



## **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento di agronomia animali alimenti risorse naturali e ambiente  
Dipartimento dei Beni Culturali

Corso di laurea magistrale in Scienze e Tecnologie  
per l'Ambiente e il Territorio

*Enhancement* di incisioni rupestri e loro valorizzazione  
nel paesaggio archeologico. *Case study*: i territori  
d'alta quota della Regola Granda di San Vito di Cadore (BL)

Relatore  
Prof. Giuseppe Salemi  
Correlatore  
Dott.ssa Emanuela Faresin

Laureanda  
Chiara Dalla Pozza  
Matricola n. 1082109

ANNO ACCADEMICO 2014 – 2015



## ABSTRACT

La tutela del paesaggio, in quanto frutto delle interazioni tra uomo e natura, è un argomento molto attuale, soprattutto se finalizzato alla salvaguardia di aree soggette a rovinosi eventi naturali.

In questo lavoro si è deciso di intervenire nelle frazioni d'alta quota del comune montano di San Vito di Cadore (BL), recentemente interessato da importanti frane. Gli alti pascoli sanvitesi ospitano infatti numerose incisioni rupestri, testimonianze importanti della frequentazione antropica in epoche preistoriche. Attraverso una campagna di rilievi fotogrammetrici, sia da terra che da quota, è stato possibile creare un archivio di modelli tridimensionali dei reperti rocciosi che ospitano le incisioni, utili come testimonianza per il futuro e come strumento di studio per i ricercatori che ogni anno compiono ricognizioni in questi territori. Si è scelto inoltre di valorizzare alcuni ritrovamenti applicando differenti tecniche di *image processing*, quali le *Reflectance Transformation Imaging* e l'utilizzo di filtri di *edge detection*, che hanno reso visibili incisioni rupestri altrimenti non valutabili con analisi autoptiche e tradizionali. Ciò consentirà di avere un *database* statisticamente più significativo dei segni rupestri incisi in questo contesto.

Il lavoro svolto è stato infine affiancato ai rilievi tradizionali eseguiti in precedenza, per un continuo e importante confronto tra diverse metodologie di indagine.

*The protection of the landscape, as the result of interactions between man and nature, is a very relevant argument nowadays, especially if aimed at safeguarding of areas prone to disastrous natural events. In this work it was decided to intervene in the high altitude areas of San Vito di Cadore (BL), recently affected by major landslides. In the surrounding meadows were found lots of petroglyphs, important evidence of human attendance in prehistoric ages. Through a campaign of photogrammetric surveys, either from the ground and from altitude, it was possible to create an archive of three-dimensional models of the petroglyphs. It will be useful as a testimony for the future, and as a tool for researchers who, year after year, keep coming to this territory for expeditions. We also chose to highlight some findings by applying different image processing techniques, such as the Reflectance Transformation Imaging and the use of edge detection filters, that made visible the petroglyphs, not assessable otherwise with autoptic and traditional analysis. This will permit to have a statistically more significant database of the petroglyphs of this land. The work was finally combined to the traditional surveys performed previously, for a continual and important comparison between different survey methodologies.*



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>7</b>
<b>CAPITOLO 1 – IL TERRITORIO DI SAN VITO DI CADORE</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Il Cadore</b>	<b>9</b>
1.1.1 Inquadramento geografico	9
1.1.2 Le Dolomiti	10
1.1.3 Caratteristiche ambientali	11
1.1.4 La Magnifica Comunità di Cadore	12
1.1.5 Le Regole Cadorine	12
<b>1.2 San Vito di Cadore</b>	<b>13</b>
1.2.1 Il comune di San Vito di Cadore	13
1.2.2 Inquadramento amministrativo: Le Regole di San Vito di Cadore	14
1.2.3 Inquadramento storico: San Vito, territorio di conquiste	15
1.2.4 L'antico confine tra Ampezzo e San Vito di Cadore	16
<b>1.3 La Muraglia del Giau</b>	<b>17</b>
1.3.1 Caratteristiche della Muraglia	17
1.3.2 La Muraglia oggi	17
<b>1.4 Il Sasso Rosso</b>	<b>19</b>
1.4.1 Ubicazione e Descrizione	19
1.4.2 Le incisioni	20
1.4.3 I segni di confine	21
1.4.4 I "Segni di Case"	22
<b>1.5 La Piana delle Baste</b>	<b>23</b>
1.5.1 Descrizione dell'area	23
1.5.2 Le incisioni circolari	23
1.5.3 La Lasta de Mondeval	24
<b>1.6 Il sito di Mondeval</b>	<b>25</b>
1.6.1 Descrizione dell'area	25
1.6.2 Il sito Mesolitico e l'uomo di Mondeval	26
Bibliografia	28
<b>CAPITOLO 2 – IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO</b>	<b>29</b>
<b>2.1 Introduzione</b>	<b>29</b>
<b>2.2 La fotogrammetria</b>	<b>29</b>
2.2.1 Definizione del metodo	29
2.2.2 Sviluppo storico della fotogrammetria	30
2.2.3 Principi e aspetti teorici	32
2.2.4 Diverse tipologie di fotogrammetria	33
2.2.5 La Fotogrammetria terrestre	34
2.2.6 La Fotogrammetria aerea	34
<b>2.3 Dal rilievo fotogrammetrico alla modellazione 3d</b>	<b>36</b>
2.3.1 Pianificazione del lavoro	36
2.3.2 Strumenti utilizzati	36
2.3.3 Il software Agisoft Photoscan	39
2.3.4 Pipeline di ricostruzione	39
2.3.5 Funzioni aggiuntive di Agisoft Photoscan	43
Bibliografia	44

<b>CAPITOLO 3 – CASO STUDIO: I RILIEVI ESEGUITI</b>	<b>45</b>
<b>3.1 Introduzione</b>	<b>45</b>
<b>3.2 Rilievo 1: le incisioni circolari</b>	<b>45</b>
3.2.1 I soggetti del rilievo	45
3.2.2 Dati del rilievo e problematiche affrontate	47
3.2.3 La ricostruzione tridimensionale	48
<b>3.3 Rilievo 2: il Sasso Rosso</b>	<b>52</b>
3.3.1 Il soggetto del rilievo	52
3.3.2 Dati del rilievo e problematiche affrontate	52
3.3.3 La ricostruzione tridimensionale	53
<b>3.4 Rilievo 3: il sito di Mondeval de Sora</b>	<b>56</b>
3.4.1 Il soggetto del rilievo	56
3.4.2 Dati del rilievo e problematiche affrontate	56
3.4.3 La ricostruzione tridimensionale	57
<b>CAPITOLO 4 – DIGITAL IMAGE PROCESSING</b>	<b>61</b>
<b>4.1 Introduzione</b>	<b>61</b>
<b>4.2 Reflectance Transformation Imaging</b>	<b>62</b>
4.2.1 Definizione	62
4.2.2 Acquisizione dei dati	63
4.2.3 Il software RTIbuilder	64
4.2.4 Il software RTIviewer	67
4.2.5 L'incisione cruciforme: risultati e problematiche affrontate	68
<b>4.3 Utilizzo di filtri</b>	<b>70</b>
4.3.1 Introduzione	70
4.3.2 Edge Detection	70
4.3.3 Il software Gimp	71
4.3.4 Il reperto SV317: risultati e problematiche	72
4.3.5 Il software Meshlab	73
4.3.6 Edge detection da modello tridimensionale: i risultati ottenuti	74
Bibliografia	79
<b>CONCLUSIONI</b>	<b>81</b>

## INTRODUZIONE

*"Paesaggio designa una determinata parte del territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interazioni"*

(Convenzione Europea del Paesaggio, Capitolo 1, Art. 1, Lettera A).

La Convenzione Europea del Paesaggio è un documento adottato dal Comitato dei Ministri della Cultura e dell'Ambiente del Consiglio d'Europa il 20 ottobre 2000.

È stata firmata da 27 stati della Comunità Europea e ratificata da dieci, tra cui l'Italia nel 2006. Oltre a dare una definizione univoca di paesaggio, dispone i provvedimenti in termini di riconoscimento e tutela che gli stati membri si impegnano ad applicare.

Da questa definizione del termine emerge la sua natura antropica, ovvero l'importanza ricoperta dal ruolo dell'azione umana caratterizzandolo nel suo aspetto formale, estetico e percettivo.

Questa tesi si propone di approfondire le diverse tecniche di rilievo fotografiche applicate ad un contesto montano d'alta quota nel territorio delle Regole di San Vito di Cadore (BL).

Il territorio sanvitese nell'estate 2015 è stato oggetto di importanti frane che hanno coinvolto sia aree d'alta quota che il centro abitato posto a valle, recando ingenti modificazioni ambientali e mettendo a rischio una serie di ritrovamenti archeologici della zona frutto dell'interazione tra uomo e natura.

Le tecniche utilizzate in questo lavoro, che rientrano nella moderna disciplina della Geomatica, sono oggi di importanza fondamentale per fornire un supporto in fase di rilievo e di rappresentazione a coloro che intendono compiere indagini sul territorio, sia di carattere culturale che ambientale.

Queste nuove tecnologie sono finalizzate ad una migliore fruizione del dato indagato e ad una corretta progettazione per la conservazione dello stesso, permettendo la creazione di un archivio di modelli 3D estremamente dettagliati che, nel caso di catastrofici eventi naturali, si dimostrano di fondamentale importanza.

Le informazioni ottenute con tecniche di questo tipo sono metricamente accurate e permettono una documentazione precisa dell'oggetto di indagine rappresentando, quindi, un valido aiuto alle più svariate tipologie di ricognizioni sul territorio, da quella ambientale-paesaggistica a quella archeologica e fungono, allo stesso tempo, da testimonianza per il futuro.

I soggetti presi in considerazione per questo lavoro sono, nello specifico, una serie di incisioni rupestri rinvenute all'interno del territorio comunale di San Vito di Cadore e oggetto di studio da parte del Progetto Cednea<sup>1</sup>, il cui obiettivo è la documentazione naturalistica, etnografica ed archeologica dell'area dolomitica in esame, al fine di creare un centro espositivo e di ricerca dedicato ad un territorio ricco sia dal punto di vista ambientale che storico-culturale. Queste incisioni ben rappresentano l'interazione antropica con questo territorio e ne testimoniano la frequentazione in periodi preistorici.

Lo scritto è così organizzato:

- Il primo capitolo presenta un inquadramento geografico e amministrativo dell'area in esame, utile a collocare i reperti esaminati e a comprenderne la disposizione.
- Nel secondo capitolo vengono spiegate le principali tecniche utilizzate, gli strumenti necessari e il funzionamento delle piattaforme software adoperate per l'elaborazione dei dati.
- Il capitolo terzo presenta i modelli tridimensionali dei reperti rilevati mediante fotogrammetria.
- Il capitolo quarto contiene un approfondimento dedicato all'*image processing* e alla sua applicazione sui dati rilevati.

Per concludere è necessario sottolineare l'importanza di un approccio complementare e integrato tra le tecniche di rilievo e di elaborazione utilizzate, soprattutto se applicate ad un ambito così particolare come quello in oggetto, dove ogni situazione presenta specificità e problematiche diverse.

---

<sup>1</sup> Il CEDNEA è un progetto di ricerca le cui finalità sono la creazione di un centro espositivo e di documentazione naturalistica, etnografica ed archeologica di San Vito di Cadore (BL).  
[www.cednea.it](http://www.cednea.it)



# CAPITOLO 1

## IL TERRITORIO DI SAN VITO DI CADORE

### 1.1 IL CADORE

#### 1.1.1 Inquadramento geografico

Il Cadore è un territorio storico italiano situato nell'alta provincia di Belluno, appartiene alla zona montuosa delle Dolomiti Orientali e confina con Austria (Tirolo e Carinzia), Trentino Alto Adige e Friuli Venezia Giulia. Come regione geografica comprende il bacino del fiume Piave, dalla sua sorgente sul Monte Peralba alla località di Termine di Cadore<sup>1</sup>.

La linea di confine segue lo spartiacque dell'intero bacino:

- Verso EST: partendo da Termine seguendo i monti che dividono il Cadore dalla Carnia, il Duranno, gli Spalti di Toro, il Cridola e la Terza Grande.
- Verso NORD: da Cima Sappada al Monte Peralba, fino al valico di Monte Croce Comelico. La linea continua verso il Monte Popera, la Croda dei Toni, le Tre Cime di Lavaredo fino al Monte Cristallo e alla Croda Rossa.
- Verso OVEST: è diviso dalla Val Pusteria e dalla Val Badia dallo spartiacque composto da Croda del Becco, Fanes, Monte Cavallo, fino a raggiungere il Passo Falzarego.
- È separato inoltre dalle zone dell'Agordino e della Val Zoldana dai fiumi Maè e Cordevole, e dai maestosi Nuvolau, Pelmo e Bosconero.

Il Cadore infine viene generalmente suddiviso in sub-territori, regioni minori che hanno origine storica più che geografica:

- Basso Cadore: la parte occidentale da Termine a Perarolo fino a Valle, dove il canale del Piave arriva al tratto terminale del Boite.
- Centro Cadore: il versante destro del fiume Piave, dall'inserimento del fiume Boite, ovvero la zona di Pieve di Cadore, Calalzo, Domegge e Lozzo.
- Oltrepiave: il versante sinistro del Piave che comprende Vigo, Lorenzago, fino alle Tre Cime di Lavaredo.
- Comelico: l'alta valle del Piave, da Santo Stefano verso Sappada.
- Sappada: sotto il Monte Peralba fino al valico di Cima Sappada e alle sorgenti del fiume Piave sul monte stesso.
- Oltrechiusa: dalla Chiusa di Vena fino ai confini con l'Ampezzano, lungo tutto il corso del fiume Boite.
- Ampezzano: tutto l'alto bacino del Boite.
- Oltremonti: i territori di Selva, Zoppè e Pescul, oltre la Forcella Forada.

