

STRATEGIE INNOVATIVE DI ELABORAZIONE E RESTITUZIONE DATI DEL CASTELLO CROCIATO DI WU'AYRA

1. IL CASTELLO CROCIATO DI WU'AYRA

Il castello di *Wu' Ayra* fu costruito dal re di Gerusalemme Baldovino I, all'inizio del XII secolo, durante il piano di riorganizzazione della valle di Petra, in Giordania. *Wu' Ayra* faceva parte di un elaborato sistema di impianti di difesa, che comprendeva anche i contemporanei castelli di *Shawbak* e *Al-Habis*, garantendo, così, il controllo della regione sud-orientale del Mar Morto. L'occupazione crociata di *Wu' Ayra* si concluse con la conquista di *Salah al-Din* nel 1188 d.C., poco prima della caduta di *Shawbak* (VANNINI, NUCCIOTTI 2009).

Wu' Ayra risulta essere il più esteso e complesso castello delle piazzeforti della regione di Petra, essendo caratterizzato da lunghe mura di difesa, torri di osservazione e cisterne scavate nella roccia (Fig. 1). Il complesso archeologico presenta una differenziazione funzionale fra il castello vero e proprio e l'area fortificata, con strutture che ricalcano la morfologia del terreno. Differenti studi hanno evidenziato setti murari posizionati in modo da arginare e difendere ogni tipo di accesso naturale, integrati da torrette di avvistamento collocate sulle principali sommità dell'area (VANNINI *et al.* 2003). *Wu' Ayra* occupa una superficie di 15.000 m² ca., su tre quote differenziate, e, così come in passato, le rovine possono essere raggiunte solo attraversando un ponte sul *Wadi Wu' Ayra*, caratterizzato da un piccolo tunnel scavato nella roccia (BINI, BERTOCCHI 2004).

D.P.

2. ANALISI DI UN PERCORSO METODOLOGICO

A partire dal 2000, nell'ambito della missione archeologica internazionale¹ "Medieval Petra: archaeology of Crusader-Ayyubid settlement in Transjordan", sono state eseguite numerose campagne di acquisizione per il rilevamento dell'area monumentale di *Wu' Ayra*, come base per sperimentare diverse tecniche di rilevamento. Le campagne susseguite nel tempo (2000-2014) hanno avuto lo scopo di restituire graficamente l'area archeologica e la geomorfologia di un sito molto complesso ed esteso in tutte le sue ramificazioni (GABRIELLI *et al.* 2012).

¹ La missione è attualmente coordinata dal Prof. G. Vannini dell'Università degli Studi di Firenze.



Fig. 1 – Vista panoramica dell'area di Petra in Giordania. Sullo sfondo è possibile vedere le rovine del castello crociato di *Wu' Ayra*.



Fig. 2 – Attività di rilevamento topografico attraverso l'uso di un GPS differenziale.

La prima sperimentazione internazionale (2000) venne eseguita con sistemi GNSS (Global Navigation Satellite System), concentrati sulla parte più alta della fortezza, nota come il Cassero. Gli obiettivi furono la georeferenziazione di una planimetria archeologica esistente del castello e, allo stesso tempo, un controllo numerico della rappresentazione. Parte dei dati venne anche elaborata con algoritmi di interpolazione per la trasformazione dei punti in modello triangolato (TIN, Triangulated Irregular Network), modello da cui fu possibile leggere diverse discontinuità. Lo scopo della missione doveva essere la determinazione dei piani di intervisibilità tra le diverse fortificazioni crociate presenti sul territorio di Petra. La tecnologia utilizzata era quella del GPS (Global Positioning System) allora agli esordi.

Il diverso impiego strumentale ha permesso di distinguere le aree realmente utili all'indagine, da quelle che alteravano la lettura delle strutture antiche (Fig. 2). Questa prima sperimentazione, realizzata in collaborazione con l'Università degli Studi di Napoli "L'Orientale", ha permesso di acquisire informazioni spaziali di diverse migliaia di punti, consentendo di affrontare, da un diverso punto di vista, l'interpretazione di un'area archeologica e, per la prima volta, di mettere in relazione le principali strutture murarie con il modello digitale del terreno. La validità di questa prima esperienza ha inoltre permesso di avviare un'intensa attività di collaborazione con la cattedra di Archeologia Medievale del Dipartimento di Studi Storici e Geografici dell'Università di Firenze, che ha portato nel 2001 alla firma di un protocollo di ricerca congiunto ("Produzione e documentazione archeologica procedendo alla definizione di protocolli operativi e modelli interpretativi a carattere innovativo nel campo delle tecnologie applicate ai Beni Culturali").

Questa prima fase di sperimentazione ha prodotto un notevole interesse per lo studio dei modelli numerici di stratigrafie murarie e scavi archeologici. Il sito di *Wu'Ayra* è diventato in questo modo un laboratorio a cielo aperto per applicazioni sperimentali di rilievo. Con gli anni si è sviluppata l'esigenza di rappresentare il sito mediante l'integrazione del dato numerico e cromatico con delle immagini fotografiche che potessero dare una migliore interpretazione delle strutture murarie. Per soddisfare tale esigenza si è deciso di procedere all'acquisizione di immagini dall'alto, utilizzando un aquilone (attività di rilevamento anno 2001). Le riprese sul campo furono allora eseguite tramite un dispositivo fotografico analogico, con pellicola professionale ad alta definizione a grana esagonale, in modo da ridurre al minimo le aree prive di superficie sensibile. La scelta di queste pellicole fu dovuta al fatto che nel 2001 non erano ancora disponibili macchine di ripresa digitali compatte, la cui risoluzione fosse migliore di quella delle macchine analogiche. Data la complessità della situazione, sia dal punto di vista logistico che da quello strettamente topografico, si decise di operare in due distinte campagne di rilevamento: il primo anno (2001) furono eseguite le riprese aeree, mentre

il secondo anno (2002) si relazionarono i singoli fotogrammi con elementi architettonici ben visibili sul terreno e opportunamente georeferenziati. Tale dispositivo restituì fotogrammi ad elevata risoluzione da 25 m di altezza (risoluzione di 1-2 cm)². I dati furono elaborati con un software di georeferenziazione satellitare (ERDAS ER Mapper 6.0) e finalizzati allo sviluppo di un ortofoto-mosaico complessivo del Cassero (Fig. 3). Uno dei limiti che condizionò questa procedura fu il vento, per cui alcune zone furono prive di copertura fotografica. Dal 2002 al 2007 vennero eseguite altre attività di rilevamento nei vicini castelli di *Shawbak* e *Al-Habis*.

