono realizzati, dal processo di contestualizzazione del territorio, fino allo studio dell'area archeologica e delle strutture che lo costituiscono, hanno richiesto strumentazioni distinte che operano con precisioni non sempre omogenee e differenti sistemi di riferimento, ma che, alla fine, sono state messe in correlazione diretta.

La ricerca svolta ha avuto evoluzione da un inquadramento a macro-scala fino allo studio del particolare, attraverso informazioni puramente geometriche che sono state integrate o accoppiate con dati di altra natura allo scopo di aumentarne il grado di utilizzazione. Infatti, è opportuno sottolineare che tutti i dati riferibili al mondo reale, quindi al territorio, debbono essere correlati ad entità geometriche quali la forma e la loro posizione in un sistema di riferimento conosciuto. A questo proposito l'applicazione del GPS è da considerarsi fondamentale sia in condizioni dinamiche sia in condizioni statiche per set di dati relazionati al territorio.

Il punto di partenza di questo lavoro sono state le riprese a distanza, che hanno dato la possibilità di evidenziare gli allineamenti delle strutture messe in luce durante gli scavi. Inoltre, la presenza in alcuni fotogrammi di "macchie cromatiche anomale" sulla vegetazione hanno ispirato ed indirizzato indagini geognostiche, fondamentali per produrre dati sulla stratificazione sepolta, che non possono essere ottenuti altrimenti, e per la comprensione dell'articolazione interna del sito. Lo scopo è stato quello di privilegiare la fase progettuale ponendo in primo piano le ipotesi archeologiche e seguendo l'obiettivo di ottenere indicazioni sullo sviluppo ed orientamento delle strutture sepolte.

Nelle fasi di sviluppo di un progetto dopo le analisi a livello territoriale, l'attenzione deve scendere ancor più nella scala degli elementi rilevanti. Presso l'area della Vigna Parrocchiale di fondamentale importanza è stata la realizzazione del rilievo attraverso l'applicazione di uno scanner laser da terra, che ha posto in risalto la complessità delle strutture emergenti. Infatti, tale metodologia ha consentito sia di elaborare un modello numerico della struttura della vasca per consentirne una giusta rappresentazione visuale e volumetrica, sia una corretta disposizione topografica del sito.

I risultati raggiunti, quindi, hanno confermato le notevoli potenzialità dello scanner tridimensionale per la restituzione delle strutture archeologiche e architettoniche: la versatilità dello strumento dimostra, infatti, come sia possibile ottenere sezioni orizzontali e verticali delle murature rilevate elaborando a posteriori, secondo le esigenze che possono emergere nel corso della ricerca, i punti del modello.

F.C., R.G., P.M., D.P.

Ringraziamenti

Si ringraziano il Sig. Davide Petrelli per l'opera di georeferenziazione ed ortorettifica delle immagini e la Dott. Ilaria Mascellani per l'aiuto prestato nel corso delle campagne di acquisizione geofisica. Un sentito ringraziamento va alla "Mauro Foli Fotografo (Cervia, Ra)" per l'indispensabile intervento nel corso delle riprese da aquilone e per aver messo a disposizione la competenza professionale e le attrezzature tecniche. È stato possibile effettuare le riprese con lo scanner tridimensionale grazie alla collaborazione della Trimble Italia e della Geosystem Group di Roma che hanno fornito sia lo scanner laser 3D Callidus, che la competenza tecnica e scientifica per la realizzazione del modello numerico dello scavo e per la sua corretta georeferenziazione. Un particolare ringraziamento va al Geom. Francesco Zuccari (Geosystem Group) per l'assistenza tecnica fornita durante il periodo del rilievo.

FRANCESCA COLOSI, ROBERTO GABRIELLI, DANIELA PELOSO
CNR – Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali
PAOLO MAURIELLO
Università degli Studi del Molise

APPENDICE 1

Nota Tecnica: taratura del dispositivo di ripresa fotografica

L'esperienza di seguito descritta è servita a determinare la massima area fotografabile da diverse quote prestabilite, per avere a disposizione uno schema di riferimento da tenere in considerazione quando si effettuano riprese aeree, a bassa quota, di porzioni di territorio. Per la realizzazione di tale esperienza è stato "ruotato" il piano di lavoro e quindi il territorio da fotografare è rappresentato, nel nostro caso, da una parete che funge da sfondo per le fotografie, mentre la distanza della macchina fotografica dalla parete rappresenta la quota da cui vengono realizzate le fotografie.