---

<sup>1</sup> NERI C., GIANOLLA P., FURLANIS S., CAPUTO R., BOSELLINI A.

## 1.1.2 Le Dolomiti

Le Dolomiti, conosciute anche con il nome di Monti Pallidi, sono un insieme di gruppi montuosi delle Alpi Orientali italiane, tra le province di Belluno, Bolzano, Trento, Udine e Pordenone (Fig. 1.1).

Dal 26 giugno 2009 il Comitato Esecutivo della Convenzione sul patrimonio materiale dell'UNESCO ha dichiarato le Dolomiti Patrimonio dell'Umanità.

Il nome Dolomiti è strettamente legato alla geologia dell'area caratterizzata dalla presenza molto abbondante di rocce contenenti dolomia, così chiamata in onore del naturalista francese Deodat Guy Silvain Tancrede de Dolomieu che, durante i suoi viaggi in Tirolo negli anni tra il 1789 e il 1791, scoprì la nuova roccia molto simile a quelle di origine calcarea.

Il nome Dolomiti venne inizialmente utilizzato solo in modo informale e si impose definitivamente dopo la Prima Guerra Mondiale.

In quest'area la ricerca geologica vera e propria iniziò nel 1820 e la prima descrizione completa delle Dolomiti venne pubblicata nel 1824 ad opera dell'allora celebre geologo tedesco Leopold von Buch.

Un passo fondamentale nella comprensione della zona fu compiuto da Ferdinand Freiherr von Richthofen che, nel 1860, per la prima volta descrisse i grandi massicci montuosi delle Dolomiti come scogliere coralline divenute pietra e li paragonò alle attuali scogliere dell'Oceano Indiano e Pacifico.

La Dolomia ha infatti genesi attraverso accumuli di conchiglie, coralli e alghe calcaree, in ambiente marino e tropicale.

Gli accumuli ebbero inizio nel Triassico, circa 250 milioni di anni fa, in zone marine con latitudine e longitudine diverse dall'attuale localizzazione delle Dolomiti.

I depositi di sedimenti marini raggiunsero dimensioni tali da comprimersi sotto il loro stesso peso perdendo i fluidi interni, formando così la roccia sedimentaria carbonatica Dolomia.

Successivamente, lo scontro tra la placca europea e la placca africana (orogenesi alpina) fece emergere questi gruppi rocciosi, innalzandoli oltre 3000 m sopra il livello del mare.

L'innalzamento delle rocce dolomitiche è tuttora in corso, anche se accompagnato e compensato da continui fenomeni erosivi.

Dal punto di vista geomorfologico il territorio cadorino mostra il caratteristico paesaggio dolomitico, con forme uniche e spettacolari.

Le vette del Cristallo, del Sorapis, del Nuvolau, delle Tofane e tante altre mostrano forma ardite, grandi scarpate subverticali, torri, guglie, creste e pinnacoli<sup>2</sup>.

Queste montagne offrono un singolare contrasto con i dolci pendii sottostanti, sedi di pascoli, boschi e insediamenti abitativi. Tale morfologia è dovuta al concorso di numerose cause tettoniche, litologiche, climatiche e antropiche.

Infine le frane e i dissesti sia antichi che attuali, anche di notevole dimensione, hanno sicuramente influenzato le caratteristiche del paesaggio e l'andamento dei torrenti principali deviandone, e spesso sbarrandone, il corso.

---

<sup>2</sup> COLLESELLI E., SIORPAES C., PONTIN A., DALLA LONGA E., PADOVAN T. 2013.



Figura 1.1 – Le Dolomiti Cadorine.  
Il complesso formato da Becco di Mezzodi, Croda da Lago  
e Lastoi de Formin visto da Mondeval de Sora (2150 m).

### **1.1.3 Caratteristiche ambientali**

Osservando il territorio in esame, dal punto di vista della vegetazione presente, si nota che, come in molte situazioni montane analoghe, fino a circa 1800 m di quota si ha una predominanza di boschi di conifere (abete rosso, abete bianco, pino silvestre), mentre nelle alte quote si trovano quasi esclusivamente boschi di larici e cespuglietti di mughi, accompagnati talvolta da grandi distese adibite a pascolo.

Nelle vallate, al di sotto dei 1200 m, si trovano invece più frequentemente boschi di latifoglie, come faggio, quercia, betulla e nocciolo.

Anche il patrimonio idrico cadorino è molto ricco; il territorio è attraversato principalmente dal Piave e dai suoi affluenti Boite, Ansiei e Padola, oltre a numerosi altri torrenti. È presente infine un numero notevole di laghi che contribuiscono ad una ingente produzione di energia idroelettrica nel bellunese.

### **1.1.4 La Magnifica Comunità di Cadore**

La Magnifica Comunità di Cadore, dal XIV secolo, fu la principale istituzione pubblica del Cadore, dotata di Statuto Cadorino e composta dai rappresentanti dei dieci centenari (suddivisione territoriale amministrativa composta dall'unione di Regole).

La Magnifica Comunità affonda le sue radici nel Medioevo<sup>3</sup> ed è ancora oggi un punto di riferimento per le realtà istituzionali e sociali operanti nel territorio, in quanto erede della storia e dei valori delle generazioni cadorine.

Attualmente raggruppa tutti i comuni del Cadore, con finalità di conservazione dell'identità culturale della regione e delle sue risorse ambientali; Cortina d'Ampezzo, per la sua prolungata appartenenza al Tirolo nel passato, oggi si esclude dalla comunità<sup>4</sup>.

### **1.1.5 Le Regole Cadorine**

Le Regole sono antiche istituzioni fondate sull'aggregazione delle famiglie che storicamente avevano vissuto in un determinato territorio fondando gli odierni centri abitati; ogni nucleo familiare era chiamato alla gestione e al godimento dei beni forniti dal territorio, che risultavano appartenere alla collettività. Tali beni costituivano un patrimonio che non poteva essere venduto, diviso o acquisito per usucapione, al fine di mantenersi intatto nel tempo.

Proprio a questo scopo la legge tutt'ora impone che i beni di proprietà delle Regole rimangano vincolati alle attività tradizionali di tipo agro-silvo-pastorale e che i terreni non subiscano riduzioni di superficie.

I diritti regolieri erano infine trasmessi storicamente per via paterna, ma alcune Regole, adeguandosi ai cambiamenti sociali e culturali, permettono oggi la trasmissione anche per via femminile<sup>5</sup>.

---

<sup>3</sup> FABBIANI G. 1992.

<sup>4</sup> ZANDERIGO ROSOLO G. 1982.

<sup>5</sup> ZANDERIGO ROSOLO G. 1982.

## 1.2 SAN VITO DI CADORE

### 1.2.1 Il comune di San Vito di Cadore

San Vito di Cadore è un comune italiano situato nella provincia di Belluno, confinante con i limitrofi comuni di Cortina, di Borca e di Selva di Cadore e conta circa 1800 abitanti.

Si trova a 1011 m s.l.m. ed occupa una posizione strategica nel cuore delle dolomiti bellunesi (Fig. 1.2).



Figura 1.2 – L'area di San Vito di Cadore, comune montano situato a 1011 m s.l.m. in provincia di Belluno.

Il territorio di San Vito si estende per circa 60 km<sup>2</sup> ed è ospitato in un'ampia conca naturale circondata dalle cime dell'Antelao, della Croda Marcora, delle Marmarole Occidentali, fino ad arrivare al complesso del Pelmo che segna il confine con la vicina Val Fiorentina.

Il fondovalle è percorso dal torrente Boite, che dà il nome alla valle che ospita il comune, Val Boite.

Il comune, circondato da un patrimonio ambientale di indubbia bellezza, cela anche diversi elementi di interesse storico-culturale.

Due caratteristiche chiese sorgono al centro del paese: la pievanale e la chiesetta della Difesa.

La pievanale risale al 1200, ma l'attuale ricostruzione è del 1760; dell'antica chiesa rimane solo l'affresco di San Cristoforo. La chiesa inoltre ospita una pala d'altare ad opera di Francesco Vecellio, fratello del celebre Tiziano.

La chiesetta della Difesa racchiude invece un'abside tardo-gotica che raffigura l'invasione asburgica. Anche questa pala è opera di Francesco Vecellio.

## 1.2.2 Inquadramento amministrativo: Le Regole di San Vito di Cadore

Le Regole di San Vito di Cadore attuali sono tre:

1. La Regola di Vallesella, Resinego e Serdes
2. La Regola di Chiapuzza e Costa
3. La Regola Generale o Regola Granda<sup>6</sup>

Le Regole sono oggi delle organizzazioni sociali dotate di personalità giuridica privata, disciplinate da uno Statuto e da un Regolamento applicativo, nonché dalle tradizionali consuetudini orali e di vita inerenti l'uso e l'amministrazione del patrimonio di proprietà collettiva delle famiglie regoliere originarie (Fig. 1.3).

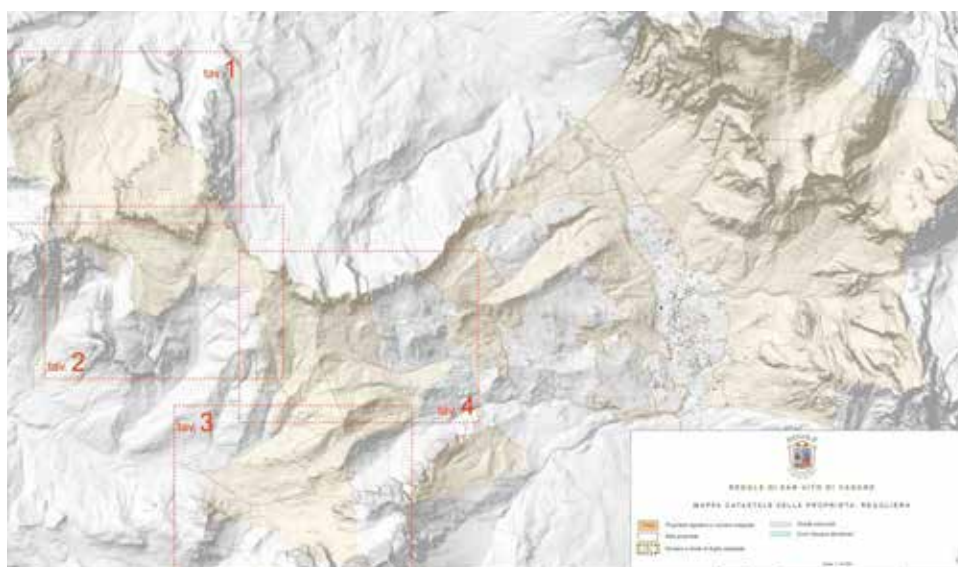


Figura 1.3 – Mappa catastale della proprietà regoliere di San Vito di Cadore. Le Regole sono antiche istituzioni fondate sull'aggregazione delle famiglie storiche del territorio, oggi riconosciute come organizzazioni sociali dotate di personalità giuridica privata.

---

<sup>6</sup> Il lavoro descritto in questa tesi si è interamente svolto nel territorio di proprietà della Regola Granda.

### **1.2.3 Inquadramento storico: San Vito, territorio di conquiste**

L'area oggi occupata dal comune di San Vito risulta fosse frequentata da popolazioni nomadi già in epoche preistoriche, come testimoniano il ritrovamento di un cacciatore mesolitico nel sito di Mondeval de Sora (Regola Granda) e la presenza di iscrizioni epigrafiche in alfabeto venetico nelle aree limitrofe.

I Romani trovarono il territorio già occupato da popolazioni celtiche e attuarono una riorganizzazione dell'area da un punto di vista urbanistico, rurale e viario, che ancora oggi si può osservare.

Successivamente, tra il 500 e il 780 d.C., San Vito fu meta di passaggio dei Longobardi che in quel periodo, caduto l'impero romano, scesero dal nord Europa ed occuparono gran parte dei territori oggi nazionali. Anche in questo caso le testimonianze di questi popoli rimangono nei molti termini delle lingue parlate cadorine con evidente origine longobarda.

Inoltre, fondamentale testimonianza dell'occupazione da parte di popoli nordici nell'area di San Vito, è la presenza di segni epigrafici rinvenuti sul Sasso Rosso, oggetto di rilievo in questo lavoro, che sembrano rifarsi all'alfabeto runico dei popoli germanici.

Il Cristianesimo arriva in Cadore con i Franchi di Carlo Magno e, insieme ad essi, si gode anche dell'ordinamento amministrativo e sociale noto come Vassallaggio Feudale.

Testimonianze di questo periodo resistono senz'altro nella Chiesa di San Floriano nel territorio della Regola di Chiapuzza, della quale oggi rimangono solo i resti, seppur di grande valore artistico, risparmiati dal primo conflitto mondiale.

Fino al 1335 il Cadore divenne feudo dei Conti da Carmino e successivamente, alla morte di Rizzardo da Carmino, erede maschio della dinastia, il Cadore poté darsi uno Statuto. Nel 1338 divenne un'unità autonoma territoriale su base federale basata su un Consiglio Generale formato dai rappresentanti delle famiglie storiche, la struttura Regoliera<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup>FABBIANI G. 1992.

### **1.2.4 L'antico confine tra Ampezzo e San Vito di Cadore**

Nel 1404 i territori che oggi consideriamo facenti parte dell'area del bellunese furono annessi spontaneamente alla Repubblica di Venezia; lo Stato Veneto comprendeva i territori del Cadore e l'area Ampezzana, ma questa supremazia non durò a lungo.

Nel 1511 il Cadore fu invaso dall'Impero Asburgico e, nel riconquistarlo, l'esercito veneto rinunciò ad occupare l'Ampezzo preferendo dirigersi verso i confini Friulani.

Cortina e i territori limitrofi dal 1511 al 1918 furono annessi al Tirolo<sup>8</sup>.

