

NUOVO SISTEMA DI FOTOGRAMMETRIA DIGITALE DA PALLONE AEROSTATICO: IL CASO DI STUDIO DEL CASTELLO DI SHAWBAK

Roberto GABRIELLI (*), Andrea ANGELINI (*), Guido VANNINI (**),
Michele NUCCIOTTI (**), Luca MENCI (***)

(*) Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturale, ITABC-CNR di Roma,
roberto.gabrielli@itabc.cnr.it, andrea_ang@libero.it.

(**) Dipartimento di studi storici e geografici, Università degli studi di Firenze,
vannini@unifi.it, nucciotti@unifi.it.

(***) Menci Software, Arezzo, luca@menci.it

Estratto

Nato da una collaborazione tra l'ITABC¹ del CNR di Roma e la Menci Software di Arezzo, la tematica dell'intervento riguarda la messa a punto di uno strumento che permetta di svolgere un rilievo archeologico-topografico mediante l'aerofotogrammetria digitale automatica in maniera veloce ed affidabile, utilizzando un pallone aerostatico a bassa quota. Per questo strumento è stato scelto come caso di studio il castello crociato di *Shawbak* in Giordania nell'ambito del progetto archeologico "*Petra Medievale: Archeologia degli insediamenti di epoca crociato-ayyubide in Transgiordania*" finanziato dal MIUR e dal MAE e condotto al prof. Guido Vannini dell'Università degli Studi di Firenze in collaborazione con l'ITABC del CNR di Roma. Gli obiettivi del lavoro sono stati quelli di ottenere un modello tridimensionale completo del castello che possa essere utilizzato per studiare eventuali interventi di restauro, che permetta di ottenere a vari livelli le planimetrie complete degli edifici e che permetta una navigazione tridimensionale all'interno della fortezza. È stato inoltre possibile ottenere un modello digitale del terreno (DTM) per un'analisi dettagliata del territorio finalizzata al recupero di strutture ancora interrate per una maggiore conoscenza della distribuzione degli spazi interni al castello.

Abstract

Born by a collaboration among the institute for the Technologies Applied to the Cultural Heritage of the CNR of Rome (ITABC) and the Menci Software of Arezzo, the intervention concerns the development of a device that allows to carry out an archaeological-topographical survey through the automatic aerophotogrammetry, in fast and reliable way, using an aerostatic balloon. For this device has been selected, as case of study, the castle of *Shawbak* in Jordan relating to the archaeological project "*Medieval Petra. Archaeology of Crusader-Ayyubid settlement in Transjordan*" financed by the MIUR and MAE and conducted by Prof. Guido Vannini of the University of the Studies of Florence in collaboration with the ITABC -CNR of Rome. The purpose of the job has been to get a complete three-dimensional model of the castle that can be used for studying the interventions of restauration. Model will allow to get complete planimetries of the buildings and a three-dimensional navigation inside the fortress. Besides it has been possible to get a digital terrain model (DTM) for detailed analysis of the territory finalized to the recuperation of structures still buried and for understanding the distribution of the inside spaces of the castle.

¹ Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali.

Petra “Medievale” e Shawbak: il progetto archeologico

La missione archeologica Petra 'medievale': archeologia dell'insediamento crociato-ayyubide in Transgiordania - Progetto Shawbak, promossa dal Dipartimento di Studi storici e geografici dell'Università di Firenze, fa parte di un programma di attività del Ministero degli Affari esteri (Progetto Pilota dal 1999) e del Ministero dell'Università e della Ricerca (Progetto scientifico di interesse nazionale 'dal 1987; Progetto FIRB 2005-8) e coinvolge un' *équipe* di ricercatori provenienti anche dalle Università di Udine, Urbino, Venezia, l'Aquila, ITABC-CNR di Roma, CNRS-LSIS di Marsiglia (Drap et al., 2007). La missione, diretta da Guido Vannini, opera, dal 1999, all'interno del progetto strategico dell'ateneo fiorentino "La società feudale mediterranea: profili archeologici. Apogeo e declino, alle origini dell'Europa moderna " ed è dedicata allo studio archeologico delle strutture materiali della società feudale mediterranea (Vannini, 2007).

