

Archeologia e Calcolatori
24, 2013, 355-370

IL RILIEVO DELLE SUPERFICI TRAMITE FOTOGRAMMETRIA 3D: DAL MICROSCAVO DEI COMPLESSI TOMBALI AGLI SCAVI IN OPEN AREA

1. OBIETTIVI DELLA RICERCA

L'interpretazione del deposito archeologico e dei suoi processi di formazione passa attraverso il riconoscimento e l'interpretazione di elementi diagnostici all'interno della stratificazione, dall'identificazione delle interfacce tra gli strati del deposito, al riconoscimento dell'organizzazione spaziale e dell'assetto degli inclusi sulle superfici e nel corpo degli strati individuati, siano essi antropici o non antropici (LEONARDI 1992). Le informazioni metriche e geometriche delle componenti del deposito archeologico e le reciproche relazioni spaziali tra di esse sono quindi alla base della ricostruzione stratigrafica. È fondamentale, pertanto, che i rilievi effettuati durante le operazioni di scavo e la restituzione grafica finale siano in grado di riprodurre fedelmente la complessità delle osservazioni e delle ricostruzioni effettuate sul campo. Per queste ragioni è stata sviluppata dagli scriventi una procedura standard, speditiva e low cost, allo scopo di rilevare tridimensionalmente e sistematicamente ogni superficie esposta durante le fasi di scavo.

Tale procedura di rilievo e modellazione 3D è stata pensata per essere integrata nelle metodologie di rilievo con strumenti digitali e per la gestione dei dati in ambiente GIS. Tali metodologie, se da un lato hanno ormai raggiunto un protocollo consolidato e speditivo per i rilievi 2D, dall'altro lato devono essere ancora migliorate se si vuole ottenere, in tempi brevi, una documentazione 3D del deposito archeologico (cfr. *infra* § 4).

L'affidabilità della procedura è stata verificata in due differenti contesti archeologici: la tomba 112 della necropoli dell'età del Ferro del Piovego (PD) e il castelliere dell'età del Bronzo della Gradiscje di Codroipo (UD). Si vedrà come in tali contesti, scelti come campione poiché diversi per scala di grandezza, tipo di deposito e problematiche di documentazione, il rilievo e le ricostruzioni 3D siano state fondamentali nell'interpretazione del deposito archeologico.

2. PROCEDURA OPERATIVA

La procedura operativa di acquisizione delle superfici, illustrata graficamente nel diagramma in Fig. 1, è suddivisibile in due fasi: la prima, corrispondente al rilievo 3D attraverso tecniche di fotogrammetria (DUBBINI, CAPRA 2009), è tesa a ricostruire la superficie rilevata nella forma di una

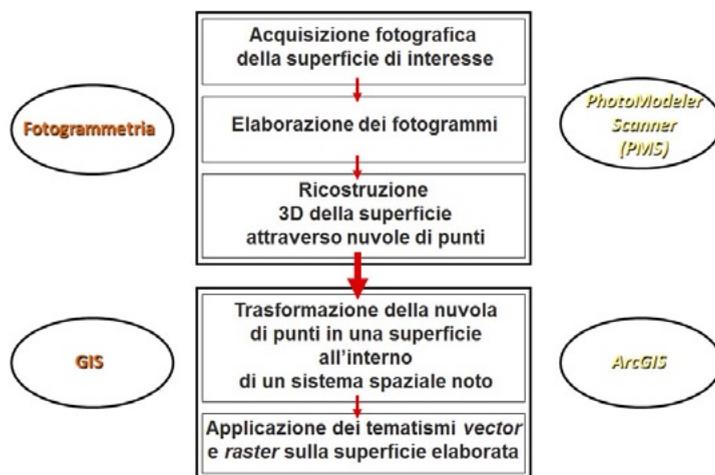


Fig. 1 – Diagramma operativo della procedura di fotomodellazione 3D.

nuvola di punti. Il software utilizzato per generare la nuvola di punti a partire dai fotogrammi acquisiti è PhotoModeler Scanner (PMS), nella versione dimostrativa: esso è stato scelto in primo luogo poiché dotato di un modulo interno di calibrazione della fotocamera e di un algoritmo di correzione della distorsione radiale, e inoltre per la possibilità di verificare al suo interno la posizione delle diverse prese e di roto-traslare la nuvola di punti in un sistema di riferimento noto. La seconda fase del protocollo, la fase di modellazione 3D e di ricostruzione virtuale del deposito, avviene all'interno di un ambiente GIS, dove la nuvola di punti viene trasformata in un DEM attraverso un algoritmo di interpolazione. La scelta di operare all'interno di un GIS, in questo caso ArcGIS, deriva dall'esigenza di trattare i dati 3D all'interno di un sistema riferito, aperto, e dove sia possibile applicare sulle superfici i tematismi vector e raster funzionali alla ricerca archeologica (limiti di US, caratterizzazione dei sedimenti, inclusi, etc.).

Nei prossimi sottoparagrafi vengono riportati nel dettaglio i passaggi operativi della procedura di rilievo e modellazione 3D.

2.1 *Acquisizione diretta della superficie di interesse*

Esposta la superficie da rilevare, si dispongono su di essa due tipologie di mire di riferimento, che qui definiremo *ground control points* (GCP) e *ground points* (GP). I GCP, funzionali alla successiva referenziazione della nuvola di punti, vanno applicati in un numero variabile da tre a n in base alle dimensioni

della superficie e vanno disposti come i target di un'area da rilevare attraverso fotogrammetria monoscopica per ottenere un fotopiano ortorettificato; la loro posizione va rilevata manualmente o con stazione totale¹.

I GP rappresentano i punti omologhi tra i fotogrammi che verranno riconosciuti all'interno di PMS e che permetteranno all'algoritmo di *dense image matching* (YONG *et al.* 2008) del software di riprodurre la superficie attraverso una nuvola di punti²; naturalmente, anche in questo caso il numero di *ground points* varia a seconda delle dimensioni dell'area da rilevare³.

