

L'uso di SAPR per la documentazione archeologica: il caso studio del Ponte Rotto ad Apice (Bn)

Marco Limongiello^(a), Alessandro Di Benedetto^(b)

^(a) Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, mlimongiello@unisa.it;

^(b) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Roma Tre,
alessandro.dibenedetto@uniroma3.it

Abstract

Nel rilievo in ambito archeologico, per la presenza di elementi curvi e di parti aggettanti, è spesso necessario l'utilizzo di sistemi di acquisizione che permettano di ottenere una misura celere, dettagliata e di supporto alle tecniche tradizionali. L'utilizzo di sistemi di acquisizione fotogrammetrici da SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto), unite all'utilizzo di algoritmi di Computer Vision, permettono la realizzazione di modelli tridimensionali ai quali vengono applicate texture foto-realistiche derivanti da immagini fotografiche acquisite in volo.

Il caso studio che presentiamo è il rilievo fotogrammetrico del Ponte Rotto ad Apice (Bn). Per il rilievo aerofotogrammetrico è stato utilizzato un UAV (Unmanned Aerial Vehicle), con peso totale al decollo inferiore ai 2 kg (art. 12, Regolamento ENAC del 16 luglio 2015). Le immagini acquisite sono state elaborate con un software con tecnologia Structure From Motion; il modello è georeferito per mezzo di sei GCP (Ground Control Points), misurati con ricevitori GNSS (Global Navigation Satellite Systems) in modalità nRTK (Network Real Time Kinematic).

Inquadramento Storico - Territoriale

Il ponte Appiano, più noto come ponte Rotto (Fig.1), attraversava il fiume Calore nell'attuale comune di Apice, in località Morroni a confine con i comuni di Bonito e Mirabella Eclano, dunque tra le province di Benevento e di Avellino. Appartiene al percorso dell'Appia che partendo da Benevento transitava per la località Cubante, passando per il Calore e dirigendosi verso Eclano. Esso risulta leggermente inclinato in pianta: il fiume in quel punto forma un angolo quasi retto con l'alveo accogliendo le acque del torrente Mela, circostanza ritenuta sfavorevole per il ponte il quale riceve la corrente in direzione dell'asse longitudinale e non in senso normale. Attualmente del viadotto sono visibili solo un'arcata e tre pile, mentre ricostruzioni storiche certificano una struttura a schiena d'asino a sei grandi arcate (di luce variabili dai 10 ai 22 m) con uno sviluppo lineare di circa 190 m e altezza massima di 13 m (Meomartini A., 1889, Quilici L., 1996). Poco lontano dal ponte romano, leggermente più a valle si notano pochi ruderi di un altro ponte (probabilmente) di origine medioevale. Tenendo conto delle dimensioni, è uno dei maggiori ponti romani in Campania. Noto per la sua maestosità e molto conosciuto in zona, è stato oggetto di diversi studi anche da parte di studiosi locali che ne hanno costantemente denunciato lo stato di abbandono.

A partire dal 2011, il DISPAC (Dipartimento di Scienze del Patrimonio Culturale) con il supporto del DICIV (Dipartimento di Ingegneria Civile) dell'Università degli Studi di Salerno, hanno avviato un progetto di ricerca multidisciplinare con lo scopo di studiare il percorso della Via Appia nel tratto compreso tra *Beneventum* e Ponte Appiano sul Calore con lo scopo di elaborare ipotesi valide sullo sviluppo del tracciato dell'asse viario (Santoriello A., Rossi A., 2016). Il progetto *Ancient Appia Landscapes* ha per obiettivo la verifica sul terreno dei segni, delle tracce archeologiche e i processi di formazione che li hanno generati e di mettere in valore i fenomeni ambientali, le dinamiche insediative e le trasformazioni del territorio a specificamente nel settore est della provincia di Benevento. Durante la Spring School organizzata da Ancient Appia Landscapes ad Apice (11 - 12 Maggio 2017), è stato effettuato il rilievo aerofotogrammetrico del Ponte Rotto. L'obiettivo della restituzione fotogrammetrica è quello di generare elaborati grafici utili alla conservazione, alla digitalizzazione e a eventuali successivi studi sullo stato di degrado in cui versa.

