

TECNICHE DI MODELLAZIONE 3D PER UNA DOCUMENTAZIONE ACCURATA DELLE INCISIONI RUPESTRI: CONFRONTO TRA STRUCTURE FROM MOTION E STEREOFOTOMETRIA

1. INTRODUZIONE E OBIETTIVO DEL LAVORO¹

Il patrimonio culturale, e in particolare l'archeologia, è stato negli ultimi decenni un valido campo di sperimentazione delle tecniche fotogrammetriche. L'utilizzo di tecniche di ricostruzione 3D poco costose che fanno uso di fotocamere digitali non calibrate e tecniche di stereofotogrammetria (Multiview) per la documentazione di incisioni rupestri è ben noto e discusso. Alcuni protocolli sono inoltre già stati proposti (cfr. CHANDLER *et al.* 2007; CURCI, URCIA 2012; ROBERT *et al.* 2012, 2014; DE REU *et al.* 2013; DOMINGO SANZ 2014; WILLIAMS, TWOHIG 2015; RIVERO *et al.* 2019; JALANDONI 2021; HORN *et al.* 2024). Oggi queste tecniche sono facilmente accessibili e alla portata anche di non addetti ai lavori. Tuttavia, le indagini archeologiche sono molto diverse tra loro e implicano contesti spesso difficili in cui operare: grandi aree (ad es. Pompei: GUIDI *et al.* 2008; REMONDINO *et al.* 2008; REMONDINO, CAMPANA 2014), anguste e buie cavità artificiali, come gli ambienti ipogei preistorici (MANNU *et al.* 2015), zone boschive con luce scarsa o non omogenea (ad es., il sito delle incisioni di Pianaùra), pareti rocciose parzialmente coperte da vegetazione (CAVULLI *et al.* 2022), volumi complessi, sovrapposizioni di volumi o stratigrafie e così via.

Nel caso delle incisioni rupestri, la sovrapposizione dei segni è molto importante per stabilirne la cronologia relativa. Le figure non sono sempre definite e alcune, come i filiformi tracciati a graffito, sono facilmente confondibili con strie casuali (e viceversa) e sono difficili da apprezzare e registrare oggettivamente perché sottili e superficiali (DEFRASNE 2014; DÍAZ-GUARDAMINO *et al.* 2015; LYMER 2015; PLISSON, ZOTKINA 2015). L'accurato rilievo tridimensionale può rappresentare un'utile tecnica in grado di descrivere una corretta rappresentazione dei segni. Le tecniche di modellizzazione, tuttavia, sono più di una e danno risultati diversi. L'obiettivo di questo lavoro è verificare l'accuratezza dei prodotti ottenuti e valutare la qualità dei risultati confrontando le misure fisiche prese *in situ* con le misure digitali sui modelli. In questo modo si intende confrontare empiricamente le tecniche Structure

¹ Fabio Cavulli ha ideato e diretto il progetto delle incisioni Stivo-Bondone, ha supervisionato le restituzioni 3D, ha lavorato su tecniche Structure from Motion (SfM), sulla validazione dei modelli e sull'elaborazione del testo; Carla Mannu, supportata da Massimo Vanzi, ha lavorato sulla modellazione stereoscopica fotometrica, sulla validazione dei modelli e sull'elaborazione del testo; Michele Mazzurana ha lavorato sui modelli SfM e sulla loro validazione.

from Motion (SfM) e Photometric Stereo (PS) per comprenderne il funzionamento e le specificità in un contesto complesso per illuminazione e per tecniche incisorie. Si prende in considerazione uno dei software più diffusi, Agisoft Metashape Professional, che utilizza la tecnica SfM, e un interessante prototipo basato sulla tecnica PS. Purtroppo, al momento, pur esistendo software fotogrammetrici gratuiti e open source (FOSS), questi sono ancora poco diffusi a causa della complessità di utilizzo, che implica maggiori conoscenze tecniche (BEZZI *et al.* 2011).

2. IL SITO DI PIANAÙRA (MASSONE DI ARCO, TRENTO) E I METODI DI RILIEVO

Il sito delle incisioni di Pianaùra è un riparo roccioso situato sul versante di bassa quota del Monte Stivo, in prossimità della conca di Arco-Riva sul Lago di Garda (Trentino) (Fig. 1). L'affioramento roccioso si trova su un sentiero acciottolato, segnato da solchi carrai, in Val Troiana, una piccola valle che scende sul versante sinistro idrografico della Valle del Sarca, a 360 m s.l.m. e che collega il Castello di Drena in Val di Cavedine con il paese di S. Martino di Arco. La lastra calcarea, montonata dal ghiacciaio e incisa dall'uomo, è accessibile dal lato N attraverso una soglia litica formata da due gradini e delimitata da due grandi lastre poste verticalmente. Una massicciata di pietre circonda l'area. All'estremità meridionale emergono due pietre di circa 20 cm, posate sulla lastra incisa e legate tra loro da malta di calce.

I processi di esalazione subglaciale hanno modellato la roccia formando una parete aggettante con due lastre leggermente inclinate verso l'esterno alla base. I segni dell'abrasione sono chiaramente riconoscibili nelle caratteristiche striature longitudinali e nella modellazione delle superfici. La roccia presenta



Fig. 1 – Il riparo di Pianaùra ripreso da O.

altre forme di alterazione e degrado, come distacchi superficiali, depositi di carbonato e microflora. Il riparo è rivolto a NO e l'area incisa insiste sulla lastra sub-orizzontale basale con asse maggiore che si estende per 28 m in direzione N-NE/S-SO e larghezza di circa 3 m. La superficie non è omogeneamente incisa per tutta la sua lunghezza.

In totale si possono contare 156 figure (Fig. 2); quasi il 50% sono croci o cruciformi (74 sono semplici, potenziate, ricrociate, latine, patenti, calvari e alcune sono incomplete), circa il 10% sono quadrilateri (15 tra filetti singoli e multipli, quadrilateri con croci, reticoli e "graticole"), cerchi o circoliformi (14 tra cerchi con croce inscritta, raggiati o con punto al centro, figure ovali e a reticolo) o indeterminati (14). Queste quattro tipologie costituiscono il 75% delle incisioni, mentre il restante 25% è costituito da roncole, date (di fine XVII-XVIII secolo), iscrizioni, simboli podomorfi e cristiani. Questo conteggio non comprende le "aree a martellina" (158 gruppi di picchiettatura, linee, tratti sparsi o raggruppati), che non formano una figura coerente (PEDERGNANA, CAVULLI 2021; CAVULLI 2023).

In questo palinsesto, la tecnica di incisione diventa molto importante per riconoscere le diverse fasi o le diverse mani: martellina fine, media e grossolana, martellina seguita da politura dei contorni delle figure e tecnica a graffito. Le figure, per lo più realizzate a martellina, si sovrappongono solo in pochi casi e solo nell'area C, quella presa in considerazione in questo lavoro: una grande croce greca ricrocata copre la punta di una roncola, entrambe a martellina, e, pochi centimetri a sinistra, una figura podomorfa a martellina fine è coperta da una grande croce latina ricrocata. L'analisi 3D ha aiutato a evidenziare tali sovrapposizioni. La cronologia assoluta dei segni si inserisce in un ampio periodo che va dal tardo medioevo all'epoca contemporanea.

