POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

# Rilievo metrico 3D multiscala per l’indagine e la rappresentazione architettonica e ambientale dell’area archeologica di Susa

*Original*
Rilievo metrico 3D multiscala per l’indagine e la rappresentazione architettonica e ambientale dell’area archeologica di Susa / Aicardi, Irene; Boccardo, Piero; Chiabrando, Filiberto; Donadio, Elisabetta; Lingua, Andrea Maria; Maschio, Paolo Felice; Noardo, Francesca; Spano', Antonia Teresa. - STAMPA. - (2014). (Intervento presentato al convegno Atti 18a Conferenza Nazionale ASITA, 14 – 16 ottobre 2014 tenutosi a Firenze).

*Availability:*
This version is available at: 11583/2583946 since:

*Publisher:*
ASITA

*Published*
DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

27 April 2024

# Rilievo metrico 3D multiscala per l'indagine e la rappresentazione architettonica e ambientale dell'area archeologica di Susa

Irene Aicardi (*), Piero Boccardo (**), Filiberto Chiabrando (*), Elisabetta Donadio (***), Andrea Lingua (*), Paolo Maschio (*), Francesca Noardo (*), Antonia Spanò (***)

(*) Dipartimento di Ingegneria dell'ambiente del Territorio e delle Infrastrutture, (**)Dipartimento Interateneo di scienze Progetto e Politiche del Territorio (***) Dipartimento Architettura e design - Politecnico di Torino, (*irene.aicardi, piero.boccardo, filiberto.chiabrando, elisabetta.donadio, andrea.lingua, paolo.maschio, francesca.noardo, antonia.spano@polito.it)*

**Riassunto**

L'articolo presenta alcuni dei risultati raggiunti in seguito ad uno degli stages didattici proposti dagli autori agli studenti dei corsi di laurea delle aree di Architettura e di Ingegneria del Politecnico di Torino inerente il rilievo metrico 3D che si è svolto a fine 2013 nell'area archeologica di Susa. L'attività è stata sostenuta dall'Ateneo, con i fondi del 5 per mille, e da alcuni enti territoriali locali (Regione Piemonte, Città di Susa, associazioni culturali locali).

Le attività di acquisizione hanno previsto l'integrazione di metodi multisensore e, in particolare, l'impiego di tecniche di fotogrammetria terrestre (close-range), RPAS (Remotely piloted aircraft system) e laser scanner.

L'elaborazione dei dati acquisiti è consistita nella loro registrazione e georeferenziazione nel sistema di riferimento globale, utilizzando l'appoggio topografico legato ai vertici della rete misurati con tecniche GPS-GNSS, e nella costruzione di modelli di superficie continui.

I modelli 3D ottenuti si caratterizzano per la diversa natura dei dati impiegati nella loro generazione e per il contenuto informativo multiscala: scansioni laser terrestri, modelli stereoscopici e ortofoto generati da voli a bassa quota tramite UAV dell'area archeologica, acquisizioni fotogrammetriche e laser scanning ad alta risoluzione di decorazioni architettoniche complesse e figurate quali il fregio dell'arco di Augusto di Susa ed infine dati estratti da voli utili per l'aggiornamento di cartografie tecniche regionali e provinciali. Tali modelli tridimensionali sono stati integrati al fine di ottenere una descrizione più completa degli oggetti indagati permettendo così l'elaborazione di molteplici rappresentazioni utili a diversi scopi: restituzione grafica (2D e 3D) dei singoli manufatti e dell'area, estrazione di ortofoto, indagine archeologica, ricostruzione archeologica delle architetture antiche etc.

I risultati ottenuti alle diverse scale sono stati infine implementati all'interno di un GIS interrogabile in relazione a molteplici necessità, integrabile continuamente con informazioni aggiuntive provenienti dagli studi archeologici o territoriali e utilizzabile per la visualizzazione 3D tematizzata delle informazioni ottenute.

**Abstract**

The article presents some of the results achieved in one of the stages proposed by the authors to the students of degree courses of Architecture and Engineer of the Politecnico of Torino for a 3D metric survey, which took place in 2013 in the archaeological site of Susa. The work has been supported by Politecnico, with 5x1000 funds, and by some local authorities (the Piedmont Region, City of Susa, local cultural associations).