Metologia

Nel caso studio si è testato un DJI Phantom 4 un mezzo "leggero" dal peso di circa 1400 g. Il Phantom 4 è un quadricottero con camera integrata in grado di effettuare riprese video in 4K fino a 30 frame al secondo e trasmettere il segnale video in HD su smartphon, tablet e dispositivi esterni tramite un software della stessa ditta costruttrice (DJI GO).

La camera è dotata di un sensore Sony CMOS Exmor da 12,4 megapixel (dimensioni 6,3 x 4,7 mm, pixel size 1,56 x 1,56 μm), ha un obiettivo quadrangolare con focale equivalente 20 mm, f/2.8 e FOV 94°. Dispone di una serie di sensori che aiutano il pilota al pilotaggio e al mantenimento della posizione in volo.



Figura 1: Resti del Ponte Rotto ad Apice (BN)

L'utilizzo di un mezzo non professionale è per valutare le potenzialità di mezzi commerciali sotto il peso complessivo di 2 kg, vista anche l'apertura del regolamento ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile) per questa tipologia di aeromobili in aree critiche, aree dove spesso vi è presenza di beni archeologici. Nell'Edizione 2 del regolamento ENAC del 16 luglio 2015, Emendamento 3 del 24 marzo 2017, nell'Art.12 "Operazioni con APR di massa operativa al decollo minore o uguale a 2 kg", comma 1 si dichiara che :*"Le operazioni specializzate condotte con SAPR di massa operativa al decollo minore o uguale a 2 kg sono considerate non critiche in tutti gli scenari operativi, a condizione che gli aspetti progettuali e le tecniche costruttive dell'APR abbiano caratteristiche di inoffensività, precedentemente accertate dall'ENAC o da soggetto da esso autorizzato"* (ENAC, 2015).

Con la pubblicazione delle linee guida LG 2016/003-NAV – Ed. n.1, ENAC ha definito i criteri da seguire per ottenere la classificazione di inoffensività per un drone che pesa più di 300 grammi (governati da altri articoli del regolamento) e meno di 2 kg. Senza entrare troppo nel merito, un drone al di sotto dei 2 kg per essere dichiarato inoffensivo deve rispettare diversi parametri: l'Energia Cinetica all'Impatto (ECI) massima deve essere inferiore ai 66J. Oltre alla ECI, il drone per essere dichiarato inoffensivo deve soddisfare i criteri qualitativi n. 2,3,4,6 della linea guida, ovvero: deve essere costruito nelle parti principali (2) con materiale a bassissima densità e ad alta deformabilità che assorba il colpo dell'impatto; il rivestimento (3) deve essere in grado di trasmettere la deformazione dell'urto al materiale sottostante senza opporre resistenza; non deve esserci presenza di parti esposte appuntite / taglienti (6), eliche, rotori o parti del drone che potrebbero urtare direttamente una persona devono essere arrotondate; le parti rotanti (ovvero le eliche) devono essere intubate o costituite da materiale morbido (ENAC, 2016). È da sottolineare che il mezzo in questione rispetto il LG 2016/003-NAV non può definirsi inoffensivo, in quanto non rispetta le caratteristiche di inoffensività sancite dalle linee guida. Il test ha però voluto verificare le potenzialità che un mezzo dal peso abbondantemente entro il limite massimo dei 2 kg, possa avere ai fini del rilievo fotogrammetrico in campo archeologico. A supporto è stata progettata una rete GNSS costituita da 6 Ground Control Points (GCP) per la georeferenziazione e la valutazione dell'accuratezza del modello generato. I GCP sono stati materializzati a terra mediante target fotogrammetrici e chiodi topografici. Il sistema di riferimento adottato è UTM/ETRF00 con quote ellissoidiche. La precisione raggiunta in planimetria è mediamente sub-centimetrica mentre in altimetria si arriva a circa 2.5 cm.

Caso studio

Per l'acquisizione delle prese fotogrammetriche si è optato per una modalità di cattura manuale per la presenza di alcuni ostacoli presenti ai lati del ponte. Sono state così acquisite in modalità time-lapse, con intervallo di 5 secondi, 273 immagini secondo 3 strisciate consecutive. Il primo volo ha previsto un'acquisizione nadirale, con 74 prese fotografiche; sono seguiti due altri voli con la camera inclinata (per restituire in post-elaborazione i prospetti laterale del ponte), acquisendo, rispettivamente, altre 93 e 106 immagini.

