

Il rilievo fotogrammetrico: un metodo alternativo di documentazione dello scavo archeologico. Casi applicativi presso la villa romana di Aiano-Torraccia di Chiusi (SI)

Marco Cavalieri - Gabriele Mainardi Valcarenghi - Alessandro Novellini

Premessa

Il sito della villa di Aiano-Torraccia di Chiusi è ubicato nel territorio del Comune di San Gimignano (Siena, Italia), lungo la valle del torrente Foci (fig. 1). Pur se localizzato già da tempo, non è mai stato oggetto di studio fino all'estate 2005, allorquando l'*Université catholique de Louvain* (Belgio) decise di porre in atto un progetto d'indagine sistematica ripartito in più anni.

La scelta d'intraprendere uno studio sulla villa di Aiano-Torraccia di Chiusi è stata dettata dall'interesse indotto dalle evidenze archeologiche emerse, ma altrettanto dalla necessità scientifica di riesaminare, possibilmente alla luce di nuovi dati, le numerose questioni, in parte ancora aperte, relative al popolamento, all'economia, al paesaggio rurale etc. nell'ambito territoriale della Val d'Elsa in età romana. Questa valle, infatti, per la sua posizione nel cuore dell'antica *regio VII Etruria* (area di raccordo tra l'entroterra volterrano ed il mare) risulta fondamentale alla comprensione dell'intera storia regionale. Tale fine, evidentemente, non sarebbe stato raggiungibile mediante un pur articolato scavo archeologico di un solo sito. Dunque, l'intento, fin dalla fase progettuale, è stato quello di tessere una rete di collaborazioni su più fronti con altri Atenei europei ed italiani (in particolare l'Università di Firenze in Italia e quella di Jena in Germania), al fine di creare una sinergia di metodi, strategie ed intenti atta a donare un quadro il più completo possibile.

Il periodo cronologico preso in esame è assai ampio, dalle prime fasi di romanizzazione alla tarda Antichità e alto Medioevo (I sec. a.C. – VIII sec. d.C.); tra gli strumenti ermeneutici impiegati occupa un ruolo di primo piano lo scavo nel sito di Aiano-Torraccia di Chiusi.



Fig. 1. Panorama della valle del Torrente Foci, ove è ubicata la villa romana di Aiano-Torraccia di Chiusi, Comune di San Gimignano, Siena.

I dati archeologici a disposizione

Durante le prime quattro campagne di scavo sono stati investigati 1000 m² dell'ettaro ipotizzato, in base ad indagini geofisiche, quale superficie complessiva dell'area occupata dalla villa¹; nonostante la relativa esiguità dell'intervento di scavo, i primi dati a nostra disposizione sono di grande interesse.

Le indagini compiute fino ad oggi hanno individuato un importante quartiere della villa, relativo probabilmente ad un'area di *otium* (soggiorno), incentrata su un'ampia sala a pianta triangolare i cui vertici sono occupati da esedre

¹ CAVALIERI, BOTTACCHI, MANTOVANI, RICCIARDI 2007:159-186.

Fig. 2. Planimetria della villa alla fine della IV campagna di scavi (m² 1000 ca.), agosto 2008.

circolari. Il rinvenimento della sala, scavata per una superficie attuale di circa 100 m², ha chiarito la natura residenziale delle strutture e l'elevata capacità culturale ed economica di coloro che ivi abitavano. Inoltre, lo studio delle evidenze archeologiche ha rivelato come in tutta l'area scavata in questi quattro anni si siano succedute diverse fasi edilizie e di vita, trasformando l'aspetto, la planimetria e anche le funzioni della villa (fig. 2)².

Se l'impianto del sito, infatti, risale al III sec. d.C., così come i materiali ceramici e le tecniche edilizie attestano, un rilevante intervento di restauro deve datarsi tra la fine del IV e gli inizi del V sec. d.C., fase in cui s'interviene sulla grande sala triabsidata trasformandone la planimetria. Lo studio degli alzati murari ha dimostrato che la pianta triangolare dell'ambiente, in origine fosse verosimilmente caratterizzata da ben sei esedre poste attorno ad uno spazio ad andamento esagonale; solo in un secondo momento si provvede al tamponamento alterno di tre dei sei vani semicircolari, contemporaneamente intervenendo con la costruzione di una nuova pavimentazione.

Il pavimento della sala triabsidata è ben conservato: si tratta di un cementizio a base litica, rubricato in superficie, in cui sono state inserite tessere musive di calcare, in prevalenza nero, a formare una decorazione a specchi decorativi geometrici. In base alle analisi stilistica, stratigrafica ed edilizia del pavimento, nonché dei materiali ceramici rinvenuti negli ultimi strati di vita a diretto contatto con questo, possiamo affermare che tra la fine del V e gli inizi del VI sec. d.C., l'ambiente fu abbandonato, determinando dopo qualche tempo il crollo delle coperture e dei muri.

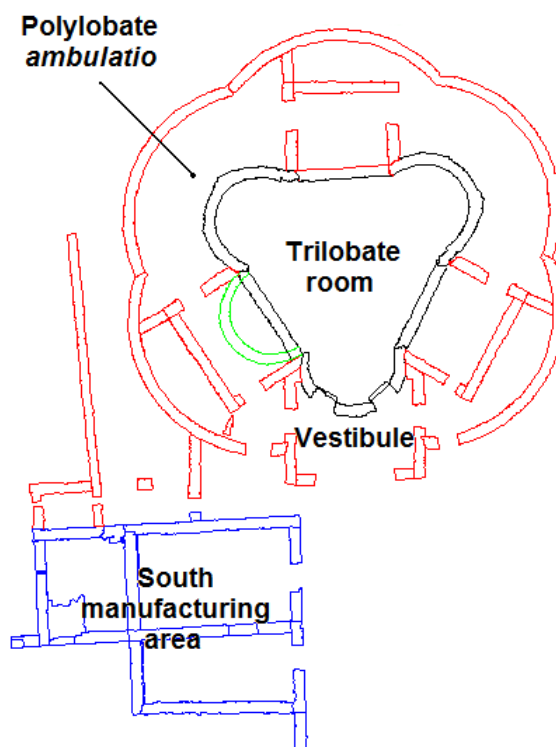
Ma questa sorte non toccò a tutto il complesso: si è appurato, infatti, come esternamente alla sala triabsidata, in tutta un'ampia area delimitata da un sistema di muri ad andamento curvilineo che inglobavano al centro l'ambiente di cui si è parlato, tra il VI ed il VII sec. d.C. si assista ad una rifunzionalizzazione della villa che pare perdere il suo valore di sito prettamente residenziale per acquisire un ruolo marcatamente produttivo. In questa fase, che ha evidenziato materiali d'influenza longobarda, gli antichi vani della villa, spoliati dei loro apparati decorativi marmorei e musivi, vengono parcellizzati e riquilibrati in bassi bacini per accogliere acqua (decantazione delle argille?) e laboratori per la produzione di materiali ceramici, come evidentemente fa comprendere il rinvenimento *in situ* di una fornace da ceramica.