Le rocce sono state documentate topograficamente, fotograficamente, tramite fotogrammetria 2D, *frottage* e rilievo a contatto su fogli trasparenti. I diversi rilievi sono stati georiferiti in una piattaforma GIS che ha permesso il tracciamento vettoriale e la catalogazione in un geodatabase di tutti i segni. Il rilievo 3D completa la documentazione, ma per realizzarlo è stato necessario confrontarsi con alcune peculiarità del sito. Le immagini della superficie

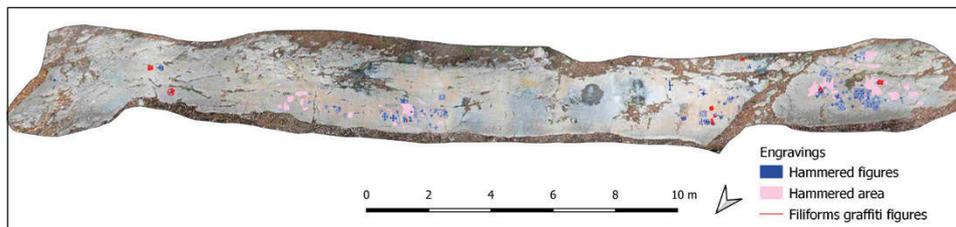


Fig. 2 – Ortofotomosaico dell'intera superficie di Pianaùra ricostruita con tecnica SfM con le incisioni, a martellina e graffiti (vettori), sovrapposte.

risentono delle ombre date dalla parete rocciosa e dai faggi che crescono di fronte al riparo, che possono essere evitate solo in giornate nuvolose a discapito dei contrasti e della definizione delle immagini. Le incisioni sono generalmente ben marcate, ma le figure filiformi sono spesso molto difficili da individuare e quasi impossibili da rappresentare con tecniche fotografiche. Tale contesto problematico è parso un buon campo per la sperimentazione di diverse tecniche di indagine e di rilievo tridimensionale (PEDERGNANA, CAVULLI 2015).

3. CONFRONTO TRA STRUCTURE FROM MOTION (SfM) E PHOTOMETRIC STEREO (PS)

3.1 Metodi e tecniche

Nel nostro caso, entrambe le tecniche di modellazione (SfM e PS) sono state scelte perché rispondevano alla disponibilità economica del progetto, alla necessità di metodi di facile utilizzo e all'obiettivo di produrre modelli 3D accurati. La SfM, derivata da tecniche di Computer Vision (LUCAS, KANADE 1981), ricostruisce i parametri della fotocamera (posizione e orientamento del punto di ripresa) e crea un modello tridimensionale dell'oggetto utilizzando una nuvola di punti a bassa densità (Fig. 3). La diffusione delle fotocamere digitali e dei software di elaborazione gratuiti o a basso costo ha contribuito alla rapida adozione di questi strumenti in archeologia (DE REU *et al.* 2013; KOUTSOUDIS *et al.* 2013; JALANDONI *et al.* 2018; RONDINI 2018).

La PS è una tecnica di Computer Vision basata sull'elaborazione delle immagini, che utilizza diverse fotografie dello stesso oggetto riprese dal medesimo punto di vista, modificando durante la ripresa solo la direzione dell'illuminazione a flash (Fig. 4). Gli algoritmi sono in grado di ricostruire le caratteristiche tridimensionali della superficie, attraverso un calcolo matematico, ovvero deducendo dall'ombreggiatura degli oggetti le informazioni

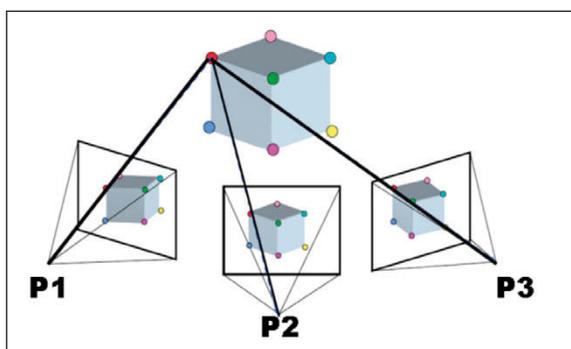


Fig. 3 – Descrizione della tecnica di ripresa fotografica per l'elaborazione in SfM.

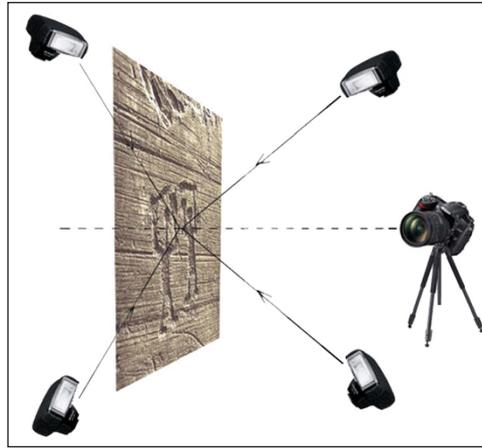


Fig. 4 – Descrizione della tecnica di ripresa fotografica per l'elaborazione in PS.

sull'orientamento della superficie pixel per pixel (WOODHAM 1980; JAIN, COLEMAN 1992; CHRISTIANSEN, SHAPIRO 1994; BARSKY, PETROU 2003).

Il lavoro specifico dell'Università di Cagliari si è focalizzato sull'ottimizzazione dell'algoritmo di calcolo (DESSI *et al.* 2015) e il reperimento di attrezzature adeguate per la soluzione di problemi pratici nell'uso della PS in campo archeologico (MANNU *et al.* 2015).

3.2 Modellizzazione 3D a Pianaùra

3.2.1 Primi modelli SfM

La prima esperienza di modelli 3D nel sito di Pianaùra è stata fatta utilizzando il software Agisoft Photoscan, che non necessita di caratteristiche hardware particolari, ma di una CPU e di una scheda grafica efficienti. Il primo rilievo è stato effettuato a settembre 2015 scattando molte foto da ogni angolatura. Il problema della luce ha influenzato i risultati a causa delle ombre degli alberi e del riparo o della luce diffusa, ma scarsa, data dal cielo nuvoloso. I modelli risultanti dell'intera lavagna (Fig. 2) e delle singole aree di concentrazione hanno risposto all'esigenza di un rilievo generale, ma i segni graffiti e la sovrapposizione delle martelline non sono apprezzabili nella ricostruzione.

3.2.2 Modelli ottenuti con PS e altri con SfM

Queste difficoltà hanno stimolato il confronto empirico tra due algoritmi di ricostruzione, SfM e PS, nel tentativo di migliorare i modelli. Per evidenziare le potenzialità e le diverse caratteristiche dei risultati abbiamo utilizzato la stessa attrezzatura per acquisire le immagini a livelli di dettaglio diversi,

da elaborare infine con le due tecniche: si tratta di una fotocamera Nikon D300 e un obiettivo zoom Nikkor 18-105, scattando con lunghezza focale fissa (50) e salvando le immagini in formato non compresso (.TIFF). Per la PS è stato collegato un flash dalla potenza massima di 400w alla fotocamera, che è stata fissata su un treppiede. Più di 1100 foto sono state scattate per il confronto PS-SfM negli stessi giorni (16-17 febbraio 2016) con cielo coperto. Sono state considerate quattro aree limitate denominate “set 1, 3, 7, 8” (Fig. 5) nella parte centrale della roccia obliqua e quasi piatta (area C), nelle stesse condizioni di luce, vento e di ripresa:

- set 1 è la superficie di grandi dimensioni (192×115 cm) con la rappresentazione di croci semplici e ricrociate, 2 roncole, un podomorfo, una scala e una figura geometrica;
- set 3 (19×14 cm) è l’area limitata alla croce greca rinforzata che si sovrappone al podomorfo;
- set 7 è l’area di medie dimensioni (84×50 cm), che comprende la croce latina rinforzata sovrapposta alla roncola solo per le estremità;
- set 8 è il dettaglio ingrandito della sovrapposizione del braccio della croce alla punta del rostro (25×19 cm).