Disposti i GCP e i GP, è possibile effettuare le prese sulla superficie di interesse. Per ottenere un risultato ottimale, i fotogrammi devono avere una sovrapposizione reciproca almeno del 60% e i punti omologhi in comune nei diversi fotogrammi di una stessa scena devono essere almeno otto. Inoltre, l'angolo sulla verticale di ciascuna presa deve rimanere invariato come la base tra le diverse prese. Infatti, il rapporto *b/h* ottimale per permettere all'algoritmo di *dense image matching* di PMS di elaborare delle nuvole di punti con un limitato errore sulle tre coordinate è di 1/3.

2.2 Elaborazione dei fotogrammi e generazione della nuvola di punti

Se la fotocamera utilizzata non è metrica, e quindi non sono noti i suoi parametri di orientamento interno, è necessario, prima dell'elaborazione dei fotogrammi, effettuare su di essa una calibrazione. Nel nostro caso, è stato utilizzato il modulo di calibrazione interno a PMS.

I fotogrammi, inseriti all'interno di PMS, vanno in primo luogo trattati per eliminare gli effetti della distorsione radiale.

Ora è possibile riconoscere e individuare i punti omologhi nei diversi fotogrammi, corrispondenti ai GCP e ai GP disposti in fase di acquisizione. Eseguita tale operazione, il software è in grado di elaborare la nuvola di punti attraverso un algoritmo di *dense image matching*. La possibilità di verificare i rapporti angolari e di *b/h* (HASEGAWA *et al.* 2000) tra le diverse prese prima dell'elaborazione, e di poter quindi scartare le coppiette di fotogrammi che

¹ Nei microcontesti la misura manuale dei *ground control point*, se effettuata con cura, porta a risultati ottimali. Alcune superfici di interesse della Tomba 112 della necropoli del Piovego sono state rilevate manualmente in via sperimentale.

² Un'alta densità di *ground points* permette all'algoritmo di *dense image matching* di creare delle nuvole di punti continue e senza lacune.

³ Si calcola che in media, per ottenere un risultato ottimale, in un microcontesto sono necessarie circa 40 *ground points* al m², mentre in un mesocontesto ne sono sufficienti 8 al m². Il numero di *ground points* da collocare al m² varia in base alla morfologia della superficie da rilevare: le zone della superficie che presentano maggiore discontinuità, come nel caso delle rotture di pendenza, necessitano di una maggiore numero di *ground points*.

porterebbero ad una nuvola di punti lacunosa, discontinua e con un errore elevato sulla coordinata z, ha spinto gli scriventi alla scelta di PMS.

La nuvola ottenuta, risultato dell'elaborazione, ha un numero di punti variabile che dipende dal numero di fotogrammi in funzione dell'ampiezza della superficie rilevata: maggiore è il numero di fotogrammi acquisiti in partenza per unità di superficie, maggiore sarà la densità della nuvola di punti. La scelta del numero di fotogrammi da effettuare in fase di acquisizione dipende dalla scala di grandezza in cui si sta operando e dalle tempistiche necessarie al calcolatore per elaborare i dati. Un elevato numero di fotogrammi in un'area ristretta è necessario nell'ambito di un microcontesto, in quanto all'indagine microstratigrafica del deposito deve corrispondere un'alta risoluzione del rilievo; al contrario, in un mesocontesto, un numero eccessivo di fotogrammi per delle limitate unità di superficie risulta sproporzionato rispetto alla scala di grandezza dell'indagine, con la conseguenza di aumentare notevolmente il "tempo macchina" delle elaborazioni. Il risultato ottimale varia da contesto a contesto, e corrisponde alla nuvola di punti che, elaborata nel minor tempo possibile, dia conto della complessità del deposito archeologico⁴.

La nuvola di punti può essere ora riferita, all'interno di PMS, in un sistema di riferimento noto assegnando ai GCP i valori delle coordinate x, y e z acquisite sul campo.

2.3 Trasformazione della nuvola di punti in superficie

La nuvola di punti, esportata da PMS in formato ASCII, viene inserita all'interno di un ambiente GIS, in questo caso ArcGIS, dove in primo luogo essa viene trasformata in un vector 3D; dal vector 3D della nuvola di punti, attraverso un algoritmo di interpolazione, si ottiene il DEM della superficie.

L'affidabilità delle superfici virtuali è stata verificata effettuando dei test di controllo sulle corrispondenti superfici reali. Per ogni superficie elaborata sono stati scelti dai due ai quindici punti di controllo; la misura dei punti è stata effettuata sul campo con stazione totale (in coordinate x, y, z) ed è stata confrontata con la misura degli stessi punti sul DEM. Nelle superfici elaborate è stato stimato, rispetto alla misura presa con stazione totale, per i microcontesti un errore medio di 3 mm sulle tre coordinate e per i mesocontesti un errore medio di 5,8 mm sempre sulle tre coordinate. Rispetto alla mediana dei valori degli errori misurati, si registra un errore massimo di 9 mm nei microcontesti, e un errore massimo di 17 mm nei mesocontesti.

⁴ Nei microcomplessi tombali rilevati, la cui area non supera il m², sono state elaborate delle nuvole di circa 80.000 punti; le elaborazioni delle superfici rilevate in open area, nell'ambito di un mesocontesto di 50 m², hanno prodotto delle nuvole di circa 100.000 punti.

