

MODELLI DIGITALI DI ELEVAZIONE:

STRUCTURE FROM MOTION

E TRATTAMENTI DEL RILIEVO SU PICCOLA E LARGA SCALA

Laura Burigana, Elena Griggio, Andrea Marra, Luigi Magnini

Il presente contributo tratta la creazione di modelli digitali di elevazione dell'area del Bostel di Rotzo mediante Structure from Motion, l'elaborazione di questi tramite l'applicazione di algoritmi di analisi della superficie e la generazione di un modello predittivo, la cui attendibilità è stata verificata con indagini sul campo. L'obiettivo è quello di mettere in luce nel paesaggio ed esaminare rilievi potenzialmente significativi per la storia del sito.

PAROLE CHIAVE: Structure from Motion, Rotzo

This contribution proposes the creation through Structure from Motion of Digital Elevation Models of Bostel di Rotzo site. The DEM thus obtained has been processed implementing surface analysis algorithms. A predictive model, the reliability of which has been checked on the field, was also produced. The purpose is to highlight three-dimensional features potentially meaningful for the site's history.

KEYWORDS: Structure from Motion, Rotzo

INTRODUZIONE

L'utilizzo dei modelli digitali di elevazione in archeologia ha portato in anni recenti a un notevole incremento del potenziale informativo, sia su macro-scala che su micro-scala, dei siti indagati. Lo sviluppo di tecniche diverse di acquisizione con tempistiche, risoluzione, possibilità di analisi e costi differenti forniscono agli archeologi un panorama variegato tra cui scegliere in base alla tipologia di studio previsto. Allo stesso modo sono stati messi a punto metodi di elaborazione dei dati sempre più raffinati e indirizzati al riconoscimento di specifiche tipologie di anomalie di superficie. Tra queste, la caratteristica del terreno più significative per coadiuvare l'identificazione di strutture o infrastrutture antiche sepolte è senza dubbio il rilievo morfologico, che può essere indirettamente o direttamente correlato con il record archeologico. Nel primo caso si tratta di rilievi derivati dai processi di natura geologica che possono tuttavia avere influenzato le scelte locazionali dei gruppi umani nel passato (ad esempio la collocazione di un insediamento in posizione rilevata o entro un'ansa fluviale). Nel secondo caso i rilievi sono la diretta manifestazione superficiale di interventi operati dall'uomo sul paesaggio (come l'escavo di canalizzazioni o la costruzione di edifici), sia mediante asporto (*features negative*) che mediante apporto (*features positive*) di materiale. Queste tracce, in quanto testimonianza di fenomeni di

minor entità, risultano spesso poco accentuate (microrilievi), impercettibili in fotografia e non facilmente distinguibili nei modelli digitali tridimensionali topografici e derivati da scansioni LiDAR. In questa sede si è pertanto deciso di creare, tramite Structure from Motion, un modello digitale di elevazione (*Digital Elevation Model, DEM*) ad alto livello di dettaglio come dato-base per l'analisi della superficie, attuata per mezzo di mirate elaborazioni di *enhancement*, in modo da mettere in luce il più efficacemente possibile il microrilievo ed identificare le anomalie di possibile origine antropica.

Per avere un riscontro non solo a livello locale, ma anche in un ambito territoriale più vasto, è stato utilizzato come ulteriore supporto per l'analisi del rilievo il modello digitale (*DTM, Digital Terrain Model*) fornito dalla Regione Veneto e prodotto tramite interpolazione di punti quotati a terra ogni m 5. Si tratta dunque di un dato con una risoluzione spaziale molto più bassa rispetto a quello ottenuto mediante *structure from motion*. In questo caso i trattamenti di ombreggiatura non restituiscono dettagli a livello metrico o decimetrico, tuttavia l'assenza dell'ingombro dato dalla copertura boschiva consente di mettere meglio in luce la morfologia nel suo complesso. Coprendo un'areale maggiore, inoltre, questo tipo di supporto si presta a trattamenti diversi, applicabili con più successo su larga scala e maggiormente focalizzati sul rapporto tra l'uomo e le potenzialità del territorio: risorser, vie d'accesso, barriere naturali,

punti di controllo ecc. Gli algoritmi implementati per tale tipologia d'indagine hanno come input dati relativi a valori di pendenza, direzionalità e distanza per determinare le zone strategicamente più vantaggiose.

Successivamente, per lo studio delle scelte locazionali dei gruppi umani a scala territoriale, ci si è concentrati sulla creazione di un modello predittivo che permettesse di evidenziare in maniera automatica i siti che potessero svolgere la funzione di “*control places*” nell'areale di indagine. A tal scopo è stato utilizzato il modello digitale del terreno con risoluzione spaziale ai m 5 trattato con specifiche elaborazioni *image enhancement* che mettessero in evidenza caratteristiche importanti per lo sviluppo di un sito strutturato come la pendenza, l'irradiazione solare e la dominanza locale.

Le caratteristiche dell'*object-based image analysis* rendono questo tipo di metodologia particolarmente adatta alla creazione di modelli predittivi di tipo *classification tree*, in cui il risultato dell'analisi predittiva coincide con la classe risultante dal processo di classificazione¹. L'OBIA, infatti, consente di analizzare e classificare un *range* molto ampio di dati differenti (sia *raster* ottenuti attraverso sensori attivi e passivi, ma anche vettoriali) e permette di implementare un ampio e variegato spettro di variabili nel *rule set* di classificazione². Il continuo sviluppo in ambito archeologico, e non solo, di tecniche di visualizzazione sempre più raffinate per dati da remoto fornisce un ottimo punto di partenza per la progettazione di modelli sempre più complessi e articolati. L'ultimo passaggio ha visto il controllo sia da remoto che a terra delle aree identificate dal modello predittivo in modo da validarne o smentirne l'effettiva efficacia dal punto di vista archeologico.

LB, LM

STRUCTURE FROM MOTION PER LA CREAZIONE DI MODELLI DIGITALI DI ELEVAZIONE

La *Structure from Motion* (SfM), letteralmente “struttura dal movimento” è una tecnica di *computer vision*, che studia quindi il recupero di informazioni di tipo tridimensionale di una scena a partire dalle sue immagini bidimensionali³. Nel caso specifico della SfM l'obiettivo è la generazione di un modello mediante la collimazione automatica di punti notevoli estratti da un insieme di riprese fotografiche effettuate da più posizioni attorno alla scena e con un buon grado di sovrapposizione tra loro.

Le immagini utilizzate per il modello sono state in buona parte acquisite il 5 e il 6 ottobre 2015. Duran-

te la campagna sono stati eseguiti cinque voli ricognitivi dell'area del Bostel di Rotzo ad una quota compresa tra i 5 e i 20 metri da suolo, utilizzando un drone DJI Phantom 2 su cui è stata montata una camera Go-Pro HERO 3+ Black Edition. Impostando la camera in modo da scattare foto ad intervalli temporali di 2 secondi, sono state ottenute complessivamente circa 2400 fotografie. Come dato integrativo sono anche state utilizzate fotografie dei settori C1, C2 e D, scattate da terra durante la medesima campagna, per evitare aree di sottosquadro e generare modelli di elevazione ad alta risoluzione dei singoli settori di scavo.

In questa fase del lavoro si sono riscontrate essenzialmente due problematiche, a cui si è potuto far fronte solo successivamente in fase di elaborazione:

- L'effetto *fish-eye*, per definizione tanto più accentuato quanto lontano dal centro dell'immagine⁴, dovuto all'obiettivo grandangolare della camera e che è stato possibile attenuare solo parzialmente regolando le impostazioni.
- La *palette* cromatica in alcuni scatti risulta alterata. Ciò dipende dalla variabilità (soprattutto tra un volo e l'altro) del tempo di esposizione della camera, che non è stato possibile stabilizzare agendo sulle impostazioni dello strumento in quanto per questo specifico modello tale parametro non è modificabile.