Per la tecnica SfM abbiamo elaborato le immagini in Agisoft Photoscan (poi sostituito con Agisoft Metashape Professional, ver. 1.7). Le fotografie scattate dei set 1, 3, 7, 8 sono molto più numerose di quelle utilizzate per la tecnica PS (8). Il software è stato configurato in modo da sfruttare al meglio sia CPU che GPU durante l’elaborazione (JALANDONI *et al.* 2018). I modelli 3D sono stati elaborati² con la massima accuratezza per l’allineamento, l’altissima qualità per la generazione della mappa di profondità e scegliendo una “superficie arbitraria” per la costruzione della mesh; nello stesso software sono state messe a punto anche texture, ortofotomosaico, DEM e isopse. I tempi di elaborazione hanno richiesto da 33 minuti a 11h 18’ e sono direttamente dipendenti dal numero di immagini (4.5-6.5 MB JPG ciascuna): sono state allineate 40 su 45 immagini per il set 1, 25 su 32 per il set 3, 75 su 96 per il set 7 e 46 su 61 per il set 8. I modelli risultanti sono stati esportati nel software Meshlab, scalati e posti in orizzontale. Dal modello 3D il software ha generato un’immagine ortometrica: un mosaico di immagini scalate, geometricamente e planimetricamente corrette, riprese zenitalmente, importate nella piattaforma GIS e georeferenziate nel sistema di coordinate locali.

Per la ricostruzione in PS, la fotocamera fissata su un treppiede è stata posizionata ortogonalmente alla superficie planare, regolata in modalità

² Per l’elaborazione di post-processing è stata utilizzata una workstation HP z440 del 2016 (CPU Intel Xeron CPUE5-1620 v3 @ 3.50GHz 3.50 GHz, RAM 32,0 GB, OS 64 bit e CPU x64 Windows 1Tabb0 Pro; scheda grafica NVIDIA GeForce GTX 1060 3GB).

	set 1	set 3	set 7	set 8
Tie Points				
Points	560,243 of 608,995	120,858 of 130,807	634,958 of 725,188	375,123 of 412,806
Alignment parameters (Accuracy)	(Highest)	(Highest)	(Highest)	(Highest)
Matching time	54 mins 41 secs	15 mins 34 secs	2 h 37 mins	1 h 0 mins
Alignment time	1 mins 45 secs	29 secs	3 mins 16 secs	2 mins 15 secs
File size	41.01 MB	8.39 MB	53.63 MB	33.19 MB
Dense Cloud (Points)	40,927,428	11,481,655	42,870,791	31,539,341
Depth maps generation parameters (Quality)	(Ultra High)	(Ultra High)	(Ultra High)	(Ultra High)
Dense cloud generation parameters				
Processing time	1 h 0 mins	9 mins 29 secs	8 h 2 mins	51 mins 4 secs
File size	561.00 MB	145.72 MB	573.06 MB	415.87 MB
Model				
Faces	8,185,409	2,296,172	8,999,999	8,999,999
Vertices	4,098,705	1,150,177	6,311,826	5,165,746
Texture (4 bands, uint8)	4,096×4,096	8,192×8,192	4,096×4,096	4,096×4,096
Depth maps generation parameters (Quality)	(Ultra High)	(Ultra High)	(Ultra High)	(Ultra High)
Reconstruction parameters (Surface type)	(Arbitrary)	(Arbitrary)	(Arbitrary)	(Arbitrary)
Processing time	28 mins 42 secs	7 mins 10 secs	20 mins 43 secs	13 mins 41 secs
Texturing parameters				
Texture size	4,096	8,192	4,096	4,096
UV mapping time	5 mins 7 secs	1 mins 2 secs	39 secs	1 mins 51 secs
Blending time	6 mins 57 secs	2 mins 51 secs	16 mins 15 secs	8 mins 44 secs
File size	363.40 MB	140.04 MB	439.29 MB	413.79 MB
Tiled Model (Texture)	(3 bands, uint8)	(3 bands, uint8)	(3 bands, uint8)	(3 bands, uint8)
File size	25.71 MB	15.91 MB	23.29 MB	16.39 MB
Orthomosaic: Size	4,096×3,278	4,096×3,497	4,096×3,279	4,096×3,341
Reconstruction parameters				
Blending mode	Mosaic	Mosaic	Mosaic	Mosaic
Surface	Mesh	Mesh	Mesh	Mesh
File size	137.65 MB	104.54 MB	232.16 MB	159.38 MB
Total time	2 h 51 mins	0 h 35 mins	14 h 27 mins	2 h 25 mins

Tab. 1 – Dati quantitativi dei modelli SfM: tempi di elaborazione, parametri, dati.

manuale per trovare la corretta esposizione e per scattare tutte le immagini con gli stessi parametri. Per ogni set sono state scattate otto immagini con il flash proveniente da punti sempre diversi (VANZI *et al.* 2013). Le immagini (37 MB ciascuna in .TIFF) sono state processate senza alcuna ottimizzazione³

³ Su laptop Asus N56J (CPU Intel Core i7-4700HQ CPU @ 2.40GHz 2.39 GHz CPU x64 16,0 GB RAM scheda video NVIDIA GeForce 760M 2GB, OS Windows 10 Pro.

VERTICES	Set 1 (192×115 cm)	Set 3 (19×14 cm)	Set 7 (84×50 cm)	Set 8 (25×19 cm)
PS	3053056	3053056	3053056	3053056
SfM	1332065	1150177	2996740	1792684

Tab. 2 – Dati quantitativi: numero di vertici nell’area C.

FACES	Set 1 (192×115 cm)	Set 3 (19×14 cm)	Set 7 (84×50 cm)	Set 8 (25×19 cm)
PS	6098978	6098978	6098978	6098978
SfM	2657991	2296177	5978877	3578174

Tab. 3 – Dati quantitativi: numero di facce nell’area C.

nello script di Matlab, sviluppato e implementato dal gruppo di lavoro del Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica dell’Università di Cagliari. Usando questo script, il tempo di elaborazione cala drasticamente da svariate ore a pochi minuti per l’intero processo (DESSÌ *et al.* 2015; MANNU *et al.* 2015). Come abbiamo visto, SfM richiede anche diverse ore per lo stesso lavoro (Tab. 1). Per una migliore comprensione della qualità e delle caratteristiche, i modelli sono stati analizzati sotto tre diversi aspetti: analisi dei dati quantitativi puri, test di qualità visiva (dati qualitativi) e analisi delle geometrie (dati quantitativi).