2.4 Applicazione dei tematismi della ricerca archeologica sulla superficie elaborata

Elaborato il DEM, è possibile applicare su di esso i tematismi raster e vector propri della documentazione digitale 2D da scavo (fotopiani, curve di livello, caratterizzazione dei sedimenti, inclusi antropici e non antropici, limiti di US). Proponendosi di rilevare sistematicamente ogni superficie di interesse⁵ all'interno della stratificazione archeologica e avvalendosi degli strumenti GIS, al termine dell'indagine, l'intera stratigrafia sarà mappata e caratterizzata tridimensionalmente; saranno quindi visibili contemporaneamente, grazie alla documentazione 3D, tutte le superfici di interesse del deposito e i materiali contenuti all'interno di esso, evidenziabili ed isolabili come vector. Sarà quindi possibile, in fase di post-scavo, calibrare l'interpretazione stratigrafica data sul campo in base alle informazioni metriche, geometriche, volumetriche e topologiche delle componenti del deposito.

3. RILIEVO E MODELLAZIONE 3D APPLICATA AD UN MICROCONTESTO: IL CASO STUDIO DELLA TOMBA 112, NECROPOLI DELL'ETÀ DEL FERRO DEL PIOVEGO (VI-IV SEC. A.C.)

La necropoli del CUS-Piovego (Padova), che si colloca globalmente tra la metà del VI e la metà del IV secolo a.C. con una netta prevalenza di contesti databili tra la seconda metà del VI e il V secolo a.C., è stata indagata a più riprese tra 1975-1977 e 1986-1989 dall'allora Istituto di Archeologia dell'Università di Padova. La tomba 112 è stata prelevata in blocco dal cantiere di scavo nel luglio del 1976 ed è stata oggetto di microscavo presso i Laboratori di Archeologia del Dipartimento dei Beni Culturali dell'Università di Padova tra marzo e dicembre 2011 (CALZAVARA CAPUIS, LEONARDI 1979; CUPITÒ 1996-1997; LEONARDI 1990, 1991)⁶.

Si tratta di una tomba in dolio (Fig. 2a), il cui ricco corredo ceramico è composto da: un ossuario situliforme cordonato a fasce rosse e nere e il suo coperchio cordonato sempre a fasce rosse e nere, tre olle, cinque coppe, una coppa su stelo integra e una coppa deposta dopo esser stata privata dello stelo, quattro bicchieri, un piccolo bicchiere/elemento di sostegno, due scodelle, una

⁵ Per superficie di interesse si intende una superficie diagnostica alla comprensione della stratificazione archeologica. Essa può corrispondere alla testa di un strato antropico o non antropico, ad una superficie negativa o ad un taglio all'interno di uno strato.

⁶ Lo studio della tomba rientra nell'ambito del Progetto di Eccellenza "PATAVNOS", diretto dal prof. G. Leonardi. Si ringraziano il prof. G. Leonardi e il prof. M. Cupitò per aver agevolato la sperimentazione di nuove metodologie di rilievo e modellazione 3D nei microcontesti tombali della necropoli del Piovego. Fondamentale inoltre è stato il contributo del dott. L. Bezzi, che per primo ha intrapreso le sperimentazioni di fotomodellazione nei complessi tombali del Piovego (BEZZI 2003-2004).



Fig. 2 – a) Tomba 112. Foto Polaroid effettuata poco prima del suo prelievo sul campo; b) Macrofoto. Si noti come la rottura dell’equilibrio interno del corredo sia provocato dallo spostamento/inclinazione dell’ossuario.

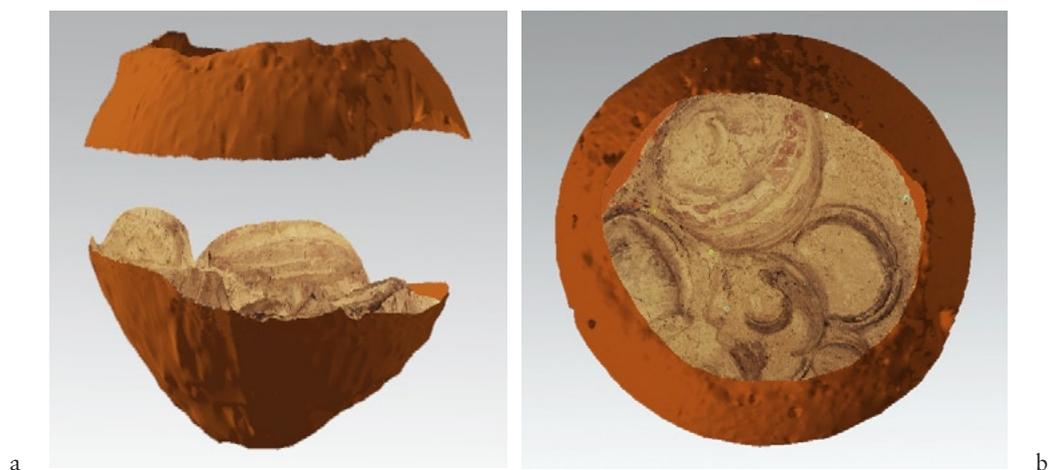


Fig. 3 – Ricostruzione 3D del dolio con in evidenza la superficie superiore del corredo: a) vista laterale (la parte centrale è stata rimossa dalla ricostruzione per mettere in luce la superficie superiore del corredo); b) vista zenitale attraverso la bocca del dolio.

tazzina, un piccolo coperchio (Fig. 2b). I manufatti in ferro sono rappresentati da un punteruolo e un coltello posizionati all’esterno dell’ossuario, e i bronzi corrispondono ad una fibula ad arco molto ribassato con costolatura mediana, una fibula con arco di verga a sezione lenticolare con staffa lunga, e un frammento di *aes rude*, collocati all’interno dell’ossuario (VICENZUTTO 2012-2013).