L'obiettivo principale del progetto archeologico, a carattere territoriale, è costituito dall'analisi delle forme dell'incastellamento crociato nell'area meridionale della Signoria di Transgiordania nel 12° secolo, sia negli aspetti propriamente strutturali, sia come 'osservatorio' sulla frontiera crociato-musulmana, in relazione con i modelli di insediamento Ayyubidi e Mamelucchi.

Tra i principali risultati di quasi due decenni di ricerca si ricordano in particolare l'identificazione del rinnovato ruolo centrale di Petra nella Transgiordania di 12 ° secolo, dove emerge un sistema classico di "Incastellamento" della valle (con i centri fortificati di al-Habis, al-Wu'ayra, Wadi Farasa (Schmid, 2005), Hormuz e il villaggio 'arabo-latino' di Beidha) collegato con il grande centro castrense regio di Ash-Shawbak ("Crack deMontral"). Un risultato più recente della missione, che a partire dal 2002 si è progressivamente focalizzata sull'analisi di quest'ultimo sito (dal 2006 in diretta collaborazione con il Department of Antiquities of Jordan), è stato infine il riconoscimento del ruolo di preminenza politica, amministrativa ed economica che Shawbak, fondato da Baldovino I nel 1115 sui ruderi di un antico forte del *Limes Arabicus*, esercita con rinnovato slancio in età Ayyubide e nel primo periodo mamelucco (Vannini, 2007). Il complesso archeologico-monumentale del castrum di *Mons Regalis/Shawbak* è localizzato a circa 25 chilometri a nord di Petra e costituisce uno degli insediamenti medievali meglio conservati dell'intero Medio Oriente. Il villaggio fortificato occupa una posizione strategica nel sistema viario principale (*darb al-malik* o *darb al-sultan* – Milwright, 2006) che collegava il Mar Morto e Damasco al Mar Rosso, al Cairo e alla Penisola Arabica. La fortezza, edificata sulla sommità di un rilievo calcareo emisferico, rappresenta uno dei rari esempi di castello crociato rioccupato con funzione militare e amministrativa in epoca Ayyubide, all'indomani della sconfitta subita dagli europei ad Hattin nel 1187. La cittadella, investigata estesamente attraverso i metodi dell'archeologia leggera (36 cf sono stati attualmente analizzati – Nucciotti, 2007), è dotata di un sistema difensivo complesso e continuo, con una planimetria quasi perfettamente ellittica, articolato in tre cinte murarie (già dal XII secolo) intervallate da torri e bastioni aggettanti, databili dalla fondazione crociata all'epoca Mamelucca. Le strutture murarie di molti edifici medievali (incluse due chiese, una cappella, i resti dei palazzi crociato e ayyubide e le imponenti torri mamelucche), conservate estesamente in elevato, permettono ancora oggi di percepire la monumentalità di un sito chiave nel controllo della Giordania meridionale per tutto il medioevo.

Z-Scan

Il dispositivo di acquisizione dati è supportato da un software, Z-Scan, per la generazione di nuvole di punti sviluppato dalla Menci Software.

ZScan basa il proprio funzionamento su un sofisticato algoritmo di rettifica multifocale mediante la quale le immagini vengono ricampionate epipolarmente secondo piani variabili in funzione della morfologia dell'oggetto da ricostruire. La rettifica è seguita da un processo di *image matching* multiculare che consente di ottenere un'elevata qualità ricostruttiva sia della forma che del colore della nuvola di punti.

Le fasi del processo di elaborazione sono suddivisibili in due grandi categorie: la preparazione della tripletta² e la ricostruzione della superficie. La preparazione inizia con la contro-distorsione delle immagini per l'eliminazione delle aberrazioni ottiche. Le immagini vengono analizzate mediante un operatore d'interesse per la ricerca di un numero di *features* dipendente dalle loro dimensioni, ma che di solito non è inferiore alle 1500. La disposizione delle *features* influenza le fasi successive del calcolo. È necessario che esse siano distribuite su tutto il fotogramma e che quest'ultimo sia omogeneamente *texturizzato*. Un algoritmo di ricerca delle *features* omologhe e del loro filtraggio mediante geometria epipolare, conduce alla ricostruzione degli orientamenti dei tre fotogrammi. I valori angolari ottenuti per l'assetto di presa sono prossimi a zero e la loro entità dipende dalle tolleranze costruttive della slitta, dal posizionamento della camera sul carrello, dall'oscillazione della barra ed eventualmente del supporto che la sostiene. La correttezza dell'orientamento è il presupposto indispensabile per la buona riuscita del processo di ricostruzione.