Per la successiva fase di elaborazione del dato mediante SfM sono stati presi in considerazione più software, sia proprietari che *open source*. In seguito ad una valutazione preliminare si è scelto di portare avanti le operazioni con Agisoft Photoscan per la sua ottima qualità di elaborazione, per la semplicità di utilizzo e soprattutto per la possibilità di gestire integralmente con un unico programma il processo di creazione del DEM in tutte le sue fasi, ovvero:

- Importazione delle immagini;
- Accorpamento delle immagini in un *chunk*⁵;
- Allineamento delle camere;
- Creazione di una nuvola di punti radi (*sparse point cloud*);
- Creazione di una nuvola densa di punti (*dense point cloud*);
- Creazione della *mesh*;
- Applicazione della *texture*.

Per quanto riguarda le immagini da importare è stata operata una selezione quantitativa di circa 120 fotografie in modo da non dilatare eccessivamente i tempi di calcolo e da non creare un modello troppo pesante che non consentisse di procedere con le elaborazioni successive. Inoltre, sebbene l'utilizzo di modelli digitali ad altissima risoluzione (fino al cm di risoluzione spaziale) permet-

¹ BREIMAN et alii 1984; QUINLAN 1986; ROKACH, MAIMON 2008.

² LANG 2008.

³ YI et alii 2001, p. 4.

⁴ WOOD 1911, pp. 66-68.

⁵ In inglese significa, letteralmente, “pezzo”.

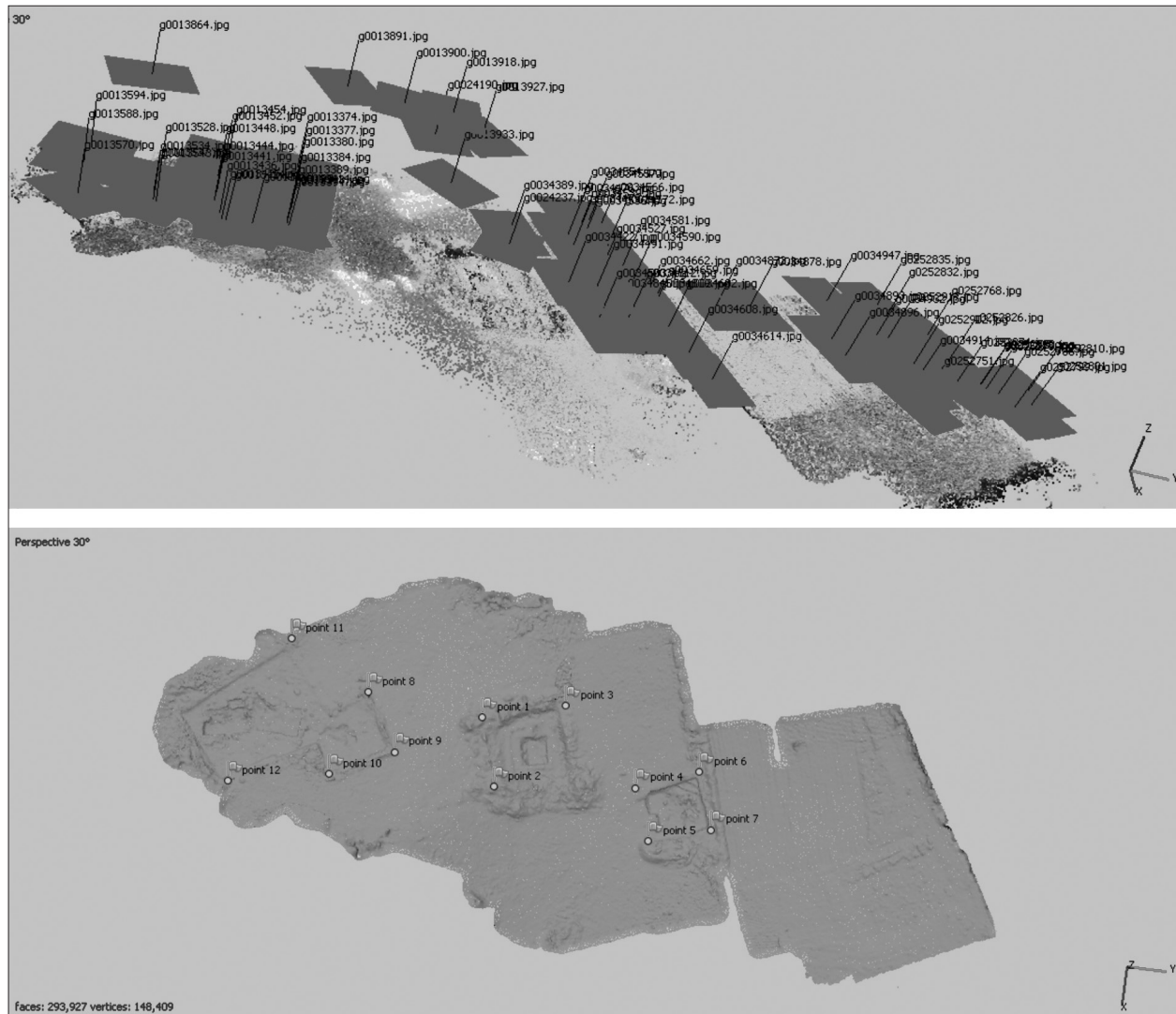


Fig. 1 – Passaggi operazionali della Structure from Motion per la creazione del DEM del Bostel. Sopra: allineamento delle camere; sotto: mesh con marker geografici.

ta di visualizzare numerosi dati aggiuntivi, nella maggior parte dei casi questi ultimi risultano non solo poco informativi ai fini della ricerca archeologica ma anche un agente di disturbo per la lettura delle tracce. Esemplificativo è il caso dei fili d'erba che, su alcuni modelli test ad altissima risoluzione sviluppati, fornivano una notevole quantità di “rumore” di fondo nell'immagine soprattutto nell'applicazione di trattamenti di *image enhancement*. Le foto selezionate sono state quindi caricate all'interno di un *chunk*, ovvero il blocco di dati destinato al processamento. Successivamente le immagini sono state allineate dal *software* sulla base del riconoscimento automatico di punti notevoli comuni: tale operazione determina la collocazione spaziale della camera al momento dello scatto e restituisce in forma di nuvola di punti rada (o *sparse point cloud*) l'insieme dei punti notevoli identificati.

Durante la fase successiva è stata effettuata un'ottimizzazione della posizione delle camere inserendo manualmente le coordinate rilevate tramite GPS e stazione totale dei punti comuni (*marker*) individuati nelle fotografie, i quali sono destinati alla georeferenziazione durante la generazione del modello (*fig. 1*). Tale procedura consente anche di ridurre eventuali errori di allineamento, dovuti alle linee prospettiche troppo accentuate del grandangolare della GoPro. I punti che presentavano un alto errore di proiezione e la cui ricostruzione risultava incerta sono stati rimossi manualmente.

Dalle immagini allineate sono stati estratti quanti più possibili punti comuni, il cui insieme è definito nuvola di punti densa (*dense point cloud*). Sia nel caso della *sparse point cloud* che nel caso della *dense point cloud* ogni punto, oltre che ad una posizione nello spazio cartesiano,

è stato associato automaticamente dal software anche ad un valore spettrale.

I punti della nuvola densa sono stati connessi andando a creare una maglia geometrica poligonale (*mesh*). Si è ottenuta una tassellazione poligonale di dimensioni decimetriche per quanto riguarda i modelli ottenuti dalle foto aeree e di dimensioni centimetriche per i modelli specifici dei singoli settori di scavo, ottenuti dalle foto scattate a terra. I poligoni privi di collegamenti con il resto della *mesh* e quelli dimensionalmente fuori scala sono stati eliminati manualmente.

