

Andrea Garzulino – Andrea Zerboni – Alessandro Perego

MURA TARQUINESI: LETTURA DELLE EVIDENZE (LIDAR) E DEGLI ASPETTI GEOARCHEOLOGICI

LETTURA DELLE EVIDENZE SU BASE LIDAR

Nel Luglio 2010 è stato condotto sul Pianoro della Civita, per la prima volta in un'area archeologica etrusca, un rilievo laser scanner con tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), volto a identificare il tracciato dell'intero circuito muraneo¹.

La tecnologia LiDAR

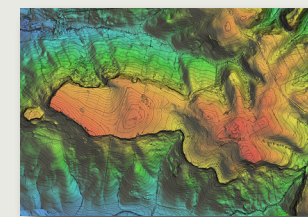
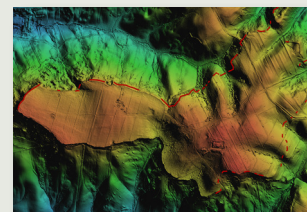
Come è noto tale tecnologia si avvale di sistemi di misurazione montati su velivoli che durante la ricognizione scansionano il campo sorvolato immagazzinando informazioni utili alla conoscenza e rappresentazione del territorio e degli oggetti in esso contenuti. I dati grezzi, primo prodotto di output del rilievo aereo, si presentano come una “nuvola” di punti che definisce l'andamento del terreno e degli elementi in esso presenti come vegetazione, edifici, strade, corsi d'acqua, ecc.². Di questi punti sono note le coordinate planimetriche, le altimetrie, l'intensità di riflessione, la classificazione in base al materiale intercettato ed altre indicazioni riguardanti le caratteristiche di presa e di volo³. Generalmente il laser scanner è uno strumento utilizzato per rilievi di oggetti e manufatti ed è costituito da un dispositivo che aziona, dirige e registra in modo automatico gli impulsi del telemetro laser annesso che determina la distanza tra il punto di emissione dell'impulso e il punto di riflessione sulla superficie dell'oggetto intercettato. Essendo nota la posizione dell'origine dell'impulso, ed essendone registrati l'angolo di direzione e la distanza percorsa, l'insieme dei punti intercettati⁴ contribuisce a formare una nuvola di punti, un “calco digitale” delle superfici scansite⁵. A tale strumentazione è stata

collegata una camera fotogrammetrica digitale ad alta risoluzione, che ha permesso di abbinare al dato spaziale l'immagine esatta di ciascun punto, restituendo così un'ortofoto molto dettagliata e di alta precisione. L'ortofoto è una immagine che rappresenta l'intero territorio della Civita di Tarquinia, in maniera geometricamente corretta, il che significa che è possibile impiegarla come la più aggiornata cartografia territoriale che presenta oltre ai dati geometrici quelli fotografici.

L'applicazione della tecnologia LiDAR pertanto offre il vantaggio di acquisire molto velocemente un gran numero di punti quotati a terra e pertanto georeferenziati. La vegetazione è un elemento che potrebbe costituire un ostacolo a questo tipo di rilevazione, tuttavia la traccia a terra dell'impulso emesso dallo strumento⁶ ha un diametro piuttosto elevato e questo aumenta la probabilità che almeno una sua porzione trovi un varco attraverso la vegetazione e intercetti il terreno.

L'applicazione al caso studio di Tarquinia

Nel caso specifico, pur essendo alcune aree del Pianoro della Civita caratterizzate da una folta macchia mediterranea, è stato possibile ottenere un valido risultato nella acquisizione e rappresentazione della morfologia del terreno sottostante. Questo esito è stato ottenuto grazie alla applicazione di appositi algoritmi e opportuni criteri di selezione⁷ in modo tale da estrarre dalla nuvola di punti solo le informazioni derivanti dalla superficie del terreno. Tale metodologia ha consentito di generare un modello digitale del terreno (DTM) in grado di descrivere tridimensionalmente tutti i suoi andamenti (*Fig. 1*) e in cui è possibile creare curve di livello con qualsiasi tipo di intervallo la cui distanza può scendere, a seconda delle necessità, anche ai 20 centimetri (*Fig. 2*). Pertanto il modello risultante si differenzia nettamente



1 Il rilievo è stato eseguito dalla società Geotechnos s.r.l. utilizzando un aereo bimotore su cui è stato montato l'*Airborne Laser Scanner* “LEICA ALS 60” ed una camera metrica digitale “RCD105” 39MP.

2 I punti che contribuiscono a formare la nuvola sono disposti secondo lo *scanning pattern* dello strumento, pertanto bisognosi di una approfondita elaborazione.