Acquisition activities have predicted the integration of multi-sensor methods and, in particular, they have been performed using terrestrial photogrammetry (close range) techniques, RPAS (Remotely piloted aircraft system) and terrestrial laser scanner.

The data processing consisted in the data registration and geo-referencing in the global reference system, using the vertices network measured with GPS-GNSS techniques, and in the construction of 3D surfaces (*mesh*).

The 3D models obtained are characterized by the different nature of the data used in their generation, and by a multiscale information content: vectorial dataset, regional and provincial flights for cartography, terrestrial laser scanning, stereoscopic models and orthophotos generated by RPAS (Remotely piloted aircraft system) low-altitude flights of the archaeological site, photogrammetric acquisitions and laser scanning at a high resolution of complex architectural and figurative decorations such as the frieze of the Augustus Arch in Susa.
These 3D models have been integrated in order to obtain a more complete description of the objects investigated allowing multiple representations useful for several purposes: restitution (2D and 3D) of objects and area, extraction of orthophotos, archaeological investigation, archaeological reconstruction of Roman architecture, etc.
The data at different scales were finally implemented within a GIS in connection with multiple needs, which can be continuously integrated with additional information from the archaeological or territorial studies and can be used for 3D thematized visualization of the obtained information.

**Introduzione**

L'opportunità di studiare un oggetto nel suo complesso, sia dal punto di vista terrestre che aereo, è una problematica attuale nei campi del rilievo architettonico e ambientale, in quanto tale operazione consente di analizzare gli oggetti stessi in modo più dettagliato e completo, e aiuta la fase di conoscenza e monitoraggio. Oggi le nuove tecnologie offerte dalla Geomatica rendono questo obiettivo raggiungibile grazie alla possibilità di acquisire dati terrestri e aerei più compatibili tra loro permettendone una più facile integrazione (Bastonero P. et al. 2014).
La tecnologia LiDAR (Light Detection And Ranging) è ormai consolidata per le applicazioni nel campo dei Beni Culturali, nelle fasi di conoscenza e documentazione, permettendo di acquisire moltissime informazioni su superfici anche articolate con un alto livello di precisione e qualità (Patias, P., Santana, M., 2012).
La fotogrammetria da UAV è una tecnica che sta avendo in questi anni uno sviluppo decisamente importante sia dal punto di vista della componente hardware (mezzo che acquisisce le immagini) sia in quella software (programmi per l'elaborazione dei dati). Grazie a tale tecnica è possibile acquisire dati impiegando i velivoli aerei, droni (solitamente ad ala fissa o multi rotore), comandati in remoto, che per loro natura combinando le caratteristiche della fotogrammetria aerea a quelle della fotogrammetria terrestre alla scala architettonica (Eisenbeiβ, H., 2013). Il risultato di un volo da drone consiste infatti in una serie di immagini acquisite a bassa quota (solitamente al di sotto dei 70 m) dalle quali è possibile estrarre nuvole di punti, modelli 3D texturizzati e ortofoto digitali tramite l'ormai sempre più consolidato processo di *image matching* (Kersten, T.P, Lindstaedt, M., 2012, Chiabrando et al., 2012, Remondino et al., 2014 ). L'integrazione e fusione dei dati acquisiti tramite queste tecnologie multisensore permette di elaborare modelli tridimensionali più completi e multiscala, consentendo di analizzare lo stesso oggetto sia dalla posizione terrestre che aerea.
La campagna di acquisizione e le successive elaborazioni qui presentate sono state realizzate dagli autori e dagli studenti del Politecnico di Torino che hanno aderito al Team DIRECT (DIsaster and RECovery Team), un team studentesco che opera nel campo delle tecnologie avanzate del Rilievo Metrico 3D e del Telerilevamento e loro integrazione con tecniche innovative. Tali metodologie si ritengono fondamentali per la documentazione dell'ambiente e del patrimonio costruito in occasione di emergenze ambientali, e contestualmente utilizzabili anche per beni soggetti a emergenze ordinarie e continue. (Boccardo et al., 2013)
Le informazioni metrico numeriche raccolte a Susa attraverso tecnica GPS/GNSS, laser scanner, metodo fotogrammetrico, hanno riguardato: l'arco di Augusto, i resti del presunto Praetorium, gli archi superstiti dell'acquedotto romano, le mura della fortificazione tardo-antica ed infine il castello di Maria Adelaide (Figura 1), che rappresenta il presidio sabaudo della rocca di Susa. (Barello et al., 2013).