Già a partire da questa fase Photoscan permette l'exportazione, previa georeferenziazione⁶ (Agisoft PhotoScan User Manual, p.30), di un DEM su cui svolgere ulteriori analisi. Le coordinate GPS inserite in corrispondenza dei *marker* erano state rilevate sul campo durante la medesima campagna di acquisizione delle immagini.

Per ottenere il modello tridimensionale completo, in ultima istanza, sulla maglia poligonale è stata stesa la *texture* elaborata a partire dalle varie riprese fotografiche. In quest'ultima fase del processo è stato risolto il problema dato dai diversi tempi di esposizione delle singole foto, attivando tramite il *software* la correzione cromatica mediando tra le differenti luminosità delle immagini in *input*. Come nei passaggi precedenti, si è infine proceduto con una pulizia manuale, eliminando le porzioni del modello corrotte, marginali o di qualità eccessivamente bassa.

LB

APPLICAZIONE DI TECNICHE DI VISUALIZZAZIONE AI MODELLI DIGITALI DI ELEVAZIONE

Fase operativa sui modelli digitali a piccola scala

Il modello digitale di elevazione realizzato con la tecnica della *Structure from Motion* è stato successivamente trattato con specifici software di elaborazione per evidenziare eventuali anomalie micromorfologiche legate alla frequentazione antropica del sito. In questo specifico caso è stato utilizzato il programma RVT⁷ (*Relief Visualization Toolbox*), realizzato dal *Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Art*. Questa applicazione autonoma consente di effettuare operazioni di *relief enhancing* (tramite algoritmi) su modelli di elevazione preesistenti al fine di evidenziare eventuali anomalie del terreno.

RVT consente quindi di elaborare i dati modificando differenti parametri per ogni tecnica, rilasciando infine come *output* due immagini per ogni trattamento, la prima è una versione "completa" a 32 bit ottimizzata per l'utilizzo su piattaforme GIS mentre la seconda è una

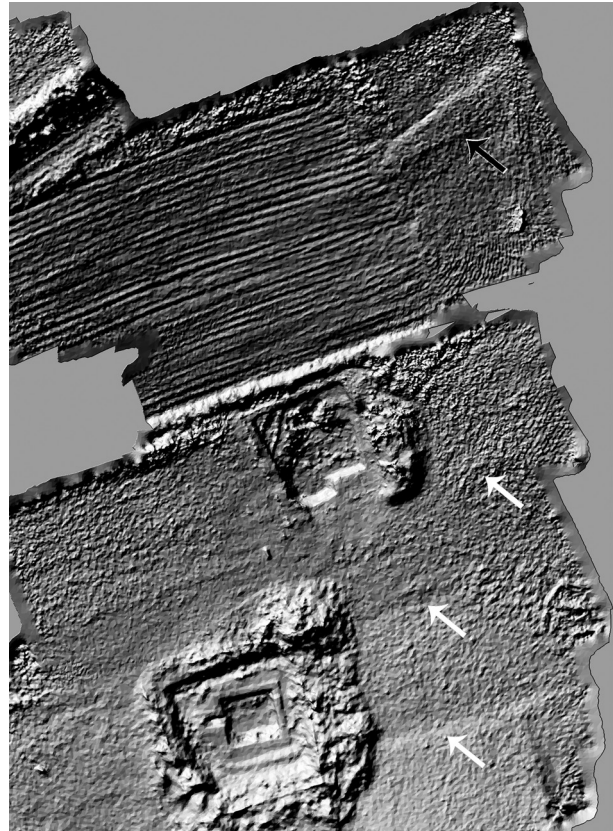


Fig. 2 – Bostel di Rotzo, elaborazione in *Analytical Hillshading* del modello digitale di elevazione ottenuto da *structure from motion*. La freccia nera indica l'anomalia poligonale, le frecce bianche le anomalie lineari.

versione "semplificata" a 8 bit utile per la visualizzazione⁸. Un parametro fondamentale è il *Vertical Exaggeration Factor* che va ad influenzare ogni tecnica successivamente citata ed è utile a evidenziare le caratteristiche verticali altrimenti poco visibili rispetto alla scala orizzontale. Per ogni trattamento sono stati effettuati cinque test con parametri differenti.

L'*Analytical Hillshading* è una tecnica che consente di illuminare artificialmente un modello digitale scegliendo la direzione della luce (azimut) e l'altezza sopra l'orizzonte (*sun elevation*). Questo trattamento evidenzia anomalie illuminate obliquamente, ma nasconde quelle parallele alla fonte di luce⁹ (fig. 2).

L'*Hillshading from Multiple Directions* è una tecnica che consente di illuminare artificialmente un modello digitale da diverse direzioni contemporaneamente mantenendo costante l'altezza sopra l'orizzonte; fornisce due tipi di visualizzazioni, uno che attribuisce ad ogni banda un'ombreggiatura da una specifica direzione e una in RGB¹⁰ (fig. 3).

⁸ KOKALJ et alii 2016, p. 3.

⁹ CHALLIS et alii 2011.

¹⁰ KOKALJ et alii 2013.

⁶ Agisoft PhotoScan User Manual, p. 30.

⁷ KOKALJ et alii 2016.

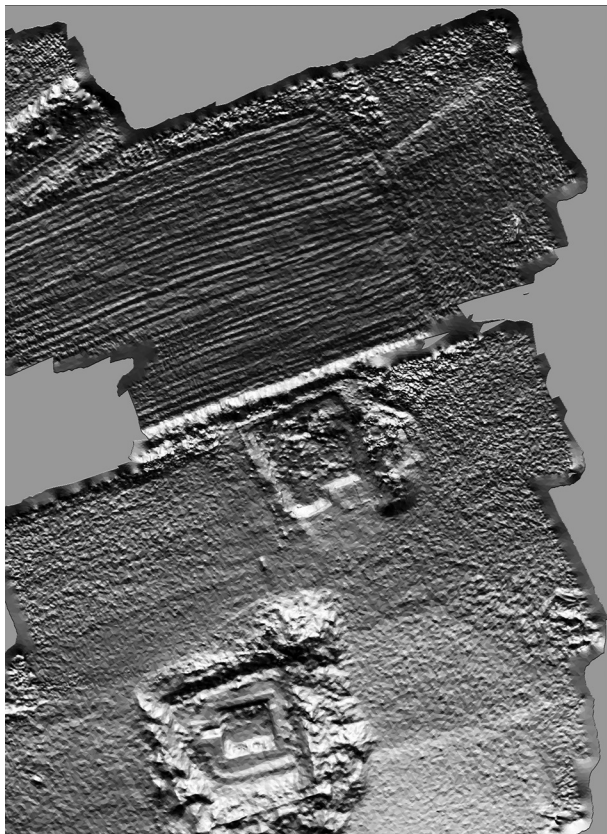


Fig. 3 – Bostel di Rotzo, elaborazione in *Hillshading from Multiple Directions* del modello digitale di elevazione ottenuto da *structure from motion*.

Lo *Slope Gradient* è una tecnica che permette di visualizzare in falsi colori la variazione di pendenza per ogni cella del modello digitale e quelle adiacenti¹¹.

Lo *Sky-View Factor* è una tecnica che calcola la porzione di cielo visibile per ogni punto del DEM, ideale nell'identificazione di morfologie concave. Il trattamento viene visualizzato in scala di grigi le dove il bianco indica la massima visibilità celeste e il nero una visibilità estremamente limitata¹².

L'*Anisotropic Sky-View Factor* è una versione più complessa dello SVF nel quale il cielo viene simulato come elemento complesso avente intensità luminosa variabile; si aggiungono quindi, parametri relativi alla direzione della luce (fig. 4).

Il *Simple Local Relief Model* è una tecnica che va a rimuovere gli elementi morfologici su larga scala (colline, valli) in modo che rimangano solamente quelli su piccola scala. Questa versione utilizza un processo semplificato: la tendenza è calcolata da un filtraggio gaussiano e il modello di rilievo locale è prodotto direttamente sottraendo il modello filtrato dall'originale.