3 Per le tecniche di rilevamento LiDAR cfr. KOKALJ *et al.* 2010.

4 Nell'ordine di oltre 100.000 al secondo.

5 Nel caso specifico, per conoscere la posizione del punto di emissione dell'impulso, l'orientamento del laser e la direzione dei raggi emessi, è stato necessario integrare un sistema inerziale e un sistema

GPS utili alla ricostruzione della traiettoria del volo. Essendo gli strumenti sincronizzati tra loro, è stato possibile inserire in uno spazio georeferenziato il punto intercettato dall'impulso laser in ogni istante poiché sono note le informazioni spaziali. Per le tecniche *laser scanning* impiegate nella tecnologia LiDAR e per le elaborazioni cfr. SHAN - TOTH 2009.

6 Ad esempio se il volo avviene a quota relativa di 1000 metri, la traccia a terra risulta essere di 20 centimetri circa.

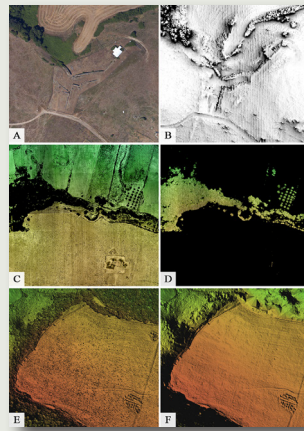
7 Parametri geometrici quali pendenza massima ammissibile e scarti in quota accettabili.

da qualsiasi altro prodotto tridimensionale ottenuto a partire dalla cartografia o dalla foto aerea. La quantità e qualità dei dati raccolti dal laser scanner ha quindi consentito di realizzare un DTM di alta precisione che si è rivelato estremamente proficuo nell'ambito del censimento delle emergenze archeologiche su vaste aree, poiché qualsiasi tipo di antropizzazione emerge con chiarezza dal livello del terreno così ottenuto.

Un ulteriore vantaggio è aver creato in questo modo una base cartografica aggiornata e metricamente corretta sulla quale trovano posto le emergenze archeologiche individuabili, risultando così correttamente posizionate⁸. Per ottenere le elaborazioni del territorio sopra descritte è stato necessario utilizzare algoritmi non troppo selettivi e automatici nello scartare i punti non appartenenti al terreno, dal momento che l'emergenza archeologica, a causa delle sue caratteristiche morfologiche e dimensionali che la distinguono dall'ambiente in cui è inserita, potrebbe essere scambiata dal sistema come un "rumore di fondo" ed essere automaticamente eliminata come disturbo. Pertanto si è reso necessario il mantenimento di tutti gli andamenti e di tutte le discontinuità puntuali del terreno che sono stati analizzati ed interpretati caso per caso ad esclusione delle strutture di grandi dimensioni che non presentano problemi interpretativi.

La modalità di lavoro utilizzata ha previsto quindi l'esplorazione diretta della nuvola di punti e della foto aerea (Fig. 3A). Considerando la presenza della vegetazione infestante in alcuni punti del Pianoro, l'applicazione del procedimento a Tarquinia ha permesso di condurre per la prima volta una ricerca specifica sulle potenzialità dello strumento in consimili condizioni: la definizione geometrica della rugosità del DTM aumenta, ovviamente, all'aumentare della densità di punti a terra. Un esempio è rappresentato dall'area settentrionale del Pianoro dove per ottenere maggiori informazioni in merito alla conformazione del terreno e alla presenza di resti archeologici nascosti dalla fitta vegetazione, si è reso necessario un volo supplementare.

La densità dei punti è di ca. 5 al metro quadro per quanto riguarda l'area in piano della Civita, ma aumenta lungo la fascia perimetrale dove ci si attende la



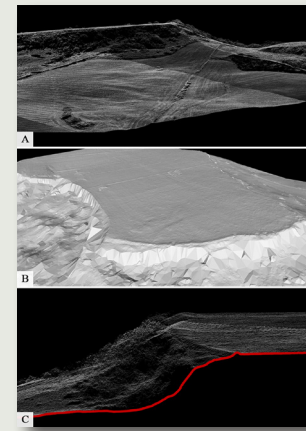
⁸ In questo modo vengono superati tutti i problemi di rilievo e posizionamento delle strutture archeologiche, che avevano inficiato i precedenti tentativi di redazione delle carte archeologiche.

presenza delle mura, oggetto della ricerca in corso. In questo caso si è raggiunta una densità di ca. 15 punti al metro quadro, valore non sempre omogeneo a causa del limite fisico-naturale costituito dalla presenza di macchia mediterranea, particolarmente ravvicinata, prossima ai punti terreno e a volte difficilmente distinguibile dal rumore di fondo. Per questo motivo si è cercato di recuperare il maggior numero di punti lungo le fasce esterne del Pianoro in modo da migliorare il più possibile la ricchezza di dettaglio del DTM e di conseguenza renderlo più definito in vista della sua successiva interpretazione.