I confini di San Vito e Cortina erano da sempre oggetto di conflitto tra le due comunità, soprattutto per la contesa dei pascoli d'alta quota, in particolare sul Passo Giau, assegnato dopo una lunga diatriba al territorio di San Vito già nel 1333.

Con l'annessione dell'area Ampezzana al Tirolo, il Passo Giau divenne un confine di stato, rendendo ancora più precari gli equilibri territoriali tra le due fazioni.

Nel 1734 Cortina tornò a rivendicare il possesso di quell'ambito pascolo, venne quindi istituita una Commissione Internazionale Austriaco-Veneta, che riunitasi a Rovereto si pronunciò in favore di San Vito di Cadore.

Nel 1752 venne emessa una sentenza che imponeva ai sanvitesi la costruzione a proprie spese di una muraglia da monte a monte per chiudere la valle e sancire definitivamente i confini, impedendo così il passaggio del bestiame<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> RICHEBUONO G. 1974.

<sup>9</sup> RICHEBUONO G. 1968.



## 1.3 LA MURAGLIA DEL GIAU

### 1.3.1 Caratteristiche della Muraglia

La costruzione della Muraglia del Giau, imposta dalla Commissione Internazionale Austriaco-Veneta come segno di confine tra territori della Serenissima e Tirolo, inizia il 24 giugno del 1753 e termina come richiesto nella sentenza il 18 settembre dello stesso anno, esattamente tre mesi dopo.

Nella sentenza si legge:

*"Così la Commissione ferma nel suo principio di impedire in quanto sia possibile ogni promiscuità, ingiunge alla comunità di San Vito già disposta il preciso obbligo di dover a sue proprie spese alzare una marogna di pietra di piedi sei di altezza, grossa al fondo piedi 5 ed in cima 2, la quale sarà condotta da un monte all'altro, principiando dal Sasso isolato della Gusella sino al termine della forzella, per serrare tutta la valle troppo comoda al trapasso degli animali"*

*"Quando poi tal opera di marogna non fosse terminata entro lo spazio di mesi tre dopo la pubblicazione del Trattato nella qui prescritta forma, in tal caso il sito compreso in quella estensione e rappresentato dal disegno avrà da essere venduto o dato in perpetua affittanza dalla Comunità di S. Vito a quella di Ampezzo"*

La Muraglia di pietra, come richiesto nella sentenza, si estendeva dal Becco Muraglia alle Crepe del Formin, aveva un'altezza di circa 80 cm, una larghezza alla base di 150 cm e alla sommità di 60 cm.

Al termine dei lavori si presentava lunga circa 2 km e il costo complessivo dell'opera venne stimato in 6800 mucche<sup>10</sup>.

### 1.3.2 La Muraglia oggi

La Muraglia oggi segnala il confine tra i Comuni di San Vito e Cortina d'Ampezzo (Fig. 1.4)

Numerosi pezzi in pietra, compresi i cippi e le lapidi che conteneva, sono oggi ancora visibili ai tanti escursionisti che decidono di addentrarsi tra i boschi e i prati anticamente contesi tra Veneto e Tirolo.

La porzione sicuramente meglio conservata è quella che ospita il Sasso Rosso (Fig. 1.5), sotto le cime del Ra Gusela, dove sono ancora infisse sulla roccia la coppia di targhe ben conservate raffiguranti l'Aquila dell'Impero Asburgico e il Leone di San Marco (Fig. 1.6).

---

<sup>10</sup> RICHEBUONO G. 1980.



Figura 1.4 – La Muraglia del Giau come appare oggi. Nella maggior parte dei tratti ancora intatti risulta coperta dalla vegetazione ma ben riconoscibile.



Figura 1.5 – L'ottavo cippo della Muraglia, eretto sopra il Sasso Rosso durante la costruzione del muro nel 1753.



Figura 1.6 – Le targhe di confine Tirolo-Veneto, oggi visibili sotto le cime del Ra Gusela.

## 1.4 IL SASSO ROSSO

### 1.4.1 Ubicazione e Descrizione

Il Sasso Rosso, grande masso ora inglobato nel muro, è situato a circa 1900 m di quota nella zona a est del passo Giau, lungo la linea della Muraglia.

Fin dal XIV secolo il Sasso Rosso ha costituito uno dei pochi punti rintracciabili in modo univoco nel confine tra le due aree contese; prima del 1753 emergeva dal prato pianeggiante chiamato Plan de la Saleres o Prà d'Adamo.

Con la costruzione del Muro viene inserito all'interno della costruzione in pietra e tutt'ora ospita l'ottavo di dieci cippi eretti nella Muraglia, che presumibilmente segnavano i punti di certa localizzazione tradizionale del confine.

Il Sasso Rosso è inoltre situato all'incirca nel punto intermedio rispetto ai due capi del Muro.

Si tratta di un'arenaria dalla forma di parallelepipedo romboidale irregolare, allungato in direzione nord-sud e appuntito verso sud; le dimensioni sono all'incirca 3,75 m x 2,10 m x 1,5 m.

La faccia superiore ha una leggera inclinazione verso ovest e conserva la superficie originaria, liscia, a grana fine e colorazione rossastra.

Qui si trova la maggior parte delle incisioni, che non presentano differenze di patina rispetto al colore della roccia (Fig. 1.7).



Figura 1.7 – Il Sasso Rosso, masso in arenaria situato a circa 1900 m nel Plan de la Saleres. Ospita numerose incisioni catalogate in 190 gruppi differenti.

## 1.4.2 Le incisioni

Le incisioni del Sasso Rosso sono catalogate in circa 190 gruppi, eseguite per la maggior parte dei casi a graffito filiforme, quindi spesso di difficile lettura perché labili e sovrapposte ad altre.

Sono suddivise inoltre in 18 categorie tipologiche: Croci, Sigle, Date, Segni a punta, Segni a freccia, Segni ad A aperta, Segni a M, Segni a doppia V, Segni a Y rovesciata, Segni a punta di lancia, Segni a Clessidra, Altri segni, Pseudoiscrizioni, Reticoli e griglie, Altre incisioni, Segni incerti e Linee e gruppi di linee (Fig. 1.8).

La datazione delle diverse incisioni è ancora incerta; conoscendo la storia de Sasso Rosso ed il suo cambio di connotazione confinaria, da punto di confine tra due comuni cadorini a confine di stato, è possibile supporre che le incisioni che ospita risalgano a diversi periodi, presumibilmente Medievali e Post-Medievali fino al 1753, anno di costruzione della Muraglia<sup>11</sup>.



Figura 1.8 A e B – Esempio di diverse incisioni presenti sul Sasso Rosso.

---

<sup>11</sup> SANSONI U. 2006. Centro Camuno Studi Preistorici.

### 1.4.3 I segni di confine

Particolare attenzione meritano le incisioni a croce (Fig. 1.9), tutte presenti nella porzione di Sasso Rosso rivolta verso il territorio sanvitese, sicuramente legate a momenti di conferma del confine, alcune già da prima del 1300.

L'esecuzione della croce, da segno religioso a segno confinario, garantisce implicitamente la veridicità e la legittimità giuridico-sacrale del confine stesso; già nel sistema mitologico classico (e celtico) i confini venivano posti sotto la tutela di specifiche divinità<sup>12</sup>.



Figura 1.9 – Incisioni a croce presenti sul Sasso Rosso. Le tre incisioni a croce più visibili risultano collocate nella porzione del masso rivolta verso il territorio sanvitese.

Anche le date e le sigle sono probabilmente da relazionare alla definizione e al controllo del confine; visibili oggi troviamo le due sigle A e C capitali, che indicano presumibilmente le due comunità, Ampezzo e Cadore.

---

<sup>12</sup> ZANDERIGO ROSOLO G. 2010.

### 1.4.4 I “Segni di Case”

Molte delle categorie tipologiche di incisioni richiamano la grafica dei cosiddetti “segni di casa”, emblemi che individuano la proprietà e la presenza sul territorio di diverse famiglie.

La disposizione dei “segni di case” sul Sasso Rosso suggerisce inoltre la marcata volontà di legittimare la presenza di casate soprattutto sanvitesi sul territorio (Figg. 1.10-1.11).

È importante notare come nel susseguirsi delle diverse generazioni spesso i “simboli di casa” subiscono leggere variazioni; tali modificazioni non permettono oggi di ricondurre con certezza le incisioni del Sasso Rosso alle storiche casate regoliere, delle quali si dispone solo di un repertorio posteriore al 1800<sup>13</sup>.

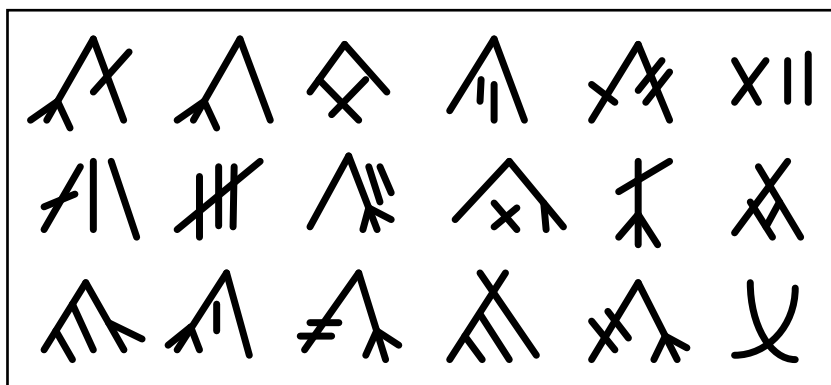


Figure 1.10 – Esempi di Segni di Case, simili a quelli riconoscibili sul Sasso Rosso.



Figure 1.11 – Alcune incisioni del Sasso Rosso riconducibili a Segni di Case.

<sup>13</sup> SANSONI U. 2006. Centro Camuno Studi Preistorici.

## 1.5 LA PIANA DELLE BASTE

### 1.5.1 Descrizione dell'area

La Piana delle Baste è una porzione pianeggiante di territorio d'alta quota, appartenente alla Regola Granda di San Vito di Cadore, collocata a poca distanza da Passo Giau.

La Piana si estende da Forcella Giau (2360 m) al sito mesolitico di Mondeval de Sora (2150 m) ed ospita il Lago delle Baste, dal quale prende il nome (Fig. 1.12).



Figura 12 – La Piana delle Baste, area pianeggiante d'alta quota collocata tra la Forcella Giau e il sito di Mondeval de Sora.

### 1.5.2 Le incisioni circolari

Numerose emersioni rocciose in arenaria, di piccola o media dimensione, hanno rivelato la presenza di perfette incisioni circolari, concentriche o sovrapposte, con diverso diametro e pochi millimetri di profondità (Fig. 1.13). Le rocce che presentano incisioni sono diffuse in tutta la piana, ma si concentrano particolarmente nella porzione adiacente il sito mesolitico di Mondeval de Sora, nella zona dove terminano una serie di piccole dorsali che emergono dal prato e si estendono parallelamente alla piana.



Figura 1.13 – Esempio di incisioni circolari. Non è ancora disponibile una datazione certa delle incisioni, né una sicura interpretazione. Si ipotizza anche in questo caso un utilizzo confinario.

### 1.5.3 La Lasta de Mondeval

Nel 1999 in prossimità del Lago delle Baste fu ritrovata una lasta d'arenaria recante un'iscrizione in alfabeto venetico (Fig. 1.14).

Tale iscrizione è una fondamentale testimonianza di presenza di individui nel territorio d'alta quota della Regola Granda in epoca preromana, nonostante l'area non fosse una zona di insediamenti e di frequentazione stabile.

La lasta non si presenta nella sua interezza in quanto risulta spezzata su entrambi i lati; nonostante questo è possibile riconoscere una sequenza di lettere incise in una sola riga e interpretabili come la parte finale di un nome proprio e l'inizio di una seconda parola.

La presenza di iscrizioni venetiche è rilevante nell'intero territorio cadorino, tuttavia sempre legata a centri di carattere sacrale, santuari, dov'erano presenti diversi oggetti votivi a testimonianza della presenza di un luogo di culto.

Nel caso della Lasta di Mondeval, invece, si è privi di qualsiasi elemento che possa definire il contesto della lasta stessa.

Le ipotesi formulate sul possibile utilizzo, oltre al significato sacrale (oggetto votivo offerto da un personaggio del luogo), sono due: un uso funerario, come testimonianza di sepoltura di un personaggio rilevante per la comunità, o il più accreditato utilizzo confinario, per la delimitazione di territori in antichità adibiti a pascolo<sup>14</sup>.



Figura 1.14 - Lasta di Mondeval. L'iscrizione venetica è visibile nella parte superiore della lasta.

---

<sup>14</sup> FONTANA F., GUERRESCHI A., REBERSCHAK M., 2002.



## 1.6 IL SITO DI MONDEVAL

### 1.6.1 Descrizione dell'area

L'area di Mondeval è una porzione di territorio confinante con la Piana delle Baste e si sviluppa verticalmente in due porzioni: Mondeval de Soto (circa 1800 m) nel comune di Selva di Cadore, e Mondeval de Sora (2150 m) nel territorio della Regola Granda di San Vito di Cadore.

Mondeval de Sora ha le caratteristiche di un ampio pianoro, racchiuso dai gruppi montuosi Pelmo, Rocchette, Croda da Lago, Lastoni di Formin, Cernerà e Corvo Alto (Fig. 1.15).

L'importanza di Mondeval de Sora è indubbiamente legata al sito archeologico preistorico rinvenuto nel 1985 a seguito di una segnalazione dell'alpinista Vittorino Cazzetta.

Il sito rivela la frequentazione di quei luoghi da parte di gruppi di cacciatori-raccoglitori nomadi che durante il Mesolitico si spingevano sulle alte quote per le stagionali battute di caccia.