¹¹ CHALLIS *et alii* 2011

¹² ZAKŠEK *et alii* 2011

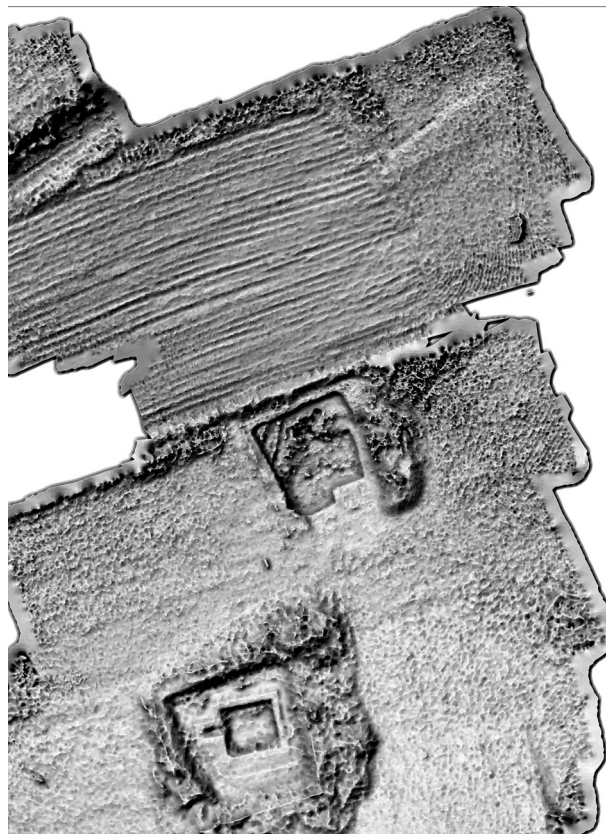


Fig. 4 – Bostel di Rotzo, elaborazione in *Anisotropic Sky-View Factor* del modello digitale di elevazione ottenuto da *structure from motion*.

L'*Openess* è una tecnica che si basa sulla stima dell'angolo medio di elevazione all'orizzonte entro un raggio di ricerca definito. La media del valore di tutti gli angoli allo zenit da un'apertura positiva, mentre la media dei valori al nadir da un'apertura negativa¹³ (fig. 5). Nonostante fosse tra i trattamenti presenti nel pacchetto software RVT, la PCA (*Principal Component Analysis*) degli *Hillshade* è stata calcolata utilizzando ArcGis. È una procedura di statistica multivariata che trasforma dati correlati in un nuovo *set* di variabili non correlate tra loro, nello specifico caso le informazioni provenienti dagli *Hillshade* da direzioni diverse. Applicando quindi la *Principal Component Analysis* a sedici differenti *Hillshade* presi a intervalli angolari regolari tra 0 e 360 gradi è possibile ottenere nelle prime tre componenti la somma di buona parte delle informazioni contenute nei dati di partenza (circa il 95%). Questo permette quindi di creare un'unica immagine composita in falsi colori, con le prime tre componenti mappate sulle bande del rosso/ verde/ blu, per visualizzare contemporaneamente i dati provenienti da tutte le direzioni

¹³ DONEUS 2013

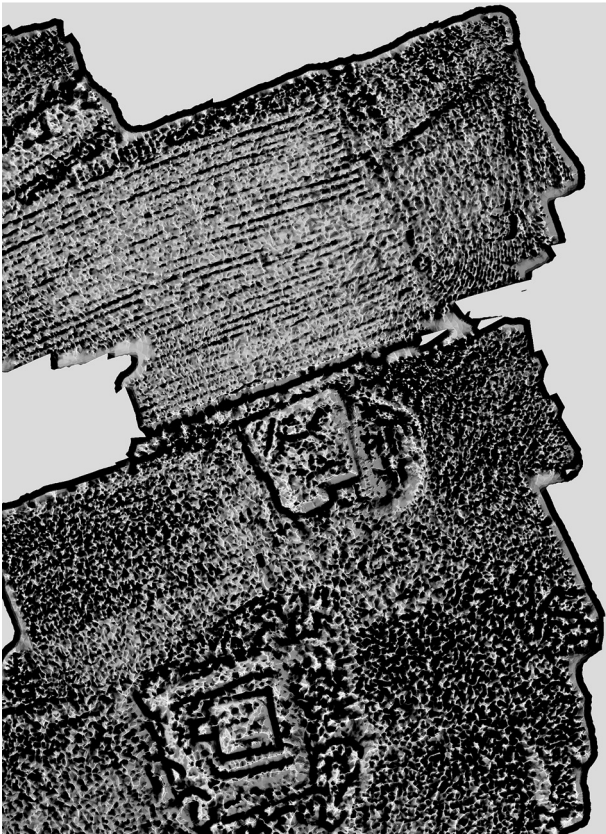


Fig. 5 – Bostel di Rotzo, elaborazione in *Openess Negative* del modello digitale di elevazione ottenuto da *structure from motion*.

degli *Hillshade* originali, massimizzando la percettibilità delle evidenze archeologiche¹⁴.

EG

Fase operativa sui modelli digitali a grande scala

Per il trattamento del DTM sono stati utilizzati sia Esri ArcGis, che consente operazioni quali *slope* (letteralmente “pendenza”), *aspect* (che visualizza la direzionalità della pendenza)¹⁵ e *viewshed analysis*¹⁶ (che determina la superficie visibile da uno o più arbitrari punti di osservazione), sia LiVT (Lidar Visualization Toolbox¹⁷), un’applicazione *open source* sviluppata presso l’Ufficio Statale per il Patrimonio Culturale a Baden-Württemberg (Germania), nel contesto del progetto internazionale *Archaeolandscapes Europe*. Quest’ultimo software dispone di una serie di funzioni di analisi del rilievo comunemente usate in ambito archeologico, tra cui *local dominance* (che definisce l’area sotto il controllo visivo da una determi-

¹⁴ DEVERAUX et alii 2008.

¹⁵ BURROUGH, McDONELL 1998, p. 190.

¹⁶ LEE, STUCKY 1998, p. 892.

¹⁷ HESSE 2010.

nata posizione, e dipende dall’ampiezza dell’angolo di vista entro un raggio predefinito) e *cumulative visibility* (visibilità cumulativa, che assegna ad ogni pixel valori proporzionali alla sua visibilità da tutti i pixel circostanti entro un determinato raggio). Tali procedure sono state testate sul sito di Rotzo e sul territorio circostante per un raggio di circa un chilometro quadrato (*Tav. 3*).

LB

Risultati

L’analisi delle elaborazioni sul modello digitale ottenuto tramite SfM ha portato all’individuazione di quattro anomalie: tre lineari parallele e un’altra di forma poligonale irregolare.

L’anomalia poligonale (*fig. 2*), situata nella parte nord-est del DEM, in un’area privata, è composta da due evidenze perpendicolari ribassate di circa 10 metri di lunghezza a formare una sorta di angolo. All’interno si identifica una seconda struttura pseudo-quadrangolare di dimensioni minori paragonabili a quelle delle abitazioni protostoriche messe in luce nel pianoro. Nella precedente campagna di scavo (2015) quest’area è stata oggetto di un *survey* mirato che aveva portato al rinvenimento di diversi frammenti ceramici e di un elemento in bronzo riferibile ad un *aes rude*.