Noto l'orientamento, si procede alla fase di rettifica trinoculare al fine di annullare simultaneamente la parallasse verticale sui tre fotogrammi. La rettifica è particolarmente complessa in quanto le condizioni di presa sono prossime a quelle di perfetto allineamento che costituisce una condizione degenera per il tensore trifocale. A tale scopo è stato messo a punto un algoritmo di rettifica trinoculare senza l'uso del tensore trifocale. La ricostruzione della superficie avviene per *image matching* mediante metodi di programmazione dinamica. Il calcolo della cross-correlazione è simultaneo sulle tre immagini e sfrutta le componenti cromatiche RGB.

Applicazione del dispositivo sperimentale

Dalla collaborazione tra la Menci Software di Arezzo e l'ITABC-CNR di Roma è stata sviluppata una nuova strumentazione che sfruttasse il *software Z-scan* da pallone aerostatico applicato su aree archeologiche.

Il dispositivo consiste in una barra metallica in alluminio di m 2 di lunghezza, sulla quale sono poste ad una distanza nota tre camere digitali *reflex* precedentemente calibrate. Per questo tipo di applicazione si è deciso l'utilizzo di un 24 mm fisso che potesse assolvere alle esigenze di ampia ripresa ed una distorsione ottica ridotta. Dal centro della barra principale si diparte in direzione ortogonale un'altra barra a formare una T, sempre in alluminio, della stessa lunghezza di quella principale e del peso inferiore per compensare eventuali momenti sull'asse verticale dell'asta principale. Su tale coda è agganciata una fune per direzionare il dispositivo nella posizione desiderata. Con l'ausilio di tre cavi, agganciati sui tre vertici estremi della T, il dispositivo è stato appeso ad un pallone aerostatico di 3.5 m di diametro. Il sistema è munito di un radio comando per lo scatto remoto e la sincronizzazione delle camere sul soggetto da riprendere.

Fly-scan è stato sperimentato sul complesso archeologico del castello di *Shawbak* sul quale sono state eseguite riprese dall'alto per la generazione di nuvole di punti dettagliate. La sperimentazione è durata soltanto quattro ore³ durante le quali sono stati scattati più di 800 fotogrammi/triplette⁴. Il lavoro è stato diviso in due parti: una relativa al primo volo, fatto da m 25 di altezza per assicurare un corretto funzionamento dello strumento. L'altra fatta durante le prime ore del mattino in maniera tale che la luce radente del sole evitasse forti contrasti tra luci e ombre, poiché gli elementi in ombra non vengono restituiti correttamente. In questo caso gli scatti sono stati effettuati da un'altezza di m 40 che simulasse anche l'altezza massima alla quale siamo obbligati in Italia⁵. Da tale altezza, montando un 24 mm l'area di ripresa a terra è stata di m² 1000⁶. In questa maniera, in poche ore è

² Per tripletta si intende lo scatto in successione sulla camera digitale.

³ Le ore sopracitate fanno riferimento al tempo effettivo della fase di acquisizione totale. Prima di tale fase è necessario preparare lo strumento per poter essere alzato in volo.

⁴ Ciascuna camera digitale ha scattato 800 fotogrammi utili alla ricostruzione tridimensionale del sito.

⁵ L'altezza massima stabilita dall'ENAC è di m 40. Oltre tale altezza bisogna richiedere dei permessi specifici e comunque non oltre determinate altezze, soprattutto in presenza di aeroporti.