3.3 Dati quantitativi

L’analisi ha messo a confronto il numero di vertici e facce dei modelli costruiti con le due tecniche. Il metodo PS è più accurato e fornisce un numero maggiore di facce e vertici per modello rispetto al metodo SfM. Questo risultato diventa più significativo se la scala viene ingrandita, perché il metodo PS è più dettagliato quando viene utilizzato per ricostruzioni di piccole aree. La ragione va ricercata nel numero di facce e vertici che in PS dipende solo dalla risoluzione della fotocamera, mentre Agisoft SfM adatta il numero di punti e facce al modello. Costruendo la superficie in Agisoft, la “Region” (boundingbox = area di lavoro) non è stata modificata, quindi l’area di ricostruzione è massima, ma piccole aree dei modelli SfM sono state tagliate in seguito (in Meshlab) per pulire le frange e rendere l’area del modello simile a quella utilizzata in PS (Tabb. 2-3).

3.4 Test visivo della qualità

Per quanto riguarda la qualità visiva, abbiamo testato mediante un questionario tre diversi set (area grande: set 7; media: set 8; piccola: set 3; Figg. 5-6), ricostruiti con entrambe le tecniche, al fine di confrontarne i modelli sotto diversi aspetti. È stato selezionato un campione di 45 persone con scarsa o nessuna esperienza nel campo della grafica 3D e nemmeno in quello

della grafica raster o vettoriale in generale. Ogni persona, separatamente, senza sapere nulla delle tecniche di ricostruzione utilizzate, è stata messa di fronte a un display che mostrava i modelli dello stesso set ricostruiti con le due diverse tecniche e, su un altro display, il questionario. I tester potevano spostare, scalare il modello e cambiare la posizione delle luci. Le domande riguardavano la percezione della qualità visiva dei modelli, le forme, la levigatezza della superficie e la qualità dei diversi tipi di dettagli incisi.

Il modulo di Google Forms comprende in apertura una breve descrizione delle incisioni di Pianaùra, una foto del riparo, un'immagine della superficie rocciosa dell'area C e l'interpretazione delle incisioni (disegno vettoriale) sovrapposte all'ortofoto 2D. Ogni test è composto da 3 sezioni: una riguardante i dati anagrafici generali (non tutte le domande sono obbligatorie); la seconda riguardante la percezione delle superfici, con texture attivata, rispetto a tre foto della stessa area: somiglianze visive generali, fedeltà dei colori, chiarezza/nitidezza e dettagli; la terza sezione, simile alla precedente, riguarda le sole superfici senza texture. Le domande concernono le morfologie e le incisioni in generale, secondo la nitidezza, i dettagli e l'omogeneità della superficie della roccia non incisa, per poi passare alla nitidezza e ai dettagli dei limiti delle figure incise, al riconoscimento dei segni graffiti (filiformi tracciati da bulini) e alla percezione della distorsione e della curvatura delle figure o dell'intero modello.

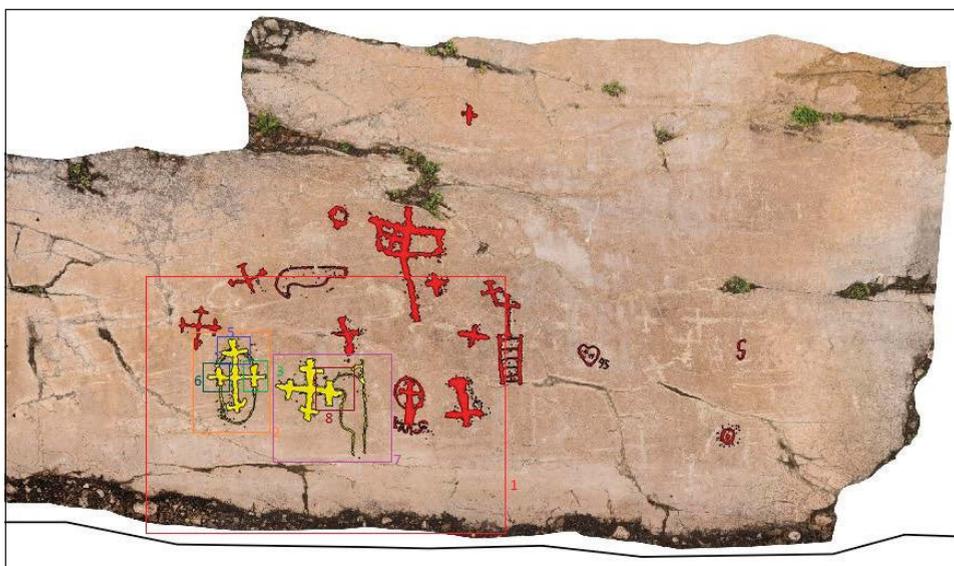


Fig. 5 – Delimitazione dei set 1, 3, 7, 8 nell'Area C di Pianaùra ricostruiti e utilizzati per il test qualitativo.

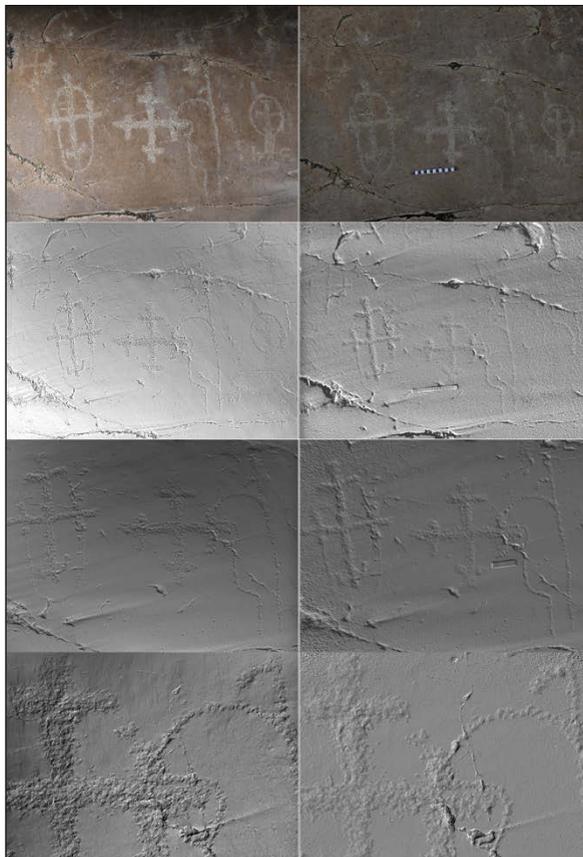


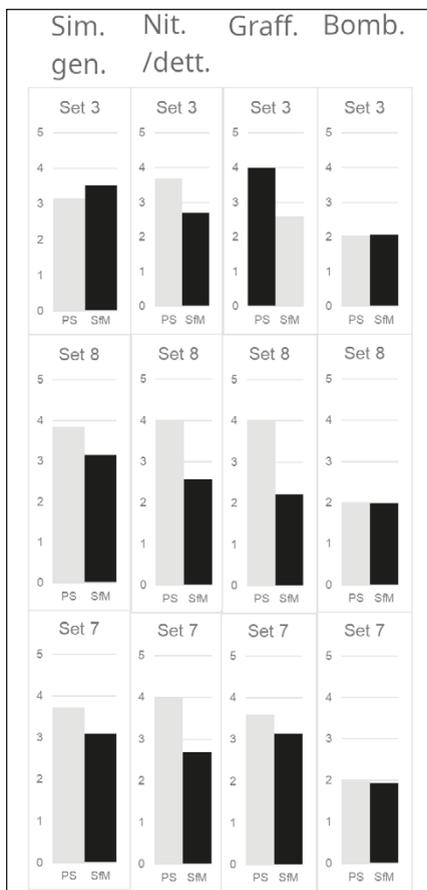
Fig. 6 – Esempio di comparazione tra modelli per il test qualitativo: modelli PS sulla sinistra e SfM sulla destra; sopra con texture (set 1), sotto senza (set 1, 7, 8).