Due delle evidenze lineari (*fig. 2*), identificabili prevalentemente a est del settore A, si sviluppano perpendicolarmente alla linea di pendio, risultano isorientate e in evidente associazione con la struttura A. Queste caratteristiche hanno fatto propendere per interpretare le due anomalie come terrazzi di contenimento per l’impianto della struttura abitativa A. La terza evidenza lineare (*figg. 4-5*) è situata in una zona ribassata e pianeggiante del promontorio isorientata anch’essa con le due anomalie precedenti. L’assenza di riscontri con le foto storiche ha permesso di ipotizzare una possibile associazione con l’abitato protostorico, forse in funzione di strada/camminamento interno o di canaletta di scolo. Tali anomalie, identificate sul DEM, trovano inoltre riscontro diretto anche nei dati multispettrali *WorldView 2*, che forniscono dunque una conferma della validità dei risultati. In ogni caso un ulteriore controllo attraverso saggi di scavo e prospezioni risulta necessario per poter validare o smentire le ipotesi avanzate finora.

Dallo studio delle elaborazioni effettuate sul DTM topografico dell’area è emerso che l’area del Bostel, così come tutta la fascia parallela alla Val d’Astico estesa in direzione nord-sud, appare quella con i più alti valori di *cumulative visibility*. La *local dominance* pone invece in evidenza a livello locale il limite occidentale e l’area settentrionale del pianoro, dove ha sede la cosiddetta “sala del trono”, struttura che era stata interpretata

	prima	seconda	terza	quarta	quinta
Vertical Exaggeration Factor	1.00000	1.00000	2.00000	1.00000	1.00000
Analytical Hillshading (Sun azimuth[deg], Sun elevation angle [deg])	315.000 35.0000	315.000 35.0000	315.000 35.0000	90.0000 45.0000	270.000 45.0000
Hillshading from Multiple Directions (Number of directions, Sun elevation angle [deg])	16 35.0000	32 35.0000	16 35.0000	16 45.0000	16 10.0000
Slope Gradient	No parameters required	No parameters required	No parameters required	No parameters required	No parameters required
Sky-View Factor (Number of search directions, Search radius [pixels])	16 10.0000	32 10.0000	16 10.0000	16 20.0000	16 20.0000
Anisotropic Sky-View Factor (Level of anisotropy, Main direction of anisotropy [degrees])	high 315.000 Other parameters are taken from the Sky-View Factor method	high 315.000 Other parameters are taken from the Sky-View Factor method	low 315.000 Other parameters are taken from the Sky-View Factor method	low 90.0000 Other parameters are taken from the Sky-View Factor method	low 0.0000 Other parameters are taken from the Sky-View Factor method
Openness (Positive and Negative)	Parameters are taken from the Sky-View Factor method	Parameters are taken from the Sky-View Factor method	Parameters are taken from the Sky-View Factor method	Parameters are taken from the Sky-View Factor method	Parameters are taken from the Sky-View Factor method

Tab. 1 – Tabella Parametri.

come sede di un'autorità politica¹⁸. Le visualizzazioni di *slope* e *aspect* sono state sintetizzate in un'immagine unitaria mediante una procedura di riclassificazione, nella quale l'area più pianeggiante del Bostel, ovvero quella con un più basso valore di pendenza, risulta principalmente esposta a sud e ad est. Per quanto riguarda la *viewshed analysis* si è proceduto operando un confronto tra 8 aree di osservazione, selezionate in media-alta quota (m 785-880) ad una distanza media approssimativa di m 350 l'una dall'altra. In base a questa analisi il Bostel di Rotzo risulta godere di una visibilità complessiva nettamente maggiore, coprendo il 33% del territorio in esame contro una media del 14% relativa alle altre aree di osservazione testate.

EG, LB

CREAZIONE DEL MODELLO PREDITTIVO TRAMITE APPROCCIO OBJECT-BASED

Trattamento dei dati e formalizzazione del rule set

La finalità di questa parte del lavoro vuole essere un esempio di applicazione delle tecniche OBIA per la creazione di modelli predittivi mirati. In particolare, il modello predittivo progettato non è volto a individuare tutti i possibili siti archeologici all'interno dell'areale indagato, ma intende identificare solo alcuni specifici contesti caratterizzati da una posizione privilegiata (in termini di dominanza, pendenza ed esposizione solare), sfruttando alcune variabili specifiche. La gestione delle vie di transito e il controllo sul territorio circostante, infatti, hanno rivestito un ruolo fondamentale nelle scelte locazionali dei gruppi umani fin da epoca pre-protostorica. L'areale di studio indagato comprende il territorio circostante all'abitato protostorico del Bostel di Rotzo,

¹⁸ PELLEGRINI 1916.

con particolare riferimento al comparto occidentale dell'Altopiano dei Sette Comuni per un'estensione di circa km² 52.

Il modello predittivo è stato progettato allo scopo di individuare in maniera automatica i “control places” presenti nell'area di indagine, soprattutto sui crinali protesi verso la Val d'Assa e la Val d'Astico, importanti vie di comunicazione che collegano la pianura veneta con l'area alpina trentino-atesina.

Il modello proposto mira a determinare in modo oggettivo la reale “dominanza” del sito del Bostel di Rotzo, da sempre considerato come una postazione di controllo sulla Val d'Assa e sulla Val d'Astico. La presenza del villaggio ha costituito, inoltre, un termine di confronto per la creazione del modello stesso. Durante la segmentazione, infatti, è stato impiegato uno *shape file* che definiva con precisione il perimetro ad oggi noto del villaggio, tuttavia in fase di classificazione sono stati impiegati dei parametri e dei valori generali, senza tenere in considerazione le specifiche caratteristiche dell'abitato del Bostel. In questo modo è stato possibile valutare concretamente e in modo obiettivo l'assunto di partenza in relazione alla localizzazione del sito in posizione dominante.

Come dato di partenza si è deciso di usare il modello digitale del terreno con risoluzione ai m 5 disponibile per l'intero areale di indagine. Il modello mentale volto alla localizzazione dei punti di controllo ha considerato i seguenti parametri:

1. l'irradiazione solare. Una buona esposizione è infatti fondamentale per un insediamento stanziale, per superare i rigidi inverni alpini;
2. la dominanza locale. Essenzialmente si è andati a valutare qual è la visibilità, e dunque quanto territorio è possibile controllare, da ogni punto del modello tridimensionale. Alti valori di dominanza sono generalmente caratteristici degli abitati d'altura e di strutture di controllo come castelli ed edifici religiosi;
3. la pendenza. Per consentire lo sviluppo di strutture permanenti la ripidezza del pendio deve essere relativamente ridotta. I gruppi umani potevano di volta in volta indirizzare le scelte locazionali in aree naturalmente pianeggianti, oppure trasformare aree particolarmente significative tramite infrastrutturazioni come terrazzamenti o spianamento di aree sommitali.

Al modello digitale di elevazione sono state applicate tre differenti elaborazioni che hanno fornito la base di partenza per l'implementazione del modello predittivo. Nel dettaglio, sono stati realizzati: a) una *solar radiation*, che permette di calcolare la quantità di radiazione solare per ogni punto del DEM durante tutto l'arco dell'anno (Tav.4 A); b) una *local dominance*, che calcola il dominio sul territorio circostante per ogni punto

del modello digitale¹⁹ (Tav.4 B); c) una *slope analysis*, che consente di rappresentare l'andamento della pendenza in un set di dati di elevazione (Tav. 4 C).

Il quantitativo di irradiazione solare è stato calcolato con l'algoritmo di RICH et alii del 1994 e successivamente modificato da FU e RICH nel 2000. Si è scelto di procedere calcolando l'irradiazione solare sull'intero territorio in analisi a intervalli mensili regolari mappando poi il risultato su un'unica immagine. Il risultato è stata una mappa in falsi colori dove per ogni area del modello era visibile il quantitativo di irradiazione solare calcolato sull'intero anno.

La fase successiva ha visto la creazione vera e propria del modello predittivo tramite un approccio object-based alla classificazione, partendo dai dati noti e da quelli elaborati *ad hoc*.