In generale, comunque, soprattutto nelle fasi iniziali di vita della villa, si ha l'impressione che la ricchezza ed il lusso che la contraddistinguevano, fossero notevoli. In tal senso sono indicativi i numerosi ritrovamenti marmorei della decorazione architettonica in *opus sectile*. La varietà dei "marmi" è notevolissima: dai bianchi e grigi più comuni dalle Alpi Apuane, alle brecce d'estrazione senese, fino a frammenti in porfido egiziano e serpentino greco. L'ostentazione di questo lusso privato, evidente nella capacità economica di acquistare materiali provenienti da lontane province dell'Impero romano, pare delineare l'immagine di una dimora d'alto livello ove, ad esempio, i marmi potevano risultare particolarmente vantaggiosi sia in ambienti a forte umidità (terme) sia in triclini o altre zone di soggiorno.

Le pagine qui di seguito vertono sulle tecniche di classificazione supervisionata delle immagini e sulla fotogrammetria e classificazione mediante digitalizzazione a video applicate al sito di Aiano-Torraccia di Chiusi. Un'esperienza di studio in cui i risultati ed i limiti riteniamo valga la pena aggiungere alla riflessione archeologica sulla villa.

Introduzione

La fotogrammetria nasce quasi nello stesso periodo della fotografia tradizionale, costituendone una branca particolare e specializzata. Evolvendosi negli anni, diventa lo strumento principale per la realizzazione di carte topografiche proprio per le peculiarità della tecnica utilizzata e dei risultati ottenibili, ovviando a molti dei problemi della fotografia tradizionale. L'ambito della fotogrammetria aerea è diventato sempre più specializzato in rapporto ai mezzi utilizzati, portando, di conseguenza, ad una maggiorazione dei costi per la sua realizzazione.



² CAVALIERI 2008; CAVALIERI, BALDINI, RAGAZZINI, BELLINI, GONNELLI, MARIOTTI, NOVELLINI, MAINARDI VALCARENGHI 2008: 586-606.

L'avvento della fotogrammetria digitale, basandosi sull'utilizzo di *personal computer*, porta due grandi novità: da un lato, la riduzione dell'impegno economico per le costose e complesse attrezzature proprie della fotogrammetria aerea; dall'altro, l'accessibilità di questa tecnica anche a persone dotate di una non elevata esperienza in tale settore. Sebbene le esigenze di documentazione in campo archeologico ed architettonico sembrano spingere verso nuove tecnologie in continua evoluzione (ad esempio il *laser scanner*), l'elevato costo delle apparecchiature per realizzarle ne ha spesso limitato la diffusione.

Nella fotogrammetria archeologica normalmente si parla di campo operativo ristretto nello spazio. In archeologia, in sostanza, assume un elevato ruolo la fotogrammetria dei vicini, nonostante l'aerofotogrammetria a grande scala rivesta tutt'oggi una funzione importante, soprattutto per lo studio dei centri storici, dei grandi complessi architettonici e dei siti archeologici³. Ma è senza dubbio la fotogrammetria terrestre che sta godendo, in questo periodo, di un notevole sviluppo delle tecniche: in tale contesto, quindi, diventano fondamentali le fotografie dalle quali estrarre ortofoto; il dato fotografico diventa straordinariamente ricco, assumendo, addirittura, un valore a più ampio raggio rispetto ai classici disegni.

Le nuove tecnologie digitali, dunque, permettono, da una parte, una razionalizzazione e velocizzazione delle operazioni di rilievo, dall'altra, la creazione di nuove rappresentazioni infografiche che possono adattarsi facilmente alle diverse esigenze degli studiosi e degli operatori nel campo archeologico⁴.

In ambiente di scavo gli operatori addetti al rilievo fotogrammetrico devono essere estremamente flessibili nell'affrontare, in maniera differenziata, problemi e situazioni eterogenei fra loro: la raccolta dei dati, ad esempio, deve avvenire con la massima velocità, evitando il più possibile l'ingerenza con i lavori di scavo o, almeno, cercare di ridurli al minimo.

La fotogrammetria

Il presente lavoro è stato realizzato, per quanto riguarda la raccolta dei dati immagine e di posizionamento, utilizzando una fotocamera digitale della fascia consumer (Nikon Coolpix P3) e una stazione totale topografica a prisma riflettente (Topcon GTS-702); per ciò che concerne l'elaborazione fotogrammetrica e di classificazione delle immagini, si è ricorsi alla suite di elaborazione LEICA ERDAS IMAGE 9.1 con l'estensione LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE, mentre per la digitalizzazione e la costruzione di banca dati vettoriale, è stato impiegato il software ARCGIS 9.2.

La sequenza operativa per la realizzazione di un'indagine fotogrammetrica consta di alcuni passaggi fondamentali. In prima battuta la scelta dei fotogrammi, ciò che diventerà il blocco stereoscopico, e l'orientamento interno della fotocamera: in questo caso, l'utilizzo di una fotocamera non metrica, obbliga all'inserimento solo di alcuni dei parametri relativi alla geometria dell'ottica (distanza focale e *pixel size*). Va specificata, inoltre, la proiezione a terra dei punti, la quale costituisce la base di lavoro: in questo caso si è assunto come corretta la proiezione stereografica⁵. Terminata la fase di Orientamento Interno, si cerca di stabilire un rapporto tra i fotogrammi ed un sistema di riferimento terreno. Nella pratica vengono collimati i punti a terra, *Ground Control Point* (GCP), raccolti con la stazione totale, inserendo le coordinate *x*, *y* e *z*. I punti, quindi, mantengono una relazione spaziale corretta fra di loro permettendo, così, la creazione delle cosiddette "coppie stereoscopiche". Inoltre, per verificare indipendentemente l'accuratezza è auspicabile anche l'inserimento di *Check Point*, non necessari alla triangolazione, ma che riducono l'RMSE⁶. Un ulteriore abbassamento dell'errore calcolato si è avuto con l'inserimento di un buon numero di *Tie Point*. Questi punti sono collimati come se fossero GCP, ma mancano delle informazioni numeriche delle tre coordinate: essi stabiliscono una relazione oggettiva tra punti omologhi sulle due foto. All'inserimento dei *Tie point* manuali è seguito l'immissione di altri *Tie Point* in modalità automatica; non sono state notate migliorie apprezzabili nel risultato (RMSE e DTM) e soprattutto in un caso fra i due trattati (canaletta, *cfr.* sotto) si è registrato un fenomeno quasi di *clustering*: in varie zone gli algoritmi automatici hanno posizionato i punti presso altri punti già collimati manualmente.