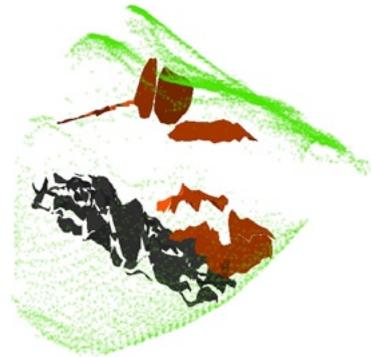
Le meccaniche di spostamento degli elementi del corredo rispetto al loro assetto originario di deposizione sono legati in questo caso principalmente



Fig. 4 – Visualizzazione esplosa dell'ossuario con le superficie di interesse rilevate con fotomodellazione 3D.



a



b

Fig. 5 – a) Macrofoto dell'ossuario situliforme cordonato a fasce rosse e nere scavato e documentato tramite fotomodellazione 3D; b) Posizionamento tridimensionale dei frammenti di coperchio collassati all'interno dell'ossuario (vector di colore arancio) e del livello superiore di ossa cremate (vector di colore grigio scuro).

al collasso dell'ossuario e del suo coperchio connesso. L'ossuario è risultato quindi l'elemento centrale nell'interpretazione delle meccaniche di dislocazione secondaria dell'intero corredo (LEONARDI 1986; CUPITÒ, LEONARDI 1999).

La complessa stratificazione del deposito tombale è stata documentata tridimensionalmente in modo sistematico; la procedura di rilievo 3D è stata applicata sia nelle fasi di microscavo del dolio (Figg. 2a-b), sia durante il microscavo dell'ossuario (Fig. 4). Le informazioni di carattere metrico, geometrico e volumetrico così ottenute sono state fondamentali nel calcolo degli ingombri e dell'assetto dei manufatti all'interno del dolio; la documentazione 3D, sistematica poiché speditiva in fase di rilievo, ha quindi agevolato da un lato la ricostruzione della posizione originaria degli elementi di corredo, e dall'altro lato ha facilitato la definizione dei processi post-deposizionali che ne hanno provocato il collasso e il dislocamento.

A titolo esemplificativo si evidenzia come, attraverso la lettura di una documentazione 3D sistematica, sia stato possibile ricostruire le dinamiche di collasso dell'ossuario, delle ossa al suo interno e del suo coperchio (VICENZUTTO, FARESIN, SALEMI 2013).

Si è rilevato che la superficie superiore delle ossa contenute nell'ossuario era parallela alla bocca dell'ossuario stesso. Parte dei frammenti del coperchio sono caduti all'interno dell'ossuario, sia a contatto con le ossa, sia nello spazio al di sopra di esse. Al contrario di quanto visto per le ossa, i frammenti di coperchio avevano un assetto quasi esclusivamente parallelo al suolo e discordante rispetto alla bocca dell'ossuario (Figg. 5a-b). Pertanto, si è potuto ricostruire che durante la caduta dell'ossuario le ossa non si sono spostate, il coperchio è collassato e l'ossuario era privo di sedimento all'interno poiché alcuni dei frammenti di coperchio sono caduti all'interno – anche a contatto con le ossa – ma con un assetto parallelo al suolo. Le possibili spiegazioni che diano conto del mantenimento della posizione originaria delle ossa sono due: o esse erano contenute all'interno di una sacca in materiale deperibile, o si erano già cementificate prima dello spostamento dell'ossuario.

4. RILIEVO E MODELLAZIONE 3D APPLICATA AD UN MESOCONTESTO: IL CASO STUDIO DELLA GRADISCJE DI CODROIPO, INSEDIAMENTO DELL'ETÀ DEL BRONZO RECENTE (XIII-XII SEC. A.C.)

Il castelliere della Gradiscje, localizzato immediatamente a sud dell'attuale abitato di Codroipo (UD), è un sito arginato, noto da materiali di superficie dal 1983 ed oggetto di regolari campagne di scavo stratigrafico dal 2004⁷; i materiali di superficie attestano una frequentazione dal Bronzo

⁷ Organizzate dal Museo Civico di Codroipo e dalla Società Friulana di Archeologia sotto la direzione della Dr.ssa C. Brancolini e del Dr. G. Tasca; solamente nel 2010 l'attività è stata sospesa, per poi riprendere l'anno seguente.

Recente alle prime fasi dell'età del Ferro (TASCA 2011). Il fenomeno dei castellieri friulani è costituito da insediamenti dell'ampiezza di 2-2,5 ha distribuiti secondo una maglia pressoché regolare con distanze di 10 km (alta pianura) e di 4,5 km (risorgive) posti su leggeri dossi (figure risparmiate dall'erosione) specialmente riconoscibili in area di risorgive, cinti da strutture perimetrali in "terra armata" (terra e ghiaia con strutture portanti in legno, quali pali e cassoni, SIMEONI, CORAZZA 2011). L'arco cronologico complessivo di sviluppo e utilizzo dei castellieri friulani coincide sostanzialmente con quello dei castellieri carsici in muratura a secco, estendendosi complessivamente tra il Bronzo Antico e il IV sec. a.C.

Rispetto ad altri castellieri della pianura friulana (SIMEONI, CORAZZA 2011), Codroipo non risulta frequentato prima del tardo XIV-XIII sec. a.C. (TASCA 2011). L'importanza del sito consiste nell'aver fornito per la prima volta in Friuli l'evidenza di strati in diretta sovrapposizione con assemblaggi ceramici che documentano la locale evoluzione stilistica e formale tra le diverse fasi successive del Bronzo Recente e il passaggio alla prima fase del Bronzo Finale (fine XIV-XII sec. a.C.: TASCA 2012).

Sotto l'aspetto puramente metodologico il rilievo del sito è stato condotto con tecniche di rilievo diretto – soprattutto attraverso i metodi della triangolazione e del rilievo per ascisse ed ordinate – fino alla campagna 2008 ed ha visto poi, con l'arrivo nel gruppo di lavoro degli scriventi nella campagna 2009, l'introduzione del rilievo digitale.

Come già descritta in altre sedi (LAURENZA, PUTZOLU 2006, 2009), la catena operativa del rilievo digitale impostato nella campagna 2009 prevedeva l'utilizzo combinato del rilievo a stazione totale e della fotogrammetria monoscopica: con la prima venivano rilevati i contorni delle singole US e le quote significative e con la seconda si elaboravano dei fotopiani ortorettificati che fungessero da base per una più accurata resa grafica dei materiali che giacevano sulle superfici di interesse.