Le elaborazioni si sono servite di funzioni analitiche delle superfici, ad esempio: *shading* o *hillshading*⁹ che consentono di aumentare l'effetto di ombreggiatura per far risaltare maggiormente le discontinuità; funzioni che permettano l'accentuazione delle altimetrie per far risaltare i cambi di quota e capire meglio l'andamento del terreno; rappresentazioni volte a evidenziare concavità e convessità di terreno e strutture, tramite il parametro *SkyViewFactor*¹⁰ (Fig. 3B). Successive elaborazioni hanno preso in considerazione la frequenza e il numero di ritorni degli impulsi consentendo di distinguere i diversi materiali (Fig. 3C, 3D) che compongono il modello, permettendo così di escludere la vegetazione e di individuare più chiaramente parti del circuito muraneo (Fig. 3E, 3F).

I risultati ottenuti

Tramite queste differenti modalità è stato possibile ottenere adatte esplorazioni della nuvola, per determinare i caratteri peculiari della Civita e dei suoi "segni" di permanenza e per rendere chiaramente leggibile l'andamento del terreno, evidenziandone la morfologia e le forme da esso assunte (Fig. 4A, 4B). Questo ci ha permesso di superare il limite oggettivo costituito dalla vegetazione e di identificare con chiarezza segni e caratteristiche anche grazie a strumenti dedicati, come le sezioni (Fig. 4C), in grado di mostrare la conformazione del terreno e delle relative strutture (in questo caso identificabili con le mura) intercettate dal piano di sezione. Tali letture, unitamente a quanto emerge dall'interpretazione del-



⁹ Disponibili nei *software* GIS come ArcGIS.

¹⁰ Applicabile utilizzando il *software open source* SAGA GIS.

le cartografie¹¹ e dalla storia delle ricerche, ha reso possibile una valutazione e una verifica delle emergenze riscontrate contribuendo alla realizzazione della carta tematica delle mura tarquinesesi¹².

Andrea Garzulino
Politecnico di Milano
Dipartimento di Architettura e Studi Urbani
andregarzulino@hotmail.com

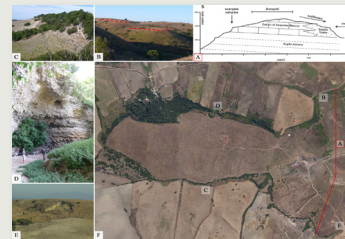
LETTURA DEGLI ASPETTI GEOARCHEOLOGICI

La lettura geoarcheologica¹³ ha mostrato che il lembo di altopiano che ospita le vestigia della Civita di Tarquinia è stato ed è ancora modellato da processi erosivi di varia natura (principalmente fluviali, carsici e di versante) riconoscibili nelle forme del paesaggio attuale¹⁴; inoltre, tali processi sono parzialmente responsabili della conservazione o distruzione delle evidenze archeologiche.

L'attuale morfologia dell'area è ben riconoscibile dalle foto aeree e soprattutto è possibile apprezzarne le caratteristiche dallo studio del DTM ottenuto attraverso le acquisizioni LiDAR. La comparazione tra le osservazioni di terreno del Pianoro e i dati LiDAR, ha permesso di identificare i processi che lo hanno plasmato, interessando in alcuni casi il tracciato della cinta muraria.

Evoluzione dei versanti del pianoro

L'evoluzione dei versanti del piano della Civita di Tarquinia è legata sia alla dinamica dei processi superficiali, sia alla tipologia del substrato roccioso¹⁵ (Fig. 5A). Le parti occidentali dell'altopiano,



11 Cfr. Bortolotto, Favino, Simonelli in questo volume (sezione poster).

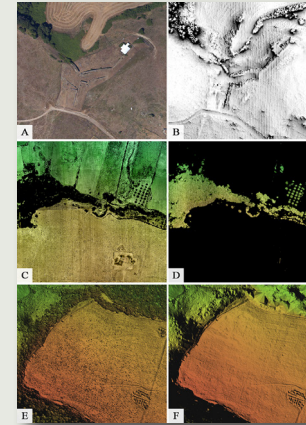
12 Cfr. Marzullo in questo volume (sezione poster).

13 CREMASCHI 2000.

14 Le prime osservazioni sui processi di versante in atto nell'area del pianoro sono stati pubblicati in via preliminare da CATTUTO *et al.* 2006; questi dati sono tenuti in piena considerazione in questo contributo.

15 Per la geologia dell'area si consideri la carta geologica disponibile in internet, curata dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, Carta Geologica d'Italia, 1:50000, Foglio 354 - Tarquinia, http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/354_TARQUINIA/Foglio.html).

caratterizzate da vasti affioramenti di macco (calcarenite fossilifera) presentano fenomeni di crollo significativi e pareti sub-verticali; al contrario, le porzioni orientali, presso le quali affiorano le sabbie e le sabbie argillose gialle (Unità di Pian della Regina) più facilmente erodibili dagli agenti atmosferici, mostrano pendii più dolci e interessati, alla loro sommità, da fenomeni di soliflusso (Fig. 5B).