Dal 1986 al 2000 si sono susseguite 15 campagne di scavo condotte dall'Università di Ferrara sotto la direzione del prof. Guerreschi; il ritrovamento di rilevanza maggiore è sicuramente la sepoltura intatta di uno di questi cacciatori, espressione di un culto dei morti che aveva già raggiunto una complessa ritualità. Rinvenuta sotto un masso erratico di dolomia è, ad oggi, l'unica sepoltura mesolitica situata ad alta quota e la più ricca che si conosca nella Penisola per questo periodo.



Figura 1.15 – La distesa di Mondeval de Sora. Al centro dell'immagine si nota il masso erratico di dolomia, sede della sepoltura mesolitica.

## 1.6.2 Il sito Mesolitico e l’Uomo di Mondeval

Mondeval de Sora presenta due depositi archeologici principali, localizzati sotto due pareti sporgenti di un grande masso di dolomia trasportato a valle dallo scioglimento di un ghiacciaio (Fig. 1.16).

Gli scavi mostrano sequenze stratigrafiche inusuali per un contesto d’alta quota: ai livelli mesolitici (X-VII millennio a.C.) seguono quelli dell’età del bronzo (II millennio a.C.), comprendenti una serie di focolari e la base di una capanna, e quelli di epoca romana tardoantica, documentati da due monete di bronzo con le effigi degli imperatori Costanzo II e Teodosio I (IV secolo d.C.).

Infine, le serie stratigrafiche si chiudono con i resti di strutture in pietra a secco utilizzate da pastori fino ad epoche recenti<sup>15</sup>.

La sepoltura rinvenuta ospitava i resti perfettamente conservati di un adulto di circa quarant’anni, sistemato in posizione supina all’interno di una fossa, con la parte inferiore del corpo ricoperta da grandi pietre e accompagnato da oggetti di vario tipo, alcuni di essi con significati fortemente simbolici (Fig. 1.17).



Figura 1.16 – Vista del masso erratico di dolomia nel sito di Mondeval de Sora, sotto al quale è stata rinvenuta la sepoltura mesolitica.



Figura 1.17 – Immagine dello scavo successivo al ritrovamento dell’Uomo di Mondeval.

---

<sup>15</sup> CESCO FRARE P. & MONDINI C. 2005.

La presenza di tre lame in selce gialla della val d'Adige, distante intere giornate di cammino attraverso difficili passi montani, sembrano indicare il rilevante ruolo sociale occupato dal defunto, in quanto maschio adulto ed abile scheggiatore.

Durante il mesolitico recente infatti, grazie all'introduzione di nuove tecniche di scheggiatura quali la percussione indiretta e la pressione, che permettevano di ottenere prodotti in serie estremamente regolari con una difficoltà tecnica di esecuzione molto elevata, le lame sembrano assumere una valenza maggiore che va oltre quella puramente pratica.

Altri oggetti ospitati nella sepoltura appaiono invece più legati alla ritualità funeraria, come i due punteruoli in osso di alce e di cervo, localizzati rispettivamente sullo sterno e in mezzo alle ginocchia del defunto, che probabilmente chiudevano un sudario in pelle entro il quale era avvolto il corpo.

Sono poi presenti elementi riconducibili agli ornamenti che l'uomo indossava al momento del seppellimento, sette canini atrofici di cervo forati che costituivano una collana.

Una serie di oggetti raggruppati in tre insiemi, posizionati sul fianco sinistro dello scheletro all'altezza dell'avambraccio e della mano, rappresentano invece la dotazione personale del cacciatore: diversi pezzi in selce identificabili come riserve di materia prima (nuclei dai quali poter estrarre nuove lame), lame pronte all'uso e molti manufatti in osso o dente (Fig. 1.18). Infine, è importante sottolineare la presenza di due agglomerati di sostanze organiche, composti l'uno da resina di abete rosso e pino mugo, l'altro da propoli, interpretabili rispettivamente come mastice/impermeabilizzante e medicamento<sup>16</sup>.



Figura 1.18 – Ricomposizione dello scheletro di Mondeval. Nei riquadri è possibile osservare la disposizione del corredo funerario rinvenuto in fase di scavo.

<sup>16</sup> FONTANA F., PASI E. 2002.

BIBLIOGRAFIA

- CESCO FRARE P., MONDINI C. 2005. *Il Mesolitico in provincia di Belluno – il quadro dei ritrovamenti*. Frammenti: conoscere e tutelare la natura bellunese, 4.
- COLLESELLI E., SIORPAES C., PONTIN A., DALLA LONGA E., PADOVAN T. 2013. *Relazione geologica, Dolomiti*.
- FABBIANI G. 1992. *Breve storia del Cadore*. (V ed.) Pieve di Cadore (BL).
- FONTANA F., GUERRESCHI A., REBERSCHAK M., 2002. *Nuovi dati sul popolamento dell'alta valle del Cordevole nel Mesolitico*. Quaderni di Archeologia del Veneto, 18.
- FONTANA F., PASI E. 2002. *Risultati delle ultime prospezioni nell'area di Mondeval de Sora (San Vito di Cadore, Belluno)*. Quaderni di Archeologia del Veneto, 18.
- NERI C., GIANOLLA P., FURLANIS S., CAPUTO R., BOSELLINI A. *Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 029, Cortina d'Ampezzo*.
- RICHEBUONO G. 1968. *Contese per i confini fra le comunità di Ampezzo e di San Vito di Cadore*. Cassa Rurale Artigiana di Cortina d'Ampezzo.
- RICHEBUONO G. 1974. *Storia di Cortina d'Ampezzo. Studi e documenti dalle origini al 1915*. Cassa Rurale Artigiana di Cortina d'Ampezzo. Milano. Mursia.
- RICHEBUONO G. 1980. *Le antiche pergamene di San Vito di Cadore*. Istituto Bellunese di Ricerche Sociali e Culturali. Belluno.
- SANSONI U. 2006. *Il Sasso Rosso*. Centro Camuno Studi Preistorici. [www.cednea.it/wp-content/uploads/Il-Sasso-Rosso-del-Centro-Camuno-Studi-Preistorici.-2006.-Sintesi-introductiva.pdf](http://www.cednea.it/wp-content/uploads/Il-Sasso-Rosso-del-Centro-Camuno-Studi-Preistorici.-2006.-Sintesi-introductiva.pdf)
- ZANDERIGO ROSOLO G. 1982. *Appunti per la storia delle Regole del Cadore nei secoli XIII-XIV*. Istituto Bellunese di Ricerche Sociali e Culturali – Serie "Storia", n.10.
- ZANDERIGO ROSOLO G. 2010. *Rocce di confine*. Geo-archeologia, n°159.

## **CAPITOLO 2**

# **IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO**

### **2.1 INTRODUZIONE**

Le metodologie geomatiche per il rilievo 3D presentano caratteristiche diverse, sia per quanto riguarda l'utilizzo pratico della strumentazione, sia per la qualità e la risoluzione del risultato ottenuto, che dipendono da molteplici fattori.

La scelta della tecnica migliore per svolgere un rilievo si basa sicuramente sulla tipologia del soggetto in esame, ma anche sulle condizioni ambientali di lavoro nel contesto delle metodologie di acquisizione.

Nel rilevare contesti complessi come quello affrontato in questa tesi è utile e indicato attuare un'integrazione di diverse metodologie, al fine di ottenere un risultato ottimale massimizzando la risoluzione.

In questo lavoro ci si è concentrati principalmente sull'utilizzo di tecniche di rilievo fotografiche quali fotogrammetria terrestre e aerea, che risultano adatte alle caratteristiche e dimensioni dei soggetti di studio, ma anche per rispondere alle molte problematiche di utilizzo e trasporto della strumentazione in alta quota.

Queste tecniche risultano, infine, particolarmente adatte per la loro non invasività sui beni indagati.

### **2.2 LA FOTOGRAMMETRIA**

#### **2.2.1 Definizione del metodo**

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che consente di ottenere informazioni metriche di un oggetto, come forma e posizione, mediante l'acquisizione e l'analisi di fotogrammi o immagini digitali dello stesso, acquisiti da diversi punti di vista.

Effettuare il rilievo di un oggetto significa ricavare la posizione spaziale di tutti i punti di interesse; mediante la fotogrammetria questa operazione viene fatta non direttamente sull'oggetto ma operando su immagini fotografiche, quindi senza necessità di contatto fisico<sup>1</sup>.

In passato gli apparati strumentali erano complessi e costosi, motivo per cui questa tecnica era relativamente poco utilizzata.

In particolare, lo sviluppo del digitale, ha permesso l'elaborazione di un numero maggiore di dati a costi notevolmente minori e con un considerevole risparmio di tempo.

---

<sup>1</sup> BEZOARI G., SELVINI A. 1999.

La fotogrammetria digitale diventa quindi uno strumento di rilevamento di dati metrici indispensabile in molti settori, dall'utilizzo topografico e cartografico alle applicazioni per lo studio del paesaggio e dei beni culturali.

È importante però sottolineare che la tecnica fotogrammetrica non può e non deve sostituire il rilievo diretto, ma diventa invece una componente aggiuntiva che offre una documentazione geometrica attendibile.

## 2.2.2 Sviluppo storico della fotogrammetria

La storia della fotogrammetria è indubbiamente legata allo sviluppo della geometria descrittiva, che ne ha determinato i principi teorici, come anche all'ottica e alla fotografia.

Nel descrivere lo sviluppo della tecnica vera propria, così come oggi la conosciamo, è possibile individuare schematicamente quattro fasi temporali, ognuna delle quali legata allo sviluppo di determinate tecnologie:

### 1 Fase pionieristica (1850-1900)

La fotogrammetria fu fondata da Aimé Laussedat, che nel 1851 ne indicò i procedimenti, basati sostanzialmente sul compiere un'intersezione in avanti, in cui i dati metrici venivano ottenuti direttamente dai fotogrammi.

La misura delle grandezze sul fotogramma era però fonte di notevoli errori dovuti alla distorsione degli obiettivi fotografici.

Ignazio Porro nel 1865 cercò di rimediare a tali errori integrando la tecnica con il fotogoniometro, uno strumento che permetteva di misurare gli angoli delle direzioni che vanno dal centro dell'obiettivo ai punti dell'oggetto fotografato (Fig. 2.1 - Il fotogoniometro ideato da Ignazio Porro, 1865).



Figura 2.1

### 2 Fase analogica e stereoscopica (1900-1960)

La seconda età della fotogrammetria inizia nei primi anni del Novecento attraverso la stereoscopia e il principio della marca mobile, che permisero di superare le difficoltà dell'ambiguo riconoscimento dei punti omologhi su due fotogrammi diversi. Nel 1909 il triestino E. Von Orel costruì lo stereoautografo, strumento che permetteva di risolvere anche il problema di passare da una coppia di fotogrammi alla proiezione orizzontale, non attraverso il calcolo delle coordinate dei singoli punti, bensì in maniera continua utilizzando elementi fisici di tipo analogico.

Von Orel aprì quindi l'era dei restitutori analogici, e in questo campo i progressi furono molto rapidi grazie all'opera di studiosi come Wild, Nistri e Santoni (Fig. 2.2 - Stereoautografo costruito dall'ing. Santoni).

Con la Prima Guerra Mondiale si vide anche l'introduzione della fotogrammetria aerea, tecnica che oggi ha sostituito tutti gli altri metodi per la produzione cartografica.



Figura 2.2

### 3 Fase analitica (1960-1990)

L'impostazione analogica della fotogrammetria era legata ad epoche in cui i limitati mezzi di calcolo impedivano di sviluppare le procedure analitiche necessarie per passare dalla prospettiva (fotografia) alla proiezione ortogonale (carta). A partire dagli anni Sessanta, l'avvento di calcolatori elettronici con grande capacità di calcolo e piccole dimensioni, ha indirizzato lo sviluppo della fotogrammetria verso un'impostazione analitica: essa prevede il passaggio da una coppia stereoscopica di fotogrammi alla relativa proiezione ortogonale tramite lo sviluppo numerico di un certo numero di equazioni elaborate al computer.

### 4 Fase digitale (dal 1990 ad oggi)

Dagli anni Novanta è stato possibile produrre ed utilizzare immagini digitali, ovvero a tutti gli effetti immagini non fotografiche ma numeriche, strutturate in una matrice di piccoli elementi, detti pixel. L'impiego di queste immagini ha dato luogo alla fase digitale della fotogrammetria, che svolge le procedure legate alla generazione di un modello tridimensionale attraverso i computer<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI W. 2012.

### 2.2.3 Principi e aspetti teorici

Il processo fotogrammetrico è riassumibile essenzialmente in tre fasi:

1. Presa o acquisizione dei dati, dove le immagini vengono acquisite su pellicola o in formato digitale tramite camere fotografiche;
2. Orientamento o referenziazione, attraverso il quale si determinano i parametri di trasformazione tra i sistemi di riferimento passando dal sistema immagine al sistema oggetto;
3. Restituzione, dove si determinano le coordinate dei punti al fine di ricostruire tridimensionalmente l'oggetto o l'insieme di oggetti.

Per comprendere meglio la fase di orientamento, è importante sottolineare che a livello teorico il rilievo tramite fotogrammetria comporta la risoluzione di un problema di fondo: il relazionare un oggetto (tridimensionale) a un'immagine di esso (bidimensionale) in maniera univoca, facendo corrispondere una serie di punti (punti omologhi) nei due sistemi di grandezze.

Le tipologie di grandezze da considerare in fotogrammetria sono quindi differenti:

1. Le coordinate 3D dei punti dell'oggetto
2. Le coordinate 2D degli stessi punti sull'immagine
3. I valori dei cosiddetti parametri di orientamento, che governano i rapporti tra spazio 2D e 3D

La relazione tra queste dimensioni è nota con il termine di proiezione ed è regolata da precise leggi matematiche e geometriche.

Il tipo di proiezione che descrive la geometria della presa fotogrammetrica non è altro che la prospettiva centrale.