Per un più completo rilievo digitale, che tenesse nella giusta considerazione anche l'aspetto tridimensionale dei depositi indagati, le sopraccitate superfici venivano anche rilevate con la tecnica del microrilievo a stazione totale: di ogni US si rilevava anche una maglia di punti all'interno del perimetro per poterne poi interpolare la relativa superficie. La medesima metodologia era stata impiegata per il rilievo del fossato della terramara di Santa Rosa di Poviglio (CREMASCHI *et al.* 2005) ed aveva fornito ottimi risultati in termini di resa del DTM: se funzionava per una terramara emiliana perché non avrebbe dovuto funzionare per un castelliere friulano? Ciò di cui ci si rese subito conto fu che i due contesti non potevano essere accostati così superficialmente perché mentre nel primo sito si documentava una superficie di calpestio dove l'azione dell'uomo si era tradotta nello scavo di strutture negative (pozzi, canali, canalette e buche di palo), nel secondo si documentavano cluster di

frammenti ceramici e stratigrafie in progressivo accrescimento i cui spessori (molto spesso centimetrici) richiedevano una maglia molto più stretta di quella richiesta nel caso di studio precedente: la conseguenza inevitabile fu quella di dilatare notevolmente i tempi di acquisizione sul terreno del microrilievo. Dopo la pausa forzata del 2010, la ripresa degli scavi del 2011 vide quindi la sperimentazione di un nuovo approccio metodologico al rilievo tramite la fotomodellazione 3D testata da Andrea Fiorini (FIORINI 2009, 2010) nel rilievo dell'abitato dell'età del Bronzo di Pantelleria.

Con questa metodologia sembravano finalmente coniugate le enormi potenzialità informative delle superfici interpolate dalle nuvole di punti acquisite tramite laser scanner e le esigenze di una metodologia low-cost (sia in termini di hardware che di operatori impegnati nel rilievo e nel post-processing). Durante la campagna 2011 si è quindi affiancato al collaudato rilievo tramite stazione totale e fotogrammetria monoscopica un sistematico rilievo delle finestre stratigrafiche individuate tramite tecniche di fotomodellazione 3D (D'ANDREA, BARBARINO 2012).

Va qui ricordato che i processi di formazione del deposito della Gradiscje, come gran parte degli insediamenti protostorici dell'Italia settentrionale, dipendono in larga parte dal continuo succedersi di attività antropiche e naturali che insistono in modo palinestico sulle stesse aree e hanno come esito una debole stratificazione in termini di spessore del deposito. Tali attività sono riferibili alla costruzione, manutenzione e demolizione di singole strutture abitative e non-abitative, preparazione e/o ristrutturazione di interi comparti abitativi, attività di zappatura sulle aree adibite ad orto, fenomeni meteorici che dilavano le superfici, innalzamento/abbassamento della falda freatica, etc. Tutti questi fenomeni, a cui se ne potrebbero aggiungere molti altri, concorrono alla formazione del deposito in termini di apporto/asporto/trasporto/trasformazione di componenti del deposito stesso e insistono diacronicamente sulle stesse aree: il processo antropico più recente, quindi, tende spesso a trasformare o cancellare le tracce di processi precedenti all'interno del deposito (post-deposizionale attivo: LEONARDI 1992); a queste dinamiche vanno poi sommati gli effetti dei processi post-deposizionali passivi (LEONARDI 1992). Si ritiene inoltre utile specificare che il deposito del castelliere di Gradiscje risulta, come purtroppo gran parte dei contesti protostorici in Friuli, decappato da lavori agricoli di epoca successiva. Non essendo quindi chiaramente identificabili le superfici di vita associate alle capanne per i motivi sopra esposti, il deposito risulta di difficile lettura stratigrafica, e ciò obbliga gli archeologi ad uno scavo per microtagli mirati che evidenzino cluster e dispersioni di materiali all'interno della stratificazione, spesso esito di superfici d'uso rielaborate.

La documentazione tridimensionale, che nel 2009 era stata condotta attraverso il microrilievo a stazione totale, è risultata immediatamente di più

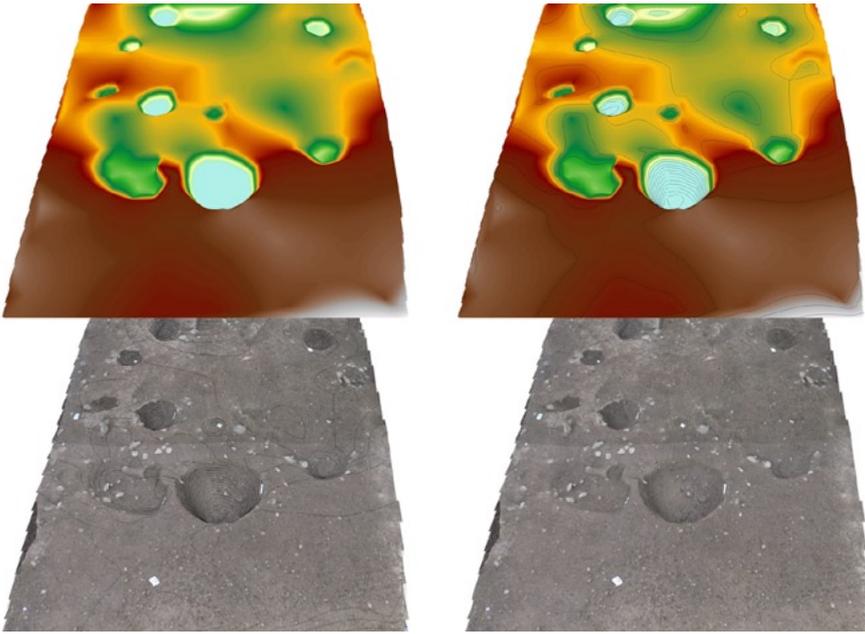


Fig. 6 – Elaborazioni 3D di una superficie rilevata nel 2009 con la tecnica del microrilievo (Trincea A, vista da O).