Per garantire una buona sovrapposizione tra i fotogrammi, nell'acquisizione laterale sono state effettuate due strisciate a quote differenti: una prima con camera inclinata di 45° che riprendesse la parte superiore del ponte (per garantire sovrapposizione con il volo nadir) e una seconda con asse della camera posto in direzione orizzontale, che avesse una sovrapposizione adeguata con la strisciata laterale precedente.

In volo nadirale si è sviluppato da Nord-Ovest verso Sud-Est, con un'altezza media di volo pari a 19 m sul piano campagna, il che ha comportato un abbracciamento dei fotogrammi di 29,9 x 22,3 m. I voli laterali, hanno un'altezza media di volo per le due strisciate di circa 17 m e 9 m su entrambi i lati del ponte, con abbracciamento dei fotogrammi pari rispettivamente a 26,8 x 20 m e 14,2 x 10,6 m. In Figura 2 è riportato un dettaglio delle "Camera positions".

L'elaborazione dei dati è avvenuta in ambiente Agisoft PhotoScan, versione 1.3.2 build 4164; il processo di restituzione si basa su quattro noti step: Align Photos, Build Dense Cloud, Build Mesh e Build Texture. Nella fase di Align Photos sono calcolati i parametri interni della camera (lunghezza focale, posizione del punto principale, distorsioni radiali e tangenziali) insieme alle determinazioni delle posizioni spaziali e la generazione della Sparse Cloud. Nella successiva fase sono ri-proiettati, per ogni camera allineata, un numero maggiore di pixel generando quella che è la Dense Cloud; in seguito, nella fase di Build Mesh, i punti della nuvola sono sottoposti ad algoritmi di triangolazione per avere un modello poligonale soggetto a proiezione della texture nella relativa fase di Build Texture.

Nella fase di Align Photos sono stati impostati i parametri: Accuracy = High, Key point limit = 4000, Tie point limit = 4000, ottenendo 84.248 punti. Nella realizzazione della Dense Cloud i parametri utilizzati sono stati: Quality = High, Depth filtering = Disable, restituendo 8.226.893 punti. Per la Mesh i parametri impostati sono: Surface type: Arbitrary; Source data: Dense Cloud e Face cont: Medium. Per la proiezione della texture sul modello poligonale i parametri scelti sono: Mapping Mode: Generic; Blending Mode: Mosaic; Texture size: 4096 x 1. Dalla completa elaborazione delle prese fotogrammetriche in questo ambiente software è stato generato il modello 3D dell'intero Ponte Rotto, sia sotto-forma di nuvola di punti sia come modello mesh. In Figura 3, è rappresentata una vista prospettica della Dense Cloud dell'unica arcata ancora in piedi del ponte Rotto, così come generata in Agisoft PhotoScan.

Gli scarti sui GCP nelle direzioni Est (E), Nord (N) e h, sono riportati in Tabella 1; si osserva che la media degli scarti è risultata inferiore ai 4 cm. Si può notare che l'errore medio maggiore sui tre assi risulta essere lungo l'altezza h; questo probabilmente è dovuto alla collocazione dei GCP a quote approssimativamente simili (vincolo dovuto alle condizioni orografiche della zona) e alla minor precisione in altimetria della misura del sistema GNSS in modalità nRTK (Barba S. et al., 2016).