Durante l'attività di rilevamento del 2007 il gruppo di ricerca ha integrato l'uso della fotografia digitale da pallone aerostatico con tecniche di rilevamento topografico, al fine di ottenere un'ortofoto generale di tutto il complesso archeologico, attraverso processi di raddrizzamento fotografico delle singole immagini. L'uso di un pallone ha permesso di acquisire foto ad alta risoluzione (2 cm da 60 m di altezza) con una singola fotocamera digitale compatta (12 MP, Fig. 4). Una strumentazione remota ha consentito di regolare l'inclinazione della fotocamera di 90° sul piano verticale e di 360° su quello orizzontale. Inoltre, è stata eseguita un'acquisizione con GPS, in due diverse modalità operative, per un totale di ca. 300 punti (GCP, *target* e punti notevoli). Nel caso della roccaforte i target sono stati posizionati su una griglia regolare (10×10 m), mentre nell'area fortificata le coordinate sono state acquisite su punti geomorfologicamente riconoscibili dalle immagini stampate. L'uso di dispositivi digitali per le riprese aeree ha permesso sia l'abbattimento dei costi che un numero di riprese potenzialmente infinite. Il risultato complessivo è stato abbastanza soddisfacente per una analisi qualitativa dell'evoluzione spaziale del complesso monumentale rispetto al territorio circostante, ma le problematiche legate ai differenti piani di proiezione hanno parzialmente ridotto l'affidabilità della rappresentazione finale.

Tali risultati ci hanno spinto a studiare metodi più efficaci per risolvere il problema dei differenti piani di proiezione, problema accentuato in un sito come quello del castello di *Wu'Ayra*, che ha una struttura morfologica molto complessa. Si tratta di problemi che erano ben evidenti fin dall'inizio, in quanto la scarsità di risorse economiche ha impedito approcci metodologici forse più corretti dal punto di vista scientifico ma in questo caso di difficile applicazione. A partire dal 2011, in concomitanza con lo sviluppo di modelli matematici sempre più affidabili, il gruppo di ricerca ha deciso di utilizzare il set di dati per tentare lo sviluppo di un modello numerico a nuvola di punti di tutto il castello, eseguito attraverso la fotomodellazione manuale. I dati sono stati oggetto di una sperimentazione metodologica sull'uso della foto-

² Le immagini stampate sono state successivamente acquisite digitalmente con uno scanner professionale.



Fig. 3 – L'uso dell'aquilone con camera analogica ha permesso di ottenere una prima restituzione della zona nota come il Cassero. A causa dei forti venti l'area della fortificazione esterna non è coperta dalle immagini.

grammetria digitale basata sul riconoscimento manuale dei punti omologhi, seguendo uno specifico protocollo operativo. È stato dunque possibile stabilire delle relazioni proiettive tra più immagini che riproducono lo stesso oggetto, attraverso l'uso di differenti software (PhotoMetric, PhotoModeler).

Attualmente l'impiego di sofisticati modelli matematici (Structure From Motion) e sistemi di calcolo sempre più performanti, hanno permesso di rivedere i dati sperimentali di molti dei siti studiati nel corso degli anni. Il lavoro svolto a *Wu'Ayra* si è ben prestato a questo tipo di revisione poiché il gran numero di misure raccolte durante le diverse campagne ha permesso



Fig. 4 – Ripresa da pallone aerostatico. Le immagini digitali sono state acquisite con una camera digitale compatta, Nikon P3 da 12 MP.

integrazioni e confronti tra le diverse metodologie utilizzate. Nell'ultimo anno (2014) sono stati condotti alcuni test con il laser scanner su diversi settori del castello, in modo da non interrompere la serie di sperimentazioni metodologiche.

R.G.

3. ELABORAZIONE RETROATTIVA DEI DATI

Con il progressivo miglioramento dei computer, in grado di gestire un grande numero di dati, e della grafica computerizzata, la fotogrammetria si è sviluppata enormemente, diventando, oggi, una delle tecniche di acquisizione dei dati architettonici e territoriali (per la realizzazione di piante, prospetti, carte topografiche) tra le più attendibili, veloci ed affidabili. Partendo da una serie di fotogrammi, in un tempo molto ridotto, si ottiene una nuvola di punti simile a quella dei laser scanner.

Nel 2014 l'attività si è incentrata nella riorganizzazione di tutti i dati precedentemente acquisiti sulla base degli ultimi sviluppi della fotogrammetria digitale. L'interazione tra i dati topografici e digitali, unitamente all'utilizzo dei moderni software, ha permesso di individuare criteri metodologici per il recupero delle immagini e lo sviluppo di un modello numerico di tutto il

castello e del territorio circostante, basato su tecniche di fotomodellazione automatica. Il processo di recupero ed elaborazione dati può essere di seguito così riassunto:

- Recupero ed editing delle acquisizioni effettuate da pallone nell'anno 2007; le riprese fotografiche sono state effettuate utilizzando una macchina compatta COOLPIX P3, lunghezza focale 7.5 mm, risoluzione 12 MP.
- Recupero delle coordinate acquisite con i relativi sistemi GNSS; le coordinate sono state acquisite nel sistema WGS84 e trasformate nel sistema di proiezione UTM36 relativo alla Giordania.
- Trattamento dei dati attraverso l'utilizzo di software di elaborazione dati 3D (Agisoft Photoscan, JRC 3D Reconstructor, Surfer).
- Confronto dei risultati ottenuti tra le diverse tecniche di elaborazione dati.