Come file di input sono stati utilizzati i risultati delle tre elaborazioni precedentemente citate e uno *shape file* con il perimetro del sito del Bostel di Rotzo. I dati sono stati caricati in un ambiente per analisi OBIA (eCognition Developer) e visualizzati come un'immagine RGB, mappando la *solar radiation* sul *layer* del rosso, la *local dominance* sul *layer* del verde e lo *slope* sul *layer* del blu. Successivamente, l'immagine è stata partizionata in oggetti-immagine attraverso una segmentazione²⁰ (tav. 5). Sin dalle prime fasi del progetto si è deciso di realizzare due *rule set* differenti in maniera da poter confrontare eventuali differenze nei risultati. Per entrambi i progetti è stato selezionato l'algoritmo di segmentazione a multirisoluzione, ma sono stati impostati parametri diversi: nel primo caso si è scelto di ponderare equivalentemente tutti e tre i *layer*, mentre nel secondo caso è stato dato un peso inferiore al *layer* dello *slope*. I parametri di scala, forma e compattezza invece sono stati rispettivamente settati su 1200, 0,1 e 0,6. Il *layer* tematico del perimetro del sito è stato tenuto in considerazione per entrambe le segmentazioni. Il valore elevato del parametro di scala è dovuto alle dimensioni dell'area di indagine: infatti, con un parametro più basso l'immagine sarebbe stata sovra-segmentata e dunque più difficilmente trattabile col metodo in esame.

Il “modello mentale” sotteso alla realizzazione del modello predittivo prevede la classificazione di tutti quegli oggetti-immagine che presentino alti valori di *solar radiation* e *local dominance*, ma bassi valori di *slope*; in questo modo vengono classificate solamente aree sufficientemente pianeggianti per permettere lo sviluppo di un punto di controllo strutturato, che più facilmente può aver lasciato tracce visibili sul terreno. I primi due passaggi di classificazione sono stati identici per entram-

¹⁹ HESSE 2016.

²⁰ HARALICK, SHAPIRO 1985.

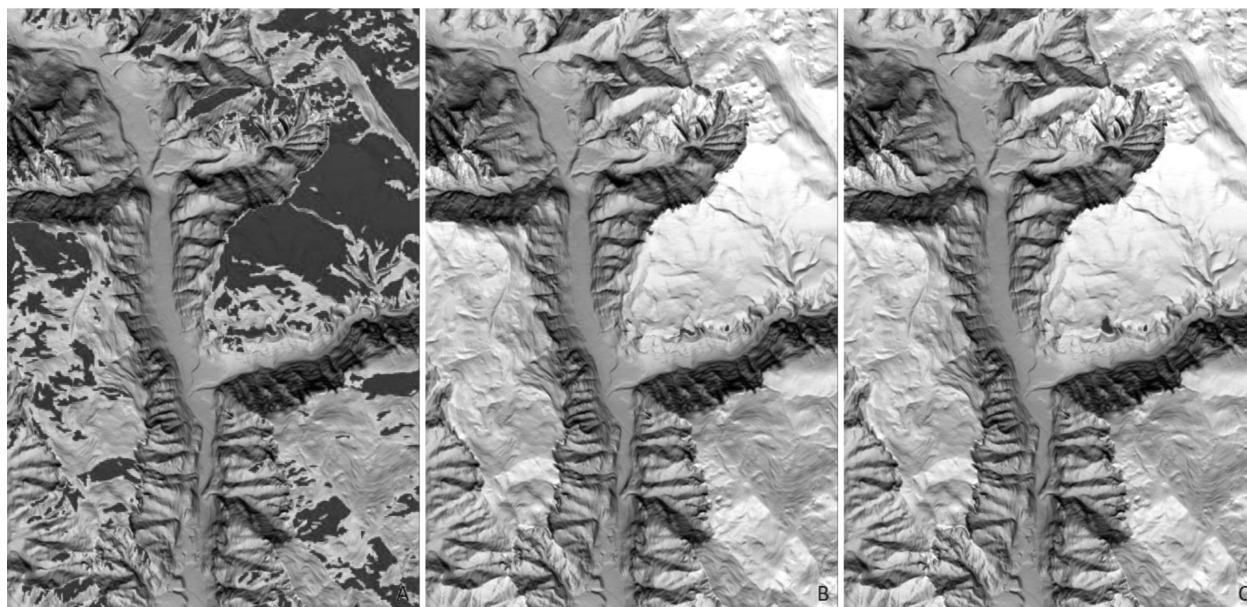


Fig. 6 – Tre passaggi di classificazione *object-based*, rule set 1: A) classificazione di oggetti con alti valori di *Solar Radiation*, B) classificazione di oggetti con alti valori di *Solar Radiation* e *Local Dominance*, C) classificazione finale (alti valori di *Solar Radiation* e *Local Dominance* e bassi valori di *Slope*).

bi i modelli: si sono inizialmente classificati tutti gli oggetti-immagine che avessero un valore piuttosto alto di irradiazione solare e successivamente, filtrando esclusivamente le aree già classificate, gli oggetti-immagine che avessero valori alti di *local dominance*. Durante il terzo passaggio i due *rule set* prendono strade differenti: nel primo si sono esclusi dalla classificazione tutti gli oggetti-immagine aventi un valore di *slope minore* di 30 gradi e, dopo l'applicazione dell'algoritmo *merge region* per la fusione degli oggetti prossimali classificati in un unico oggetto-immagine, è stata introdotta la variabile area per eliminare tutte le aree troppo piccole per il possibile sviluppo di un contesto strutturato (fig. 6).

Nel secondo modello invece è stato utilizzato un parametro di *slope* più contenuto che ha favorito le aree più pianeggianti in fase di classificazione rendendo di fatto non necessario l'utilizzo della variabile dimensionale area per escludere dal *rule set* le zone con una bassa pendenza, ma praticamente troppo piccole per uno sfruttamento antropico articolato.

Per entrambi i *rule set*, infine, è stato utilizzato un algoritmo relazionale tra oggetti-immagine che ha permesso di ampliare e meglio definire le aree individuate dal modello. Nel dettaglio si è scelto di includere nella classificazione finale quegli oggetti-immagine che condividessero con gli oggetti classificati (*o parent process objects* - PPO) almeno il 30% del perimetro totale.

Per finire è stato applicato nuovamente un algoritmo di *merge region* che ha permesso di fondere tutti gli oggetti-immagine prossimali classificati. Quest'ultimo

passaggio risulta particolarmente importante qualora sia necessario quantificare i parametri dimensionali delle aree classificate o il numero degli oggetti-immagine individuati.

LM

Risultati e verifica da remoto

I risultati dei due modelli sono in buona parte sovrapponibili, con però alcune sostanziali differenze. Quattro aree sono state identificate in entrambi i modelli, mentre il primo *rule set* classifica un singolo areale aggiuntivo (Tav.6). Le procedure di verifica dell'attendibilità dei modelli sono state suddivise in due fasi: una prima verifica da remoto attraverso l'utilizzo di fotografie aeree storiche e immagini satellitari multispettrali (*WorldView 2* a 8 bande) e una seconda con ricognizione a terra mirata alle zone d'interesse.