In particolare le acquisizioni fotogrammetriche sono state eseguite da terra, da drone e da cestello elevatore per una documentazione più completa e da un punto di vista privilegiato della parte del fregio dell'arco di Augusto.
Come già accennato in precedenza attraverso l'elaborazione dei dati raccolti è stato possibile realizzare modelli del terreno (tramite l'integrazione del DTM a scala regionale e dei dati fotogrammetrici acquisiti da drone), modelli 3D multisensore, multiscala texturizzati e ortofoto. Ulteriori elaborazioni sono consistite nella restituzione bidimensionale e nelle tradizionali rappresentazioni alla scala architettonica.

*Figura 1 - Alcune viste delle aree analizzate: castello di Adelaide (sx), Arco di Augusto (centro), Anfiteatro Romano (dx)*

## METODI DI RILIEVO 3D: LASER SCANNER TERRESTRE, FOTOGRAMMETRIA CLOSE RANGE E RPAS

### Acquisizione dei dati

Il rilievo metrico dell'area archeologica di Susa è stato organizzato come da prassi ampiamente consolidata a partire dall'impianto di una rete di vertici topografici misurati e calcolati con il metodo GPS/GNNS, riferiti alla stazione GNSS di Bussoleno (vertice appartenente alla rete di stazioni permanenti della Regione Piemonte)
Il sistema di riferimento adottato è il WGS84-ETRF2000; le coordinate dei vertici sono state troncate per tutte le elaborazioni di dettaglio; principalmente per la registrazione dei dati laser e per il trattamento dei dati fotogrammetrici, e naturalmente ripristinati nelle fasi di integrazione cartografica.

*Figura 2 - Fase di acquisizione dati*

Il rilievo laser, realizzato tramite il laser Faro 3D Focus, che come noto ha *range* da 0.6 m fino a 130 m, con velocità di misurazione 976,000 punti/secondo e camera integrata (http://www.faro.com/en-us/products/3d-surveying/faro-focus3d/overview), ha coinvolto l'intera

area archeologica: le emergenze dell'acropoli, l'anfiteatro e in particolare l'arco di Augusto, che è stato rilevato sia da terra che come già precedentemente accennato, da cestello elevatore per ottenere informazioni più dettagliate sul fregio (Figura 2).

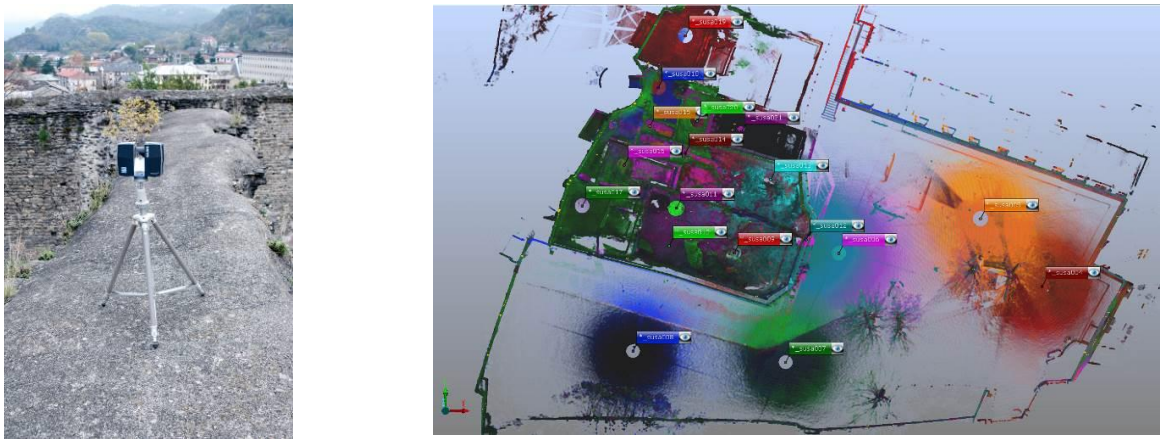

*Figura 3 – A sinistra: acquisizione laser eseguita sopra l'acquedotto romano; a destra: visualizzazione della posizione delle diverse scansioni laser effettuate nell'area di scavo e del castello*