Considerato il numero di riprese fotografiche disponibili (circa un migliaio) è stato necessario effettuare una distinzione dei dati, eliminando quelli che avrebbero potuto creare difficoltà ai software di elaborazione (ad es. riprese fuori fuoco, sovraesposte, simili ad altre, o eccessivamente oblique) e raggiungendo un numero di scatti utilizzabili di circa la metà del totale.

Le riprese fotografiche non presentavano originariamente un'organizzazione in strisciate perfettamente orientate, in considerazione dell'uso di un pallone controllato da tre operatori, che si spostavano su un terreno piuttosto accidentato e fortemente vincolato da limiti naturali, orografici e climatici. Per comodità di elaborazione, le riprese sono state organizzate in 4 differenti strisciate artificiali, suddivise in altrettanti blocchi processabili separatamente, atti a garantire una migliore sovrapposizione reciproca e un minor tempo di elaborazione.

La nuvola di punti finale è il risultato dell'allineamento dei quattro blocchi. L'applicazione di tale software, basato sulla tecnica nota come Structure From Motion, non rende metrico il modello restituito, per cui si rende necessario stabilire un rapporto di scala sulla base dei dati topografici a disposizione.

D.P.

3.1 Analisi del modello

Il modello numerico ottenuto presenta delle buone caratteristiche dal punto di vista qualitativo, in quanto evidenzia la morfologia del territorio in relazione all'area archeologica. L'errore medio del modello, ottenuto in seguito all'inserimento delle coordinate GPS, è di circa 0,059 m. Considerando che il GPS differenziale lavora contemporaneamente sulla fase e sul codice del segnale (errore medio di circa 1-2 cm) e che le misure dipendono da alcune variabili, quali il numero e la posizione dei satelliti, rumori elettromagnetici

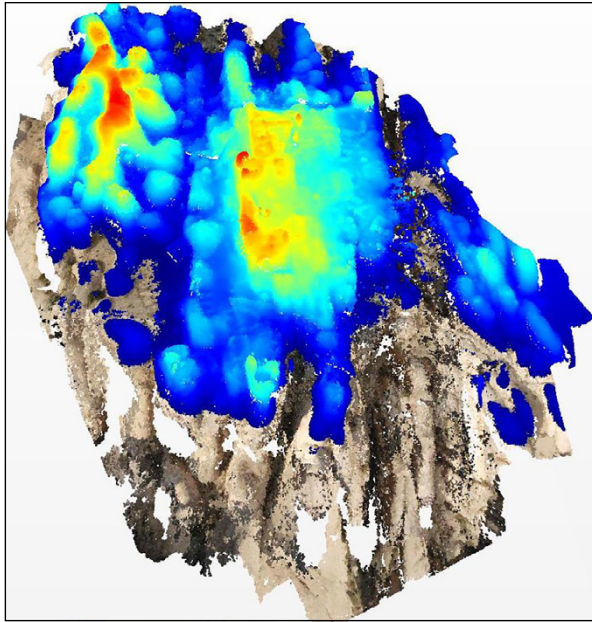


Fig. 5 – Modello numerico a nuvola di punti elaborato con sistemi di riconoscimento automatico dei punti omologhi. Una mappatura a falsi colori evidenzia le aree con quote maggiori.

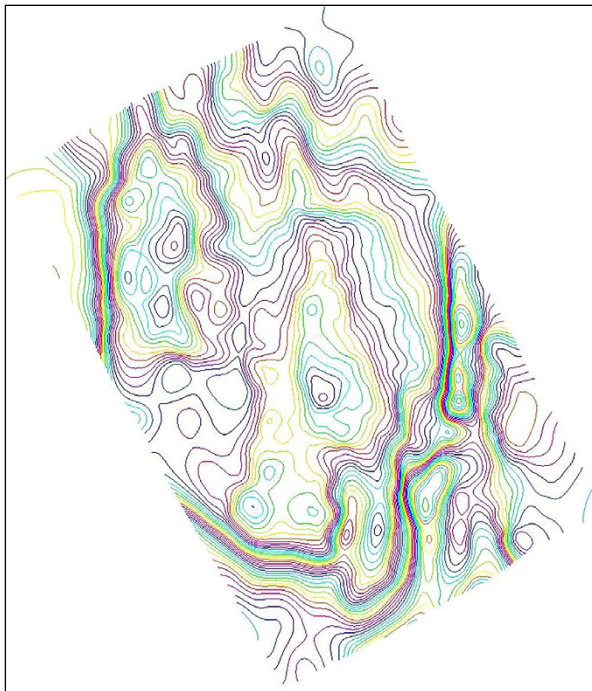


Fig. 6 – Curve di livello estratte dal modello numerico a nuvola di punti elaborato in Agisoft Photoscan.



Fig. 7 – Integrazione tra il modello numerico generato da fotogrammetria e quello ottenuto con il laser scanner.

generati da sorgenti esterne terrestri (ANGELINI, GABRIELLI 2013), e che a questi va sommato un possibile errore aggiuntivo nel posizionamento dei target sul modello nonché l'uso di una camera digitale compatta (con ottica e sensore di dimensioni ridotte), il risultato finale rientra all'incirca nei limiti d'errore calcolati sulla base della scala di rappresentazione territoriale.

Il risultato ottenuto risulta essere maggiormente affidabile nelle porzioni centrali, dove insistono un maggior numero di acquisizioni; la ricostruzione laterale è meno attendibile, in particolar modo per le porzioni settentrionali ed orientali del sito archeologico. Questo perché, originariamente, le riprese avevano l'obiettivo di documentare la zona del Cassero, nella porzione centrale. Inoltre i limiti naturalistici non permettevano di effettuare riprese nelle porzioni esterne.

La nuvola di punti è stata importata all'interno di un software di gestione dati 3D, JRC Reconstructor, trasformata in superfici triangolate (mesh), con l'obiettivo di ottenere curve di livello e immagini grafiche che rappresentassero in maniera adeguata la morfologia del sito (Fig. 5). Successivamente è stato realizzato un piano dal modello georeferenziato, parallelo al piano di proiezione orizzontale, e successivi n piani ad una distanza costante dal piano di origine (equidistanza di 1 m). Il software ha così generato delle sezioni corrispondenti alle isoipse della fortezza (Fig. 6).