Una volta inseriti i punti di controllo e i *tie point* manuali ed automatici si è proceduto al calcolo della triangolazione aerea che stabilisce le relazioni matematiche fra le immagini costituenti il *block file* e le informazioni di orientamento appena inserite.

Di seguito vengono presentati i due casi di studio.

³ BITELLI 2005: 12-14.

⁴ BALLETTI, GUERRA 2004: 6.

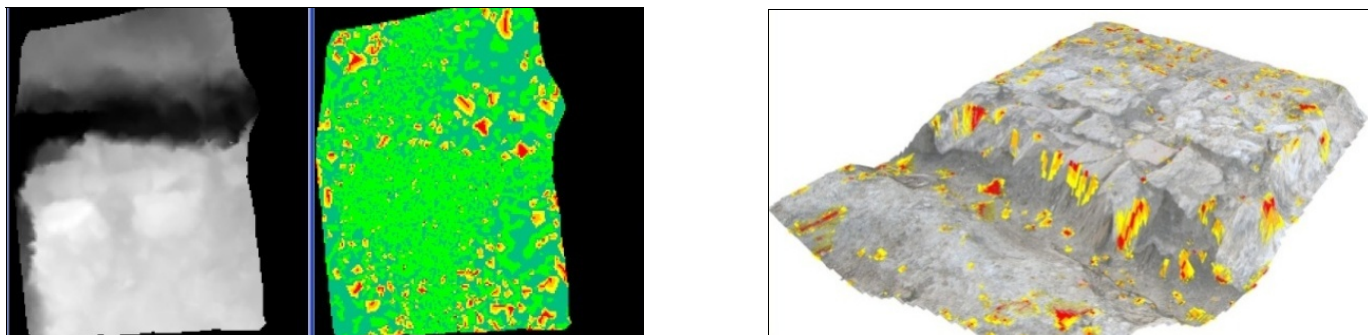
⁵ In geometria e in cartografia per proiezione stereografica si intende la proiezione dei punti sulla superficie di una sfera da un punto N della sfera stessa (che spesso viene chiamato *polo Nord* della sfera) sopra un piano che è, solitamente, o il piano equatoriale, o il tangente alla sfera nel suo punto (antipodale ad N) chiamato S, *polo Sud*.

⁶ Scarto quadratico medio tra la posizione reale dell'oggetto e quella collimata sulla foto.

Canaletta

Il calcolo della triangolazione della “canaletta” è stata raggiunta con un RMSE di 6,6 unità; quel che più importa, però, è che gli angoli di rotazione della base di presa, ω (rollio), ϕ (beccheggio) e κ (deriva), sono relativamente limitati, considerando le condizioni iniziali di scatto delle foto.

Accettata la triangolazione proposta, si è proceduto alla creazione del DTM, il Modello Digitale del Terreno, della zona in esame. La procedura di estrazione, per molti aspetti automatizzata, non ha creato particolari problemi al momento della sua esecuzione. È stato quindi ottenuto un modello digitale del terreno di qualità medio-alta; nell’elaborazione si è anche creato un file *raster* i cui differenti cromatismi indicano la qualità del DTM creato (figg. 3 e 4).



Figg. 3-4. Immagini raster (3) aperte in un normale viewer di visualizzazione bidimensionale. A destra il raster che rappresenta il DTM, mentre a sinistra il quality file, cioè l’accuratezza di estrazione del DTM; in rosso e arancione le aree con minor successo. Alla visualizzazione in due dimensioni, si preferisce importare il file di accuratezza in ambiente 3D (in questo caso ArcScene) e sovrapporlo al DTM o direttamente all’ortofoto ottenuta (4). Questo tipo di visualizzazione permette un “colpo d’occhio” più rapido delle zone non ben interpretate dal sistema di estrazione automatica del DTM. Resta comunque il fatto che per un eventuale miglioramento del modello digitale del terreno viene impiegato un normale viewer 2D da cui si risale alle coordinate dei punti da correggere attraverso l’Inquire Cursor.

Qualunque sia il metodo di visualizzazione prescelto, si può notare come le zone meno accurate di estrazione e creazione del DTM siano quelle a ridosso dei bordi della canaletta. In effetti la mancanza di punti a terra e la natura quasi verticale delle “spallette” della struttura hanno impedito una documentazione efficace, come se “mancasse” una parte di foto; gli stiramenti dei *pixel* che compongono l’ortofoto visibili in questi punti, rappresentano l’effetto delle riprese in zone con molte *breakline* che rendono la superficie irregolare.

Il passo successivo è stato quello di correzione del DTM nei punti ove risultava di minor precisione. Inutile sottolineare che le zone non ben “interpretate” dall’algoritmo di estrazione automatica erano difficili da comprendere anche per l’operatore. Si è proceduto dal modulo *Stereo Analyst* di Leica Erdas LPS creando una *feature* puntuale e cercando di posizionare quanti più punti possibile nelle zone di minor precisione, attraverso la vista stereoscopica. Le monografie dei punti sono state inserite fra i parametri necessari al calcolo di un nuovo DTM. Il risultato, tuttavia, ad un esame autoptico immediato non sembra aver migliorato la situazione.

Raggiunto il risultato del modello digitale del terreno e dell’ortofoto relativa alla canaletta, si è proceduto con la digitalizzazione a video tramite il modulo *Stereo Analyst*.

Prima di iniziare a tracciare, è stata fatta una valutazione riguardo alle caratteristiche della zona indagata, rilevando, a parte la matrice terrosa, una certa quantità di laterizi e blocchi di travertino utilizzati ampiamente nella costruzione della villa. La canaletta, infatti, aveva le “spallette” di contenimento in mattoni posti verticalmente che si appoggiavano a muri di pietra probabilmente cavata non lungi dalla villa stessa. Si è giunti alla conclusione che sia corretto mettere in evidenza i materiali da costruzione sopra citati in quanto sono, nello scavo di Aiano-Torraccia di Chiusi, indicatori tutt’altro che labili; sono state, quindi, create due *feature* lineari denominate “laterizio” e “travertino”.