Il rilievo fotogrammetrico è stato realizzato da terra, da drone e da cestello elevatore.
Grazie all'UAV utilizzato, un Hexakopter (Mikrokopter) equipaggiato con camera digitale Sony Nex 5, sono stati progettati ed eseguiti diversi voli.
I principali hanno riguardato l'intera area archeologica e della rocca sino all'area dell'anfiteatro (quota relativa di volo pari a 70 m) (Figura 4 in giallo) con sovrapposizioni tra le immagini di circa il 90 %, e l'area dell'anfiteatro (quota relativa di volo pari a 30 m) (Figura 4 in azzurro). Per le successive elaborazioni, delle quali verranno di seguito riportati i principali risultati, sono stati utilizzati i seguenti applicativi software: Scene (elaborazione dati Laser), Photoscan (elaborazione dati fotogrammetrici), 3DReshaper (modellazione 3D e texturizzazione).
Molte aree già rilevate tramite Laser Scanner, sono state affrontate tramite rilievo fotogrammetrico sia per lo scopo di ottenere informazioni integrative multiscala (il fregio dell'arco di Augusto), sia per consentire confronti metodologici efficaci per la sfera formativa del progetto.

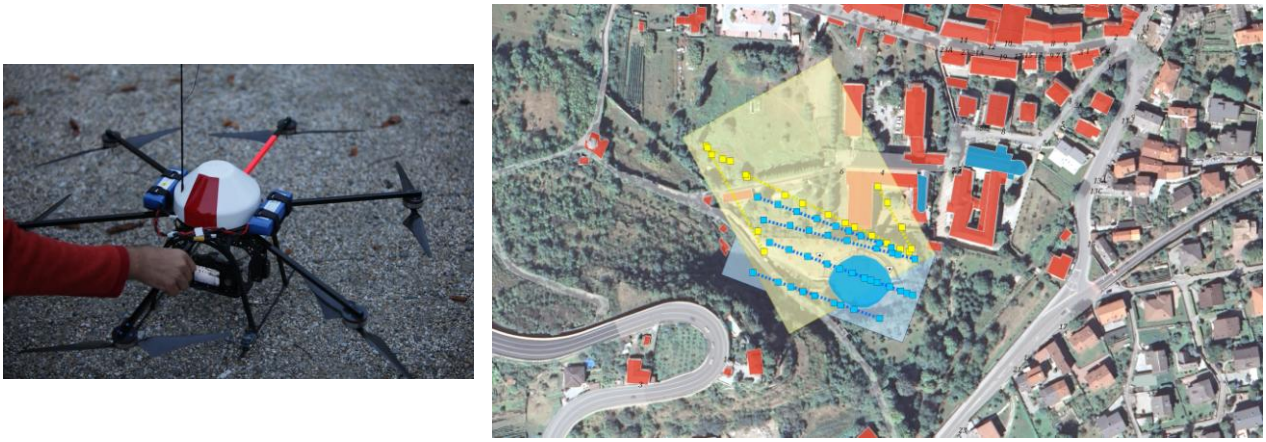

*Figura 4 – A sinistra: Hexakopter utilizzato per l'acquisizione; a destra: schema dei due principali voli eseguiti (area dell'anfiteatro in giallo quota di volo 70m, in azzurro quota di volo 30m)*

**Elaborazione dei dati e rappresentazioni finali**

Dalle acquisizioni laser e fotogrammetriche è stato possibile elaborare nuvole di punti dense degli oggetti indagati: le nuvole di punti laser (35 scansioni realizzate) sono state registrate e georiferite grazie ai target comuni (misurati topograficamente durante le operazioni di appoggio) e successivamente filtrate e pulite (Figura 5, sx). Dalle immagini acquisite con metodo fotogrammetrico è stato possibile estrarre tramite gli algoritmi di *image matching* le nuvole di punti, anch'esse orientate e georiferite grazie alle operazioni di triangolazione fotogrammetrica mediante l'utilizzo di target chiaramente riconoscibili nelle immagini (Figura 5, dx).