È importante notare che l'uso di una sola immagine piana (come quella della fotografia) non contiene informazioni sufficienti a definire la posizione e le dimensioni di un oggetto tridimensionale, lo sarebbe solo nel caso in cui anche l'oggetto del rilievo fosse piano.

Ecco perché si rende necessario l'uso di due fotografie che riprendano lo stesso oggetto osservato da differenti punti di presa.

Lo stesso oggetto, ripreso da due punti di vista diversi, assume posizioni relative differenti, si rende quindi necessaria una sovrapposizione fra più immagini per ottenere una ricostruzione tridimensionale accurata e realistica<sup>3</sup>.

Per la fase di restituzione è infine necessario ricordare che il metodo fotogrammetrico si basa sul principio della visione stereoscopica, ovvero lo stesso principio su cui si basa la percezione della tridimensionalità nella visione umana, che consente di percepire la profondità e la distanza degli oggetti.

La stereoscopia è infatti la proprietà naturale di cui siamo dotati che ci permette di vedere il mondo esterno in tre dimensioni, cioè la capacità di percepire il rilievo generato dalla diversa distanza tra gli oggetti osservati. Si ha soltanto quando si osserva un oggetto con entrambi gli occhi, in quanto ciascuno ne fornisce una immagine diversa; le due immagini poi si fondono formando un'unica immagine 3D (Fig. 2.3).

---

<sup>3</sup> FANGI G. 1995.



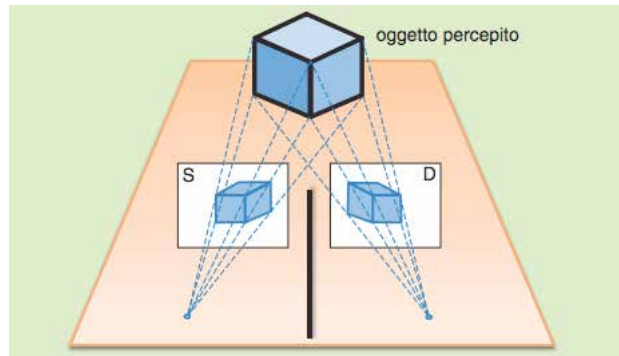


Figura 2.3 – La visione stereoscopica naturale.  
Le immagini diverse fornite dall'occhio destro e sinistro permettono, una volta unite, di percepire la tridimensionalità.

## 2.2.4 Diverse tipologie di fotogrammetria

È possibile differenziare diverse tipologie di fotogrammetria seguendo due criteri fondamentali:

1. Differenziazione in base alle modalità operative e alla distanza di presa
2. Differenziazione in base al tipo di dato in *output*

Seguendo il primo criterio, la fotogrammetria si divide in:

### *Fotogrammetria Terrestre*

Presa fotografica effettuata da punti a terra, con distanza tra sensore e oggetto pari a qualche decina di metri al massimo.

### *Fotogrammetria Aerea*

Presa fotografica effettuata con apparecchi montati su supporti volanti (UAV) che compiono un volo al di sopra del territorio da osservare; a seconda dell'area interessata e della scala di rappresentazione richiesta si passa da 15 a 25 metri di altezza (nel caso il supporto sia un drone) a un *range* che va dai 300 ai 20.000 metri (nel caso il supporto sia un aeromobile).

### *Fotogrammetria Satellitare*

Presa realizzata da Space Shuttle, tecnica utilizzata solo nel caso di rilievi su aree molto estese.

Seguendo il secondo criterio, la fotogrammetria si divide in:

### *Fotogrammetria tradizionale*

Tecnica che fornisce in *output* un dato su supporto fotografico tradizionale (pellicola).

### *Fotogrammetria digitale*

Il dato in uscita è digitale.

## 2.2.5 La Fotogrammetria terrestre

I rilievi fotogrammetrici da terra sono caratterizzati da una piccola distanza tra sensore e oggetto da rilevare. Si passa da qualche centimetro fino a un massimo di qualche decina di metri, a seconda della dimensione dell'oggetto e dello strumento da presa che si utilizza. Questa metodologia è spesso utilizzata nel rilievo dei Beni Culturali per la sua non invasività e immediatezza di utilizzo<sup>4</sup>.

La fase di presa deve essere pianificata considerando che ogni punto dell'oggetto deve comparire in almeno due fotogrammi e che i fotogrammi adiacenti devono presentare una sovrapposizione superficiale longitudinale pari a circa il 60% e laterale pari a circa il 20%. Risulta spesso conveniente acquisire quanti più fotogrammi possibili in questa fase, per garantire una buona copertura di tutto l'oggetto in esame. In un secondo momento, durante l'elaborazione del modello tridimensionale, sarà possibile selezionare il numero idoneo di foto da utilizzare.

## 2.2.6 La Fotogrammetria aerea

Questa tipologia di fotogrammetria è solitamente utilizzata per rilevare aree vaste e complesse, permettendo una vista e un risultato d'insieme. Esistono diverse applicazioni delle immagini ottenute tramite volo fotogrammetrico, le più note variano dall'uso civile per scopi cartografici, all'utilizzo in ambito forestale per il monitoraggio della copertura vegetativa. Nell'ultimo decennio l'utilizzo di questa tecnica di rilievo ha però interessato le applicazioni per i beni culturali al fine di supportare la documentazione archeologica e generare modelli tridimensionali partendo da immagini ad alta risoluzione<sup>5</sup>.

Per compiere un rilievo di questo tipo si possono utilizzare diverse macchine da presa, scelte a seconda delle caratteristiche della macchina stessa e del soggetto del rilievo, nonché del peso e delle dimensioni, considerando la necessità di montarle su dispositivi aerei.

I dispositivi sui quali montare la macchina da presa sono solitamente aeromobili o UAS (*Unmanned Aerial System*), veicoli aerei senza pilota umano a bordo, pilotati da un equipaggio che opera da una stazione remota di comando e controllo.

Gli UAS storicamente utilizzati in ambito militare sono denominati droni, mentre i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR) corrispondono ai velivoli utilizzati in ambito civile.

Esistono molteplici tipologie di SAPR, da quelli dotati o meno di motore, a quelli ad ala fissa o a rotore (singolo o multiplo); la scelta avviene a seconda della dimensione dell'area da indagare, e quindi della distanza che bisogna mantenere tra sensore e superficie per ottenere una corretta scala nelle immagini.

---

<sup>4</sup> LO BRUTTO M. 2005.

<sup>5</sup> BEZOARI G., SELVINI A. 1999.

Anche in questo caso la fase di presa deve essere pianificata al fine di ottenere un *overlap* tra fotogrammi adiacenti pari a circa il 60% in longitudine e lateralmente il 20% (Fig. 2.4). Per ottenere la sovrapposizione desiderata si rende necessario il calcolo del tempo di intervallo tra uno scatto e quello successivo. In questo caso il numero di fotogrammi da acquisire viene quindi stabilito all'inizio del lavoro di presa, anche in funzione del tempo massimo di volo che consente l'autonomia della batteria nel caso si utilizzi un drone<sup>6</sup>.

Il movimento del dispositivo volante è solitamente programmato con un piano di volo, metodo che permette di mantenere la macchina da presa in posizione parallela al terreno e consente un'ottimale precisione nella copertura della superficie.

Nel caso di utilizzo di un drone è possibile anche attuare un movimento del dispositivo di tipo manuale, scelta consigliata solo per piccole aree o per prese di oggetti molto grandi per i quali si rendono necessari scatti perpendicolari alla superficie.

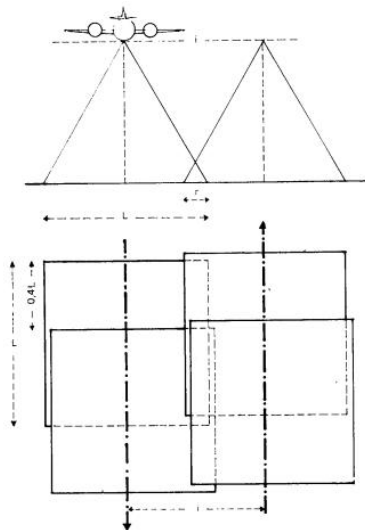


Figura 2.4 - Esempio di piano di volo che assicura un *overlap* adeguato tra fotogrammi consecutivi.

<sup>6</sup>LO BRUTTO M. 2005.

## 2.3 DAL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO ALLA MODELLAZIONE 3D

### 2.3.1 Pianificazione del lavoro

Il primo e fondamentale passo da compiere in un lavoro di rilievo è sicuramente procedere ad una accurata pianificazione delle operazioni da svolgere, considerando il contesto ambientale nel quale si opera e la tipologia di oggetti da studiare.

Nel caso specifico i soggetti del rilievo sono per la maggior parte incisioni millimetriche su matrice rocciosa, presenti in un contesto montano d'alta quota.

La scelta di compiere rilievi fotogrammetrici è sicuramente dettata dalla buona resa del metodo nell'impiego su roccia ma è anche dovuta al facile trasporto in loco degli strumenti e alla loro alimentazione a batteria.

Le aree in esame sono infatti raggiungibili esclusivamente attraverso sentieri di montagna percorribili a piedi e non vi è presenza di energia elettrica.

I rilievi sono stati eseguiti in più giornate tra luglio e ottobre 2015, pianificando le uscite anche in base alle condizioni meteorologiche e alle disponibilità concesse dalla Regola Granda di San Vito di Cadore, elementi non trascurabili in un contesto lavorativo così particolare.

Si sono inoltre resi necessari diversi sopralluoghi nel mese di giugno 2015 al fine di organizzare al meglio il lavoro, fattore da considerare nella stima delle tempistiche necessarie allo svolgimento di un tale progetto.

### 2.3.2 Strumenti utilizzati

La presa fotogrammetrica da terra è stata realizzata con una fotocamera reflex digitale modello Nikon D80 (Fig. 2.5).

Caratteristiche tecniche Nikon D80<sup>7</sup>:

- Risoluzione del sensore: 10.2 megapixel
- Sensibilità ISO: 100-3200
- Obiettivo: 18-55 mm
- Restituzione immagini nei formati RAW, JPG e TIFF

Date le caratteristiche geometriche e il posizionamento dei soggetti rilevati, non è stato necessario l'utilizzo di un cavalletto in questa fase del rilievo.

---

<sup>7</sup> AA.VV. 2006. *The Nikon Guide to Digital Photography with the D80 Digital Camera*.



Figura 2.5 – Macchina da presa Nikon D80.

La presa fotogrammetrica aerea, effettuata in una porzione del sito di Mondeval de Sora, è stata realizzata con la seguente strumentazione:

Macchina da presa: GoPro Hero 3+ (Fig. 2.6).  
SAPR modello DJI Phantom 2 (Fig. 2.7).

Caratteristiche tecniche GoPro Hero 3+<sup>8</sup>:

- Risoluzione del sensore: 12 megapixel
- Possibilità di scattare in serie fino a 30 fps
- Possibilità di riprese video 4K
- Full HD
- Supporto wi-fi
- Dimensioni senza custodia: 3 x 5,8 x 4,1 cm
- Peso dello strumento senza custodia: 74 g
- Restituzione immagini in formato JPEG

Caratteristiche tecniche DJI Phantom 2<sup>9</sup>:

- Multirottore, dotato di 4 eliche
- Dimensioni: 37,1 x 33 x 21 cm
- Batteria: 1 pila al litio
- Autonomia della batteria: circa 30-40 minuti.
- Telecomando per il controllo manuale

Le batterie a nostra disposizione erano due, per un'autonomia totale di volo pari a circa 60-70 minuti.

È stato inoltre utilizzato un tablet modello iPad 1 per la formulazione del piano di volo del drone e il controllo remoto in fase di presa, realizzato con l'ausilio dell'applicazione Ground Station (Fig. 2.8).

---

<sup>8</sup> AA.VV. 2013. *User Manual GoPro Hero3*.

<sup>9</sup> AA.VV. 2015. *Phantom 2 User Manual*.



Figura 2.6 – Macchina da presa GoPro Hero 3+.



Figura 2.7 – DJI Phantom 2.



Figura 2.8 – Interfaccia grafica dell'applicazione Ground Station per il controllo remoto del drone DJI Phantom 2.

Per la fase finale di elaborazione delle immagini, siano esse derivate da presa aerea o terrestre, si è adoperato un computer modello MacBook Pro (anno di emissione 2015).

Caratteristiche MacBook Pro:

- Processore Intel Core i5 dual-core a 2,7 GHz
- Memoria Ram 8 GB
- Capacità 128 GB
- Display Retina da 13,3"
- Risoluzione a 2560 x 1600 a 227 pixel per pollice
- Batteria integrata ai polimeri di litio a 74,9 wattora

### 2.3.3 Il software Agisoft Photoscan

Esistono diversi software finalizzati alla costruzione di un modello 3D che utilizzano immagini ottenute tramite rilievo fotogrammetrico, sia esso un rilievo da terra o aereo.

In questo lavoro di tesi si è scelto di utilizzare Agisoft Photoscan, un software non *open source* ma dotato di grande semplicità di utilizzo e ottima qualità del modello restituito.

È un software comunemente utilizzato per le applicazioni GIS ma anche per la documentazione di Beni Culturali.

Agisoft LLC si occupa dal 2006 di *multi-viewing 3D reconstruction*, e ad oggi esistono due versioni del software di ricostruzione:

- Agisoft Photoscan Standard Edition
- Agisoft Photoscan Professional Edition (versione utilizzata in questo lavoro)

Entrambe le versioni permettono la generazione di una nuvola di punti, la ricostruzione della *mesh* e la generazione della *texture*, ma l'edizione Professional permette funzioni aggiuntive quali la creazione di ortofoto, DEM, la possibilità di posizionare *markers* e la georeferenziazione del modello.

Il software, indipendentemente dall'edizione utilizzata, non richiede requisiti hardware specifici, ma per ottenere prestazioni elevate nella velocità e nella qualità di ricostruzione è necessario l'utilizzo di un computer dotato di processore di ultima generazione, elevata quantità di RAM e una o più schede video, eventualmente a cascata<sup>10</sup>.