La digitalizzazione ha messo in luce alcune difficoltà del processo fotogrammetrico in questa particolare situazione della canaletta. La stereocoppia di interesse era affetta dai problemi già sottolineati nella creazione del *Block file* che hanno poi influito sui successivi passaggi di elaborazione. Le prese fotografiche, effettuate con camera non metrica e non calibrata, non hanno una precisione elevatissima; l’aver utilizzato una “barra” costruita e migliorata pian piano durante l’utilizzo, ha permesso una riduzione degli angoli di rotazione, ma non la loro (quasi) completa eliminazione. Inoltre, i punti a terra collimati per questa stereocoppia erano effettivamente di basso numero e la ridotta altezza di “volo”⁷ e la superficie particolarmente accidentata di una zona antropizzata, con pareti verticali o sub-verticali, ma irregolari in molti punti, avrebbe richiesto un *overlap* con una percentuale di ricoprimento molto elevata, 80% o più. L’*overlap*, invece, che si è riusciti ad ottenere, date la situazione precaria e i tempi di lavoro ristretti, si attesta su una percentuale tra il 50% e il 60%, sicuramente accettabile⁸, ma non tale da permettere una completa

⁷ Il procedimento di presa utilizzato, anche se effettuato a terra, può essere accomunato a quello della fotogrammetria aerea, cioè dall’alto verso il basso, senza tuttavia le possibilità di controllo date dalle metodiche utilizzate per quest’ultima.

⁸ Da teoria, il ricoprimento “standard” delle foto aeree sarebbe del 60%. In zone accidentate viene consigliato un *overlap* più ele-

sovrapposizione di tutti i particolari della foto. In alcuni casi, infatti, anche al centro della stereocoppia, a ridosso della zona più accidentata, sono stati evidenziati elementi non perfettamente visibili in entrambe le foto.

Ciononostante, la digitalizzazione vera e propria non poteva non riguardare la parte centrale della foto, quella con le caratteristiche più interessanti da un punto di vista archeologico, ove si posiziona la struttura documentata; qui, più che altrove, vi sono elementi ben visibili di travertino e laterizio che si è cercato di disegnare mettendone in luce i bordi esposti e liberati dal terreno che li ricopriva. Le *feature* lineari così digitalizzate sono anche visibili in un ambiente *software* di visualizzazione tridimensionale come il modulo ArcScene di ArcGIS.

Lo scopo primo, tuttavia, del lavoro di digitalizzazione a video è stato quello di creare una banca dati vettoriale da cui, eventualmente, ottenere una pianta dettagliata di questa zona dello scavo di particolare interesse.

Dopo aver creato le *feature* e vettorializzato i contorni degli elementi di una certa importanza, i file ottenuti sono stati salvati come *shape*, uno dei formati condiviso con ArcGIS. Questi file di partenza sono rappresentati da polilinee chiuse; la creazione corretta di una banca dati richiedeva il passaggio a poligoni. La procedura seguita, quindi, è stata quella di creare un *Personal Geodatabase* con *ArcCatalog*, a cui è stato aggiunto un *Dataset* al cui interno sono stati inseriti gli *shape* lineari e un nuovo *shape* puntuale creato *ad hoc*; quest'ultimo viene utilizzato per "validare" il poligono ottenuto dalla polilinea tramite opportuni passaggi con il *software* GIS. Nel *Geodatabase*, quindi, devono essere editati gli appositi domini; in questo caso si è optato per un dominio chiamato "classi" di tipo *coded values*, al quale sono stati attribuiti essenzialmente due valori: 1 per il laterizio e 2 per il travertino. Lo *shape* poligonale appena ottenuto è stato relazionato con il dominio del *geodatabase* attraverso i "campi" del *database*; è stato, infatti, aggiunto un nuovo campo chiamato "classificazione" che ha come dominio di riferimento quello denominato "classi" precedentemente creato (fig. 5).

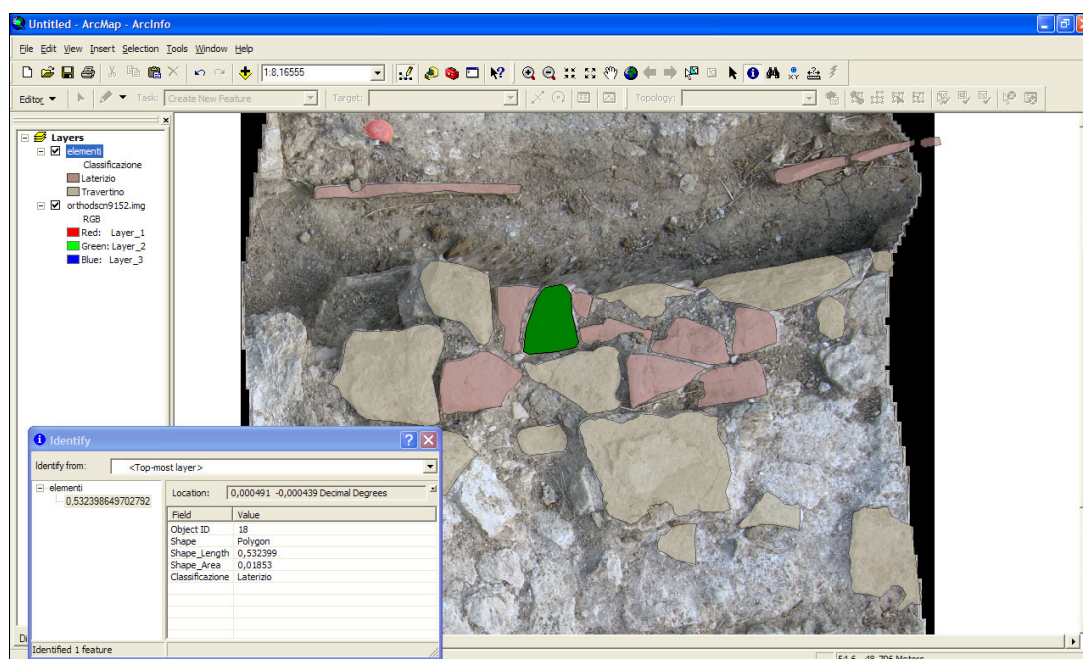


Fig. 5. Screenshot del geodatabase interrogato.