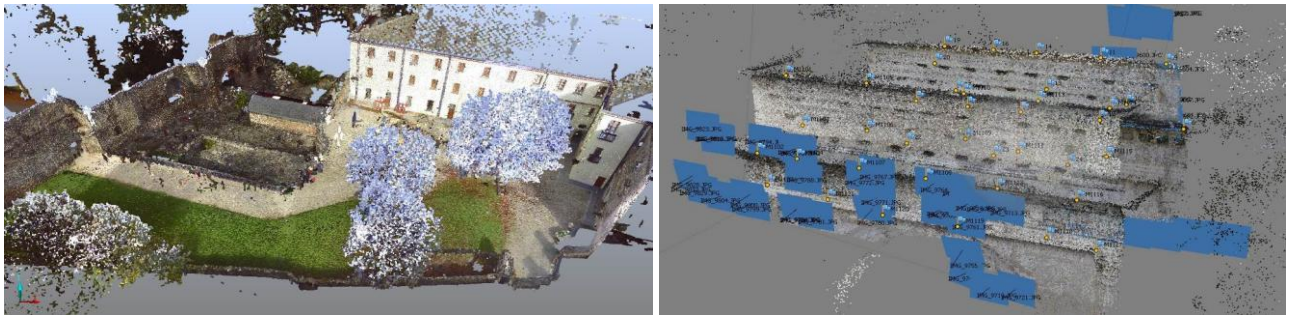

*Figura 5 - Nuvole di punti laser dell'area dell'acropoli registrate e georiferite (sx), Nuvola di punti del fregio dell'arco di Augusto estratta dai fotogrammi acquisiti da cestello elevatore (dx)*

Al fine di ottenere modelli 3D che rappresentassero al meglio l'intero oggetto e il contesto in cui esso è inserito, si è deciso di operare un'integrazione dei dati di entrambi i rilievi al fine di creare superfici triangolate (*mesh*) continue e texturizzabili con l'informazione radiometrica dei fotogrammi, per consentire nuove e più approfondite analisi sull'area archeologica.

L'area dello scavo archeologico nella rocca del castello è stata modellata sia a partire dalle nuvole di punti laser che dai dati fotogrammetrici ricavati dai voli acquisiti da drone. La prima elaborazione ha permesso di realizzare un modello 3D a scala architettonica (Figura 6 sx) che presentava alcune lacune nei punti più alti, carenza dovuta naturalmente all'impossibilità del raggio laser di raggiungere queste zone senza opportuni sistemi di elevazione.

Dai fotogrammi è stato possibile, invece, elaborare un modello 3D comprendente l'intera area archeologica e il castello di Maria Adelaide con risoluzione inferiore (Figura 6 dx), più adatta alla rappresentazione alla grande scala territoriale che è stata successivamente implementata in ambiente GIS.