Per quanto riguarda il versante nord, si osservano evidenze di alcune frane per distacco¹⁶ limitate al settore nord-ovest: alcuni blocchi superficiali di calcare si distaccano dallo strato di pertinenza lasciando profonde fessure (Fig. 3E). La presenza di un sottile suolo nonché l'utilizzo della nicchia di distacco come tracciato per costruire una via di accesso all'abitato permettono di ipotizzare che la stabilizzazione del crollo sia avvenuta in tempi antichi, e non abbia pertanto interessato eventuali tratti di mura perimetrali. Nella parte centrale del versante nord sono evidenti numerosi casi di crolli dovuti a processi di *undersapping*. Si tratta di sottoescavazione, da parte delle acque che percolano in profondità,

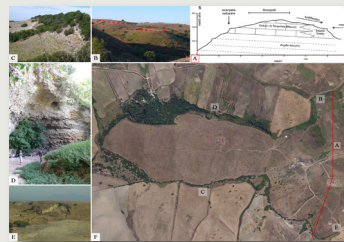
della parte basale del macco, al contatto con le argille basali (Unità del Fosso di San Savino); questo processo porta alla formazione di ampie cavità nella roccia; il progredire del fenomeno, induce la rimozione del supporto basale e il conseguente crollo della volta della cavità e della porzione di altopiano ad essa sovrastante. Ne è un buon esempio l'anfiteatro (Fig. 3C, 5D) che si osserva in corrispondenza dell'interruzione di una parte delle mura; in tale caso è possibile che il tracciato originario proseguisse ulteriormente e sia andato perduto in seguito al collasso di parte del pianoro. Lungo buona parte del versante meridionale (porzioni occidentale e centrale) si osservano frane per crollo o ribaltamento. Tuttavia, queste sono in gran parte stabilizzate dalla presenza di ampie falde di detrito che fungono da sostegno (Fig. 5C); lo sviluppo di un profondo suolo e la colonizzazione da parte della vegetazione arborea confermano che la stabilizzazione del versante sia un processo in atto da tempo. In questa parte del pianoro, ricorrono sovente blocchi calcarei che paiono essere squadrati da mano umana; ciononostante, è possibile escludere questa interpretazione nella gran parte dei casi, in quanto la forma dei blocchi è un effetto della struttura geologica degli strati originari di macco: questi, staccandosi secondo i

16 Definizione delle tipologie di frane in CASTIGLIONI 1991².

piani di stratificazione, si frantumano ulteriormente lungo piani di debolezza, ovvero lungo fratture sub-verticali, dando luogo a grossi prismi di pietra. Infine, fenomeni attivi di frana per scivolamento interessano la parte sud-orientale dell'altipiano, in prossimità dell'Ara della Regina, dove le sabbie gialle affiorano in corrispondenza di un forte stacco di pendenza (Fig. 5E). In questa località, si osservano, sparsi lungo il pendio, blocchi squadrati appartenenti a tratti della cinta muraria scivolati verso valle.

Aspetti funzionali

Sulla base delle osservazioni di terreno è possibile postulare alcune considerazioni geoarcheologiche riguardanti l'attuale distribuzione delle mura, cercando di darne una interpretazione funzionale. Sulla base dei dati DTM (elaborati da LiDAR), è possibile disegnare un profilo altimetrico (nord-sud) nel quale indicare la successione geologica del pianoro (Fig. 5A). È interessante osservare nella porzione settentrionale dell'altipiano, poco a est rispetto alla Porta Romanelli, numerosi allineamenti di blocchi squadrati che conservano la loro collocazione originale. Da un punto di vista funzionale¹⁷, è possibile legare tale evidenza alla necessità di salvaguardare la copertura pedologica dell'altipiano, minacciata da erosione e soliflusso. In corrispondenza del versante nord-orientale della Civita, infatti, la morfologia del terreno è influenzata dalla presenza delle sabbie gialle; ciò suggerisce la direzione preferenziale per lo scorrimento delle acque superficiali, nonché la vulnerabilità nei confronti di fenomeni di soliflusso. È legittimo ipotizzare che, per far fronte a questo tipo di dissesto idrogeologico, già in epoca etrusca si sia pensato di ricorrere alla realizzazione di piccoli terrazzamenti (Fig. 5B). A supporto di questa lettura funzionale delle mura di cinta si segnala come lungo un pendio gli allineamenti di blocchi siano stati regolarmente collocati in corrispondenza dei cambiamenti di pendenza; inoltre, i blocchi sono in molti casi interessati da fenomeni di dissesto, che hanno contribuito a ricoprirli di suolo colluviato. Infine, guardando altre porzioni delle mura tarquinesie da questa prospettiva, la medesima funzione può essere proposta anche per parti



17 Non si intende in questa sede prendere in considerazione gli aspetti inerenti al significato difensivo, architettonico e simbolico della cinta muraria tarquinesie, bensì se ne vuole offrire una panoramica su un piano di lettura geologico-geomorfologico.

più imponenti e meglio conservate della cinta muraria: ad esempio, si potrebbe provocatoriamente suggerire che la stessa Porta Romanelli, i cui blocchi sottolineano la grandiosità di Tarquinia, siano anche funzionali al sostegno del versante retrostante.