Il primo risultato, già verificabile da remoto, è la presenza del sito protostorico del Bostel di Rotzo tra le aree individuate da entrambi i modelli. Se da un lato ciò conferma la propensione di controllo dell'abitato sul territorio circostante, dall'altro il modello viene a sua volta validato dall'inclusione del villaggio tra le aree classificate poiché conferma un dato già empiricamente ipotizzato. Il sito più a nord, invece, coincide con l'area occupata da Forte Campolongo, uno dei più importanti forti italiani a controllo della Val d'Astico e del confine durante la Prima Guerra Mondiale. È quindi possibile confermare anche il secondo areale

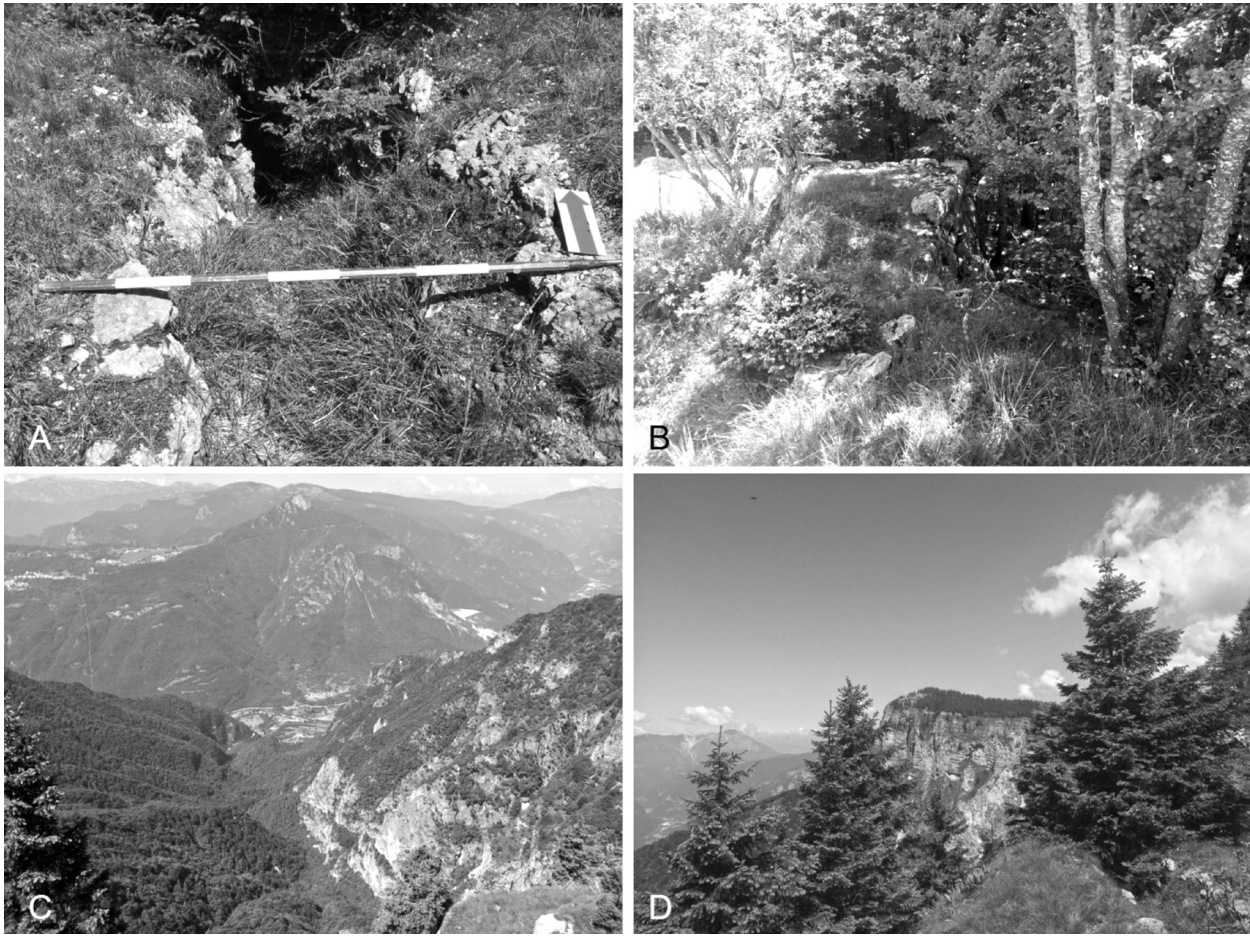


Fig. 7 – Ricognizione sul campo, località nei pressi di Spitz Rotzo: A) trincea della Prima Guerra Mondiale in stato di abbandono; B) muro di contenimento di una piazzola da artiglieria della Prima Guerra Mondiale; C) visuale dal ciglio della piazzola verso la Val d'Assa; D) Forte Campolongo visto dalla piazzola.

come “control place” dell’Altopiano occidentale, anche se ovviamente di diversa cronologia. Le altre due aree sono coperte da una fitta vegetazione e risulta impossibile verificare con certezza da remoto eventuali presenze archeologiche senza il conforto con dati LiDAR ad alta risoluzione. È comunque possibile formulare alcune considerazioni generali. L’area più a est è una zona pianeggiante a ridosso della cima Spitz di Rotzo (circa 1350 m sul livello del mare), la sua posizione ha alti valori di dominanza sul territorio circostante, ma l’altitudine e l’esposizione alle intemperie la rendono poco adatta per un insediamento protostorico. È invece probabile la presenza anche in questo caso di strutture legate alle Grande Guerra. La seconda area, anche se meno estesa, condivide caratteristiche molto simili al Bostel di Rotzo. Infatti, pur avendo alti valori di dominanza, la presenza di cima Obergrubele a nord protegge maggiormente la zona dalle correnti. Oltre a queste quattro aree, il primo modello include anche una quinta zona denominata Groementeche; si

tratta di un promontorio situato a est rispetto al Bostel di Rotzo, che si affaccia direttamente sulla Val d’Assa. Sebbene l’area sia scarsamente vegetata non è stato possibile individuare alcuna struttura visibile da remoto.

LM

Ricognizione e verifica sul campo

Si è proceduto quindi a una verifica sul campo delle tre aree individuate dai modelli di cui non si aveva un riscontro certo attraverso il *remote sensing*. La ricognizione ha avuto luogo nel giugno 2016 ed è proceduta da nord verso sud.

Procedendo in direzione nord-sud quindi il primo dato identificato attraverso indagine OBIA che si è andati a verificare è il pianoro a ridosso della cima Spitz di Rotzo (m 1350 s.l.m.).

Qui il territorio è per lo più boscoso e l’ambiente è segnato dalla presenza di opere infrastrutturali della Prima Guerra Mondiale come mulattiere, baraccamenti

e piazzole. Anche il pianoro stesso infatti risulta essere una piazzola artificiale che probabilmente ospitava una batteria d'artiglieria e una trincea (fig. 7), come dimostrato sia dalla ricognizione a vista sia dall'uso di un *metal detector* (modello Fisher Protech); entrambi i sistemi di indagine hanno riportato alla luce materiale bellico di vario tipo come scatolette di alimenti, schegge di bomba, proiettili *shrapnel*²¹ e filo spinato. In passato quindi gli ingegneri militari hanno tenuto molto in conto il fattore di *local dominance* della zona in quanto l'artiglieria lì schierata consentiva un fuoco di sbarramento sulla sottostante valle dell'Astico, a difesa del forte Campolongo, in linea d'aria distante solamente un paio di chilometri, e delle linee di difesa lì adiacenti. Il secondo luogo ricognito si trova a circa km 2 a sud-ovest rispetto a cima Spitz di Rotzo, su un piccolo pianoro protetto a nord da cima Obergrubele (m 1195 s.l.m.) e in un'ottima posizione a controllo della Val d'Astico. Infatti a testimonianza di ciò, l'intera area faceva parte della linea difensiva militare italiana della Prima Guerra Mondiale. Anche in questo caso la ricognizione è stata effettuata sia a vista sia con il cerca metalli, e, grazie a quest'ultimo, sono stati rinvenuti diversi reperti bellici tra cui un bottone, schegge di bombe, pallini e bossoli di pistola. Questi ultimi risultano di particolare interesse in quanto non attinenti al contesto della Grande Guerra quanto più probabilmente ad azioni militari risalenti al periodo della Seconda Guerra Mondiale. L'area, inoltre, è attualmente interessata dalla pratica del taglio selettivo della vegetazione come testimoniato dalla presenza di ceppaie, trucioli e segatura e quindi parte del pianoro potrebbe essere stato spianato solo di recente per permettere l'accesso ai mezzi forestali. La morfologia del territorio non ha permesso di indagare più a fondo il sito, nemmeno attraverso finestre stratigrafiche e piccoli saggi a causa della presenza di massi di grossa pezzatura intervallati da vuoti della matrice. A causa della natura impervia del territorio la ricognizione non ha potuto coprire l'intero areale indagato e perciò non è da escludere del tutto la presenza di siti o manufatti archeologici più antichi. La terza area indicata dallo studio da remoto, denominata Groementeche, è situata a circa 1 km a est del Bostel di Rotzo e si affaccia direttamente sulla Val d'Assa, in passato importante via di comunicazione. La zona è caratterizzata da una forte presenza di campi coltivati a patate (specialità del comune di Rotzo), orti e boschetti di faggio. Sul luogo propriamente chiamato Groementeche, costituito da prato, si trovano due imponenti monoliti in posizione sub-verticale di proba-