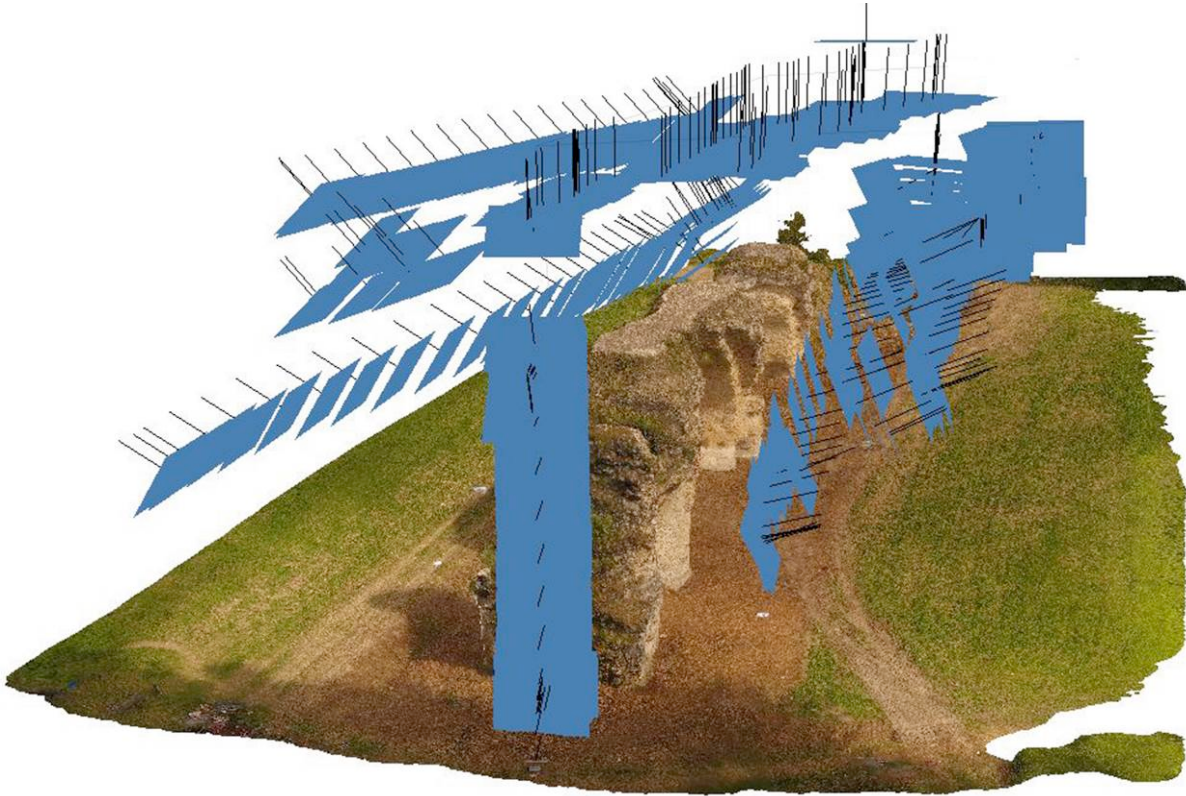


Figura 2: Metodologia di acquisizione prese fotogrammetriche da SAPR



Figura 1: Vista prospettica di un particolare della nuvola di punti generata.

In Figura 4 è riportato il DEM (Digital Elevation Model) ottenuto. Il software permette di ricavare anche le ortofoto laterali, indicando il piano di riferimento; sono stati così restituiti i prospetti Est e Ovest, osservabili in Figura 5: Si vuole sottolineare che soprattutto questa tipologia di elaborati, sono essenziali per una corretta valutazione dello stato di degrado a cui il ponte è soggetto.

	Scarti E [cm]	Scarti N [cm]	Scarti h [cm]	Scarti 3D [cm]	Scarti in Pixel
P1	-0.5	0.6	-3.1	3.2	0.2
P2	0.3	0.8	3.9	4.0	0.2
P3	-3.2	-2.4	-3.9	5.6	0.2
P4	3.0	-1.2	1.0	3.3	0.3
P5	-1.2	1.2	-0.3	1.7	0.3
P6	1.7	1.1	2.4	3.2	0.3
Scarto medio	1.6	1.2	2.4	3.5	0.2