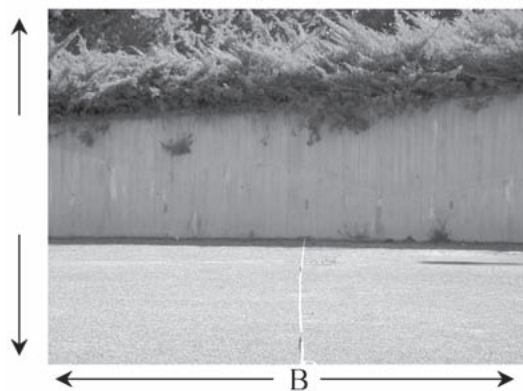


Fig. 9 – Lati del fotogramma misurati.

Sulla parete di fondo, ogni 2 m, sono state posizionate orizzontalmente, lungo l'ipotetico asse x, una serie di mire; la macchina fotografica è stata montata su un cavalletto e posizionata, perpendicolarmente alla mira centrale, a 15 m di distanza dalla parete di fondo; successivamente, portando a zero lo zoom della macchina, si è proceduto allo scatto della prima fotografia. Gli scatti successivi sono stati realizzati aumentando la distanza tra parete e macchina fotografica; precisamente a 20, 30 e 40 m dalla mira centrale posta sullo sfondo.

Le fotografie realizzate sono state ortorettificate tenendo in considerazione il numero di mire presenti in ogni singola fotografia e la loro distanza dalla mira posta al centro della parete di fondo. Mediante questi punti di controllo (GCP), sono state georeferenziate e quindi rese metriche le singole fotografie. Per ogni singolo fotogramma sono stati misurati i due lati (base ed altezza), dove la base indica la massima porzione di ripresa lungo il piano orizzontale e l'altezza lungo quello verticale (Fig. 9) delle fotografie ortorettificate, ottenendo, come mostrato nella Tab. 1, l'area massima di ripresa alle differenti distanze.

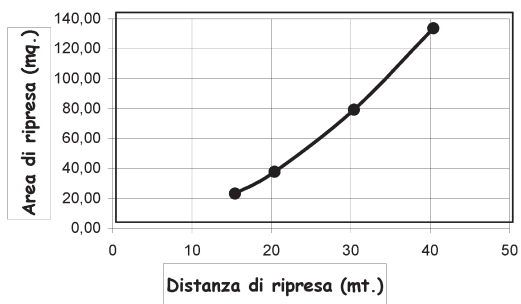
Distanza	B (mt.)	H (mt.)	Area (mq.)
15 metri	5,00	3,80	19,00
20 metri	6,70	5,00	33,50
30 metri	10,00	7,50	75,00
40 metri	13,20	9,80	129,36

Tabella 1

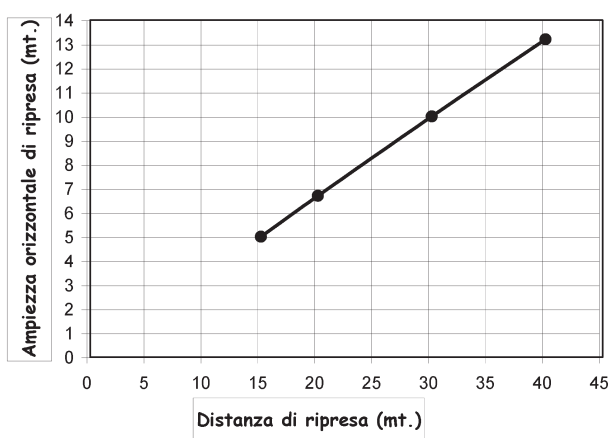
Prendendo in esame i grafici che legano l'andamento dell'ampiezza orizzontale e verticale di ciascun fotogramma con la distanza di ripresa (Fig. 10, A-C), possiamo notare che il coefficiente angolare dell'ampiezza orizzontale del fotogramma è diverso da quello verticale. Questo causa delle lievi distorsioni nelle riprese fotografiche al variare della distanza; tuttavia, tali distorsioni, vengono corrette da una distribuzione dei punti fiduciali di controllo (GCP) per ciascun fotogramma.