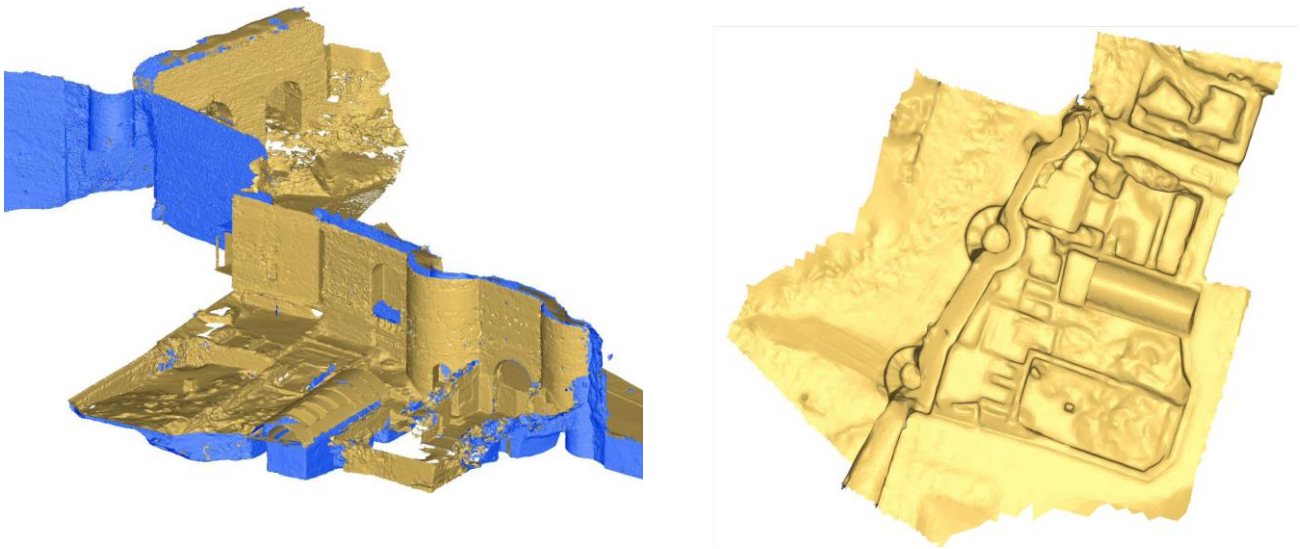

*Figura 6 – A sinistra: Mesh dell'area di scavo eseguita sulla base dei dati laser; a destra: Mesh dell'area di scavo eseguita sulla base dei dati fotogrammetrici acquisiti da drone*

Il modello dell'arco di Augusto è stato eseguito nella parte bassa partendo dai dati laser (Figura 7), nella parte del fregio invece, per ottenere un modello a risoluzione maggiore, sono stati utilizzati ed elaborati i dati fotogrammetrici acquisiti dal cestello elevatore (Figura 8).

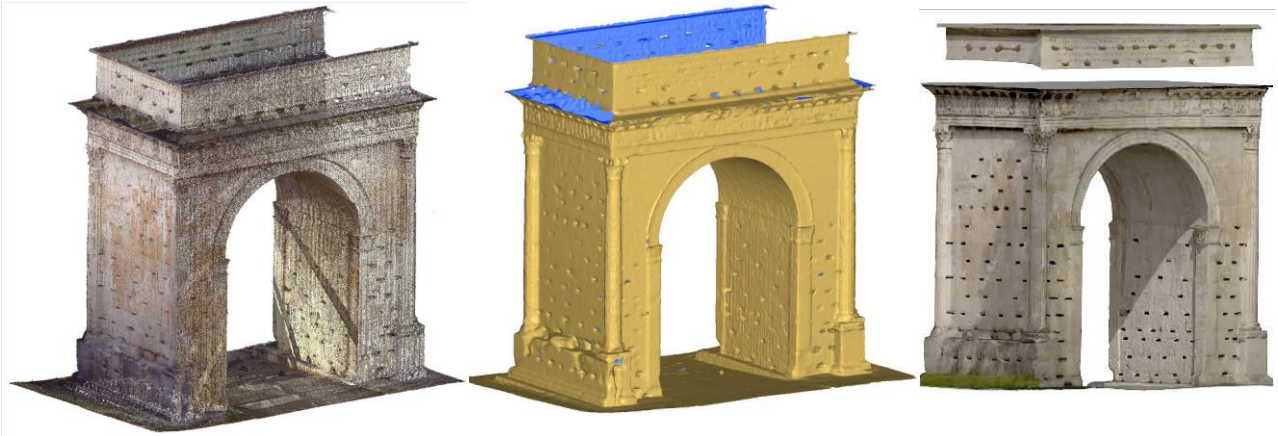

*Figura 7 – Da sinistra: nuvola di punti dell'arco di Augusto acquisita con laser scanner, mesh dell'arco, mesh dell'arco texturizzata*

*Figura 8 - A sinistra: mesh del fregio elaborata a partire dai dati fotogrammetrici; a destra: mesh del fregio texturizzata con ortofoto estratte dal modello fotogrammetrico.*

L'acquedotto e le mura sono state anch'essi oggetto di modellazione sulla base dei dati laser, seguendo l'approccio riportato precedentemente, la *mesh* (Figura 9, sx) è stata successivamente e opportunamente texturizzata (Figura 9, dx).