Andrea Zerboni
Università degli Studi di Milano
Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio"
andrea.zerboni@unimi.it

Alessandro Perego
Università degli Studi di Milano
Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio"
alessandro.perego@guest.unimi.it

Riferimenti bibliografici

- CASTIGLIONI 1991²: G.B. CASTIGLIONI, *Geomorfologia*, Torino 1991².
CATTUTO *et al.* 2006: C. CATTUTO - L. GREGORI - M. MILANO - S. RAPICETTA, *Condizioni geomorfologiche e stabilità dell'acropoli di Tarquinia Vecchia*, in *Il Quaternario* 19, 2, 2006, pp. 227-232.
CREMASCHI 2000: M. CREMASCHI, *Manuale di Geoarcheologia*, Bari 2000.
KOKALJ *et al.* 2010: Z. KOKALJ - K. OSTIR - K. ZAKSEK, *Archaeological Application of an Advanced Visualization Technique Based on Diffuse Illumination*, in R. REUTER (ed.), *Remote Sensing for Science, Education Natural and Cultural Heritage*, Proceedings of the 30th EARSeL Symposium (Paris 2010), http://www.earsel.org/symposia/2010-symposium-Paris/Proceedings/EARSeL-Symposium-2010_2-09.pdf.
SHAN - TOTH 2009: J. SHAN - C.K. TOTH, *Topographic Laser Ranging and Scanning*, Boca Raton (USA) 2009.

ABSTRACT

The flight with LiDAR technology allows the data capture of a large amount of points as "cloud" and to elaborate a Digital Terrain Model (DTM), useful for the three-dimensional description of surfaces, thus providing an updated and metrically correct basis for further

analyses. In order to discriminate the occurrence of vegetal cover and to identify parts of the wall circuit, we carried out the elaboration of the frequency, of the returns number and therefore the distinction of different materials that constitute the scanned territory. The geoarchaeological survey of the area reached two main goals. From one hand, it permitted to identify the main geomorphological processes that contributed to shaping the Pianoro della Civita and to assess the geomorphological risk that actually is threatening the vestiges of the ancient Tarquinia. On the other hand, it allowed to interpret the distribution of some parts of the walls and to propose possible functional aspects.

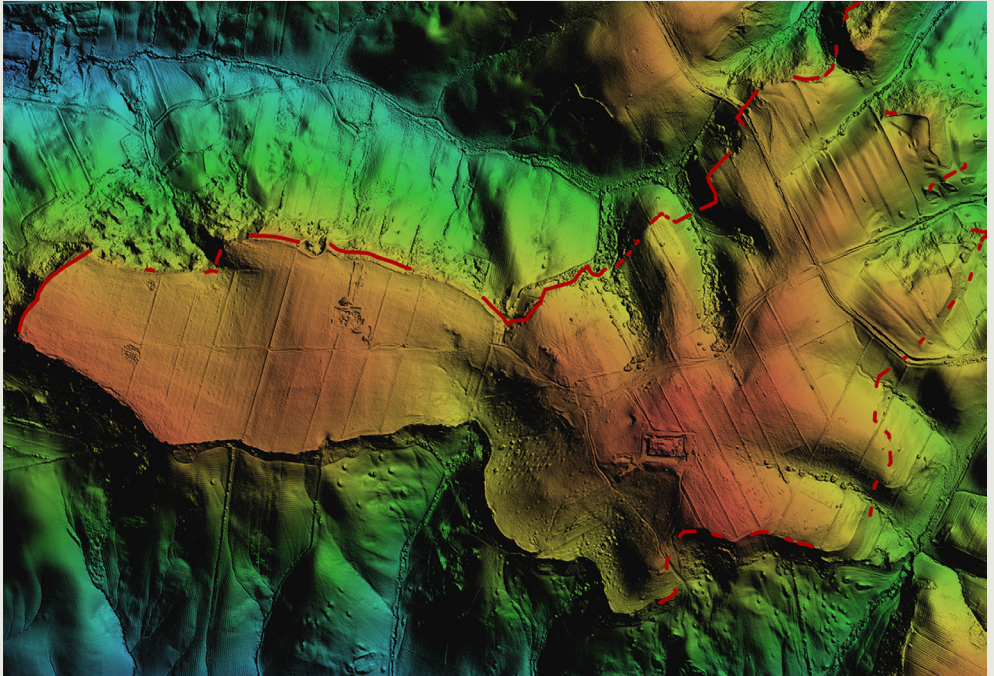


Fig. 1 – Mura accertate (tratto continuo rosso) su DTM senza vegetazione.