⁶ Per implementare l'area di ripresa dalla stessa altezza è possibile montare un 14 mm. Bisogna tenere presente però due fattori: il primo relativo alla distorsione maggiore che si ha considerando che un 14 mm è un obiettivo grandangolare

stata coperta l'area relativa a metà castello. E' doveroso fare delle precisazioni riguardo all'intervento eseguito. *In primis* l'area indagata è priva di vegetazione e strutture molto alte che possano evitare un volo idoneo del pallone poiché l'area è sita in un contesto desertico. Sul sito però sono presenti forti correnti di vento a diversi nodi di velocità che possono alterare il lavoro di ripresa considerando anche il peso della struttura pari a ca. kg 10⁷. La maggiore difficoltà è stata quella relativa allo spostamento sul sito che doveva essere fatta in maniera razionale, utilizzando la tecnica nota in aerofotogrammetria, ossia per *overlap* e *sidelap* (Bonora et al., 2000) per evitare che ci siano zone non coperte dalla ripresa⁸. Dopo la fase di acquisizione delle riprese, si è proceduto all'analisi delle foto appena fatte e, attraverso l'uso di un *GPS* differenziale, sono stati presi dei punti fiduciali su elementi architettonici ben riconoscibili sulle foto e a terra (Colosi, 2001; Gabrielli, 2001). Per ogni fotogramma si è resa necessaria l'acquisizione e l'identificazione di almeno 4 punti sul territorio⁹. Questo si è reso necessario sia per una corretta georeferenziazione delle singole nuvole, che per evitare distorsioni che non permettano una esatta collimazione delle strutture durante la mosaicatura delle nuvole.

Attraverso il *software* dedicato, le triplette hanno dato origine a nuvole di punti di ca. pp 300.000 con una risoluzione a terra di 1 punto ogni cm 5. Questo livello di risoluzione è stato frutto di un compromesso tra la precisione del dato e la sua dimensione massima che ne permettesse la gestione¹⁰. In via sperimentale è stato eseguito un *test* su un edificio del castello¹¹ alla medesima altezza aumentando notevolmente la sensibilità ed ottenendo una nuvola di punti contenente più di 2.000.000 punti e con una risoluzione a terra di 1 punto ogni cm (fig. 2). Inoltre è in via di definizione una strisciata da m 100 di altezza per i quali è stata calcolata una risoluzione massima a terra di cm 2.

Lo scopo principale della campagna di acquisizione è stato quello di ricreare nuvole di punti sulle quali ricostruire fedelmente le strutture e il territorio attualmente presenti per una fruizione *web* di tutto il complesso archeologico, in maniera tale da rendere disponibili non solo le informazioni quantitative e dimensionali atte più ad un uso specifico, ma anche quelle di tipo qualitativo legate al colore, che insieme possano dare all'utente una percezione spaziale il più reale possibile.

Questo modello tridimensionale servirà anche allo studio intensivo delle strutture del castello e allo studio relativo alla loro disposizione all'interno della spazio intramurale, nonché a tutte le operazioni di rilievo e georeferenziazione relative alle emergenze archeologiche.

Le riprese dall'alto inoltre hanno lo scopo di contestualizzare le strutture all'interno dell'ambiente nel quale sorgono. Con questa finalità si possono ottenere *DTM* (*Digital Terrain Model*) del territorio ben definiti e a colori¹², che godono del vantaggio di coprire dall'alto aree molto vaste. E' noto come una visualizzazione e interpretazione degli elementi dall'alto possa fornire informazioni interpretative diversificate rispetto alla vista dal basso soprattutto là dove aree vegetative nascondono strutture murarie di dimensioni non trascurabili (Carandini, 1991). Tramite la fotogrammetria automatica, si acquisisce la dimensione spaziale di ogni singolo punto a terra,

molto spinto, il secondo relativo alla distribuzione più rada dei pixel sulla superficie acquisita che restituirà una risoluzione più bassa.

⁷ L'uso di un pallone aerostatico garantisce una maggiore stabilità dovuta all'annullamento delle forze vettoriali: la spinta del pallone verso l'alto contrasta quella laterale del vento, diminuendo notevolmente la deriva del pallone. In questo caso la forza peso del dispositivo tende ad annullare la spinta verso l'alto facilitando in questa maniera la spinta laterale del vento.