Durante l'ultima missione sono state realizzate riprese laser scanner nella zona N/N-O di una piccola area del sito archeologico, pertinenti ad una scala ricavata nella roccia. Le riprese laser scanner realizzate a media risoluzione (1/4 di quella totale quindi circa 44.000.000 di punti con un punto ogni 6 mm a 10 m di distanza), sono state realizzate al fine di creare delle mappe di dettaglio relative alle soluzioni architettoniche adoperate per la fortezza.

Avendo a disposizione sia la nuvola di punti in fotogrammetria che quella con il laser scanner si è deciso di confrontare i due modelli, evidenziando eventuali difformità. Sovrapponendo i due set di dati georeferenziati (Fig. 7), i due modelli presentano una sensibile discrepanza (0,3 m ca.) soprattutto sull'asse delle z, probabilmente dovuta al differente posizionamento dei centri di ripresa ma anche ad una diversa sensibilità strumentale.

D.P.

3.2 Riflessioni sui dati acquisiti

Al di là del mezzo di acquisizione delle immagini, i dati esposti dimostrano quanto sia necessaria un'adeguata rete topografica finalizzata all'orientamento esterno dei dati, in assenza della quale nessun modello è affidabile dal punto di vista metrico. Perciò una corretta procedura metodologica prevede una battuta topografica contestuale alle riprese fotografiche del sito, siano esse realizzate con i vecchi sistemi, come in questo caso, oppure con i nuovi, quali per esempio i droni.

Nel caso specifico delle riprese di *Wu'Ayra*, la rielaborazione dei dati da pallone ha evidenziato come si possano recuperare vecchie riprese per ottenere rappresentazioni territoriali di qualità. Questo è stato possibile sia grazie ai nuovi software di elaborazione dati, ma anche grazie alla presenza della rete topografica GPS, senza la quale sarebbe stato impossibile correggere le distorsioni e gli errori presenti nel modello numerico.

L'eventuale utilizzo dei droni porterebbe sicuramente ad avere nuove esperienze nel campo delle riprese aeree a bassa quota. I vantaggi principali riguardano le caratteristiche principali dello strumento: permanenza fissa in quota ad un punto prestabilito; possibilità di effettuare gli scatti, organizzandoli in strisciate su rotte definite grazie all'orientamento GPS interno allo strumento; ritorno automatico al punto di partenza, azionabile tramite apposito pulsante su radiocomando o automaticamente in caso di perdita del segnale; stabilità in volo; capacità di pervenire a zone difficilmente raggiungibili da pallone. Nel caso di *Wu'Ayra* sarebbe forse più opportuno l'utilizzo di un aeromobile a comando remoto UAV (Unmanned Aerial Vehicle), che potrebbe volare in spazi piuttosto stretti, come il *Wadi Wu'Ayra*, realizzando delle strisciate anche in punti altrimenti difficilmente raggiungibili. Gli svantaggi consistono nella difficoltà di ottenere i permessi di volo oltre ai costi piuttosto

elevati dello strumento e dei software ad esso connessi, nonché la possibilità di perdita del segnale sulle frequenze previste sui comandi remoti. Nei siti dove per motivi burocratici non è possibile l'impiego di droni, l'utilizzo del pallone, che ha la possibilità di montare una camera reflex a controllo remoto con obiettivo full frame, permette comunque di ottenere una buona qualità del dato, come evidenziato dal presente lavoro di rielaborazione.

D.P.

4. CONFRONTO TRA MODELLI NUMERICI

Il confronto tra i due modelli numerici elaborati sulla base dei dati acquisiti durante la campagna di rilevamento del 2007 sul castello crociato di *Wu' Ayra* non solo è effettuato qui di seguito sulla base della differenza di informazioni dei due modelli (pur sempre importante), ma è inteso anche come riflessione critica su due distinti approcci al problema dell'indagine archeologica e del rilievo territoriale, sulla base di una metodologia di studio che vede nella tecnica fotogrammetrica una delle soluzioni principali in un contesto complesso come quello del castello crociato in Giordania.

I due modelli numerici in esame sono quello ricostruito sulla base dei recenti software per la correlazione automatica dei punti (modello numerico del 2014 elaborato con Agisoft Photoscan) e quello invece elaborato sulla base dei vecchi sistemi di correlazione manuale (modello numerico del 2010 elaborato con Photomodeler Pro 6, Fig. 8) (GABRIELLI *et al.* 2012). Per comodità di esposizione il modello più recente sarà denominato A mentre quello meno recente B. La prima differenza tra i due modelli è costituita dalla quantità di punti che nel caso A è sull'ordine dei milioni, mentre in quello B è sull'ordine delle migliaia. Altra differenza è la caratteristica cromatica che nel caso A è ereditata dalle medesime immagini utilizzate per l'elaborazione, mentre nel caso B i punti definiti nello spazio non possiedono tale caratteristica. I due modelli, in effetti, sono molto simili nel risultato, poiché mettono in evidenza una serie di elementi utili allo studio del territorio su cui sorge il castello, tuttavia l'evoluzione tecnologica degli ultimi anni, a livello software e hardware, ha portato delle enormi novità nel campo della fotogrammetria, tanto che oggi si parla a tutti gli effetti di foto scansione anziché di fotomodellazione, per via dei risultati simili a quelli di uno scanner laser (PARIS 2012).