In ArcMap ai poligoni è stata assegnata la corretta classe di appartenenza, in modo che, interrogando il file vettoriale, compaia tra le informazioni a questo collegate la dicitura "laterizio" o "travertino". Creati il DTM, l'ortofoto e la banca dati, si è provato ad effettuare alcune analisi di superficie proprie di realtà con dimensioni molto maggiori. È stato, comunque, possibile applicare queste analisi anche ad oggetti a scala ridotta, come la canaletta da noi esaminata; attraverso il modulo *3D Analyst* di ArcGIS si è riusciti ad ottenere qualche immagine tematica sulle pendenze e sulla profondità nei vari punti della struttura indagata. La preparazione dei dati è stata così affrontata; al DTM rappresentato da un'immagine *raster* a scala di grigi indicanti l'elevazione, è stato sostituito⁹ un TIN, file di tipo *vector* (*triangular irregular network*), superficie composta da triangoli irregolari uniti tra loro a formare un modello digitale del terreno. Nel modulo del *software* GIS, ArcScene, sono stati visualizzati il TIN appena creato su cui è stata applicata l'ortofoto relativa alla canaletta al fine di ottenere una migliore visione d'insieme; dalle proprietà del file si è im-

vato, intorno all'80% per non perdere particolari della superficie fotografata; inoltre, in questi casi, viene adottato uno schema di volo che "segue" il rilievo e la valle, evitando di intercettarli perpendicolarmente, per non creare stereocoppie in cui "alcuni" degli elementi ripresi in uno dei due fotogrammi non siano presenti nell'altro.

⁹ L'operazione poteva anche essere condotta partendo dal dato *raster*.

postato una *symbology* con trentadue classi¹⁰. Successivamente è stata utilizzata una scala cromatica a gradazione di marrone chiaro, tranne che per le classi con elevazione minore: ad esse è stato applicato un colore che rendesse immediatamente visibili le zone più depresse. All'ortofoto convertita in scala di grigi, al fine di non avere i colori naturali come disturbo, e al TIN così visualizzato, è stata data una trasparenza per far emergere le caratteristiche dei *layer* sovrapposti (fig. 6).

Successivamente, per mostrare la pendenza delle pareti della struttura, si è fatto ricorso alla funzione *slope*: essa permette di mostrare la percentuale di inclinazione nelle varie zone del modello digitale del terreno. È stata creata una immagine in ArcScene in cui è possibile vedere con differenze cromatiche l'inclinazione delle spallette della canaletta; per evitare che tutta l'immagine fosse ricolorata si è preferito eliminare i valori al di sotto di una certa percentuale (20%) ritenendoli non indicativi. Questa visualizzazione è utile per comprendere i problemi dati dalla fotogrammetria nella zona relativa alle spallette della canaletta; i già citati problemi di stiramento dei *pixel* si collocano proprio nelle zone interessate da maggior inclinazione (fig. 7).

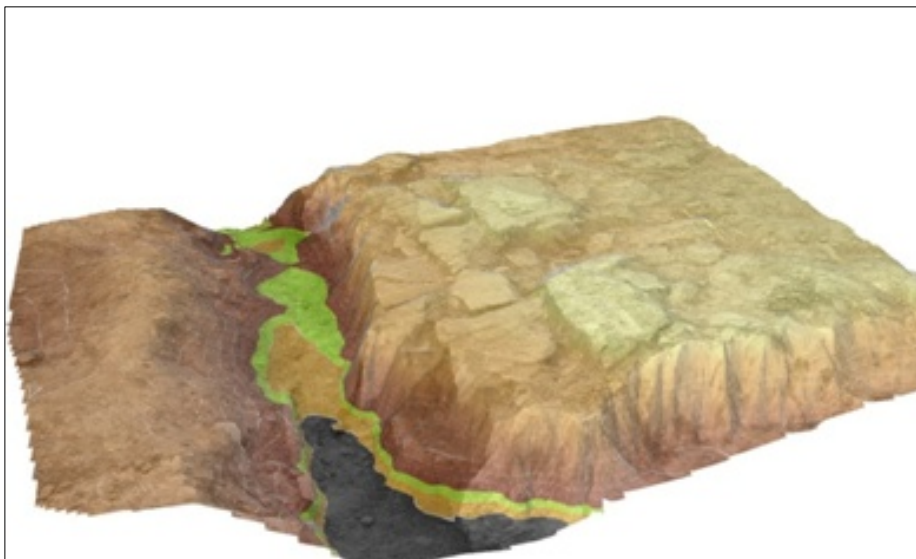


Fig. 6. Visualizzazione in ArcScene delle depressioni sul fondo della canaletta. Rispettivamente in nero, arancione e verde le zone più o meno profonde.

La fornace

Una volta inseriti i punti di controllo e i *tie point* manuali ed automatici, si è proceduto al calcolo della triangolazione aerea che stabilisce le relazioni matematiche fra le immagini costituenti il *block file* e le informazioni di orientamento appena inserite. Il calcolo della triangolazione ha portato alla creazione di un sommario contenente i dati principali sugli errori (RMSE), per quanto riguarda i GCP: l'RMSE calcolato è pari a 1,2473 unità. Considerando la difficoltà di presa delle immagini tramite la barra per le "ripresе aeree", tale errore è del tutto accettabile.

Stereo Analyst, DTM e ortofoto

Una volta portato a termine sia l'orientamento interno sia esterno, si è proceduto a verificare la perfetta sovrapposizione delle immagini appartenenti al *block file* all'interno dello *Stereo Analyst*. L'errore (RMSE) estremamente basso e l'ottima presa delle fotografie del *block file*, hanno portato ad una sovrapposizione eccellente e, quindi, ad una quasi perfetta visione stereoscopica delle immagini, fatto salvo un leggero difetto di parallasse nella direzione della coordinata Y. La creazione del DTM¹¹ e, successivamente, dell'ortofoto hanno permesso di ottenere un modello tridimensionale della superficie della fornace e degli strati ad essa circostanti (fig. 8). Queste procedure risultano estremamente utili nelle fasi di studio ed interpretazione dell'evidenza archeologica una volta terminati i lavori di scavo, ma soprattutto assumono un elevato valore documen-