DAVIDE PETRELLI

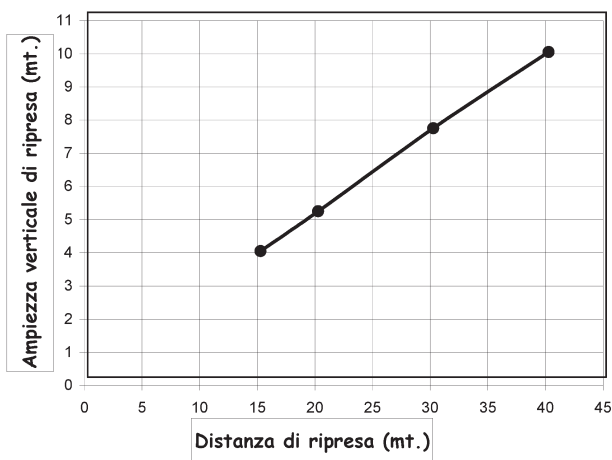
CNR – Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali



A



B



C

Fig. 10 – Andamento lineare dell'ampiezza verticale di ripresa rispetto alla distanza.

APPENDICE 2

Tomografia geoelettrica 3D di probabilità

Si supponga di realizzare una serie di N sondaggi geoelettrici su una superficie S non necessariamente piana. Si consideri quindi un sistema di riferimento cartesiano $\mathbf{r}^o(x,y,z)$ con il piano xy sul livello medio marino e l'asse z diretto verso l'alto.

Si descriva ora l' i -mo sondaggio ($i=1,\dots,N$) con la funzione di resistività apparente $\rho^{a,i}(\mathbf{r})$, dove \mathbf{r} è il punto al quale viene convenzionalmente attribuita la $\rho^{a,i}(\mathbf{r})$. Inoltre, si assume che il volume V del sottosuolo comprendente le sorgenti del campo elettrico misurato sia costituito da Q elementi, ciascuno con un volume ΔV sufficientemente piccolo e resistività ρ_q ($q=1,2,\dots,Q$). Espandendo in serie di Taylor la funzione $\rho^{a,i}(\mathbf{r})$ e indicando con mod_0 il volume V caratterizzato da resistività omogenea, si introduce la potenza W per la funzione $\Delta\rho^{a,i}(\mathbf{r})$ come

$$W = \sum_S [\Delta\rho^{a,i}(\mathbf{r})]^2 \quad (1)$$

dove $\Delta\rho^{a,i}(\mathbf{r})$ è la differenza tra la funzione di resistività apparente misurata e quella $\rho_0^{a,i}(\mathbf{r})$ calcolata sulla base del modello di riferimento mod_0 . Indicando con $\mathfrak{S}_q = \partial\rho^{a,i}(\mathbf{r})/\rho_q|_0$ la generica funzione scanner si passa alla definizione di una probabilità di occorrenza di anomalia di resistività (cioè la probabilità che un'anomalia di resistività presente nella q -ma cella sia la sorgente dell'insieme delle resistività apparenti misurate) come

$$\eta_q(\mathbf{r}_q) = C_q \sum_S \Delta\rho^{a,i}(\mathbf{r}) \mathfrak{S}_q \quad (2)$$

dove

$$C_q = \left\{ \sum_S [\Delta\rho^{a,i}(\mathbf{r})]^2 \cdot \sum_S [\mathfrak{S}_q]^2 \right\}^{-1/2} \quad (3)$$