L'affidabilità del modello numerico ovviamente dipende da diversi fattori e sostanzialmente non siamo in grado di percepirne il valore durante l'elaborazione dei dati o semplicemente visionando il risultato finale. I fattori che maggiormente possono influenzare la qualità del dato sono, com'è noto, la tipologia di camera utilizzata (reflex o compatta), la calibrazione dell'obiettivo e del sensore utilizzati, ovvero la conoscenza delle caratteristiche principali quali la distanza focale, i punti nodali e le distorsioni radiali, la presa delle

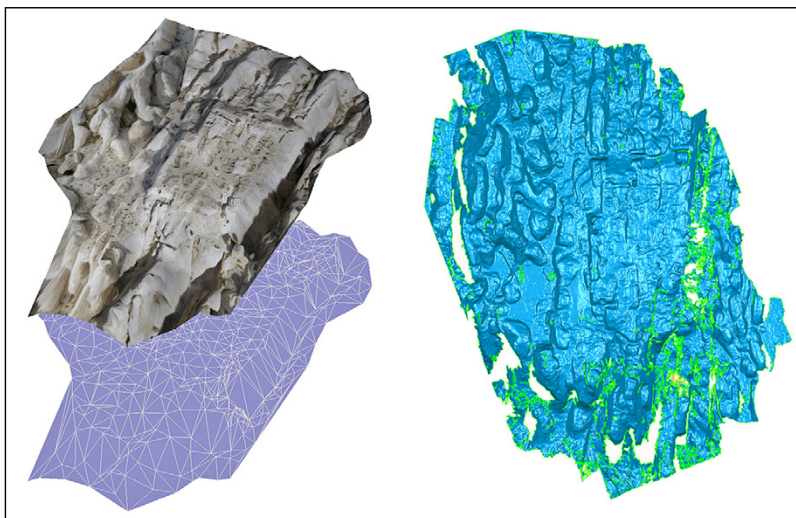


Fig. 8 – Confronto di due differenti elaborazioni: sulla sinistra il modello mesh triangolato con sistemi di fotogrammetria manuale, mentre sulla destra il modello generato da sistemi fotogrammetrici automatici ed elaborato con il virtual scan.

immagini alla medesima distanza e la loro sovrapposizione, le caratteristiche fisiche del materiale che, nel caso di pattern disomogenei, agevolano la ricostruzione del modello numerico finale (CUNDARI 2012). Partendo dalle stesse immagini acquisite, i due set di dati sono affetti dalla medesima degradazione del risultato finale o da possibili errori. Nel caso della fotomodellazione (B), poter governare i processi e gli step propedeutici all'elaborazione finale aiuta a controllare, entro determinati range, l'errore e l'affidabilità del dato. Nel caso della foto scansione (A) è sicuramente possibile comparare in maniera più oggettiva il dato reale a quello virtuale, viceversa si perde il controllo di ogni singolo punto, in considerazione dei milioni di punti che vengono generati, nonché il rumore associato all'elaborazione. Non è dunque possibile spostare o scegliere punti specifici e dunque non è possibile governare l'intero processo di elaborazione.

Vediamo ora nel dettaglio alcuni aspetti interessanti le differenze tra i due modelli numerici, cercando anche di evidenziare i vantaggi e gli svantaggi di determinate operazioni a livello software. Una delle caratteristiche evidenti risiede nel fatto che nel caso della foto scansione abbiamo una scelta indiscriminata dei punti. Grazie all'automatizzazione dei processi di scelta omologa dei punti, il software genera la nuvola di punti. Questa scelta dipende ovviamente dalle caratteristiche delle immagini, dalla geometria alla base degli algoritmi e dal materiale di supporto, ma non da una scelta ragionata.

Tuttavia la mole di dati che viene registrata copre tutta l'area di indagine, grazie anche a delle interpolazioni effettuate automaticamente.

Con i processi di fotomodellazione manuale, viceversa, la scelta dei punti è delegata all'operatore. Anche in questo caso l'importanza di una corretta acquisizione delle immagini può influenzare l'esito del risultato finale, tuttavia a ciascun punto individuato ne può corrispondere uno soltanto individuato dall'operatore nella medesima zona di pixel sull'immagine omologa³. Questo da un lato può essere considerato uno svantaggio ai fini della ricostruzione generale del modello, che risulta molto semplificata, mentre dall'altro lato agevola una scelta critica dei punti, scelta solitamente definita dall'operatore sulla base dell'esperienza maturata sul territorio di indagine e sulla base delle caratteristiche formali del sito. La scelta manuale permette anche di correggere gli automatismi legati ad indicazioni che il software potrebbe proporre come soluzione per la determinazione dei punti ad una coppia di immagini.

Il modello ricostruito nel 2010 è un modello composto da ca. 3000 punti e ciascun punto evidenzia un elemento caratteristico della geomorfologia del sito di *Wu'Ayra*. I punti definiti nello spazio virtuale sono tutti quanti utili alla ricostruzione del modello finale. Nel modello a foto scansione del 2014 la determinazione dei punti è eseguita in maniera indiscriminata, ovvero senza una scelta critica del soggetto; oltretutto il peso del modello porta necessariamente a dover filtrare i punti. La maggior parte dei software di gestione delle nuvole di punti ha una serie di algoritmi per filtrare la nuvola stessa. Spesso però questi filtri sono definiti sulla base di criteri che cercano di semplificare la maglia di punti nelle zone piane diversamente da quelle dove ci sono angoli o discontinuità, in cui è richiesto un maggior numero di punti per descriverne la superficie. L'uso di questi algoritmi è solitamente tarato per quello che riguarda le architetture, in cui la geometria è ben definita e soddisfa i requisiti di elaborazione del filtro. L'approccio è totalmente diverso nel caso in cui invece questi sono applicati nell'ambito di un territorio costituito da una maglia irregolare, come quello di *Wu'Ayra*, in cui forse il risultato potrebbe non essere particolarmente efficace.

Un aspetto sicuramente interessante è anche quello del passaggio dal modello numerico a nuvola di punti al modello numerico in formato mesh. Nella fotomodellazione manuale le mesh sono costruite dall'operatore stesso, ovvero i triangoli sono delimitati semplicemente da polilinee passanti per i punti identificati da chi elabora il modello. Tanto più il soggetto è

³ Nonostante la scelta dei punti omologhi avvenga in maniera accurata, le rette di collineazione di fatto sono delle rette sghembe e non incrociano mai esattamente il punto individuato che quindi viene approssimato.

caratterizzato da punti ben scelti, tanto più i triangoli ne descrivono correttamente la forma. Anche questo passaggio è manuale e permette di evitare costruzioni di triangoli non corretti a fronte ovviamente della quantità di punti a disposizione. A questo si deve aggiungere il fatto che sulla mesh può essere proiettata l'immagine relativa al fotogramma di interesse, per la compensazione dei colori o per scelte proiettive particolarmente utili ai fini del lavoro.