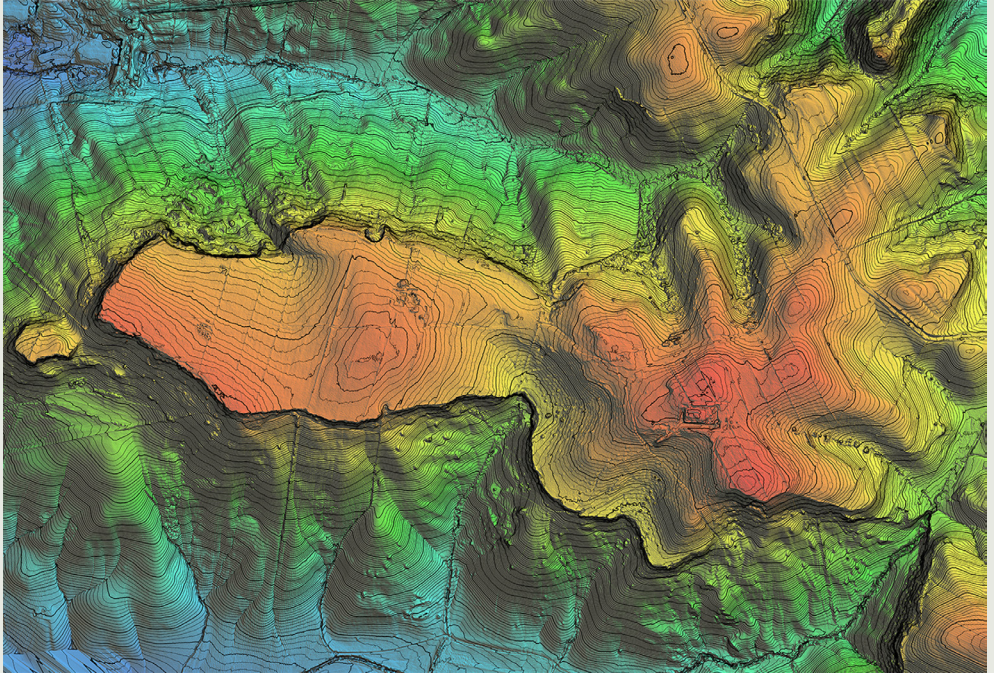


Fig. 2 – Curve di livello ogni metro su DTM senza vegetazione.