Alle risposte è stato assegnato un punteggio da 1 a 5. Dati personali a parte, lo stesso questionario è stato sottoposto tre volte, uno per ogni set (3, 7, 8) e ogni domanda è stata ripetuta per i due modelli (PS e SfM).

3.4.1 Conclusioni del test visivo

I risultati del questionario sono stati infine elaborati in grafici esplicativi di confronto tra i modelli PS e SfM. Una media dei punteggi delle risposte permette di confrontare i modelli. La somiglianza generale del modello rispetto alle foto fornite (Tab. 4, Gen. Sim.) sembra leggermente migliore (maggiore affinità) per SfM nelle ricostruzioni dettagliate (in contrasto con la validazione quantitativa), ma leggermente peggiore sui modelli di medie e grandi

dimensioni; la fedeltà cromatica, rispetto all'immagine, è leggermente migliore per il modello SfM a tutte le scale. Al contrario, il modello PS risulta migliore a tutte le scale per quanto riguarda le forme e le incisioni, la chiarezza/nitidezza e i dettagli, l'omogeneità della superficie rocciosa non incisa, la nitidezza e i dettagli dei limiti delle figure incise, il riconoscimento delle martelline e dei segni graffiti. Nella ricostruzione di forme e dettagli (Tab. 4, Clear. Sharp.), la modellazione in PS appare favorita quasi del 20% in più rispetto a quella in SfM e del 30% in più nelle figure filiformi (Tab. 4, Graff./Scratch.). L'evidente



Tab. 4 – Grafici di sintesi delle risposte al test qualitativo che confronta le tecniche PS e SfM (tutti i grafici alla stessa scala): Sim. gen. = Similarità visiva generale: “Quanto ritiene il modello 3D visivamente simile alla fotografia? Quanto è fedele il modello 3D rispetto alla fotografia?”; Nit./dett. = nitidezza e dettagli: “Quanto sembra nitido e particolareggiato il modello 3D?”; Graff. = identificazione dei graffiti: “Quanto facilmente riesce a distinguere i segni a graffito (incisioni lineari ottenute grazie al graffio di uno strumento sulla roccia)?”; Bomb. = distorsione e bombatura: “Nota distorsioni o bombature nella forma generale del modello 3D?”.

convessità artificiosa delle superfici costruite in PS viene riconosciuta dagli intervistati come un artefatto (Tab. 4, Dist./Camb.), ma non è percepita come una distorsione preoccupante.

3.5 Test delle geometrie

3.5.1 Distanze euclidee

Proprio con l'intento di valutare quantitativamente le geometrie e le distorsioni delle superfici accidentalmente create dagli algoritmi di modellazione, sono state misurate alcune distanze sulla superficie fisica della roccia e confrontate con le stesse misure sui modelli 3D sfruttando le caratteristiche più riconoscibili della roccia e delle incisioni (Fig. 7). Le misure sono state calcolate una sola volta sulla roccia per mezzo di un righello e da un solo operatore (cfr. però JALANDONI *et al.* 2018, 306). In Meshlab è stata calcolata la distanza euclidea sui modelli, ovvero la misura tra i punti 3D senza tenere conto della morfologia della superficie, curvatura o gibbosità (cfr. sotto).

Il confronto delle misure mostra in modo inequivocabile come le grandi aree siano più affette dagli errori di misura e dalla deformazione del modello rispetto alle piccole (Tabb. 5-6; Fig. 7, set 1, misure A, C). A tutte le scale di rappresentazione gli errori nei modelli PS sono sempre più rilevanti rispetto ai modelli SfM, con piccole eccezioni (misure H, I nel set 7 e H nel set 8). Nella tecnica PS infatti sussiste un legame tra le dimensioni dell'area e la distanza

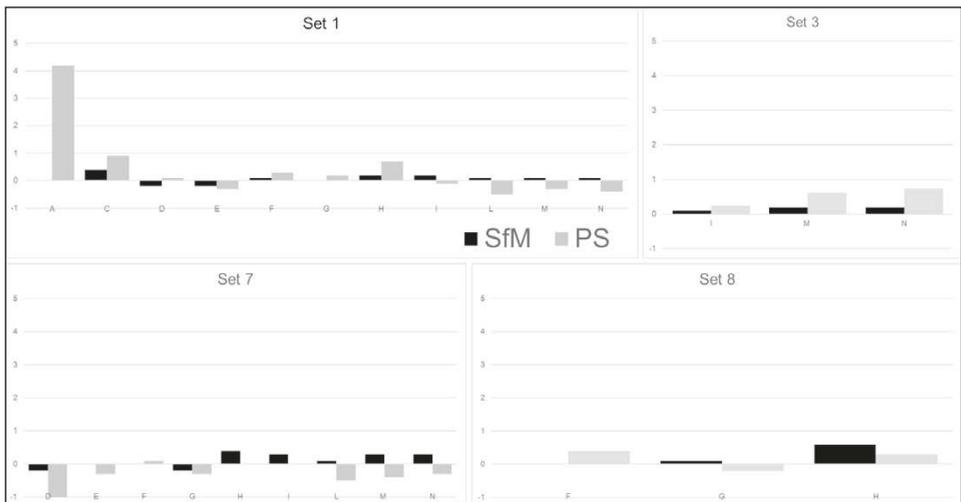


Fig. 7 – Schema delle misure prese sulla roccia e sui modelli 3D: set 1, 3, 7, 8.

della fonte luminosa (flash): al diminuire di questo rapporto, diminuisce anche l'errore generato, perché il modello tende al caso ideale in cui le luci sono virtualmente più vicine alla distanza infinita (cfr. §4.1). Ciò si può notare nel modello PS di set 1, dove l'errore raggiunge più di 4 cm nella misura A, nel

Measures	Physical (in cm)	SfM				PS			
		set 1 SfM	set 3 SfM	set 7 SfM	set 8 SfM	set 1 PS	set 3 PS	set 7 PS	set 8 PS
A	94	94				89,8			
B	63,2	62,8				63,2 u.t.s.			
C	21	20,6		20,3		20,1		21 u.t.s.	
D	19,1	19,3		19,3		19		20,1	
E	9,2	9,4		9,2	9,2	9,5		9,5	9,2 u.t.s.
F	10,5	10,4		10,5	10,5	10,2		10,4	10,1
G	11,7	11,7		11,9	11,6	11,5		12	11,9
H	17,7	17,5		17,3	17,1	17		17,7	17,4
I	5	4,8	4,9	4,7	4,8	5,1	4,75	5	
L	11,1	11	10,9	11	11	11,6	11,1 u.t.s.	11,6	
M	14,2	14,1	14	13,9	14	14,5	13,58	14,6	
N	16,9	16,8	16,7	16,6	16,7	17,3	16,16	17,2	
n. faces		2657991	2296172	5978877	3578174	6098978	6098978	6098978	6098978
n. points		1332065	1150177	2996740	1792684	3053056	3053056	3053056	3053056
		3D model cut		3D model cut	3D model cut				

Tab. 5 – Confronto tra le misure prese sulla roccia e sui modelli PS e SfM (u.t.s = utilizzato per scalare il modello PS).



Tab. 6 – Grafici di confronto delle misure: differenze tra i modelli e la roccia (valori positivi e negativi; tutti i grafici hanno la stessa scala).

modello medio, set 7, l'errore è di 1 cm (misura D), e nei piccoli set 8 e 3 le differenze sono inferiori a 1 cm.