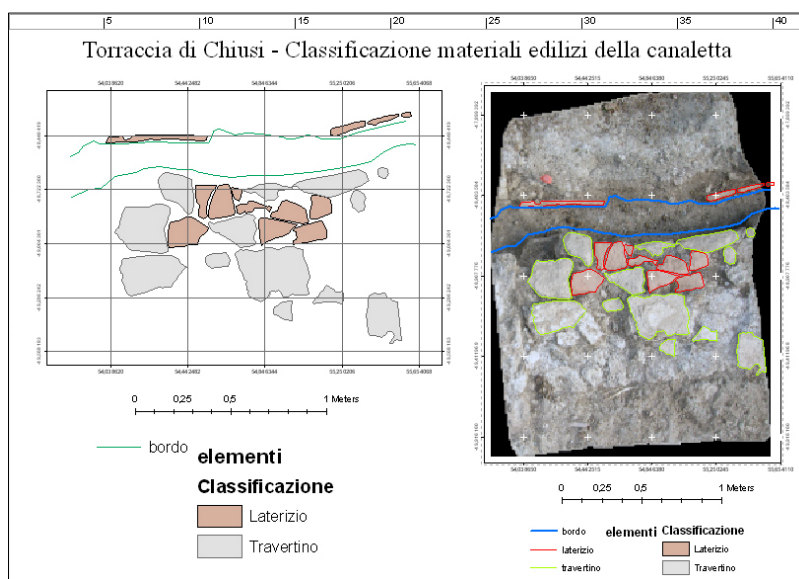


Fig. 7. Layout della classificazione dei materiali edilizi ottenuto da ArcMap.

¹⁰ La *symbology* suddivide il file in un numero prestabilito di classi di valori rappresentanti l'elevazione e provvede a conferire ad esse una colorazione prescelta.

¹¹ *Digital Terrain Model*.

tario, essendo lo scavo archeologico unico e irripetibile ma anche, allo stesso tempo, distruttivo. Avere, quindi, a disposizione tali modelli digitali del terreno facilita il lavoro degli archeologi nelle fasi *post* processionali.



Fig. 8. DTM ed ortofoto nella visualizzazione in ArcScene.

Il telerilevamento: tecniche di classificazione delle immagini ed elaborazioni di post-classificazione

Uno degli scopi fondamentali delle tecniche di telerilevamento è quello di produrre mappe tematiche delle superfici indagate tramite immagini acquisite da satellite. Per creare tali mappe è necessario, quindi, realizzare una classificazione del territorio o, come nel caso della fornace¹², una catalogazione in base a categorie corrispondenti ad un criterio di indagine prescelto.

Esistono due metodi di classificazione: supervisionata (*supervised*) e non supervisionata (*unsupervised*). Attraverso una classificazione supervisionata l'operatore individua le firme spettrali¹³ delle categorie note¹⁴ e, in un secondo momento, particolari tipi di algoritmi assegnano ogni pixel dell'immagine a ciascun *Training Set*¹⁵ di riferimento con il quale la sua firma spettrale coincide o è simile.

La seconda tipologia di classificazione, quella non supervisionata, non richiede informazioni a priori sulle classi che verranno create. Tale classificazione analizza tutti i pixel dell'immagine che vengono suddivisi nei gruppi spettrali più comuni presenti nei dati. Questo procedimento prende il nome di *clustering*. Solo successivamente l'operatore identifica i *cluster* ed assegna ciascuno di essi alle classi riconoscibili.

Classificazione non supervisionata

La classificazione non supervisionata non richiede la possibilità di impiego di indicazioni esterne per poter attribuire i pixel alle diverse classi. Questa tipologia di classificazione suddivide le classi basandosi sulle informazioni numeriche presenti nei dati. Tale procedimento prende il nome di *clustering* ed è basato sul raggruppamento statistico dei pixel dell'immagine secondo un criterio di contiguità reciproca, in modo che i gruppi dei pixel (*cluster*) risultino internamente coesi e vicendevolmente disgiunti¹⁶. Gli algoritmi utilizzati, attraverso i quali l'operatore può definire quanti gruppi l'algoritmo deve definire, sono vari. Solo in un secondo momento l'operatore deve aggregare i *cluster* calcolati dall'algoritmo alle classi identificate.

L'algoritmo di clusterizzazione utilizzato dal software ERDAS IMAGINE è ISODATA. È un algoritmo euristico complesso, basato sul principio di assegnare ogni pixel al *cluster* con centro più vicino¹⁷ e quello di ricalcolare le po-

¹² In questo caso specifico l'analisi viene compiuta su fotogrammi con le sole 3 bande del visibile (RGB). Viene di fatto semplificata l'elaborazione rispetto alle fotografie satellitari multispettrali.

¹³ La firma o risposta spettrale è definita come "l'impronta digitale" di qualsiasi oggetto che ci circonda. Essa è un grafico che ci informa sulla quantità di energia riflessa da un corpo, in funzione delle varie lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica incidente.

¹⁴ Determina, in questo modo, i *Training Set Signature* di riferimento.

¹⁵ Aree di esempio. Cioè gruppi di *pixel* che possono essere considerati rappresentativi di una classe.

¹⁶ SALVINI 2007.

¹⁷ Minima distanza spettrale.

sizioni dei centri dopo l'assegnazione. I parametri utili per eseguire l'elaborazione, che devono essere inseriti dall'utente, sono:

- Il numero massimo di *cluster* ammessi. Questi indicheranno il numero massimo di classi ottenibili;
- La soglia di convergenza¹⁸. Tale valore di soglia evita che l'algoritmo entri in un ciclo infinito;
- Il numero massimo di interazioni. Evita che l'algoritmo prosegua troppo a lungo o entri in un ciclo infinito.

Il numero dei *cluster* non è definito durante le iterazioni, ma può variare. Ad esempio i *cluster* con un numero piccolo di *pixel* vengono eliminati, quelli molto vicini vengono uniti e quelli molto lontani vengono divisi. Al termine delle iterazioni, però, il numero delle classi fissate a priori deve essere ristabilito.

Il numero delle classi identificate per la classificazione della fornace sono cinque:

1. Non classificato;
2. Tegole e laterizi;
3. US 2191;
4. Concotto;
5. Terreno di riporto.

Tale suddivisione è stata decisa, a priori, dalla conoscenza delle Unità Stratigrafiche indagate e rappresentate nel fotogramma¹⁹ (fig. 9).

Classificazione supervisionata

Tale procedimento permette all'utente un controllo completo di tutto il processo di classificazione. Esistono due tecniche di classificazione supervisionata:

a) Tecniche di classificazione parametriche

Tale metodo si basa su un procedimento statistico, come la media o la matrice di covarianza. Gli algoritmi di classificazione parametrica utilizzati dal software sono i seguenti²⁰:

- *Minimum Distance*: calcola la media, per ogni banda, dei DN²¹ dei *pixel* appartenenti ai vari *signature*. Ogni *pixel* verrà assegnato alla classe il cui punto medio è più vicino, secondo la distanza euclidea, al *pixel* analizzato (fig. 10).