Tabella 1 - Scarti sui GCP

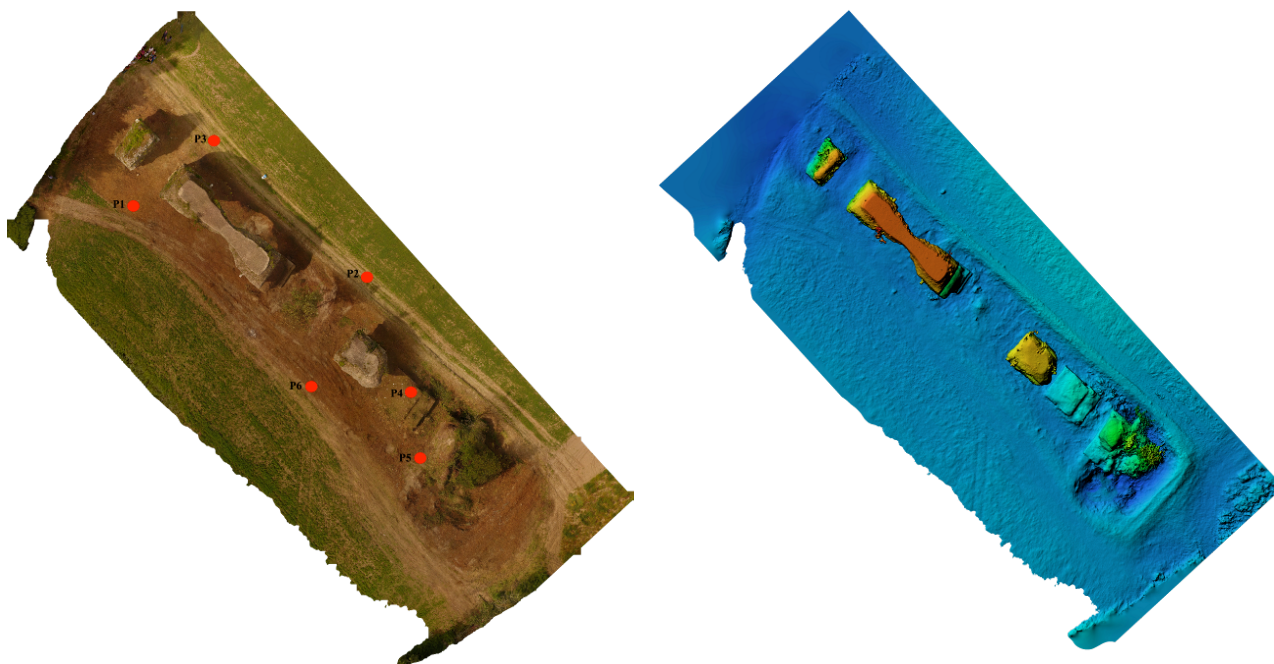


Figura 4: GCP, Ortofoto e DEM



Figura 5: Prospetto Ovest (in alto) e Prospetto est (in basso).

Discussione e Conclusioni

Il presente lavoro si poneva come obiettivo di testare un quadricottero di tipo commerciale con peso totale minore dei 2 kg e valutare i risultati metrici ottenibili tramite un processo fotogrammetrico di tipo Structure from Motion. Anche in assenza di un piano di volo, con l'acquisizione delle prese in modalità manuale e scatti in time-lapse (intervallo 5 s), il sistema e la metodologia

hanno consentito l'acquisizione e la restituzione di un corretto processo fotogrammetrico. Al termine delle elaborazioni, il modello 3D generato rispettava le tolleranze legate al grado di risoluzione relativo per una rappresentazione nella scala richiesta, e ha permesso l'estrazione di elaborati utili per una successiva mappatura del degrado.

Riferimenti bibliografici

Santoriello A., Rossi A. (2016), "Un progetto di ricerca tra topografia antica e archeologia dei paesaggi: l'Appia antica nel territorio di Beneventum", Proc. of 3rd International Landscapes Archaeology Conference, 2014, pp. 1-11.

ENAC (2016), Linee guida 2016/003, NAV Ed. n.1 del 1°, Aeromobili a Pilotaggio Remoto con caratteristiche di inoffensività, LG 2016/003-NAV, https://www.enac.gov.it/La_Normativa/Normativa_Enac/Linee_Guida/info148190721.pdf.

Barba S. et all (2016), "Una herramienta VANT experimental para una metodología cada vez más consolidada: el caso de Via di Nocera en Pompeya", 18CCIA La Habana CUJAE - Ministerio de Educación Superior Vol.CD, pp.1-11.

ENAC (2015), Regolamento "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto", Edizione 2 del 16/07/2015, https://www.enac.gov.it/repository/ContentManagement/informati on/N122671512/Regolamento_APR_Ed_2_Emend_3.pdf.

Quilici L. (1996), "Evoluzione tecnica nella costruzione dei ponti. Tre esempi tra età repubblicana e alto medioevo", in Quilici L & Quilici Gigli S (ed.), Strade romane. Ponti e viadotti, L'Erma di Bretschneider, Roma, pp. 267-92.

Meomartini A. (1889), "I monumenti e le opere d'arte della città di Benevento: lavoro storico, artistico, critico". Tipografia di L. de Martini e figlio.