3.5.2 Valutazione della distorsione geometrica

Come è noto, la convessità a cupola presenta una maggiore deviazione dalla superficie rocciosa reale nella zona centrale del modello PS, a causa degli effetti delle sorgenti luminose non ideali nelle ricostruzioni (VANZI *et al.* 2016). Poiché le misure possono differire leggermente da un modello all'altro, per quantificare l'effetto di curvatura è stato calcolato un indice di sovralongazione, per stimare tramite un valore numerico la differenza tra i due modelli.

In ogni set, per ogni coppia di superfici ricostruite, sono stati scelti punti omologhi, vicini ai margini dei modelli, per tracciarne dei profili grafici; questi

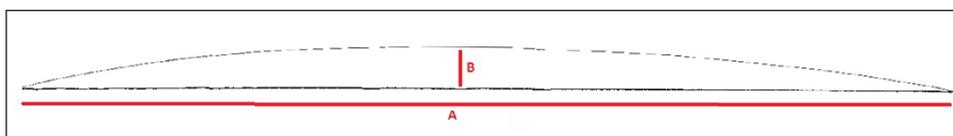


Fig. 8 – Descrizione delle misure prese per calcolare la sovra-elongazione (in percentuale).



Fig. 9 – Esempio di profili sovrapposti da set 1, dove l'effetto di curvatura è evidente.

Dataset	Overelongation (percentage)
SET 1	4.8%
SET 7	4%
SET 8	3.7%

Tab. 7 – Valori di sovraelongazione (B×100)/A.

	PS	SfM
Instruments	camera+tripod+flash and battery	camera
Light absence or scarcity (or presence of mobile shadows)	yes	difficult
Large surfaces	no	yes
Complex surfaces	no	yes
Surface - volume	2.5D	∞ 3D
Image processing speed	from seconds to few minutes	from minutes to several hours and more elaboration processes
Details accuracy	yes	affected by image quality
Thin traces (i.e. burin scratches)	yes	affected by image quality
Geometric accuracy	camber effect	yes
Texture	albedo	orthophoto, photos, tiled model
Orthomosaic	no	yes

Tab. 8 – Sintesi delle principali caratteristiche di PS e Agisoft Photoscan/Metashape.

sono stati sovrapposti sull'asse verticale, grazie ai punti omologhi, per evidenziarne la differenza data dalla bombatura. La differenza in altezza del profilo PS, rispetto a quello SfM, è stata calcolata in percentuale nel punto centrale dove la curvatura è maggiore, assumendo che la SfM non sia affetta da distorsioni: $(B \times 100) / A$ (Fig. 8). Di conseguenza, la sovraelongazione è leggermente più alta quando vengono ricostruite aree ampie (Tab. 7; Fig. 9), confermando quanto già notato per le distanze euclidee (§4.5.1; Tabb. 5-6; Fig. 7).

3.5.3 Conclusioni dei test sulle geometrie

Due dei principali problemi che influiscono sulla ricostruzione tridimensionale sono il sottocampionamento e il numero di livelli di grigio o, nel caso di immagini a colori, il numero di livelli rosso-verde-blu. La cosiddetta pixelatura in PS non riguarda solo il dominio x, y, ma anche la ricostruzione del dominio z, profondità (MANNU *et al.* 2015). La curvatura dell'area centrale (bombatura) nei modelli PS è oggettiva ed è evidente anche nella percezione della superficie. Costituisce un rilevante problema di accuratezza nella proiezione bidimensionale delle forme, ovvero quando si utilizzano questi modelli come rappresentazioni geometriche per realizzare planimetrie o profili. D'altra parte, se il modello PS è più dettagliato e ci permette di individuare (e disegnare) ogni piccola e sottile traccia e la sequenza dei segni, può rivelarsi un utile

strumento di ricerca se integrato ad altre tecniche di documentazione, come il rilievo topografico della superficie generale, le immagini vettoriali (tracciate a mano o automaticamente: cfr. CASSEN *et al.* 2014; JALANDONI, SHUKER 2021) ma, prima di tutto, la documentazione tradizionale: foto, frottage e rilievi a contatto (PEDERGNANA, CAVULLI 2015; ARCÀ 2022).

4. CONCLUSIONI E SOLUZIONI

Le tecniche fotogrammetriche realizzano modelli 3D accurati, sono facili da usare e utilizzano software relativamente economici; per queste ragioni hanno larga applicazione in campo archeologico. La sperimentazione condotta ha coinvolto solo due differenti algoritmi per l'elaborazione fotogrammetrica di superfici (2.5D), evidenziandone le caratteristiche, le criticità e i limiti. La tecnica SfM ha tempi di elaborazione piuttosto lunghi e risente in modo particolare dei problemi di luce nelle riprese fotografiche. Agisoft Metashape è un software completo che dà la possibilità di georeferenziare i modelli e creare ortofotomosaici, DEM, isoipse. Uno dei principali vantaggi del metodo PS è la ricostruzione della nitidezza delle tracce, la ricchezza di piccoli dettagli e la possibilità dell'albedo in uscita, ma le superfici ricostruite sono affette da una distorsione convessa al centro (bombatura).

Le incisioni rupestri in generale, e nello specifico la tecnica a graffito, rappresentano una classe peculiare di manufatti che necessitano di uno sforzo specifico e di un occhio allenato ad apprezzare le evidenze altrimenti invisibili, ma queste rimangono solo un dato soggettivo, relegato all'interpretazione del ricercatore, se non si possono documentare. Allo stesso modo, la sovrapposizione dei segni e delle diverse figure, come le croci e l'elemento podomorfo o la roncola che abbiamo preso in considerazione, merita una specifica analisi oggettiva che, lungi dall'essere completamente risolta dalla documentazione 3D, è meno affetta da pregiudizi e meglio descritta dalla rappresentazione tridimensionale (oltre alla possibilità di essere messa a disposizione dell'intera comunità scientifica), rispetto alla mera osservazione autoptica e alla soggettività del singolo ricercatore.

Lo studio delle incisioni rupestri necessita di un dettaglio più accurato rispetto ad altri lavori archeologici perché, per la prima volta, grazie a profili/sezioni trasversali e ingrandimenti di superficie, la ricerca può essere supportata da una descrizione di buona qualità in grado di dimostrare le interpretazioni, le sovrapposizioni e le intuizioni suggerite dall'archeologo (PLISSON, ZOTKINA 2015). Per questa proposta, la PS è una buona tecnica, soprattutto se applicata a tecniche microscopiche o a immagini ad alta risoluzione, per generare profili in grado di analizzare quale segno cancella l'altro e, quindi, la sequenza delle incisioni. Questo è stato il caso di Pianaùra, dove la connessione tra la croce e il podomorfo era controversa: nel modello 3D

dettagliato, il primo elemento si sovrappone in modo piuttosto convincente al secondo.

È evidente che non esiste la ricostruzione perfetta o un software perfetto, ma la qualità del dato è strettamente legata agli obiettivi della ricerca e all'uso che si vuol fare delle ricostruzioni. Il modello utilizzato per la comunicazione/musealizzazione o per lo studio della cronologia relativa dei segni può essere dettagliato, ma non geometricamente perfetto, mentre le superfici costruite per analizzare e misurare le incisioni rupestri devono rispettare accuratamente forme e volumi reali. Quindi, per il disegno geometrico, lo studio quantitativo delle incisioni e la ricostruzione museale di grandi aree (o oggetti), SfM dà risultati migliori.