Se consideriamo la foto scansione ci rendiamo conto che il valore RGB già associato alla nuvola ci permette di capire le qualità cromatiche del soggetto e la rappresentazione nel formato mesh è relegata ad un aspetto tecnico-formale che permette di approssimare la superficie al soggetto reale, in funzione del numero dei triangoli e di filtri utili alla sistemazione del dato finale. Solitamente per la costruzione dei triangoli viene utilizzato l'algoritmo di Delaunay, algoritmo che tende a generare dei triangoli equiangoli, omogeneizzando la loro disposizione sul modello (MIGLIARI 2009).

Un'ultima riflessione può essere viceversa fatta su quello che riguarda le possibili ulteriori elaborazione dei modelli, in funzione dell'obiettivo generale del lavoro, ovvero lo studio del castello nell'ambito del territorio di Petra di cui non esiste una cartografia di base specifica. Una delle operazioni più diffuse è quella della creazione di curve di livello e in questo caso i due modelli numerici hanno dei comportamenti diversi poiché le curve di livello sono generate a partire dal modello mesh e ne sono una conseguenza. È evidente che le mesh, costruite in fotomodellazione e interpolate con filtri per renderle meno aggressive, permettono di estrapolare curve di livello che descrivono l'area nelle sue caratteristiche principali. Nella foto scansione ovviamente la nuvola di punti prima e il modello mesh poi hanno la particolarità di dare una serie di informazioni e dettagli sicuramente più approfonditi, e quindi modelli digitali del terreno e curve di livello più rappresentativi.

Con questa riflessione non si vuole sminuire il recente sviluppo degli algoritmi nel campo della fotogrammetria digitale, tuttavia si vuole mettere in evidenza come i precedenti sistemi di fotomodellazione manuale conservino una serie di caratteristiche ed un controllo più accurato di alcune fasi, controllo che l'automatizzazione dei processi sembra aver parzialmente inibito (fotoscansione). In sintesi è chiaro che il dettaglio delle nuvole di punti può dare delle informazioni suppletive a possibili anomalie del terreno, utili all'indagine archeologica, anche se la scala di rappresentazione tende ad una scala di tipo urbano. Ovviamente la gran quantità di punti permette di definire mappe tematiche molto utili, come ad esempio i modelli digitali del terreno (DEM).

A.A.

5. ELABORAZIONI DELLA NUVOLO DI PUNTI E RAPPRESENTAZIONE DELLE CURVE DI LIVELLO

I dati elaborati sono stati utili alla costruzione di mappe e informazioni per la contestualizzazione del sito. Se da un lato la costruzione del modello 3D ha portato notevoli vantaggi nell'ottica dell'interpretazione del sito, dall'altra è stata necessaria una serie di elaborazioni e di filtri per compensare il rumore dei dati. Ad esempio, la nuvola di punti derivata da software fotogrammetrici è una nuvola non soltanto non strutturata ma, soprattutto, è una nuvola casuale, poiché il riconoscimento dei punti omologhi avviene in funzione di una determinata geometria e delle caratteristiche colorimetriche del soggetto. Se il pattern è continuo come ad esempio un muro bianco, nonostante le prese fotogrammetriche siano corrette, probabilmente la muratura non sarà ricostruita secondo la geometria definita dalle immagini e i punti presenti nel modello numerico non saranno sufficienti a descriverla correttamente. Viceversa un pattern molto discontinuo, ovvero con presenza di forti contrasti di luce-ombra, ma anche colorimetrici, facilita la ricostruzione del modello numerico (ANGELINI, GABRIELLI 2013).

Un altro parametro che facilita la costruzione della nuvola 3D è caratterizzato dalla modalità di ripresa. Nel caso in esame le prese non sono complanari, motivo per cui il riconoscimento dei punti avviene su diversi piani epipolari. Viceversa se le prese sono complanari e parallele, la geometria dei piani epipolari diventa parallela ed anche il riconoscimento dei punti ne è agevolato e la ricostruzione è più affidabile e con meno rumori (CARPICECI 2012).

Come accennato, la nuvola di punti è costituita da un numero di punti disposto in maniera casuale, il cui discriminante è il riconoscimento o meno dei punti, indipendentemente dalle zone di maggior o minor interesse per l'indagine. Pertanto se sottocampioniamo la nuvola secondo una specifica percentuale è possibile osservare un alto riconoscimento di punti nelle acquisizioni centrali, ed una rarefazione degli stessi nelle zone marginali del modello, poiché i margini dell'area hanno un numero inferiore di sovrapposizioni dovute ad ostacoli naturali.

Questa differenza di presenza si ripercuote su tutte le elaborazioni successive. Nello specifico sono state prese in considerazione le informazioni utili per la costruzione delle curve di livello, la cui rappresentazione costituisce un problema, soprattutto perché è cambiato il modo in cui viene effettuata, essendo demandata a processi automatici di estrazione. Le curve di livello nel calcolo computazionale non sono altro che delle sezioni orizzontali parallele ad un piano di proiezione scelto dall'operatore, che, in funzione della distanza e della ripetizione, può calcolarne un numero infinito. Il problema è come queste curve sono rappresentate. Spesso nel calcolo matematico sono estratte delle polilinee a