### 2.3.4 Pipeline di ricostruzione

Photoscan prevede tre fasi principali nel processo di ricostruzione 3D:



---

<sup>10</sup> AA.VV. 2013 a. *Agisoft Photoscan User Manual*.

### Fase 1: *Allineamento dei fotogrammi (Align photos)*

Questa prima fase consente di allineare i fotogrammi importati nel progetto, calcolando orientamento interno ed esterno, così da ottenere una nuvola di punti di tutte le superfici oggetto di rilievo.

Nella finestra di dialogo sarà inoltre possibile visualizzare tutte le immagini importate con le rispettive posizioni di presa (Fig. 2.9), al fine di selezionarne un numero sufficiente a coprire tutta la superficie del soggetto studiato, eliminando la ridondanza causata da prese troppo sovrapposte e/o ripetute. La scelta di non utilizzare tutte le prese a disposizione è da ricondursi ad una minore dimensione del modello finale, facilitando così le operazioni di elaborazione ed eventuale condivisione.

I due parametri modificabili in questa parte del processo di ricostruzione sono l'opzione "Accuracy", necessaria a decidere l'accuratezza della *point cloud* che si vuole ottenere (per set con meno di 150 fotografie è consigliabile impostare il valore *High*, per una nuvola di punti molto fedele), e l'opzione "Pair Preselection", che interessa la modalità di preselezione delle immagini che il software implementerà per l'allineamento.

L'opzione "Pair Preselection" può essere *disabilitata* (il software non porrà alcun vincolo, processo più lento), *generica* (il software prova a selezionare razionalmente le foto, processo più veloce) e infine settata su *Ground Control* (il software terrà conto delle informazioni di orientamento contenute nelle prese fotografiche, quali dati GPS)<sup>11</sup>.

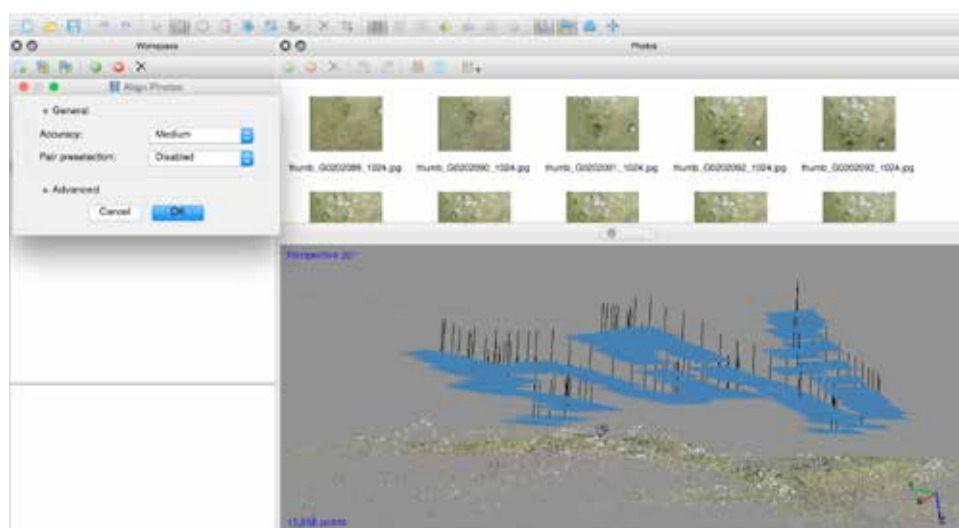


Figura 2.9 – Allineamento dei fotogrammi. I riquadri in azzurro presenti sopra il modello rappresentano l'orientamento, la distanza dal soggetto e le sovrapposizioni tra scatti adiacenti di ogni presa.

<sup>11</sup> AA.VV. 2013 b. *Agisoft Photoscan, uno scatto in più nella ricostruzione 3D*.



### Fase 2: Creazione della mesh (*Build Mesh*)

In questo secondo *step* al software viene richiesto di risolvere un sistema complesso di variabili, la cui soluzione è rappresentata da una *mesh* continua, che interpola tra loro tutti i punti omologhi riconosciuti a partire dalla fase di allineamento dei fotogrammi importati nel progetto (Fig. 2.10). Gli algoritmi a disposizione per completare questa fase sono due, *Heigh Field* e *Arbitrary*, ognuno dei quali ha 6 gradi di dettaglio settabili e due tipologie di interpolazione geometrica.

L'algoritmo *Heigh Field* è ottimizzato per la ricostruzione di superfici che si presentano regolari; quando si ha a che fare con fotografie aeree, riprese da una quota rilevante rispetto all'orografia del terreno, questo algoritmo riesce a mediare la ricostruzione della superficie meglio, e più velocemente, rispetto all'algoritmo *Arbitrary*.

L'algoritmo *Arbitrary*, al contrario, non imposterà nessun filtro geometrico preliminare all'interpolazione dei punti; in genere si tratta di un'operazione di calcolo più complessa e impiega maggior tempo, seppur con maggiore dettaglio risultante a parità di grado di dettaglio settato.

Nel processo di costruzione della *mesh* è possibile infine impostare il numero di facce limite (*Face Count*); solitamente il programma seleziona in automatico il massimo numero di facce che il grado di dettaglio settato può permettere<sup>12</sup>.

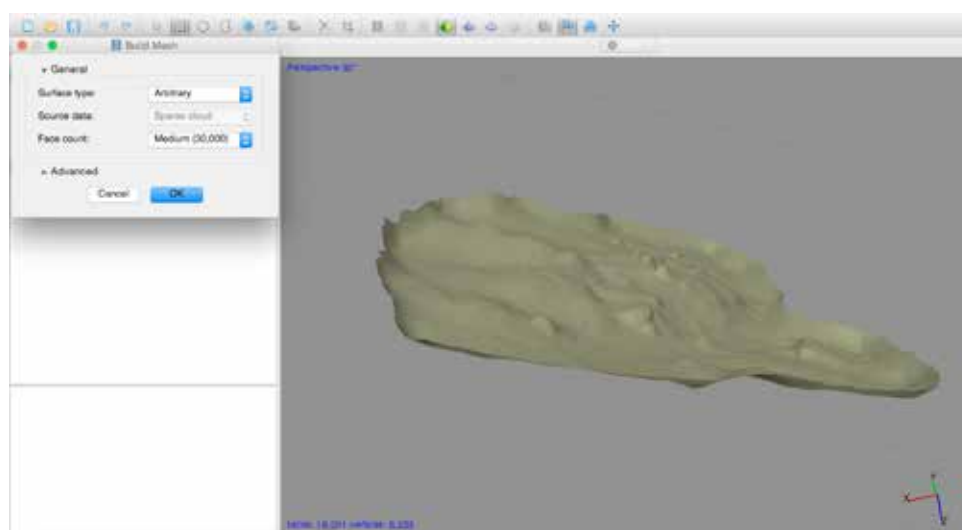


Figura 2.10 – Creazione della *mesh*.

<sup>12</sup> AA.VV. 2013 b. *Agisoft Photoscan, uno scatto in più nella ricostruzione 3D*.

### Fase 3: *Texturizzazione (Build Texture)*

Quest'ultima fase si occupa di assegnare alla *mesh* risultante dalla fase precedente una *texture* fotorealistica continua ed estremamente fedele (Fig. 2.11).

Ad ogni cella della *mesh* verrà dunque associato un insieme di pixel *raster* derivanti dalla mosaicatura delle foto allineate.

Per generare la *texture* è possibile impostare i seguenti parametri, scelti a seconda del dato finale desiderato:

- *Generic*, generico
- *Orthophoto*, ottimizzato per la generazione di *texture* che privilegiano l'aspetto planare della geometria riconosciuta
- *Adaptive Orthophoto*, Photoscan ottimizza la creazione della *texture* per mantenere accuratezza sia sulla planarità che sulla verticalità delle facce della *mesh* risultante
- *Single Camera*, prende come riferimento per la texturizzazione una singola foto del set selezionata dall'utente

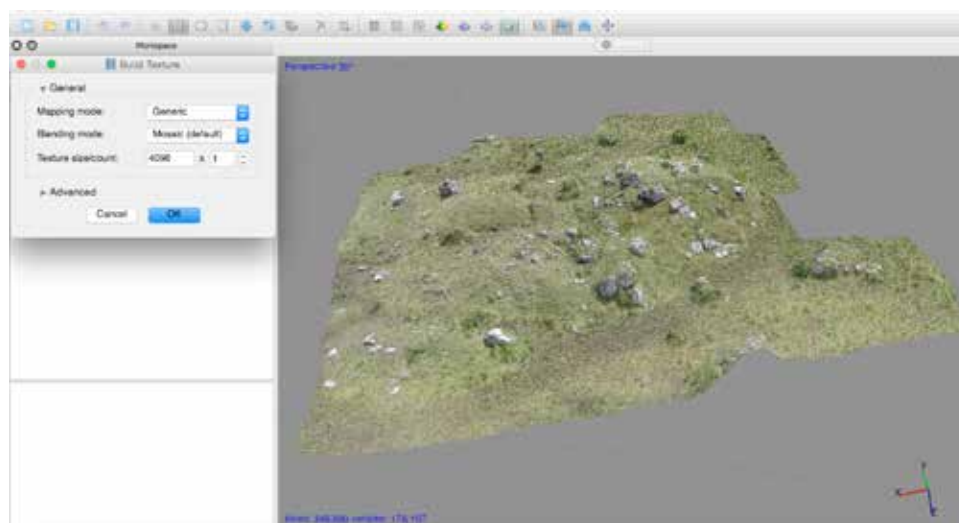


Figura 2.11 – Applicazione della *texture*.

Terminata la terza e ultima fase di ricostruzione è possibile selezionare il formato desiderato del file da esportare, scelto a seconda dell'utilizzo richiesto.

Nei formati OBJ e PLY vengono ad esempio memorizzate anche le informazioni relative al colore di ogni singolo punto<sup>13</sup>. Il formato STL invece, comunemente usato per la stampa 3D, contiene informazioni che descrivono la sola geometria della superficie.

<sup>13</sup> AA.VV. 2013 b. *Agisoft Photoscan, uno scatto in più nella ricostruzione 3D*.

Nella tabella qui riportata è possibile visualizzare le informazioni relative all'occupazione di memoria per i diversi formati utilizzati per l'esportazione del modello tridimensionale del sito di Mondeval de Sora.

MODELLO	FORMATO OBJ	FORMATO PLY	FORMATO STL
Mondeval de Sora	35,9 MB	18 MB	17,5 MB

Si noti la grande differenza tra dimensioni del modello in formato OBJ rispetto al formato STL, dovuto alla presenza o meno delle informazioni relative alla *texture*.

### 2.3.5 Funzioni aggiuntive di Agisoft Photoscan

Il software descritto è principalmente utilizzato per la ricostruzione del modello tridimensionale, ma presenta alcune opzioni di elaborazione del modello, da applicare se necessario prima della procedura di esportazione.

Esempi di funzioni aggiuntive alla ricostruzione sono i comandi:

- *Close Holes*, che permette la chiusura automatica di eventuali zone vacanti nella *mesh*.
- *Gradual Selection*, comando che permette la rimozione automatica (basata su specifici criteri) o manuale di tutti i punti che vengono riconosciuti come appartenenti al modello 3D.
- *Place Markers*, che permette il posizionamento sul modello di *markers* con coordinate note, utili alla georeferenziazione, all'ottimizzazione dell'allineamento dei fotogrammi e a compiere misure di distanze e volumi. Questa operazione può avvenire manualmente o in modalità automatica svolta dal software.
- *Assign reference coordinates*, che permette la georeferenziazione del modello utilizzando le coordinate associate ai *markers* precedentemente posizionati, le informazioni relative alla posizione delle prese fotografiche o entrambe.
- *Measure area and volume*, che consente di compiere misurazioni dell'area e del volume direttamente sulla ricostruzione 3D dell'oggetto.

## BIBLIOGRAFIA

AA.VV. 2006. *The Nikon Guide to Digital Photography with the D80 Digital Camera*.

[http://cdn-10.nikon-cdn.com/pdf/manuals/dslr/D80\\_en.pdf](http://cdn-10.nikon-cdn.com/pdf/manuals/dslr/D80_en.pdf)

AA.VV. 2013 a. *Agisoft Photoscan User Manual*. Professional Edition, Version 1.0.0

[http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro\\_1\\_0\\_0\\_en.pdf](http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_1_0_0_en.pdf)

AA.VV. 2013 b. *Agisoft Photoscan, uno scatto in più nella ricostruzione 3D. Cenni preliminari, Tips&Tricks, Funzioni avanzate*.

<http://www.geores.it>

AA.VV. 2013. *User Manual GoPro Hero3*. [http://cbcdn1.gp-static.com/uploads/product\\_manual/file/59/HERO3\\_Silver\\_UM\\_ITA\\_RevC\\_web.pdf](http://cbcdn1.gp-static.com/uploads/product_manual/file/59/HERO3_Silver_UM_ITA_RevC_web.pdf)

AA.VV. 2015. *Phantom 2 User Manual*.

<http://www.dji.com/product/phantom-2/download>

BEZOARI G., SELVINI A. 1999. *Gli strumenti per la fotogrammetria. Storia e tecnica*. Liguori.

CANNAROZZO R., CUCCHIARINI L., MESCHIERI W. 2012. *Misure, Rilievo, Progetto*. Zanichelli editore. Volume 3, Modulo T: Fotogrammetria.

FANGI G. 1995. *Note di fotogrammetria*. CLUA.

LO BRUTTO M. 2005. *Elementi di fotogrammetria digitale*.