Anche se il modello 3D acquisisce sempre maggiore rilevanza nel campo della documentazione archeologica e artistica (e non solo) per via della sua ricchezza descrittiva e nonostante il crescente sviluppo dei Sistemi Informativi Geografici basati sulla gestione dello spazio in 2.5 o 3D (voxel), la documentazione archeologica e le analisi spaziali si basano ancora ampiamente su ortomosaici, curve di livello, DEM e vettori (spesso non 3D), oltre che sui tradizionali rilievi fotografici e iconografici 2D. Il dettaglio e l'accuratezza di queste elaborazioni bidimensionali rimangono la parte più importante della documentazione e quella che meglio si integra ancora con il sistema di documentazione attualmente utilizzato e diffuso.

In attesa che si sviluppino sistemi di documentazione e analisi realmente 3D e di facile utilizzo, la soluzione ideale potrebbe essere quella di utilizzare la tecnica SfM per ricostruire i contesti di grandi dimensioni e PS per ricostruire le aree di dettaglio. I modelli elaborati separatamente, infatti, possono essere integrati in una sorta di superficie patchwork finale che riassume le migliori caratteristiche delle due tecniche.

FABIO CAVULLI*

Dipartimento di Studi Umanistici
Università degli Studi di Napoli Federico II
fabio.cavulli@unina.it

CARLA MANNU, MASSIMO VANZI

Dipartimento di Ingegneria Elettronica
Università degli Studi di Cagliari
ca.mannu@gmail.com, vanzi@diee.unica.it

MICHELE MAZZURANA

Dipartimento di Lettere e Filosofia, LaBAAF
Università degli Studi di Trento
mazzurana.michele@gmail.com

* Corresponding Author

BIBLIOGRAFIA

- ARCÀ A. 2022, *Metodi di studio: novità e tradizione nell'arte rupestre della Lombardia e dell'arco alpino*, in *Preistoria e Protostoria della Lombardia, Atti LII Riunione Scientifica IIPP (Milano 2017)*, «Rivista di Scienze Preistoriche», 72, S2, 327-345.
- BARSKY S., PETROU M. 2003, *The 4-source photometric stereo technique for three dimensional surfaces in the presence of highlights and shadows*, «IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence», 25, 10, 1239-1252.
- BEZZI A., BEZZI L., BENJAMIN D. 2011, *Computer vision e Structure from Motion, nuove metodologie per la documentazione archeologica tridimensionale: un approccio aperto*, in G. DE FELICE, M.G. SIBILANO (eds.), *V ArcheoFOSS Open Source, Free Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica (Foggia 2010)*, Bari, Edipuglia, 103-111.
- CASSEN S., LESCOPEL L., GRIMAUD V., ROBIN G. 2014, *Complementarity of acquisition techniques for the documentation of Neolithic engravings: Lasergrammetric and photographic recording in Gavrinis passage tomb (Brittany, France)*, «Journal of Archaeological Science», 45, 126-140 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.02.019>).
- CAVULLI F. 2023, *In the sign of the billhook. The rock engravings around Stivo-Bondone mountain group (Trento) between figurative culture and landscape*, in D. SIGARI, R. GRIFONI CREMONESI, A. MARIA TOSATTI (eds.), *XII IAPP Abstract Book - XII Annual Meeting of Prehistory and Protohistory, New Discoveries and Progress in the Tracing and Analysis Methodologies of the Post-Palaeolithic Rock Art in Italy (Camaione 2023)* (https://www.iipp.it/wp-content/uploads/2023/05/Abstract-Book_IAPP12.pdf).
- CAVULLI F., AVELLA R., FUSCONE A., CAROSI S., PACCIARELLI M. 2022, *Prima campagna di scavo alla Grotta dei Moscerini, località Don Simone, Canino (VT)*, in F. CAVULLI (ed.), *Come Federico opera sul campo 2021, Atti del Convegno (Napoli 2021)*, «Quaderni della Scuola di Specializzazione in Beni Archeologici», 53-71.
- CHANDLER J.H., BRYAN P., FRYER J.G. 2007, *The development and application of a simple methodology for recording rock art using consumer-grade digital cameras*, «The Photogrammetric Record», 22, 10-21 (<https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2007.00414.x>).
- CHRISTIANSEN P.H., SHAPIRO L.G. 1994, *Three-dimensional shape from color photometric stereo*, «International Journal of Computer Vision», 13, 2, 213-337 (<https://doi.org/10.1007/BF01427152>).
- COLEMAN E.N., JAIN R. 1992, *Obtaining 3-dimensional shape of textured and specular surfaces using four source photometry*, «Computer Graphics and Image Processing», 18, 309-328 ([https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90001-6](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90001-6)).
- CURCI A., URZIA A. 2012, *Verso un sistema integrato di documentazione dell'arte rupestre. L'esperienza AKAP (Egitto)*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 2.0, Atti del Workshop (Bologna 2012)*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 247-260 (<https://www.archcalc.cnr.it/journal/id.php?id=621>).
- DEFRASNE C. 2014, *Digital image enhancement for recording rupestrian engravings: Applications to an alpine rockshelter*, «Journal of Archaeological Science», 50, 31-38 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2014.06.010>).
- DE REU J., PLETS G., VERHOEVEN G., DE SMEDT P., BATS M., CHERRETTÉ B., DE MAEYER W., DECONYNCK J., HERREMANS D., LALOO P. 2013, *Towards a three-dimensional cost effective registration of the archaeological heritage*, «Journal of Archaeological Science», 40, 1108-1121 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.08.040>).
- DESSÌ R., MANNU C., RODRIGUEZ G., TANDA G., VANZI M. 2015, *Recent improvements in photometric stereo for rock art 3D imaging*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 2, 2-3, 132-139 (<https://doi.org/10.1016/j.daach.2015.05.002>).
- DÍAZ-GUARDAMINO M., GARCÍA SANJUÁN L., WHEATLEY D., RODRÍGUEZ ZAMORA V. 2015, *RTI and the study of engraved rock art: A re-examination of the Iberian south-western stelae of Setefilla and Almadén de la Plata 2 (Seville, Spain)*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 2, 41-54 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2015.07.002>).