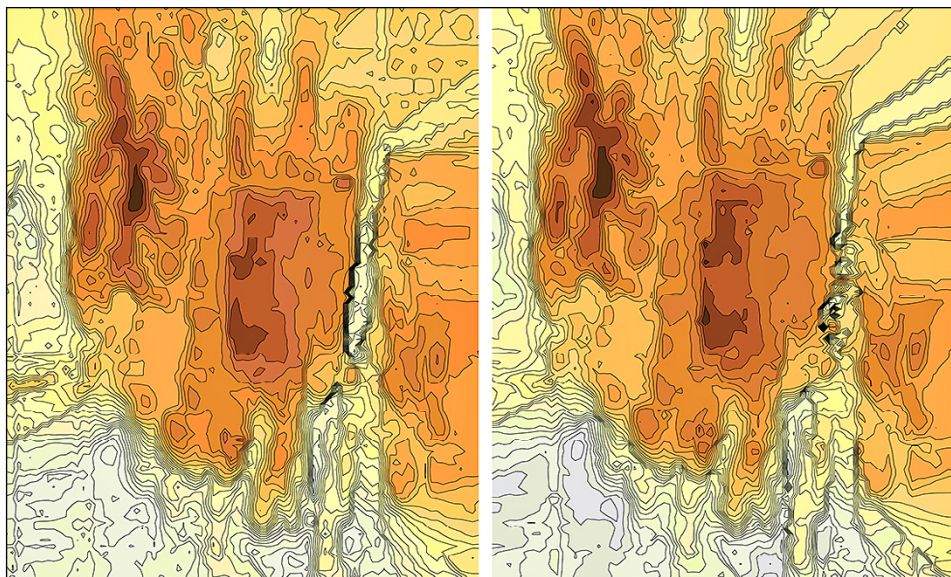


Fig. 9 – Elaborazione delle curve di livello: a sinistra l'elaborazione sul modello di punti discontinuo, mentre a destra l'elaborazione effettuata dopo la regolarizzazione del modello numerico. Nel secondo caso le curve sono più regolari ed affidabili.

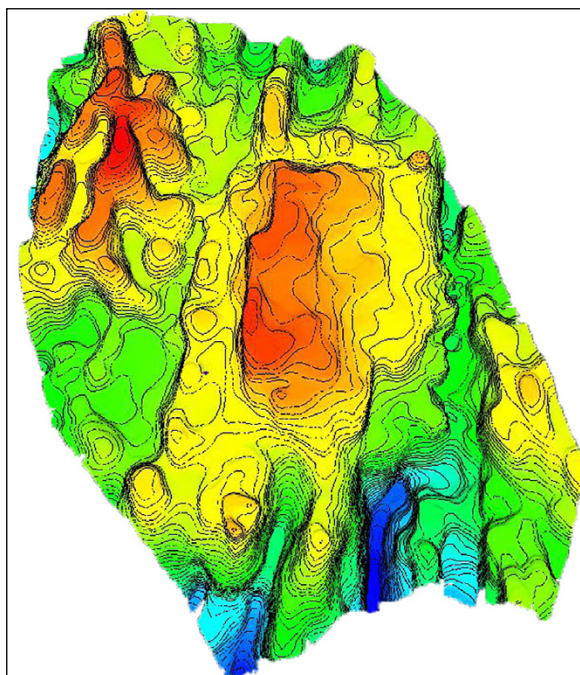


Fig. 10 – Elaborazione delle curve di livello su meshing topografico. La nuvola di punti è stata resa uniforme attraverso l'uso del virtual scan e successivamente trasformata in mesh. Il risultato delle curve è più idoneo e privo di alterazioni dell'informazione.

segmento che nelle varie sovrapposizione dei modelli sono ricalcolate più volte, creando problemi nella visualizzazione e sovrapposizioni non perfette. Se poi i modelli numerici contengono rumori, la visualizzazione finale è compromessa da dati non veritieri (Fig. 9). Se quindi da un lato si è reso più veloce il calcolo di queste polilinee, dall'altro la loro rappresentazione pone non pochi problemi anche in funzione dei dati di partenza che si hanno a disposizione.

Nel caso di una nuvola non filtrata, il risultato delle curve di livello sicuramente aiuta a gestire una gran quantità di dati, ma la rappresentazione non è poi così ben definita, in quanto descrive un terreno molto accidentato in zone dove invece la roccia è levigata e ci si aspetterebbe una certa "morbidezza" nelle rappresentazioni. La rappresentazione matematica ovviamente tende a creare una sorta di effetto spigolo. Sul modello numerico a nuvola di punti non è possibile calcolare le curve di livello in funzione della discontinuità dei punti in alcune zone del rilievo. Pertanto si rende necessario effettuare una trasformazione dei punti in modello mesh.

I dati sono stati trattati sfruttando una particolare tecnica di filtraggio esistente ormai in vari software e che nel caso specifico è definita come virtual scan all'interno del software JRC Reconstructor (SGRENZAROLI, VASSENA 2007). Una volta stabilita un'ideale camera ortografica che contenga l'oggetto di indagine, viene costruita dal software una griglia di riferimento che funziona come un laser scanner. Di fatto avviene un campionamento dei punti secondo una griglia scelta dall'utente in funzione degli obiettivi del lavoro. Uno dei principali vantaggi consiste nel passare da una nuvola non strutturata ad una nuvola strutturata anche se con un numero minore di punti, definendo una griglia di punti omogenea su tutto il modello indipendentemente dalle forme che lo caratterizzano. Tale passaggio semplifica notevolmente le successive elaborazioni per la determinazione delle curve di livello, rappresentate in maniera più omogenea.

Anche nella ricostruzione delle mesh, la maglia regolare può aiutare l'identificazione delle discontinuità del terreno soprattutto se a seguito di questa prima operazione applichiamo un filtro di riduzione, dove le zone piane possono essere descritte da pochi poligoni a differenza delle zone a forte discontinuità dove il numero di poligoni dovrebbe essere maggiore. Il numero di punti (10.000) è stato sufficientemente alto per trasformare mesh di tipo territoriale, meno spigolose, dove è stato applicato l'algoritmo per la costruzione delle curve di livello (Fig. 10). La differenza nei due risultati è notevole soprattutto rispetto alla scala di rappresentazione prescelta. Le forti discontinuità presenti sul dato grezzo sono state ben filtrate per una rappresentazione più aderente a quella reale. Inoltre questo approccio alla rappresentazione garantisce una lettura più immediata ed idonea al problema dell'interpretazione del dato finale.

A.A.