⁸ Sulle *reflex* attuali non è possibile visualizzare l'anteprima dello scatto. Di conseguenza gli operatori si muovevano su linee parallele contando dei passi dopo i quali veniva effettuata l'acquisizione. Per questo motivo a fine ripresa veniva eseguito un *back up* delle triplette che successivamente erano analizzate per conoscere le zone coperte e quelle ancora da coprire.

⁹ La disposizione dei punti sul fotogramma deve essere distribuita su tutta la superficie e non concentrata in alcune aree.

¹⁰ Questo tipo di risoluzione è legata al processore di calcolo e alla memoria *ram* di cui si dispone.

¹¹ L'edificio in questione è la così detta Chiesa Grande.

¹² Il sistema è in grado di associare il grado RGB alle coordinate del punto.

ottenendo modelli 3D integrabili con altre informazioni relative alla presenza e all'intervento dell'uomo sul territorio.

In merito a questa metodologia e al campo di applicazione sopra descritto, bisogna sottolineare la versatilità, la leggerezza e le dimensioni esigue dello strumento, che permettono una facilità di trasporto in ambienti logisticamente difficili come il sito di *Shawbak* in Giordania dove altrimenti strumenti della stessa categoria (i.e. *laser scanner*) avrebbero dei costi di gestione e trasporto superiori. In ambito di *upgrading* del *software* e dell'*hardware*, diversamente da molti strumenti (i.e. stazione totale, *laser scanner*), dove il prodotto nuovo sostituisce quello vecchio in maniera completa, per ottenere risoluzioni maggiori nel caso di *Fly-scan* è necessario cambiare solo le camere fotografiche poiché la barra rimane comunque sempre la stessa ed anche il *software* di gestione dati. Il notevole vantaggio consiste nel cambiare camera digitale con una a risoluzione maggiore, tale da aumentare la definizione della nuvola di punti. Attualmente a m 40 si possono ottenere nuvole con una risoluzione a terra di 1 punto ogni cm. Utilizzando sensori da MP 20 si possono ottenere risoluzioni prossime al cm a m 100 di altezza¹³. Altro fattore sicuramente molto importante consiste nella scelta della risoluzione. Impiegando un *laser scanner* durante la fase di acquisizione è necessario stabilire una risoluzione che non sempre si rivela efficace e corretta per il tipo di lavoro che si sta svolgendo. In questo caso la fase di acquisizione non dipende dalla risoluzione dello strumento¹⁴; soltanto durante la fase di *process* dei dati sceglieremo la risoluzione idonea al tipo di intervento che si è fatto. In questo caso rispetto alla definizione del castello che si voleva ottenere si è scelta una risoluzione di 1 punto ogni 5 cm per avere una visione generale del castello che potesse essere anche gestita in maniera rapida. Non ultima la velocità di elaborazione del dato che può variare per ogni singola nuvola da un minimo di pochi secondi fino a un paio d'ore ottimizzando tutti i parametri per l'ottenimento della massima risoluzione.

La possibilità di scegliere la risoluzione ci aiuta a riflettere sugli scopi che ci dobbiamo prefiggere ogni qual volta decidiamo di fare un lavoro, dove non sempre la massima risoluzione è richiesta ed è sinonimo di qualità e affidabilità. Viceversa nuvole ad altissima risoluzione possono creare disagi nella gestione dei dati stessi che dunque si rendono inutilizzabili.



Figura 1 – Veduta del castello di Shawbak (Giordania).

¹³ L'utilizzo attuale di tali sensori comporta una spesa economica ingente.

¹⁴ Le camere digitali compiono uno scatto fotografico al massimo della risoluzione di acquisizione del sensore