- DOMINGO SANZ I. 2014, *Rock art recording methods: From traditional to digital*, in C. SMITH (ed.), *Encyclopaedia of Global Archaeology*, New York, Springer, 6351-6357 (https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2_1277).
- GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., MENNA F., RIZZI A. 2008, *3D Modeling of large and complex site using multi-sensor integration and multi-resolution data*, in M. ASHLEY, S. HERMON, A. PROENCA, K. RODRIGUEZ-ECHAVARRIA (eds.), *Proceedings of the 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST 2008 (Braga 2008)*, Goslar (Germany), The Eurographics Association, 85-92.
- HORN C., PETERNELL M., LING J., GREEN A., POTTER R. 2024, *Chapter 6. Rock art in three dimensions: Comments on the use and possibilities of 3D rock art documentation*, in M. HOSTETTLER, A. BUHLKE, C. DRUMMER, L. EMMENEGGER, J. REICH, C. STÄHELI (eds.), *The 3 Dimensions of Digitalised Archaeology. State-of-the-art, Data Management and Current Challenges in Archaeological 3D-Documentation*, Springer, 87-108 (<https://doi.org/10.1007/978-3-031-53032-6>).
- JALANDONI A. 2021, *An overview of remote sensing deliverables for rock art research*, «Quaternary International», 572, 131-138 (<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.10.008>).
- JALANDONI A., DOMINGO I., TAÇON P. 2018, *Testing the value of low-cost Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry for metric and visual analysis of rock art*, «Journal of Archaeological Science Reports», 17, 605-616 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.12.020>).
- JALANDONI A., SHUKER J. 2021, *Automated tracing of petroglyphs using spatial algorithms*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 22, e00191 (<https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00191>).
- KOUTSOUDIS A., VIDMAR B., ARNAOUTOGLU F. 2013, *Performance evaluation of a multi image 3D reconstruction software on a low-feature artefact*, «Journal of Archaeological Science», 40, 4450-4456 (<https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.07.007>).
- LYMER K. 2015, *Image processing and visualisation of rock art laser scans from Loups's Hill, County Durham*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 2, 155-165 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2015.01.002>).
- LUCAS B.D., KANADE T. 1981, *An interactive image registration technique with an application in stereo vision*, in P.J. HAYES (ed.), *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81) (Vancouver 1981)*, Los Altos (<https://www.ijcai.org/proceedings/1981-1>), 647-679.
- MANNU C., RODRIGUEZ G., TANDA G., VANZI M. 2015, *Nuovi sviluppi nelle tecniche di stereofotometria 3D di incisioni e rilievi. Applicazioni nella tomba XV di Sos Furrighesos, Sardegna*, in F. TROLETTI (ed.), *Prospect for the Prehistoric Art Research, Proceedings of XXVI Valcamonica Symposium 2015*, Capo di Ponte, CCSP, 285-288.
- PEDERGNANA N., CAVULLI F. 2015, *Un approccio multilayered alla documentazione e interpretazione dell'arte rupestre. L'integrazione delle tecniche di rilievo a Pianaura (Massone, Arco di Trento)*, in F. TROLETTI (ed.), *Prospect for the Prehistoric Art Research, Proceedings of XXVI Valcamonica Symposium 2015*, Capo di Ponte, CCSP, 63-68.
- PEDERGNANA N., CAVULLI F. 2021, *La via segnata: Pianaura e le incisioni rupestri nel paesaggio del Monte Stivo (TN)*, in F. CARRERA, R. GRIFONI CREMONESI, A.M. TOSATTI (eds.), *L'arte rupestre nella penisola e nelle isole italiane: rapporti tra rocce incise e dipinte, simboli, aree montane e viabilità. Rock art in the Italian Peninsula and Islands: Issues about the Relation between Engraved and Painted Rocks, Symbols, Mountain Areas and Paths. Atti del 20th International Rock Art Congress IFRAO 2018 - sessione H2*, Oxford, Archaeopress, 31-60.
- PLISSON H., ZOTKINA L.V. 2015, *From 2D to 3D at macro-and microscopic scale in rock art studies*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 2, 102-119 (<https://doi.org/10.1016/j.daach.2015.06.002>).
- REMONDINO F., CAMPANA S. (eds.) 2014, *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and Best Practices*, BAR International Series 2598, Oxford, Archaeopress.

- REMONDINO F., RUSSO M., RIZZI A., VOLTOLINI F., MENNA F., FRANCESCO FASSI F., ERCOLI S., MASCI M.E., BENEDETTI B. 2008, *A multi-resolution methodology for archaeological survey: The Pompeii Forum*, in M. IOANNIDES, A. ADDISON, A. GEORGOPOULOS, L. KALISPERI (eds.), *14th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM) (Limassol, Cyprus, 2008)*, Eindhoven, Eurographics Publishing, 51-59.
- RIVERO O., RUIZ-LOPEZ J.F., INTXAURBE I., SALAZAR S., GARATE D. 2019, *On the limits of 3D capture: A new method to approach the photogrammetric recording of palaeolithic thin incised engravings in Atxurra Cave (northern Spain)*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 14, e00106 (<https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00106>).
- ROBERT E., EGELS Y., BOCHE E., PEYROUX M., VIALOU D., PAILLET P., VIGEARS D. 2014, *Applications 3D pour la contextualisation et le relevé d'art en grotte ornée*, in L. COSTA, F. DJINDJIAN, F. GILIGNY (eds.), *Actes des 3^{èmes} Journées d'Informatique et Archéologie de Paris, JIAP 2012*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 5, 88-101 (<https://www.archcalc.cnr.it/journal/id.php?id=734&sup=true>).
- ROBERT E., VIGEARS D., MELARD N., PAILLET P., VIALOU D., EGELS Y. 2012, *L'apport de la 3D dans l'art préhistorique: analyse et restitution des images et de leurs supports, exemples croisés des sites de Blanchard (La Garenne) et la Marche*, in F. GILIGNY, L. COSTA, F. DJINDJIAN, P. CIEZAR, B. DESACHY (eds.), *Actes des 2^{èmes} Journées d'Informatique et Archéologie de Paris, JIAP 2010*, «Archeologia e Calcolatori», Suppl. 3, 339-354 (<https://www.archcalc.cnr.it/journal/id.php?id=653&sup=true>).
- RONDINI P. 2018, *Digital Rocks. An integrated approach to rock arte recording: The case study of Ossimo-Pat (Valle Camonica)*, *Monolith 23*, «Archeologia e Calcolatori», 29, 259-278 (<https://doi.org/10.19282/ac.29.2018.21>).
- VANZI M., BAGNOLI P.E., MANNU C., RODRIGUEZ G. 2016, *Photometric stereo 3D visualisation of rock-art panels, bas-reliefs, and graffiti*, in S. CAMPANA, R. SCOPIGNO, G. CARPENTIERO, M. CIRILLO (eds.), *CAA2015. Keep the Revolution Going, Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Application (Siena 2015)*, Oxford, Archaeopress, 1059-1065.
- VANZI M., TANDA G., MANNU C. 2013, *Stereofotometria per la documentazione in 3D di incisioni e rilievi. Applicazioni nell'arte preistorica della Sardegna*, in *Proceedings of XXV Valcamonica Symposium*, Capo di Ponte, CCSP, 155-160.
- WILLIAMS K., TWHIG E.S. 2015, *From sketchbook to structure from motion: Recording prehistoric carvings in Ireland*, «Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage», 2, 120-131.
- WOODHAM R.J. 1980, *Photometric method for determining surface orientation from multiple images*, «Optical Engineerings», 19, 1, 139-144 (<https://doi.org/10.1117/12.7972479>).

ABSTRACT

3D modelling represents a fundamental survey technique to represent archaeological evidence. It is particularly important to draw and analyse engravings because it is more descriptive and, somehow, objective than traditional drawings, which result interpretative and not replicable, becoming a debatable and often controversial matter. A technique able to verify the overlaying of signs is essential to establish the relative sequence, thus the chronology of engravings. However, there are several techniques and they provide different results. The paper tries to empirically compare SfM and PS methods to understand how they work on surface representation and which are their specificities in a difficult context such as the Pianaùra engravings. The aim of the paper is to verify the accuracy of the techniques. Three paths are pursued: the first analyses pure quantitative data, such as counting the number of points or faces built and so on; the second aims to verify quantitatively distortions by geometric measurements analysis; the third is a visual quality test, which focuses on users' perception of 3D models. It can be concluded that the distinct fields of application and the diverse purposes of the research enhance the different specificities of the two techniques.