*Figura 9 - A sinistra: mesh degli archi dell'acquedetto da dati laser; a destra: mesh del tratto di mura da dati laser texturizzata con dati fotogrammetrici terrestri.*

Infine è stato prodotto anche il modello 3D dell'anfiteatro, elaborato grazie al processo di *image-matching* realizzato grazie ai fotogrammi acquisiti durante il volo a 30 m sull'area in oggetto.
Nella successiva Figura 10 si riporta una vista 3d texturizzata e l'estrazione delle break-line utilizzate nella fase successiva di integrazione nel modello del terreno multi-risoluzione.

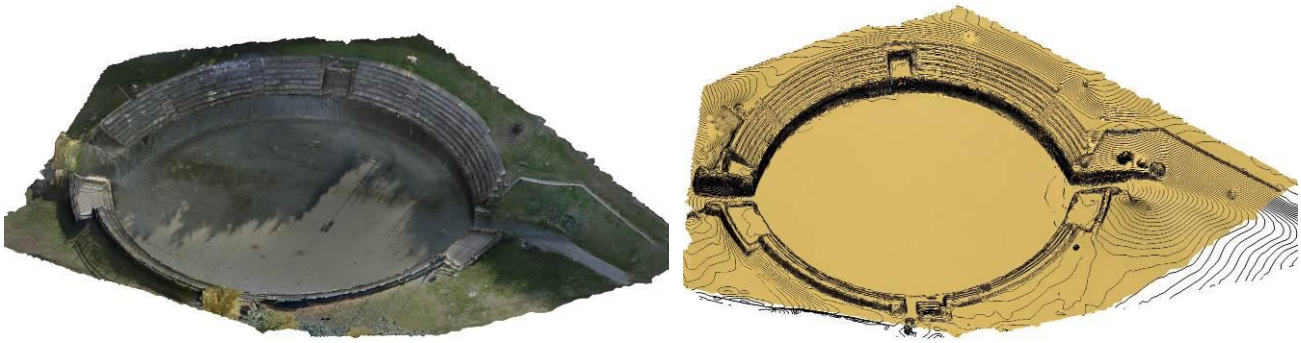

*Figura 10 – A sinistra: Mesh dell'anfiteatro realizzata con dati fotogrammetrici e texturizzata con ortofoto; a destra: mesh dell'anfiteatro con sovrapposizione dei profili di sezione estratti*

Grazie all'estrazione e misura di dati 3D ed all'utilizzo di immagini fotogrammetriche su tutte le aree sono state anche naturalmente prodotte le ortofoto sia a carattere architettonico (Figura 11 dx) sia a scala territoriale (Figura 11 sx), utili per una lettura accurata dei manufatti e dell'area sulla quale insistono.

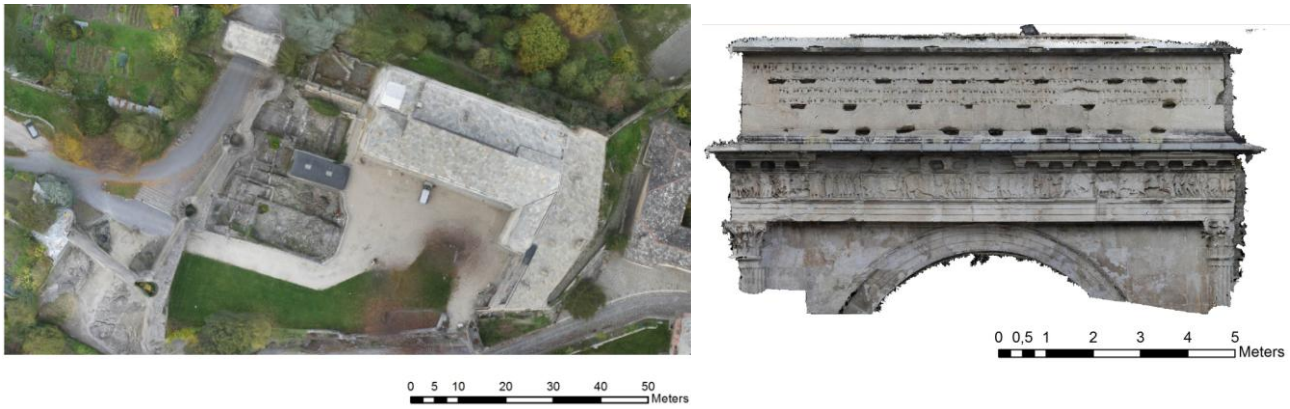


*Figura 11 - A sinistra: ortofoto dell'area archeologica e del castello estratta dai dati fotogrammetrici aerei; a destra: ortofoto del fregio estratta dai dati fotogrammetrici acquisiti da cestello elevatore*