- *Mahalanobis Distance*: la probabilità di assegnazione di un *pixel* ad una classe dipende non solo dal valore della sua distanza euclidea dal centro della classe, ma anche dalla direzione.

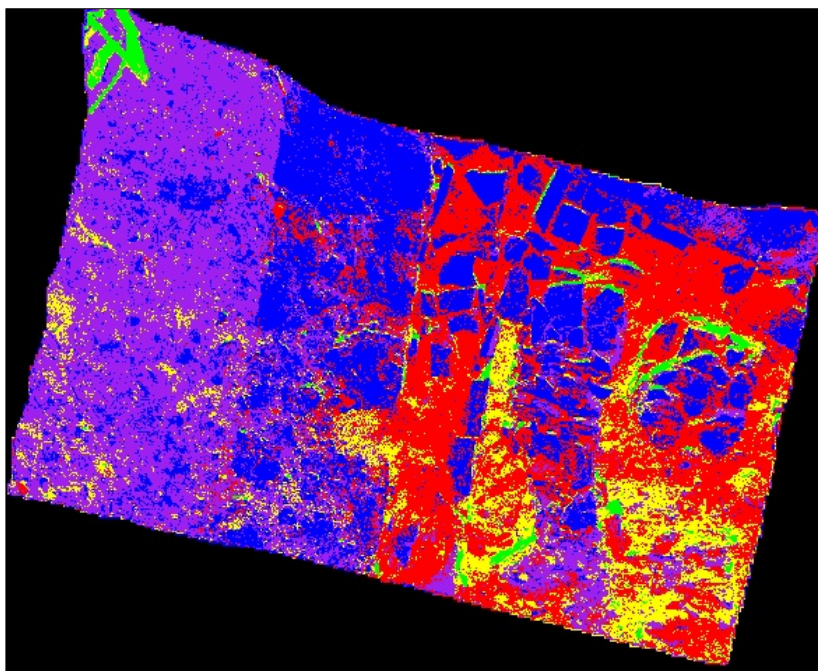


Fig. 9. Esito della classificazione non supervisionata.

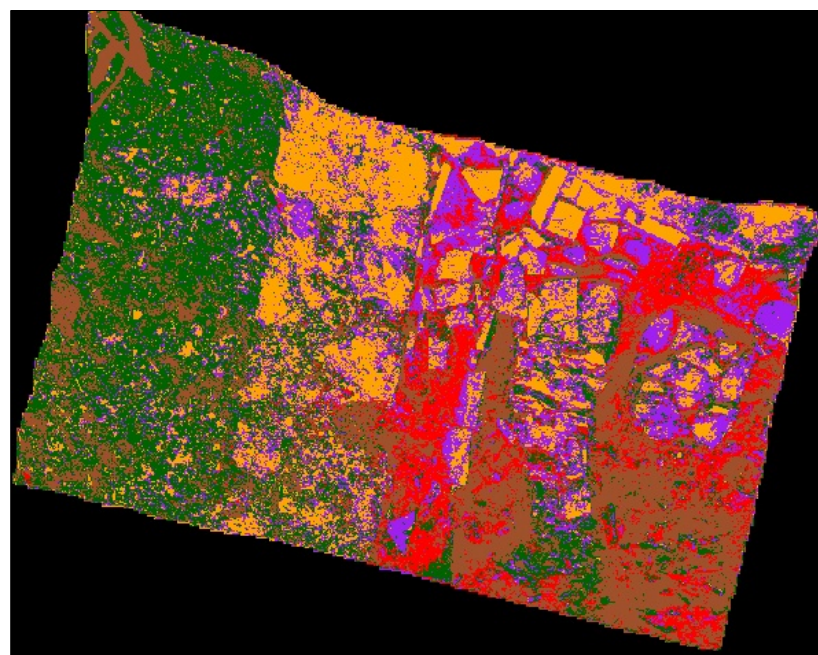


Figura 10. Classificazione non parametrica con l'utilizzo dell'algoritmo della minima distanza.

¹⁸ È la massima percentuale di *pixel* la cui assegnazione ad un *cluster* può non cambiare da un'iterazione all'altra.

¹⁹ L'immagine utilizzata per la realizzazione delle classificazioni è l'ortofoto ottenuta dalla fotogrammetria.

²⁰ SALVINI 2007.

²¹ *Digital Number*.

- *Maximum Likelihood*²²: per ogni pixel da classificare, verrà calcolata la probabilità di appartenenza (cioè la “somiglianza”) ad ognuna delle classi definite dai *signature* e quindi il pixel verrà assegnato alla classe con maggior somiglianza (fig. 11).

b) *Tecniche di classificazione non parametriche*

Un classificatore non parametrico può utilizzare un set di *signature* sia parametriche che non parametriche, assegnando quindi un *pixel* ad ogni classe, utilizzando regole di tipo geometrico. Per far sì che questi *pixel* vengano classificati, bisogna utilizzare anche tecniche di classificazione parametriche affinché ciascun pixel venga assegnato alla classe con probabilità più alta²³.

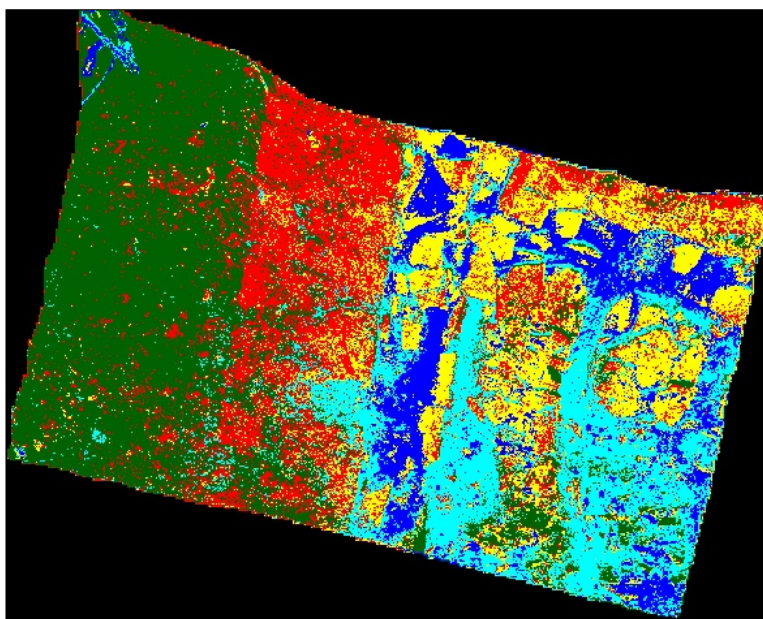


Fig. 11. Classificazione parametrica con l'utilizzo dell'algoritmo di Maximum Likelihood.