6. CONCLUSIONI

Ciascuno dei rilievi eseguiti ha portato ad un incremento di conoscenza delle strutture investigate, con metodologie di volta in volta all'avanguardia. Parimenti va anche riconosciuto che le tecnologie impiegate hanno prospettato nuove problematiche, a cui abbiamo cercato di dare risposte con ulteriori applicazioni. L'iniziale uso del GPS, ad esempio, ha fornito una rappresentazione metrica certificata, sia dalla risoluzione dello strumento che dal diretto controllo sul terreno ed è ancora oggi uno strumento di rilevamento tra i più affidabili. Ovviamente l'interpretazione areale e spaziale viene letta in modo migliore dalle rappresentazioni dei modelli tridimensionali derivati dalla fotogrammetria aerea.

Tuttavia l'evoluzione dei sistemi di rilevamento ha aperto nuove frontiere di indagine. Attualmente il gruppo di ricerca dell'ITABC-CNR sta procedendo ad un nuovo rilievo dell'intera area archeologica del castello, mediante l'impiego di un laser scanner, per documentare il complesso monumentale e validare i modelli derivati dalle acquisizioni fotogrammetriche. La maggior parte dei rilievi eseguiti sul sito rappresenta visioni dall'alto del sistema insediativo descrivendo in modo ottimale tutte le superfici piane ed oblique ma meno bene, per la natura stessa del sistema di misura, le superfici verticali. I primi test compiuti con l'utilizzo del laser scanner hanno messo in luce ulteriori difficoltà, quali aree molto estese con poche strutture in elevato e una serie di zone d'ombra (mancanza di dato rilevato) causate dai crolli del sito. Questi problemi rendono quasi illeggibile il modello numerico generato, se questo non è accompagnato da un numero elevato di scansioni eseguite da diversi punti dell'area archeologica. I risultati dello strumento sono delle "letture" altamente definite nei particolari, che per essere gestite e sfruttate in tutta la loro potenzialità devono essere eseguite con grande cura e precisione, altrimenti si rischia solo di incrementare la quantità dei dati raccolti senza apportare nessun miglioramento alla conoscenza e interpretazione del dato.

L'esperienza maturata sul castello di *Wu' Ayra* ci ha suggerito la seguente riflessione: ciascuno dei rilievi eseguiti è fondamentale nella sua specifica strumentale per cui bisogna indirizzare ogni sforzo non solo ad un confronto fra le varie tecniche ma, partendo da questo, mirare ad una integrazione più completa possibile dei diversi metodi di rilevamento.

R.G.

ROBERTO GABRIELLI, ANDREA ANGELINI, DAMIANO PORTARENA

Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali

CNR – Roma

roberto.gabrielli@itabc.cnr.it, andrea.angelini@itabc.cnr.it, damianportarena@hotmail.it

BIBLIOGRAFIA

- ANGELINI A., GABRIELLI R. 2013, *Laser scanning e photoscanning. Tecniche di rilevamento per la documentazione 3D di beni architettonici e archeologici*, «Archeologia e Calcolatori», 24, 379-394
- BINI M., BERTOCCHI S. 2004, *Castelli di pietre. Aspetti formali e materiali dei castelli crociati nell'area di Petra in Transgiordania*, Firenze, Polistampa.
- CARPICECI M. 2012, *Modelli geometrici e costruzioni grafiche per il rilevamento architettonico. Idee e proposte per una migliore gestione dei dati grafici e numerici nel rilevamento architettonico*, Roma, Aracne, 33-60.
- CUNDARI C. 2012, *Il rilievo architettonico. Ragioni. Fondamenti. Applicazioni*, Roma, Kappa.
- GABRIELLI R., ANGELINI A., GIUNTA E., TAFFI E. 2012, *From 2D to 3D data: Al-Wu'ayra's crusader castle*, in *Proceedings of 5th International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (Istanbul 2011)*, I, Roma, 71-77.
- MIGLIARI R. 2009, *Geometria descrittiva - Tecniche e applicazioni*, II, Novara, CittàStudi.
- PARIS L. 2012, *Fotogrammetria e/o foto modellazione*, in A. CASALE, *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione*, Roma, Kappa, 55-62.
- SGRENZAROLI M., VASSENA G.P.M. 2007, *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner. Volume 1 – Introduzione generale*, Brescia, Starrylink.
- VANNINI G., VANNI DESIDERI A., NUCCIOTTI M., TONGHINI C. 2003, *Medieval Petra. Archaeology of the Crusader-Ayyubid fortified installations in Trans-Jordan. Archaeological Mission of the University of Florence*, in G. VANNINI et al. (eds.), *Civiltà del Passato, dialogo del presente: Missioni di ricerca italiana in Giordania (Amman 2002)*, Amman, 181-200.
- VANNINI G., NUCCIOTTI M. 2009, *Da Petra a Shawbak. Archeologia di una frontiera*, Firenze, Giunti.

ABSTRACT

The recent development of camera sensors, the manufacturing of lenses and the accurate algorithms of photogrammetric software allow today to acquire point clouds similar to those generated from a laser scanner. The results are similar: numerical models that contain a variety of information, useful for the final data synthesis. Thanks to the automatic points recognition of photogrammetric algorithms, it is now possible to revise part of digital data previously acquired and use them in new computing strategies. Emblematic is the example of the crusader castle of *Wu' Ayra*, an important medieval fortress located in the Petra valley in Jordan. Since 2000, in collaboration with the international mission of the University of Florence, a number of surveys aimed at detecting the whole monumental area, the archaeological site, the settlement and the defensive system of the castle were performed by the research team of the Italian ITABC-CNR. Different survey techniques were used during the acquisition step, in order to enhance the main information of the archaeological site and the geomorphology of an extended area particularly complex to be defined. In these 15 years, the team tested several techniques. Thanks to recent software, the team has revised old data, created a defined numerical model of *Wu' Ayra*, updated and improved the documentation. The Authors illustrate the results of these elaborations and compare them with the other systems used, highlighting the differences and updating the graphic documentation of an important site in the history of the Petra valley. Furthermore, latest data of the architectural structures of the formworks acquired with laser scanner will be presented.