[http://www.webalice.it/orrione/File%20pdf/Work/Corsi/TOPOGRAFIA/Modulo\\_Geomatica\\_Dispensa\\_Fotogrammetria\\_Digitale.pdf](http://www.webalice.it/orrione/File%20pdf/Work/Corsi/TOPOGRAFIA/Modulo_Geomatica_Dispensa_Fotogrammetria_Digitale.pdf)

## **CAPITOLO 3**

### **CASO STUDIO: I RILIEVI ESEGUITI**

#### **3.1 INTRODUZIONE**

Il caso di studio affrontato in questo lavoro si sviluppa in un'area molto vasta, appartenente alla Regola Granda di San Vito di Cadore. Il territorio di interesse si estende infatti dal versante sanvitese del Passo Giau agli alti pascoli a confine con la Val Fiorentina; sono stati quindi selezionati diversi soggetti dei quali compiere un rilievo, scelti perché ritenuti di particolare interesse per lo studio del paesaggio archeologico e in qualche modo rappresentativi della zona.

I soggetti sottoposti a rilievo sono tre:

1. Le incisioni circolari
2. Il Sasso Rosso
3. L'area di Mondeval de Sora

La tecnica utilizzata è quella fotogrammetrica, sia terrestre che aerea.

#### **3.2 RILIEVO 1: LE INCISIONI CIRCOLARI**

##### **3.2.1 I soggetti del rilievo**

La prima serie di rilievi eseguita ha come oggetto quattro emersioni rocciose in arenaria che presentano incisioni circolari, prese come campione in una porzione di territorio dove ne sono presenti diverse decine.

Le emersioni sono tutte collocate ad una altitudine di circa 2300 m, nella Piana delle Baste, e si concentrano in maggior numero nell'area di confine con il sito mesolitico di Mondeval de Sora.

Ogni reperto risulta numerato e localizzato da coordinate GPS, ed è quindi così identificabile:

*Reperto 1: SV317 (Fig. 3.1)*

*Reperto 2: SV312 (Fig. 3.2)*

*Reperto 3: SV310 (Fig. 3.3)*

*Reperto 4: SV311 (Fig. 3.4)*



Figura 3.1 – Reperto SV317.

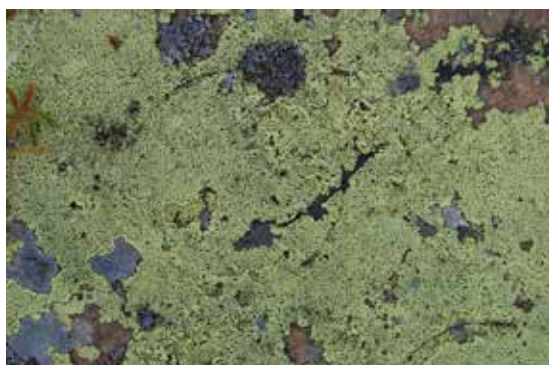


Figura 3.2 – Reperto SV312.



Figura 3.3 – Reperto SV310.



Figura 3.4 – Reperto SV311.

### 3.2.2 Dati del rilievo e problematiche affrontate

Tutti i reperti sono stati rilevati mediante fotogrammetria da terra, tecnica che risulta adatta alle prese su roccia, sufficientemente precisa nel rilievo di incisioni con profondità millimetrica e di facile applicazione in un contesto ambientale dove sia il trasporto della strumentazione che l'esecuzione del lavoro stesso devono essere quanto più agevoli possibile.

Gli scatti eseguiti su ogni reperto sono stati circa un centinaio, con un tempo medio di rilievo pari a 30 minuti per incisione. La distanza media tra macchina da presa e reperto si è mantenuta intorno ai 30-40 cm.

Nella tabella di seguito riportata è possibile visualizzare il numero di fotogrammi utilizzati per la ricostruzione tridimensionale di ogni singolo reperto e le informazioni relative alla memoria occupata per i diversi formati utilizzati.

REPERTO	NUMERO FOTOGRAMMI	FORMATO OBJ	FORMATO STL
SV317	91	5,6 MB	3 MB
SV312	94	5,8 MB	3 MB
SV310	97	5,8 MB	3 MB
SV311	95	5,7 MB	3 MB

La principale difficoltà legata a questo primo set di rilievi riguarda sicuramente la presenza di vegetazione che ricopre la maggior parte delle emersioni rocciose e genera ombre sulle incisioni.

Non è stato invece possibile rimuovere gli estesi licheni che coprivano alcune incisioni, rendendo così più difficoltoso il rilievo della profondità millimetrica delle stesse.

### 3.2.3 La ricostruzione tridimensionale

La ricostruzione 3D, effettuata mediante il software Photoscan Professional Edition, ha comportato un tempo medio di elaborazione pari a circa 50 minuti per ogni reperto descritto.

I risultati ottenuti sono i seguenti (Fig. 3.5-3.6-3.7-3.8).

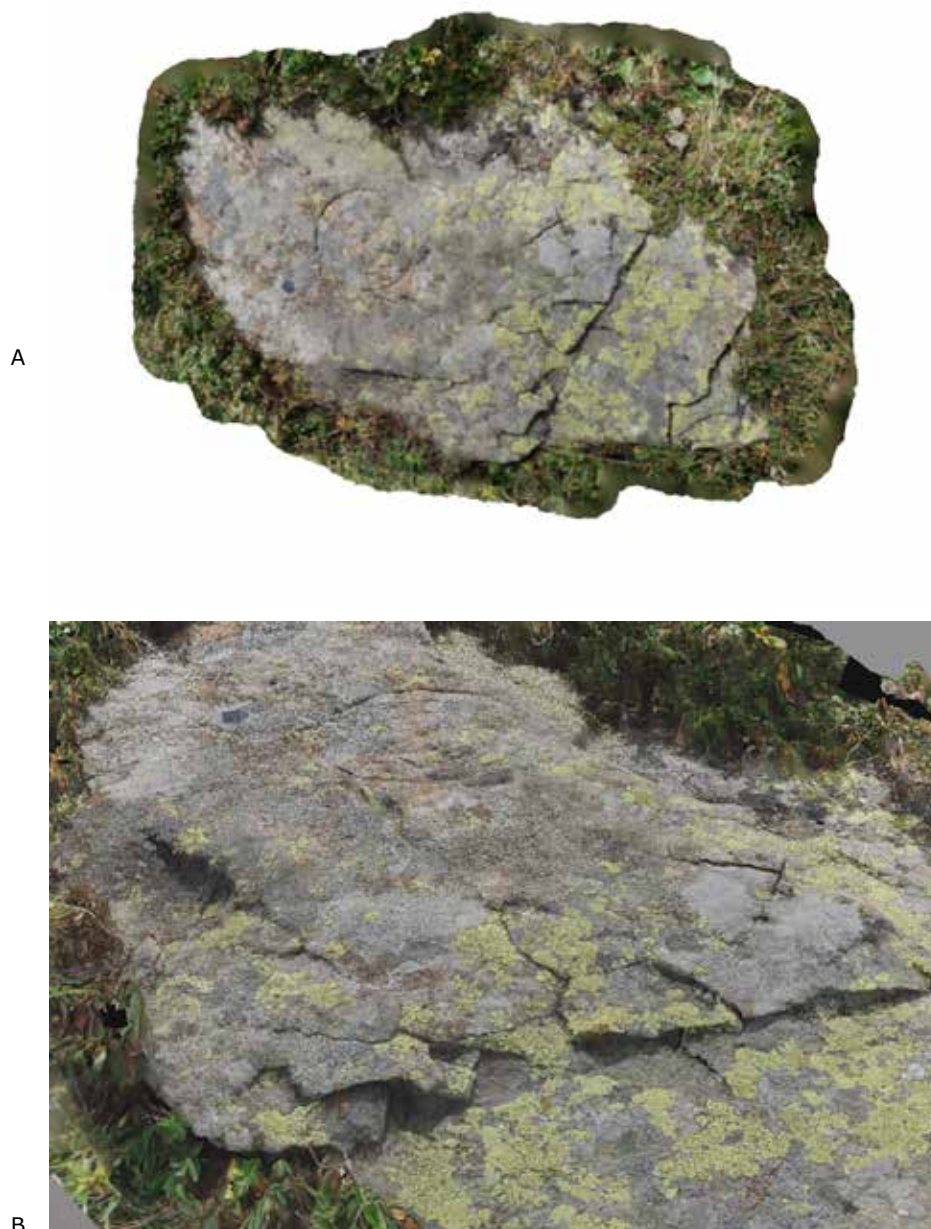


Figura 3.5 A e B – Modello del reperto SV317 e particolare delle incisioni. Questo reperto presenta diverse incisioni a cerchio, perfettamente concentriche e presumibilmente tracciate con uno strumento dal funzionamento simile ad un compasso; si noti la presenza di un piccolo foro corrispondente all'esatto centro delle circonferenze.



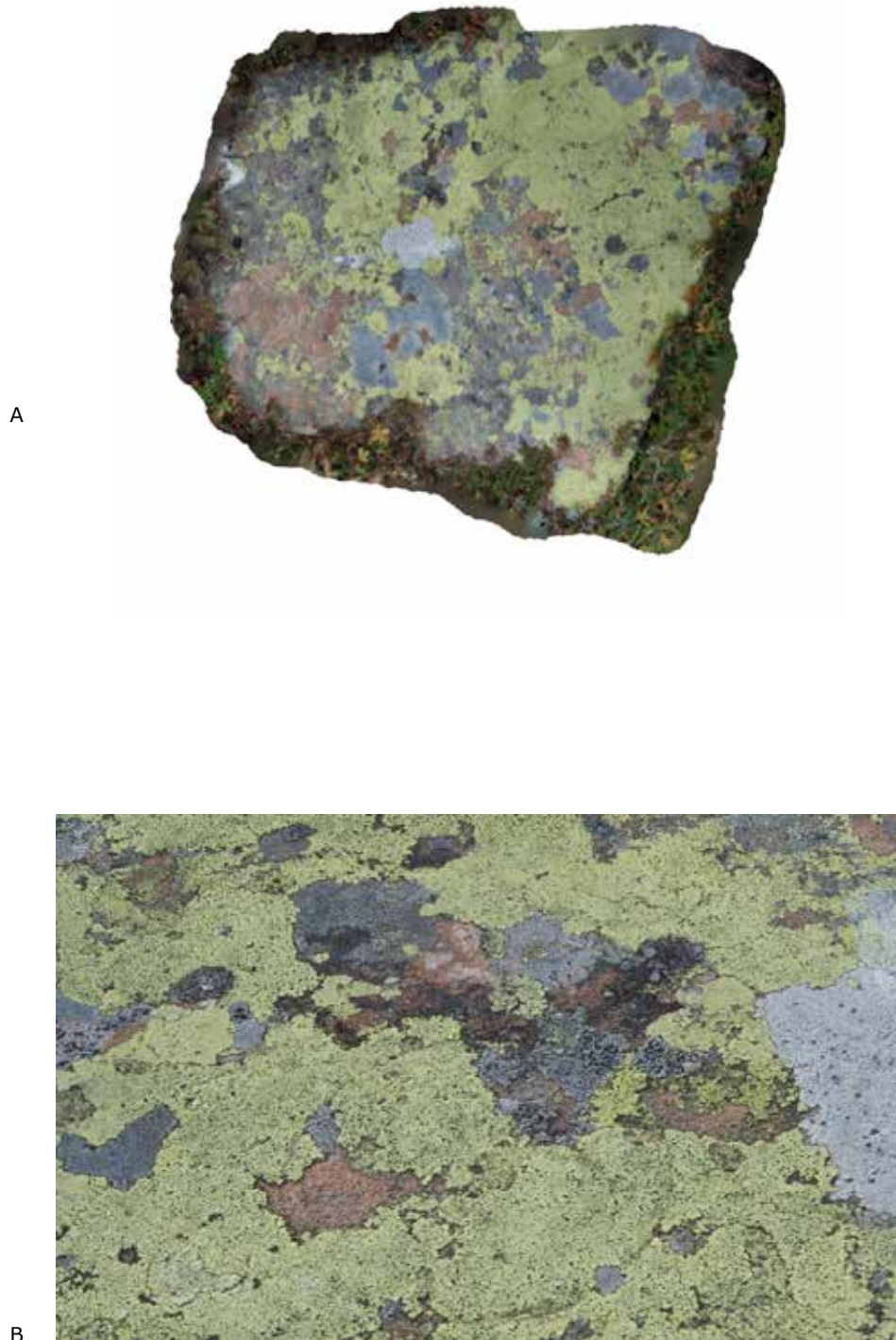


Figura 3.6 A e B – Modello del reperto SV312 e particolare delle incisioni. In questo reperto sono incisi diverse circonferenze affiancate ma non sovrapposte, difficilmente visibili a causa del lichene che ricopre quasi del tutto la roccia.