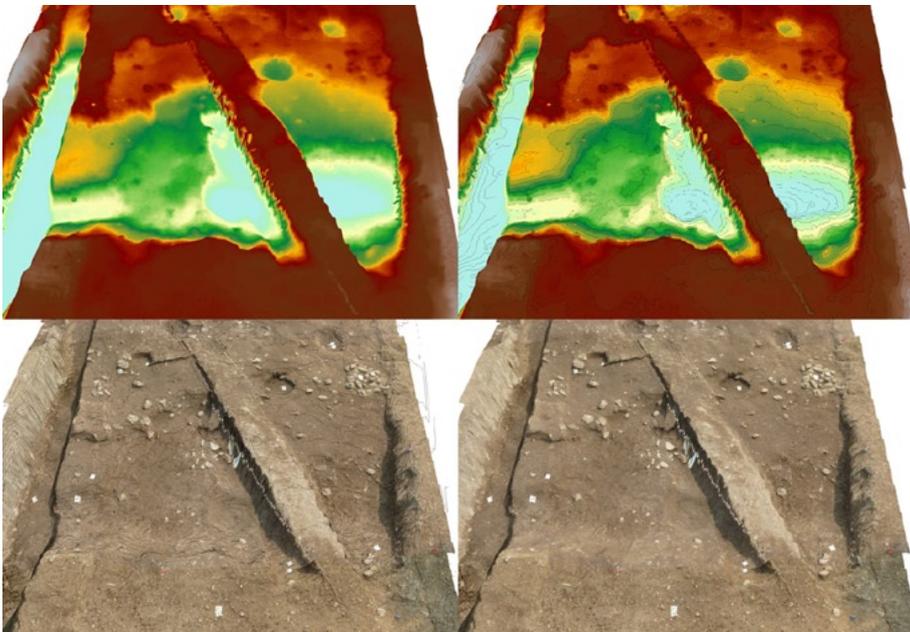


Fig. 7 – Elaborazioni 3D di una superficie rilevata nel 2012 con la tecnica della fotomodellazione 3D (Trincea A, vista da O).

veloce acquisizione e, dopo i primi processamenti di dati, con una risoluzione notevolmente più alta: le superfici ricostruite apparivano meno spigolose di quelle della campagna precedente e di conseguenza i prodotti grafici derivati come le curve di livello e le immagini 3D con il draping dei fotopiani sui DEM risultavano più realistici (Figg. 6-7).

La mancanza di esperienza nei confronti della metodologia impiegata e la complessa logistica dello scavo, con due settori contemporaneamente aperti (Trincea A 11×4 m e Trincea C 13×18 m), hanno reso impossibile procedere al post-processing delle superfici mano a mano che queste venivano rilevate ma si è riusciti ugualmente a processare alcune scansioni campione e confrontarle immediatamente con misure prese con la stazione totale, trovando così conferma della bontà della metodologia scelta anche per la documentazione del sito indagato.

La campagna 2012 è stata, per gli aspetti legati al rilievo, quella della ottimizzazione della catena operativa (cfr. *supra* § 2) e ci si propone per il futuro di procedere con l'elaborazione sul campo delle superfici rilevate per poter utilizzare direttamente in fase di scavo il notevole valore informativo della documentazione GIS⁸ su una base 3D con alto grado di fotorealismo, senza dimenticare che, anche a scavo concluso, è possibile utilizzare la documentazione per elaborare infinite sezioni trasversali o valutare *de visu* i rapporti topologici tra le varie US (CATTANI, FIORINI, RONDELLI 2004; LAURENZA, PUTZOLU 2006).

5. CONSIDERAZIONI SUL RILIEVO 3D ATTRAVERSO LA FOTOMODELLAZIONE: «WITH GREAT POWER THERE MUST ALSO COME GREAT RESPONSIBILITY» (LEE, DITKO 1962)

Nell'aprile del 2003, in occasione della conferenza internazionale Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), si tenne un interessante scambio di opinioni intorno all'uso dello scanner per la documentazione archeologica dello scavo. In particolare, Maurizio Cattani commentò che era necessaria estrema cautela nel valutare il ruolo di questa tecnologia in cantiere in quanto gli altissimi costi da sostenere per l'acquisto dell'hardware e per la formazione degli operatori la rendevano disponibile solo ad una piccola cerchia di utilizzatori; aggiunse inoltre che fino a quando non fossero diventati strumenti economicamente più accessibili bisognava continuare a ricercare metodologie alternative.

A dieci anni di distanza, se da un lato il prezzo di uno scanner laser si è abbassato, pur rimanendo ancora elevato per un'utenza archeologica che

⁸ Fin dal 2009 la documentazione acquisita con stazione totale e fotogrammetria monoscopica viene immediatamente vettorializzata e inserita in un GIS di scavo che viene utilizzato come supporto quotidiano per orientare le strategie di intervento.

non sia legata a grossi studi di rilievo o a dipartimenti universitari, dall'altro la ricerca archeologica ha assistito allo sviluppo delle tecniche di fotomodellazione 3D.