²¹ Generalmente costituiti da una lega di piombo e ferro, erano contenuti all'interno dei proiettili di artiglieria, i quali esplodendo a mezz'aria rilasciavano una pioggia di questi pallini sulle linee nemiche.

bile origine antropica di cui però non si conosce né la funzione né la datazione.

La zona è nota nelle leggende e nelle storie popolari per essere un luogo magico legato a rituali stregoneschi ed esoterici (anche sul Bostel di Rotzo esistono leggende simili: si narra fosse un luogo di ritrovo per le streghe che vi celebravano Sabba e rituali simili). Non è quindi possibile escludere che il modello rifletta anche aree riferite alla sfera cognitivo-proiettiva e culturale, che sono frequentemente associate a particolari caratteristiche topografiche come cime, passi e variazioni di pendenza repentine (ad es. santuari sommitali, *Passfunde* e *Branndopferplätze*) come ben testimoniato in letteratura²².

Le ricognizioni effettuate nell'estate del 2014 a nord dell'area avevano portato al riconoscimento di alcuni materiali archeologici: frammenti ceramici riferibili all'età del ferro e una scoria di riduzione primaria del rame. La ricognizione del giugno 2016 si è concentrata per lo più a nord-ovest dei monoliti in un terreno precedentemente boschivo ed ora adibito a campi coltivabili. Nonostante il terreno arato sia più funzionale a questa tipologia d'indagine, non si sono individuati manufatti archeologici con la ricognizione a vista, mentre con l'uso della metal detector sono stati rinvenuti solo pochi reperti bellici (bossoli italiani e austriaci, *shrapnel*, schegge di bombe).

AM

Risultati

Il caso di studio qui presentato, nonostante le problematiche connesse alle costrizioni geografiche e all'impossibilità di indagare con campagne di scavo sistematico o di prospezioni geofisiche le aree identificate, offre uno spunto interessante per valutare le potenzialità e l'affidabilità che la tecnologia OBIA può offrire anche nella realizzazione di modelli predittivi applicati all'archeologia. Sfruttando la natura interattiva e l'ampia adattabilità offerta dal metodo, nonché la possibilità di elaborare tipologie di dati diversi contemporaneamente è possibile creare innanzitutto modelli esportabili e riutilizzabili in differenti areali geografici e in secondo luogo ampliare il numero di variabili da considerare per raffinare ulteriormente il modello. Sebbene dai controlli a terra non siano state individuate chiare testimonianze di frequentazione pre-protostorica negli areali indagati, la posizione dominante di questi luoghi lascia trasparire una presenza antropica piuttosto costante nel tempo per il mantenimento del controllo sulle due vallate. Il modello, sviluppato specificatamente per l'individuazione di possibili "*control places*" ha permesso di individuare con una certa precisio-

²² STEINER 2010.

ne aree con un alto potenziale dominante sul territorio circostante. Tre delle cinque occorrenze evidenziate dal modello sono fortemente interessate da infrastrutturazione militare della Prima Guerra Mondiale mentre la quarta area individuata è interessata dal villaggio protostorico del Bostel di Rotzo. A tal proposito, infatti, è stato possibile confermare in maniera oggettiva la posizione privilegiata rivestita dal sito dell'età del Ferro all'interno dell'Altopiano occidentale.

(L.M., A.M.)

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, 2016, Version 1.2, <http://www.agisoft.com>
- BREIMAN L., FRIEDMAN J., STONE C.J., OLSHEN R.A., 1984, *Classification and Regression Trees*, Belmont, California.
- BURROUGH P. A., McDONELL R.A., 1998, *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, New York.
- CHALLIS K., FORLIN P., KINCEY M., 2011, *A generic toolkit for the visualization of archaeological features on airborne Lidar elevation data*, in *Archaeological Prospection* 18(4).
- DEVEREUX B.J., AMABLE G.S., CROW P., 2008, *Visualisation of lidar terrain models for archaeological feature detection*, in *Antiquity* 82, pp. 9-470.
- DONEUS M., 2013, *Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Derived Digital Terrain Models*, in *Remote Sensing* 5, pp. 6427-6442.
- FU P., RICH P.M., 2000, *The Solar Analyst 1.0 Manual*, Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA.
- HARALICK R.M., SHAPIRO L.G., 1985, *Image segmentation Techniques*, in *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 29, pp.100-132.
- HESSE R., 2010, *LIDAR-derived Local Relief Models (LRM) – a new tool for archaeological Prospection*, in *Archaeological Prospection*, 17, pp. 67-72.
- HESSE R., 2016, *Visualisierung hochauflösender digitaler Geländemodelle mit LiVT*, in pubblicazione in *e-Topoi. Journal for Ancient Studies*.
- KOKALJ Z., ZAKŠEK K., OŠTIR K., 2013, *Visualizations of Lidar Derived Relief Models*, in *Interpreting Archaeological Topography - Airborne Laser Scanning, Aerial Photographs and Ground Observation*, a cura di OPITZ R., COWLEY C.D., Oxford, pp. 100-114.
- KOKALJ Z., ZAKŠEK K., OŠTIR K., PEHANI P., ČOTAR K., 2016, *Relief Visualization Toolbox ver. 1.3 Manual*, <http://iaps.zrc-sazu.si/en/rvt>, Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts
- LANG S., 2008, *Object-based image analysis for remote sensing applications: modeling reality - dealing with complexity*, in *Object-based image analysis. Spatial concepts for knowledge-driven Remote Sensing applications* a cura di BLASCHKE T., LANG S., HAY G.J., Berlino, pp. 3-28.
- LEE J., STUCKY D., 1998, *On Applying Viewshed Analysis for Determining Least-cost Paths on Digital Elevation Models*, in *International Journal of Geographical Information Science*, 12(8), pp. 891-905.
- PELLEGRINI G., 1916, *La stazione preromana di Rotzo sull'altipiano dei Sette Comuni*, in *Atti del R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, 75, pp. 105-135.
- QUINLAN J.R., 1986, *Induction of Decision Trees*, in *Machine Learning*, 1, pp. 81-106.
- RICH P.M., DUBAYAH R., HETRICK W.A., SAVING S.C., 1994, *Using Viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology*, in *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, pp. 524-529.
- ROKACH L., MAIMON O., 2008, *Data Mining with Decision Trees. Theory and Applications*, Machine Perception and Artificial Intelligence, 69, Singapore.
- STEINER H., 2010, *Alpine Brandopferplätze - Roghi Votivi Alpini, zur Denkmalpflege in Südtirol - Beni culturali in Alto Adige Studi e ricerche* 5, Trento.
- WOOD R.W., 1911, *Physical Optics*, New York.
- YI M., KOŠECKÁ J., SOATTO S., SASTRY S., 2001, *An Invitation to 3D Vision*, Cambridge.
- ZAKŠEK K., OŠTIR K., KOKALJ Z., 2011, *Sky-View Factor as a relief visualisation technique*, in *Remote Sensing* 3, pp. 398-415.