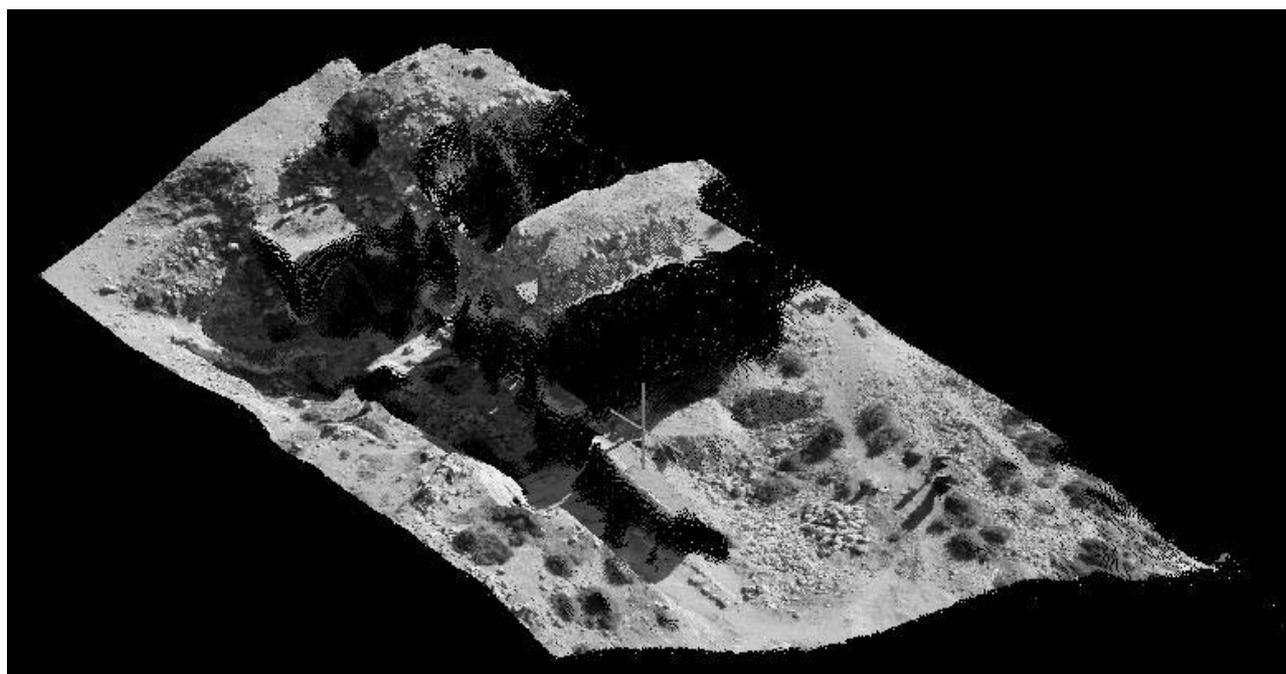


Figura 2 – Vista prospettica della nuvola di punti generata con Fly-Scan dell'area relativa alla Chiesa Grande.

Bibliografia

- Bonora G., Dall'Aglio P., Patitucci S., Uggeri G. (2000), *La topografia antica*, CLUEB, Bologna, 161-174.
- Carandini A. (1991), *Storie della terra. Manuale di scavo archeologico*, Einaudi, Torino, 38-85.
- Colosi F., Gabrielli R., Peloso D., Rose D. (2001), "Impiego del Differential Global Positioning System (DGPS) per lo studio del paesaggio antico: alcuni esempi rappresentativi", *Archeologia e Calcolatori*, 12, 2001, 181-197.
- Drap P. et al. (2007), *Photogrammetry and archaeological knowledge: toward a 3d information system dedicated to medieval archaeology: a case study of Shawbak castle in Jordan*, in Remondino El-Hakim a c. (2007), *Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2007: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures"*, Zurich;
- Gabrielli R. (2001), "Introduzione all'uso dei GPS in archeologia", in Campana S., Forte M. (eds.), *Remote sensing in Archaeology*, Firenze, All'insegna del Giglio, 1-25.
- Milwright M. (2006), "Central and southern Jordan in the Ayyubid period", *Journal of Royal Asiatic society*, s 3, 16-1: 1-27;
- Nucciotti M. (2007), *Shawbak. Analisi stratigrafiche degli elevati: primi risultati*, in Vannini G. a.c. (2007), 27-55;
- Schmid S. G. (2005), "The international Wadi Farasa Project, preliminary report of the 2004 season", *Annual of the Department of Antiquities of Jordan*, 49: 71-80;
- Vannini G. a.c. (2007), *Archeologia dell'insediamento crociato-ayyubide in Transgiordania. Il Progetto Shawbak*, Insegna del Giglio, Firenze;