Quello che al momento è la fase finale del processo di elaborazione, ancora in fase di definizione, consiste nell'integrazione tra la cartografia numerica regionale e provinciale (CTRN 1:10000 CTRP 1:5000) e i dati fotogrammetrici acquisiti da drone al fine di elaborare una cartografia aggiornata e un modello del terreno in cui le emergenze rilevate siano evidenziate in relazione al contesto in cui sono inserite.

**Conclusioni**

I risultati ottenuti con questo test hanno dimostrato ancora una volta le notevoli potenzialità che possono essere offerte dai metodi della Geomatica per la conoscenza, il monitoraggio e la documentazione di emergenze ambientali e architettoniche, permettendone l'analisi multiscala, l'archiviazione dei dati e molteplici rappresentazioni.
Attraverso questa esperienza di rilievo sul campo, il Team DIRECT ha potuto testare, in particolare, l'efficacia dell'applicazione delle tecniche di acquisizione speditive, da impiegare in casi di

emergenza e di rilievo post disastro, a scala ambientale e architettonica. Inoltre, il rilievo multisensore ha permesso al Team di verificare e definire modalità con cui è possibile integrare e fondere dati laser e fotogrammetrici, studiando la possibilità di generare nuove e più complete rappresentazioni e nuove informazioni sugli oggetti.
Nuove ricerche sono rivolte alla sperimentazione di strumenti di acquisizione sempre più economici (es. *smartphones* per la fotogrammetria terrestre) e di archiviazione open source (es. QGIS, PostegreSQL).

**Ringraziamenti**
Si ringraziano gli studenti del team DIRECT che hanno partecipato alla campagna di rilievo ed all'elaborazione dei dati (www.polito.it/teamdirect).

**Riferimenti bibliografici**

Barello F., Ferrero L., Uggé S., (2013), Evidenze archeologiche in Valle di Susa: acquisizioni, bilanci, prospettive di ricerca, *SEGUSIUM – Ricerche e Studi*, L-52: 30

Bastonero P., Chiabrando F., Donadio E., Spanò A. (2014). "Fusion of 3D models derived from TLS and image-based techniques for CH enhanced documentation". *ISPRS Annals of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, II-5, DOI: 10.5194, 73-80

Boccardo P., Chiabrando F., Facello A., Gnavi L., Lingua A., Maschio P., Pasquale F., Spanò A. (2013) "A didactic project for landscape heritage mapping in post-disaster management". *International Workshop "The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk"*, Padova, 27-28 Febbraio 2013

Chiabrando F., Lingua A., Rinaudo F., Spanò A. (2012). "Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer". *ISPRS Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, XXXIX-B5, ISSN 1682-1777, 583-588

Chiabrando, F., Spanò, A. (2013). "Points clouds generation using TLS and dense-matching techniques. A test on approachable accuracies of different tools." *ISPRS Annals of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, II-5/W1, DOI: 10.5194, 67-72

Eisenbeiβ, H., (2013). "The potential of unmanned aerial vehicle for mapping." *System Engineering and Technology (ICSET), IEEE 3rd International Conference*, 135-145

Kersten, T.P., Lindstaedt, M., (2012). "Potential of Automatic 3D object reconstruction from multiple Images for applications in Architecture, Cultural Heritage and Archaeology." *International Journal of Heritage in the Digital Era, Multi Science Publishing*, 399-420

Patias, P., Santana, M., (2012). "Introduction to heritage documentation". *CIPA heritage documentation best practices and applications*, Series 1, 2007-2009, 9-13

Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F., (2014) "State of the art in high density image matching. The Photogrammetric Record", XXIX-146, DOI:10.1111/phor.12063, 144-166