La funzione scanner \mathfrak{S}_q viene calcolata come segue: siano \mathbf{r}_{A_i} , \mathbf{r}_{B_i} , \mathbf{r}_{M_i} e \mathbf{r}_{N_i} le coordinate degli elettrodi energizzazione A_i , B_i e di quelli di misura M_i , N_i nella generica configurazione dell' i -mo sondaggio. La caduta di potenziale sul dipolo $M_i N_i$ dovuta ad una variazione infinitesimale di resistività nel volume ΔV contenente al suo interno \mathbf{r}_q è

$$\frac{\partial\phi}{\partial\rho_q} = \frac{\partial\phi_{A_i M_i}}{\partial\rho_q} - \frac{\partial\phi_{A_i N_i}}{\partial\rho_q} - \frac{\partial\phi_{B_i M_i}}{\partial\rho_q} + \frac{\partial\phi_{B_i N_i}}{\partial\rho_q} \quad (4)$$

dove

$$\frac{\partial\phi_{UV}}{\partial\rho_q} = \frac{I\Delta V}{4\pi^2} \frac{(x_q - x_U)(x_q - x_V) + (y_q - y_U)(y_q - y_V) + (z_q - z_U)(z_q - z_V)}{[(x_q - x_U)^2 + (y_q - y_U)^2 + (z_q - z_U)^2]^{3/2} [(x_q - x_V)^2 + (y_q - y_V)^2 + (z_q - z_V)^2]^{3/2}} \quad (5)$$

dove $U=A_i, B_i$, $V=M_i, N_i$ e I è la corrente iniettata nel sottosuolo.

PAOLO MAURIELLO
Università degli Studi del Molise

BIBLIOGRAFIA

COLOSI F., COSTANTINI A., GABRIELLI R., PIRO S., SANTORO P. 2001, *Studio integrato e multidisciplinare del territorio: il caso della Valle del Tevere*, «Archeologia e Calcolatori», 11, 171-189.

- COLOSI F., D'ANDREA A., GABRIELLI R. 2002, *Applicazioni informatiche per l'integrazione di dati eterogenei nel processo di conoscenza del sito antico di Cuma*, in B. D'AGOSTINO, A. D'ANDREA (eds.), *Cuma. Nuove forme di intervento per lo studio del sito antico. Atti della Giornata di Studio (Napoli 2001)*, AION, Quaderno 14, 115-126.
- COLOSI F., GABRIELLI R., PELOSO D., ROSE D. 2002, *Impiego del Differential Global Positioning System (DGPS) per lo studio del paesaggio antico: alcuni esempi rappresentativi*, «Archeologia e Calcolatori», 12, 181-197.
- COLOSI F., GABRIELLI R., ROSE D. 2001, *Integrated use of DGPS and Total Station for the survey of archeological sites: The case of Colle Breccioso (Borghose, RI)*, in Z. STANČIĆ, T. VELJANOVSKI (eds.), *Proceedings of CAA 2000: Computing Archaeology for Understanding the Past (Ljubljana 2000)*, BAR International Series 931, Oxford, 9-12.
- GABRIELLI R. 2001, *Introduzione all'uso dei GPS in Archeologia*, in S. CAMPANA, M. FORTE (eds.), *Remote Sensing in Archaeology*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 1-25.
- MAURIELLO P., PATELLA D. 1999, *Resistivity anomaly imaging by probability tomography*, «Geophysical Prospecting», 47, 411-429

ABSTRACT

The article presents activities and specific technologies connected to a multidisciplinary project, developed within the "Caere Project" (<http://www.progettocaere.rm.cnr.it>) and conducted by researchers of the CNR-ITABC and the University of Molise. The goal of the research is to contribute to the archaeological documentation of the Etruscan town of Cerveteri (Rome-Italy), employing a vast array of technologies for 3D reconstruction of the landscape. The research is also aimed at integrating instruments for topographic relief and innovative methodologies of surveying (DGPS, laser total station, 3D laser scanning), to collect geometrical and morphological data at territorial and site scale. A geophysical survey in the Vigna Parrocchiale area, located in the centre of the urban plateau, has been carried out using geoelectric methods of investigation to enable archaeologists to detect subsurface structures. The results obtained and illustrated in the paper will be validated by the reopening in the near future of the excavations by the CNR-ISCIMA.