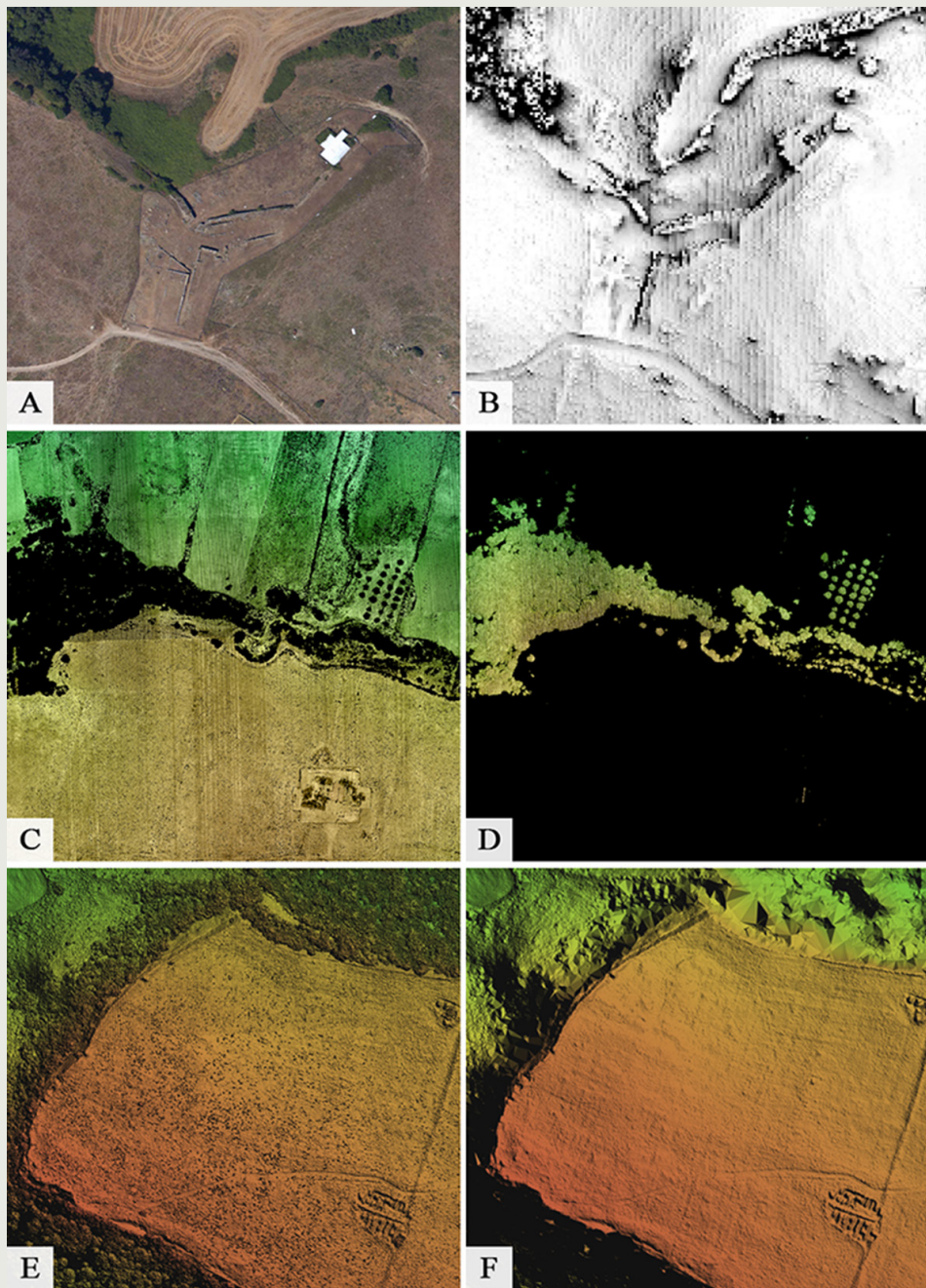
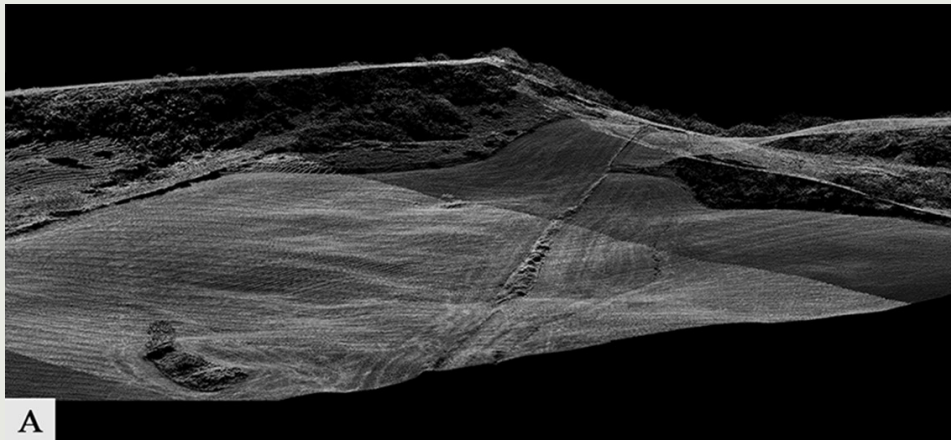
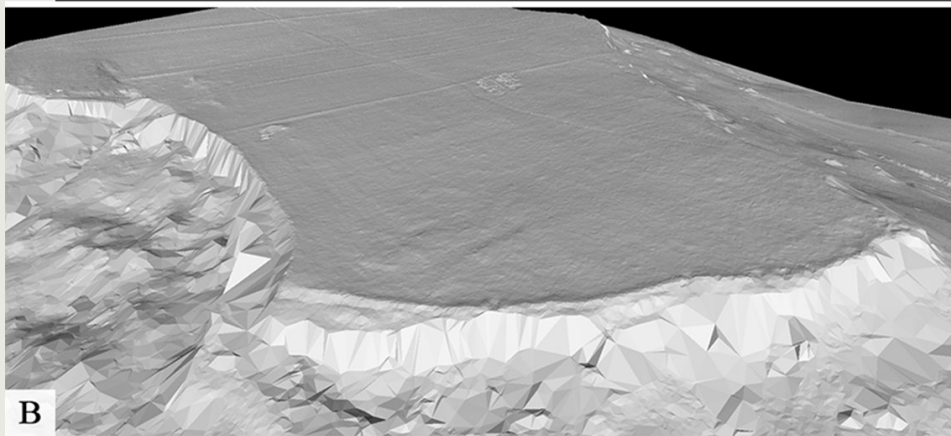