Descrivendo con un certo numero di casi di studio l'applicazione di entrambe le metodologie di rilievo 3D, A. D'Andrea e M. Barbarino hanno scritto di ritenere che «... in alcune circostanze i due metodi di 3D data-capture piuttosto che alternativi debbano essere considerati complementari quando gli oggetti da riprendere, per le loro proprietà strutturali e le finalità di una documentazione composta da rilevamenti a differente risoluzione e ricchezza di dettagli, richiedano metodologie e strumenti integrati ... Nonostante una positiva evoluzione, anche in termini di riduzione dei costi di acquisto della strumentazione e formazione del personale, la tecnologia laser scanning resta ancora appannaggio di un numero molto ristretto di gruppi di ricerca» (D'ANDREA, BARBARINO 2012). Quasi fossero una risposta al problema posto nel 2003 a Vienna, le parole di D'Andrea e Barbarino sottolineano chiaramente che chi voglia sviluppare standard operativi di documentazione basati su tecniche e metodologie di rilievo 3D senza disporre di un budget a 6 cifre (inteso non solo per l'acquisto di hardware e software per il rilievo ma per coprire il costo complessivo di una campagna di scavo) può ora contare sulla valida alternativa costituita dalla fotomodellazione 3D. Come dimostrato da numerosi altri lavori in questo volume la fotomodellazione 3D è ormai da considerarsi affidabile e speditiva (sia riguardo ai tempi di acquisizione sul terreno che di post-processing): il rischio ora è quello di utilizzare una "tecnica di rilievo" senza pensare a come modificare la "metodologia di rilievo".

Riferendosi alla diffusione nell'impiego dei GIS in archeologia della seconda metà degli anni '90 David Wheatley e Mark Gillings scrivevano «unfortunately, the growth in availability of GIS software has not always been accompanied by a corresponding increase in the knowledge and technical capabilities of archaeologists. All too often, archaeological research or cultural resource management projects begin with the vague idea of GIS-ing the data and undertaking some GIS-ish analysis with it later. When later arrives, it becomes clear that poor decisions taken in ignorance about recording have been compounded by a lack of understanding of the capacities and limitations of the technology. The inevitable result is, at best, analysis that fails to live up to expectations and, at worst, flawed data-sets, poorly documented resources and misleading conclusions» (WHEATLEY, GILLINGS 2002). Anche nei confronti della fotomodellazione 3D è importante avere chiaro cosa ci si prefigge di ottenere dal suo impiego.

Per quanto attiene allo scavo di Gradiscje, è la difficile leggibilità della stratificazione che obbliga chi scava ad effettuare diversi tagli mirati all'interno di un deposito troppo spesso caratterizzato da matrici difficilmente distinguibili per seguire cluster di reperti che disegnano dei relitti di superfici d'uso, a

suggerire un simile approccio al rilievo: se infatti le unità stratigrafiche che vengono discrezionate all'interno delle diverse superfici rilevate dovessero, in seguito allo studio dei materiali, rivelare delle associazioni reciproche saremmo in grado di meglio comprendere le dinamiche ed i processi formativi del deposito. Il rilievo 3D delle superfici con le quali viene sfogliato il deposito permette di acquisire dei blocchi di punti 3D riferiti alle singole unità stratigrafiche, cui sono associati i materiali significativi corredati da un ID, e di potere poi in fase di analisi raggruppare quanto le dinamiche dello scavo avevano tenuto separato.

6. CONCLUSIONI

La procedura per il rilievo 3D delle superfici qui proposta, low cost, speditiva e basata sull'integrazione tra tecniche fotogrammetriche e ambiente GIS, riduce notevolmente, rispetto al rilievo 3D effettuato con altre tecniche, i tempi di fermo cantiere e in parte di post-processing dei dati. Inoltre, i valori degli errori delle superficie virtuali nelle tre coordinate rispetto ai valori delle superfici reali sono in linea, dal punto di vista degli scriventi, con la risoluzione dell'indagine microstratigrafica nei microcontesti e stratigrafica nei mesocontesti (cfr. *supra* § 2.3).

Inoltre, una documentazione 3D sistematica delle superfici, oltre a svolgere un ruolo fondamentale nell'interpretazione del deposito archeologico, ricostruisce e valorizza il contesto di indagine e ne rende più immediata la comunicazione anche a non-specialisti del settore; dopotutto, la molla che spinge chi si occupa di questa disciplina resta l'invito rivolto a tutti da Gary Lock (ormai più di una decina di anni fa!) ad andare "beyond the map" (LOCK 2000).

CRISTIANO PUTZOLU, DAVID VICENZUTTO
Dipartimento dei Beni Culturali: Archeologia,
Storia dell'Arte, del Cinema e della Musica
Università degli Studi di Padova

BIBLIOGRAFIA

- BEZZI L. 2003-2004, *Necropoli del Piovego: scavo e documentazione informatica delle tombe n. 71 e U.F.C. 2*, Tesi di Laurea, relatore G. Leonardi, Università degli Studi di Padova.
- CALZAVARA CAPIUS L., LEONARDI G. 1979, *Padova, località S. Gregorio: necropoli paleo veneta del Piovego*, «Rivista di Archeologia», 3, 137-141.
- CATTANI M., FIORINI A., RONDELLI B. 2004, *Computer applications for a reconstruction of archaeological stratigraphy as a predictive model in urban and territorial contexts*, in K.F. AUSSERER, W. BÖRNER, M. GORIANY, L. KARLHUBER-VÖCKL (eds.), *Enter the Past: The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage CAA 03 Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Proceedings of the 31st Conference, (Vienna 2003)*, Oxford, Archaeopress, 299-303.