Attraverso tale metodo di classificazione è stato possibile creare un gruppo attendibile di *signature*, utili ad una corretta classificazione dell'immagine. Una volta localizzati gli esempi rappresentativi di ogni classe si è proceduto alla digitalizzazione dei poligoni nei *training sites* e, quindi, alla definizione delle loro firme spettrali.

Fra le due tecniche utilizzate quella che meglio ha classificato l'immagine è il metodo parametrico, ed in particolare utilizzando l'algoritmo di *Maximum Likelihood* (fig. 12). Per tale motivo i valori di DN si distribuiscono secondo una legge gaussiana o normale. Ciò vuol dire che la frequenza dei valori sarà massima all'intorno della media di ogni categoria, e diminuirà con l'aumentare della distanza. Tale algoritmo è, certamente, quello avente la maggiore accuratezza.

A differenza degli altri algoritmi utilizzati (Minima Distanza e Distanza di Mahalanobis), quest'ultimo ha creato una classificazione estremamente accurata, anche se non ancora del tutto precisa. Infatti, rimane ancora elevato il cosiddetto effetto “sale e pepe” anche dopo aver eseguito tecniche di elaborazioni di post-classificazione come lo *smoothing*.

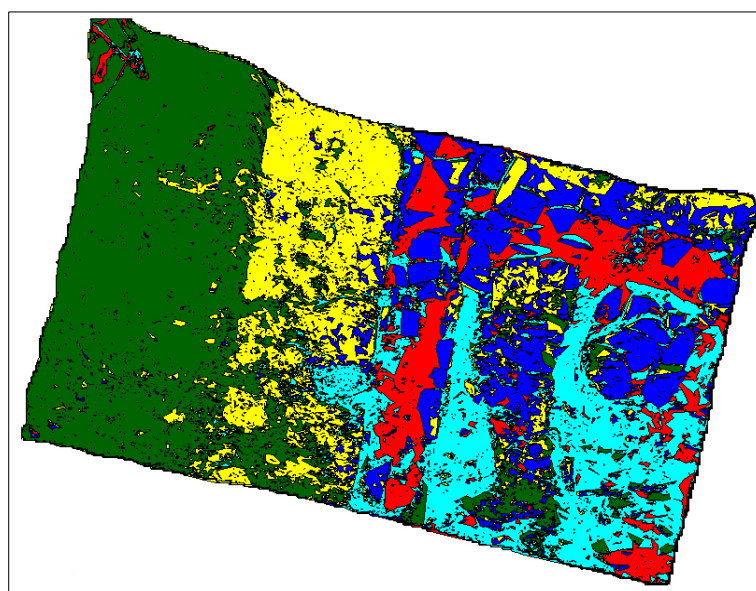


Fig. 12. Conversione da raster a vettoriale (file Arc Coverage - Class. Supervised).

Come è possibile notare nell'immagine della classificazione parametrica mediante algoritmo *Maximum Likelihood*, la procedura automatica è stata in grado di discriminare, nel miglior modo possibile, le 6 classi individuate precedentemente coi poligoni nei *training set*:

1. Non classificato;
2. Tegole e laterizi;
3. Malta e argilla;
4. US 2191;
5. Concotto;
6. Blocchi in travertino.

²² O della massima verosimiglianza.

²³ Altra possibilità è quella di lasciarli non classificati.

Elaborazioni di post-classificazione: conversione dal formato raster al formato vettoriale

Il prodotto finale della classificazione è rappresentato da un dato *raster* di tipo tematico. Ad ogni *pixel* è associato, attraverso la propria tabella di appartenenza, un attributo che circoscrive la sua classe di pertinenza.

Spesso, però, il dato grezzo ottenuto dalla classificazione necessita di una serie di miglioramenti che ne affinino il contenuto informativo. Tali procedimenti, che prendono il nome di elaborazioni di *post-classificazione*, sono appunto lo *Smoothing* e la conversione *Raster to Vector*.

Dopo le opportune operazioni di *Smoothing*, si è proceduto alla conversione del file originale, in formato raster, ad un nuovo file di tipo vettoriale. Tale procedimento avviene in maniera del tutto automatica, con la creazione di poligoni aventi *pixel* dalle medesime caratteristiche. Il file vettoriale permette una migliore visualizzazione dell'immagine classificata, inoltre permette una più agevole e veloce editazione da parte dell'utente.

Attraverso tale funzione è possibile esportare in ArcGIS un file vettoriale editabile e che, una volta inserito nel GIS di scavo, diventa un'unità funzionale dello stesso Sistema Informativo Geografico.

Marco CAVALIERI
Département d'archéologie et d'histoire de l'art
Université catholique de Louvain (UCL)
marco.cavalieri@uclouvain.be
www.villaromaine-torracciadichiusi.be

Gabriele MAINARDI VALCARENGHI
Centro di GeoTecnologie
Università degli Studi di Siena
g.mainardi@libero.it

Alessandro NOVELLINI
alexnov@libero.it

BIBLIOGRAFIA

- BALLETTI C., GUERRA F., 2004, *Il rilievo per la rappresentazione 3D: la città romana di Grumentum*, Venezia.
- BITELLI G., 2005, *Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali*, Bologna.
- CAVALIERI M., BOTTACCHI M. MANTOVANI F. e RICCIARDI G., 2007, "Misure di resistività mediante OhmMapper finalizzate allo studio del sito di Torraccia di Chiusi", in *Archeologia e Calcolatori* 18: 159-186.
- CAVALIERI M., 2008, "La villa romana di Aiano-Torraccia di Chiusi, III campagna di scavi 2007. Il progetto internazionale 'VII Regio. Il caso della Val d'Elsa in età romana e tardoantica'", in www.fastionline.org/docs/FOLDER-it-2008-111.pdf.
- CAVALIERI M., BALDINI G., RAGAZZINI S., BELLINI C., GONNELLI T., MARIOTTI M., NOVELLINI A. e MAINARDI VALCARENGHI G., 2008, "San Gimignano (SI). La villa di Torraccia di Chiusi, località Aiano. Dati preliminari dalla III campagna di scavo, 2007", in *Notiziario della Soprintendenza ai Beni Archeologici della Toscana* 3: 586-606.
- SALVINI R., 2007, *Telerilevamento applicato alla difesa del suolo*, San Giovanni Valdarno.