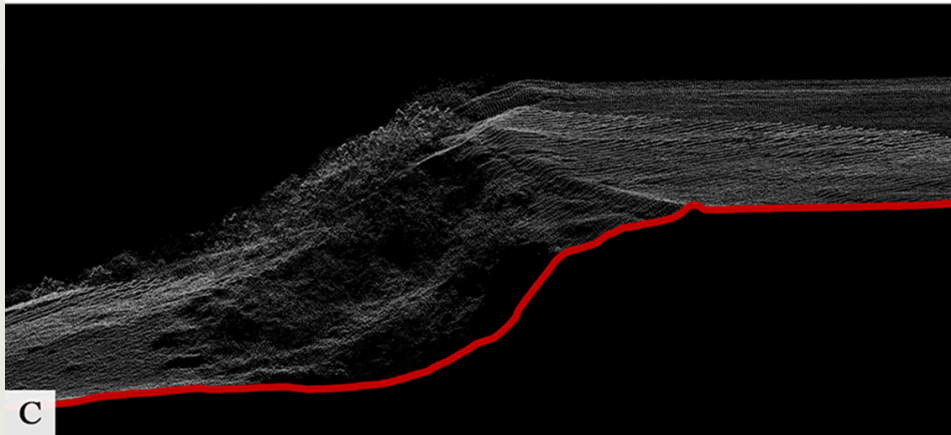
Fig. 3 – Particolari tratti dalla nuvola di punti: A. ortofoto ad alta risoluzione; B. elaborazione tramite Sky View Factor; C. nuvola di punti del terreno; D. nuvola di punti della vegetazione; E. DTM con vegetazione; F. DTM senza vegetazione.



A



B



C

Fig. 4 – Elaborazioni tratte dalla nuvola di punti: A. vista del fronte ovest della Civita; B. vista del Pian di Civita tratta dal modello tridimensionale; C. sezione del versante ovest con evidenza del tratto muraneo.

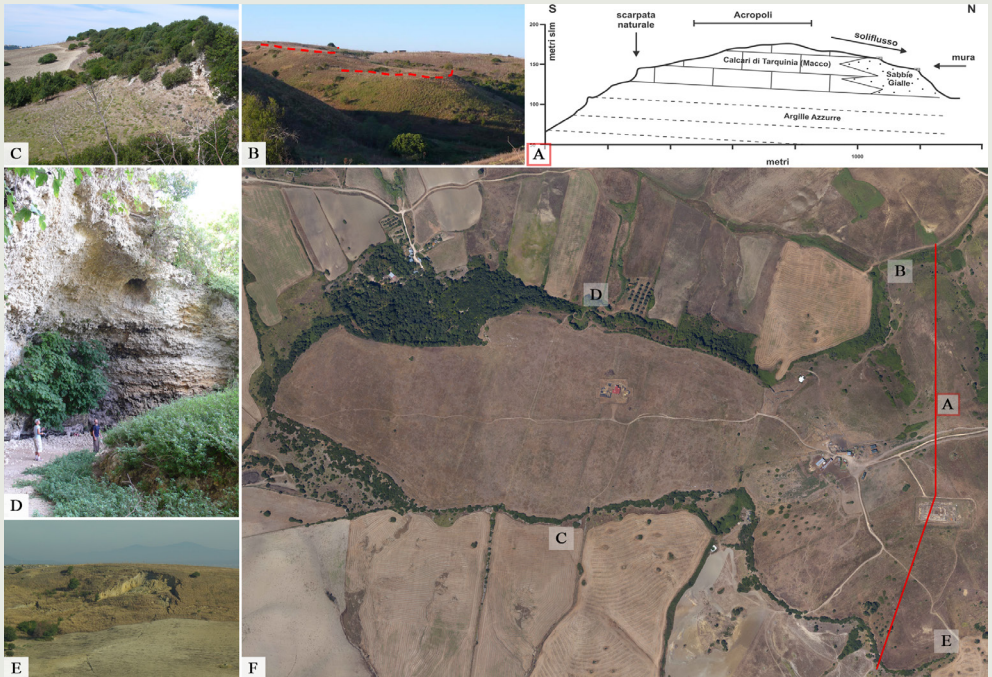


Fig. 5 – Evidenze geologiche circa la stabilità dei versanti del piano della Civita di Tarquinia: A. sezione geologica schematica che illustra le differenti rocce affioranti e il comportamento dei versanti corrispondenti (il transetto considerato, così come la localizzazione dei particolari, è indicato sull'ortofoto F); B. margine settentrionale del piano: le linee tratteggiate indicano la presenza di tratti di mura in corrispondenza di stacchi di pendenza, utili a stabilizzare i versanti e a contrastare il soliflusso; C. scarpata data da crolli per distacco verticale al margine meridionale del pianoro; D. fenomeno di crollo da sottoescavazione (undersapping); E. frana attiva nell'area meridionale del piano, in prossimità dell'Ara della Regina; F. ortofoto del piano della Civita di Tarquinia.