- CREMASCHI M., FERRARO F., PIZZI C., PUTZOLU C. 2005, *Spatial intra-site analyses at the terramara of Poviglio S. Rosa (Reggio Emilia, Italy): The enclosure vs. the hydraulic system*, in M. FORTE (ed.), *The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies. Proceedings of the 2nd Italy-United States Workshop (Rome-Italy 2003; Berkeley-USA 2005)*, B&R International Series 1379, Oxford, Archaeopress, 23-33.
- CUPITÒ M. 1996-1997, *Necropoli del Piovego. Analisi e interpretazione della planimetria e scavo delle tombe in laboratorio*, Tesi di Laurea, relatore prof. G. Leonardi, Università degli Studi di Padova.
- CUPITÒ M., LEONARDI G. 1999, *Potenzialità informative del record archeologico. Microstratigrafia e interpretazione genetico-processuale: uno studio di caso funerario*, «PADUSA», 35, 177-208.
- D'ANDREA A., BARBARINO M. 2012, *Modellare lo scavo archeologico: esperienze e tecniche a confronto*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 2.0. Atti del Workshop (Bologna 2012)*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 229-245.
- DE FELICE G. (ed.) 2009, *Digitalizzare la pesantezza. L'informatica e il metodo della stratigrafia*, Bari, Edipuglia.
- DUBBINI M., CAPRA A. 2009, *Fotogrammetria per l'archeologia*, in E. GIORGI (ed.), *Groma 2. In profondità senza scavare*, Bologna, BraDypUS s.a., 91-116.
- FIORINI A. 2009, *Esperienze di fotogrammetria e stereofotogrammetria archeologica*, in DE FELICE 2009, 175-186.
- FIORINI A. 2010, *La documentazione tridimensionale dello scavo archeologico nell'abitato dell'Età del Bronzo di Mursia, Pantelleria (TP)*, «IpoTESI di Preistoria», 3, 2, 1-14.
- HASEGAWA H., MATSUO K., KOARAI M., WATANABE N., MASAHARU H., FUKUSHIMA Y. 2000, *DEM accuracy and the base to height (b/h) ratio of stereo images*, «International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing», 33, 356-359.
- LAURENZA S., PUTZOLU C. 2006, *Modelli dal terreno: riflessioni e ripensamenti sulla gestione digitale dei dati di scavo*, in M. CATTANI (ed.), *Nuove frontiere dell'archeologia: il trattamento informatico del dato tridimensionale* (CD-ROM), Ravenna, Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Archeologia.
- LAURENZA S., PUTZOLU C. 2009, *Dalla terra al monitor: riflessioni e considerazioni sulla gestione digitale dello scavo archeologico*, in DE FELICE 2009, 107-122.
- LEE S., DITKO S. 1962, *Amazing Fantasy*, 15, 11.
- LEONARDI G. 1986, *Procedure di stratigrafia processuale. La necropoli paleoveneta del Piovego a Padova*, «Aquileia Nostra», 57, 210-235.
- LEONARDI G. 1990, *L'area archeologica del C.U.S.-Piovego, Padova: relazione preliminare alla campagna di scavo 1989, con note metodologiche*, «Quaderni di Archeologia del Veneto», 6, 11-53.
- LEONARDI G. 1991, *b) loc. Piovego*, «Studi Etruschi», 57, 412-414.
- LEONARDI G. 1992, *Il deposito archeologico: bacini, processi formativi e trasformativi*, in G. LEONARDI (ed.), *Processi formativi della stratificazione archeologica, Atti del seminario internazionale*, Padova, Saltuarie dal laboratorio del Piovego 3, Imprimer s.n.c., 13-47.
- LOCK G. (ed.) 2000, *Beyond the Map. Archaeology and Spatial Technologies*, Amsterdam, IOS Press.
- SIMEONI G., CORAZZA S. (eds.) 2011, *Di terra e di ghiaia. La protostoria del Medio Friuli tra Europa e Adriatico*, Mereto di Tomba, La Grame.
- TASCA G. 2011, *L'età del bronzo a Codroipo: produzione e circolazione della ceramica*, in SIMEONI, CORAZZA 2011, 200-209.
- TASCA G. 2012, *Tipologia e cronologia della produzione ceramica del Bronzo medio-recente nella Bassa Pianura Friulana*, Tesi di Dottorato, relatore prof. G. Leonardi, Università degli Studi di Padova.

- VICENZUTTO D. 2012-2013, *Necropoli del Piovego (VI-V sec. a.C.). Tomba 112: scavo, processi formativi, documentazione 2D e 3D e inquadramento cronologico*, Tesi di Specializzazione, Relatore G. Leonardi, Università degli Studi di Padova.
- VICENZUTTO D., FARESin E., SALEMI G. 2013, *Necropoli del Piovego (VI-V sec. a.C.). L'utilizzo della tomografia assiale computerizzata e della fotogrammetria nel microscavo dei complessi tombali: il caso della tomba 112*, poster in Conferenza "1973-2013. A quarant'anni dallo scavo della prima età del ferro della necropoli di San Valentino", (San Vito al Tagliamento 2013).
- WHEATLEY D., GILLINGS M. 2002, *Spatial Technology and Archaeology. The Archaeological Application of GIS*, London and New York, Taylor & Francis.
- YONG F., HAYAN H., HONG C., WU Z. 2008, *Object information automatic extraction from high resolution stereo pairs by dense image matching and information fusion*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 37, 1365-1370.

ABSTRACT

The need for a quick methodology of 3D surface recording, sensitive to the timing of fieldwork, low cost, and suitable for both micro- and meso-contexts, has induced the writers to develop a standard procedure. It is now possible to obtain a dense x, y, z point cloud starting from the photographic coverage of a surface, respecting precise parameters of overlapping for the different photos picturing the scene, and calibrating the camera. The software used to generate the point cloud is PhotoModeler Scanner, chosen firstly for its internal module of camera calibration and correction algorithm of radial distortion, and secondly for its capacity to verify the position of the different frames and point clouds roto-translating in a known reference system. The key point of the procedure is the importing of the point cloud in a GIS environment, where a DEM is created with an interpolation algorithm. The resulting surface is in the same GIS environment of vector and raster themes documenting the excavation. The procedure was tested in two different case studies: a micro-context corresponding to Tomb 112, a cremation tomb in the Iron Age necropolis of Piovego (Padua, Italy), and a meso-context corresponding to the Late Bronze Age settlement of Gradiscje (Codroipo, Italy). In both cases, meaningful because different in scale stratigraphy and survey issues, it is clear how 3D survey and the subsequent modeling of the point cloud has been fundamental for the understanding of the archaeological record.