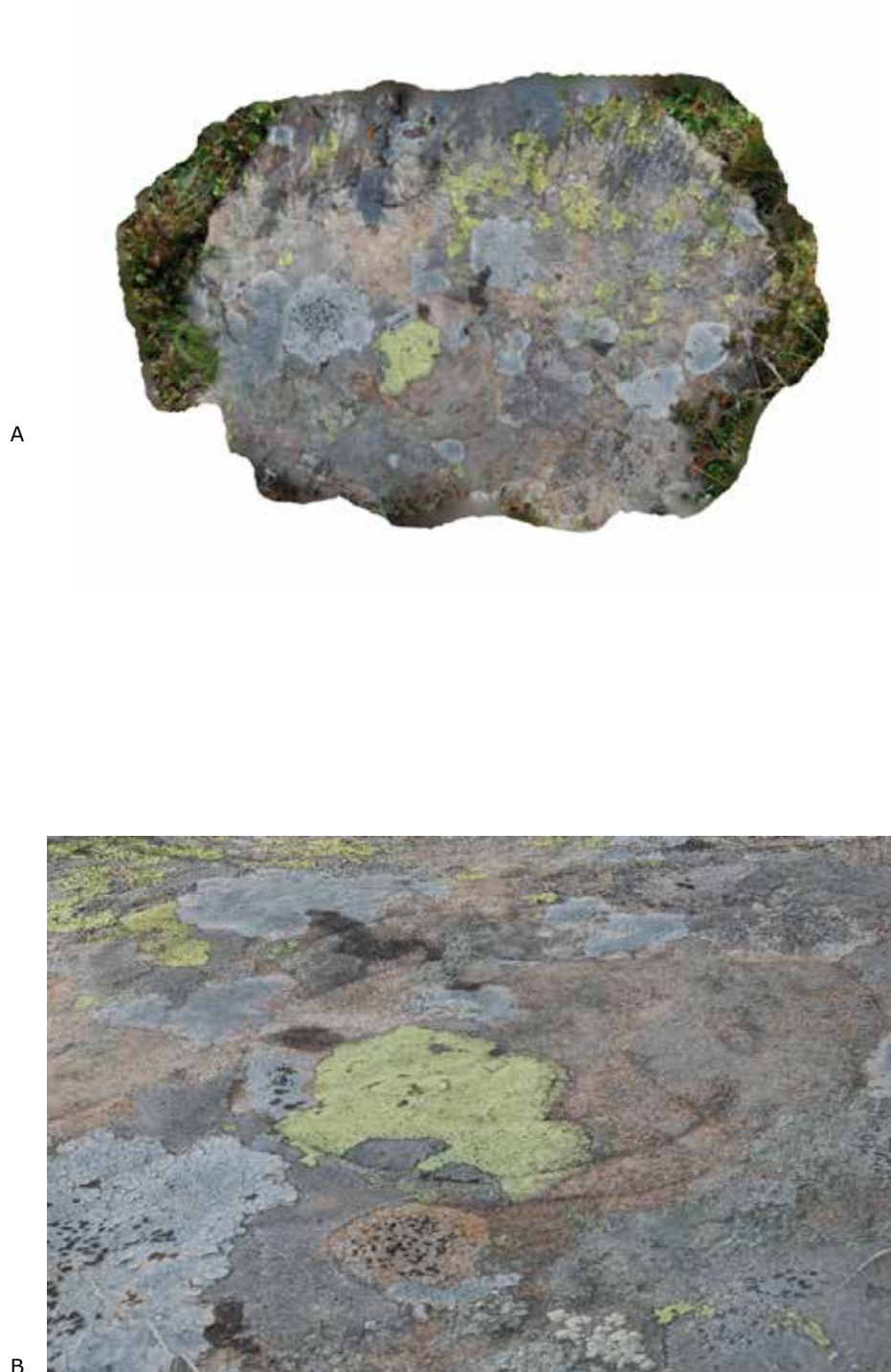


Figura 3.7 A e B – Modello del reperto SV310 e particolare delle incisioni. I segni qui apprezzabili hanno forma pseudocircolare e risultano meno precisi e delineati rispetto a quelli degli altri reperti.

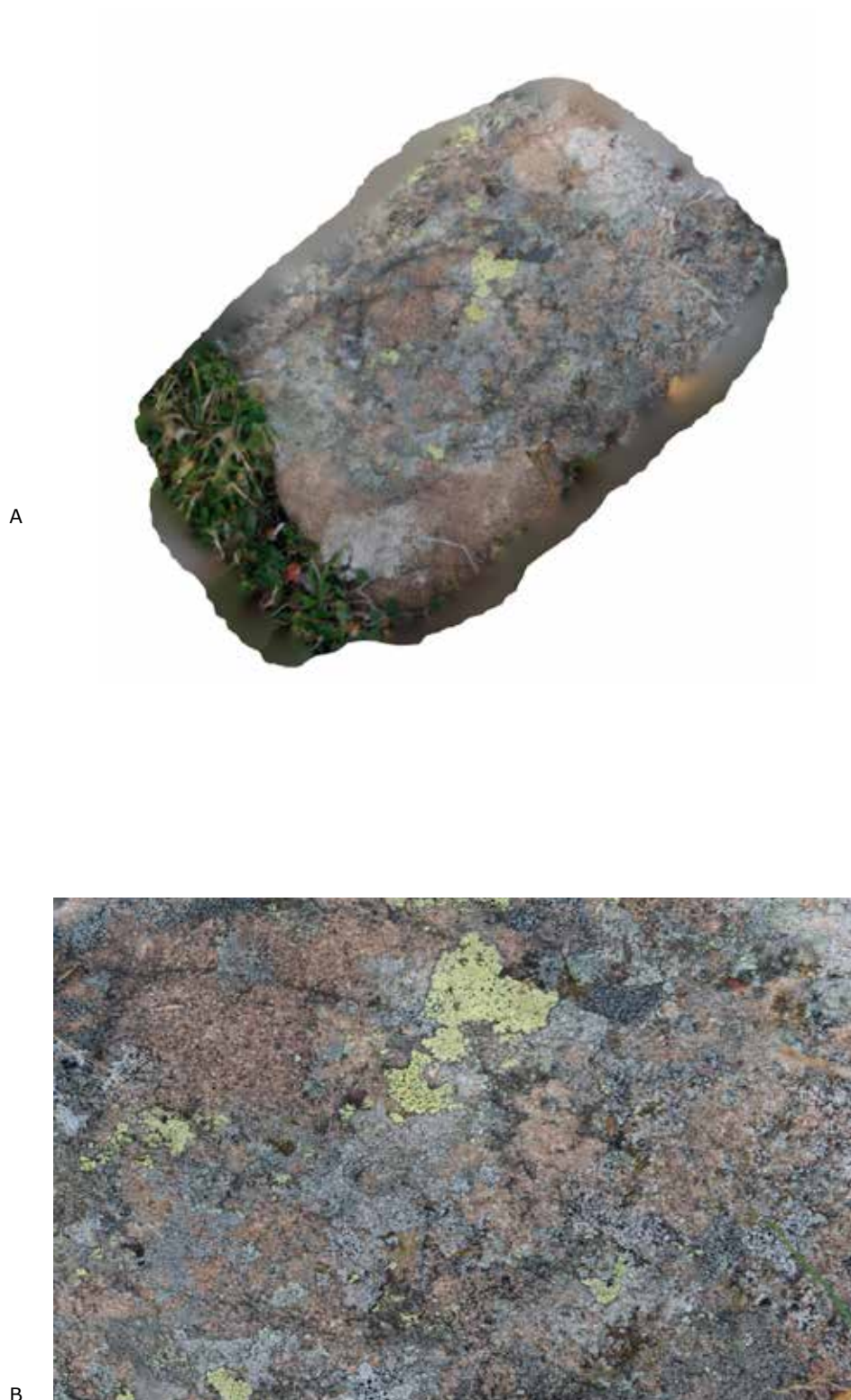


Figura 3.8 A e B – Modello del reperto SV311 e particolare delle incisioni.  
Questo reperto contiene incisioni di difficile valutazione, in quanto non definite e sovrapposte.

## 3.3 RILIEVO 2: IL SASSO ROSSO

### 3.3.1 Il soggetto del rilievo

L'oggetto del secondo rilievo è il Sasso Rosso, masso in arenaria che presenta numerose incisioni di diversa tipologia, situato ad un'altitudine di circa 1900 m nel Plan de la Saleres, a qualche centinaia di metri dalla strada asfaltata che conduce da San Vito di Cadore al Passo Giaù.

Il Sasso Rosso si presenta interamente circondato da una recinzione in rete, posta a circa mezzo metro di distanza dal sasso stesso.

### 3.3.2 Dati del rilievo e problematiche affrontate

Il Sasso Rosso è stato oggetto di rilievo fotogrammetrico da terra, metodologia scelta per la praticità di utilizzo in un contesto dove i movimenti intorno al masso stesso risultavano difficili. L'utilizzo di tecniche diverse, quali ad esempio la scansione laser, risultava impossibile per la necessità di mantenere una distanza prestabilita tra sensore e oggetto, che la presenza della recinzione non avrebbe permesso.

Le prese totali eseguiti risultano essere 1065, selezionati successivamente in fase di ricostruzione con Photoscan.

Il tempo di esecuzione della fase di presa raggiunge complessivamente le quattro ore.

La difficoltà maggiore riscontrata riguarda innanzi tutto la complessità geometrica del masso stesso e la grandissima quantità di incisioni rupestri, presenti non solo nella porzione sommitale del blocco ma anche lateralmente, fino a terra.

La difficoltà di movimento intorno al soggetto ha costituito poi un'ulteriore problematica da affrontare.

La composizione stessa del Sasso Rosso non permetteva inoltre nessun appoggio da parte dell'operatore in fase di rilievo, a causa della fragilità di questa roccia.

Infine, la scarsa presenza di alberi intorno al masso, ha favorito una buona illuminazione durante tutto il lavoro, generando però zone d'ombra piuttosto estese dovute alla vicinissima recinzione, che compaiono nei fotogrammi e di conseguenza nella ricostruzione (Fig. 3.9).



Figura 3.9 – L'ombra dovuta dalla vicina recinzione compare nel modello generando un difetto di *texture*.

### 3.3.3 La ricostruzione tridimensionale

La ricostruzione 3D, effettuata mediante il software Photoscan Professional Edition, ha comportato un tempo di elaborazione pari a circa sei ore, dovuto all'elevato numero di fotogrammi inseriti (circa un migliaio). Il risultato ottenuto è il seguente (Figg. 3.10-3.11-3.12-3.13).



Figura 3.10 –La ricostruzione del Sasso Rosso e del cippo che ospita.



Figura 3.11 – Particolare del modello. Porzione sommitale che ospita le incisioni a croce.



Figura 3.12 – Visione frontale della ricostruzione.



Figura 3.13 – Particolare del Sasso Rosso dall’alto. Nella porzione posteriore al cippo è possibile notare un gruppo di incisioni filiformi appena percepibili, questo a causa della loro profondità submillimetrica e dell’ombra generata dal cippo stesso.

\*

In prossimità del Sasso Rosso, a circa 20 metri dalla Muraglia del Giau nel Plan de la Saleres, è stato rinvenuto un ulteriore piccolo masso in arenaria recante diverse incisioni. Il reperto, di dimensioni approssimative pari a 20 cm x 30 cm, si presentava a terra completamente ricoperto dalla vegetazione.

È stato quindi eseguito un rilievo fotogrammetrico da terra che ha comportato circa 30 prese, successivamente utilizzati dal software Photoscan per la ricostruzione tridimensionale. Il risultato ottenuto è il seguente (Fig. 3.14).



Figura 3.14 – Ricostruzione tridimensionale del piccolo masso recante incisioni rupestri. I segni qui rinvenuti ricordano alcune lettere dell’alfabeto venetico, già documentato in diversi ritrovamenti in aree limitrofe.

## 3.4 RILIEVO 3: IL SITO DI MONDEVAL DE SORA

### 3.4.1 Il soggetto del rilievo

Il terzo lavoro eseguito interessa una porzione del sito di Mondeval de Sora, area archeologica che ha restituito una sepoltura mesolitica. La zona interessata si presenta pianeggiante e circondata da piccoli rilievi collinari, ospita inoltre diversi massi erratici di notevoli dimensioni. La generazione di un modello tridimensionale di quest'area apre la strada a molteplici utilizzi, dallo studio del paesaggio archeologico all'utilizzo della realtà aumentata.

### 3.4.2 Dati del rilievo e problematiche affrontate

Il rilievo dell'area è stato eseguito mediante acquisizione aerea dei fotogrammi e si compone di due parti.

#### *Parte prima: utilizzo di un piano di volo*

La presa aerea è stata programmata inizialmente mediante un piano di volo. Il punto di partenza scelto per il decollo si collocava in posizione leggermente sopraelevata rispetto alla zona di interesse, sopra una piccola collina adiacente il sito.

Il dispositivo aereo, considerata la durata di ogni batteria, avrebbe dovuto sorvolare un'area di 300 m x 200 m, mantenendosi ad un'altezza dal suolo di 25 m.

Sono stati eseguiti tre tentativi di volo utilizzando questa tipologia di controllo remoto, tutti terminati dopo pochi minuti dal decollo per improvvisa perdita di quota del dispositivo. Sono quindi stati programmati dei piani di volo che prevedessero la copertura del sito mediante aree ridotte di 200 m x 100 m e successivamente mosaicate, nel tentativo di rendere meno complessa la fase di presa; è stata inoltre abbassata la quota di altezza dal suolo a 20 m.

Anche in questo caso i tentativi di volo si sono rivelati fallimentari.

L'ipotesi più accreditata, che spieghi il malfunzionamento del dispositivo aereo, è la perdita improvvisa di segnale, dovuta ad uno sfavorevole allineamento dei satelliti sopra l'area di Mondeval, che ricordiamo trovarsi in una posizione di depressione rispetto alle montagne circostanti. L'uso dei satelliti in orbita si rende infatti necessario per il rispetto delle coordinate GPS imposte dal piano di volo al dispositivo.



*Parte seconda: utilizzo di comandi manuali*

Per ovviare al problema di segnale che impediva la corretta esecuzione del piano di volo, si è deciso di attuare un comando manuale del dispositivo aereo, nonostante le imprecisioni legate a questa scelta. È stata quindi eseguita la presa dei fotogrammi per una piccola porzione del sito di interesse, mantenendo una distanza suolo-sensore di circa 15 metri; le prese ottenute sono 107.

Non è stato possibile completare il rilievo dell'intera area a causa delle difficoltà di controllo manuale.

### **3.4.3 La ricostruzione tridimensionale**

La ricostruzione 3D, effettuata mediante il software Photoscan Professional Edition, ha comportato un tempo di elaborazione pari a circa 50 minuti. La ricostruzione ottenuta risulta parziale e presenta zone vacanti, difetti dovuti al controllo manuale del velivolo.

Il risultato ottenuto è il seguente (Figg. 3.15-3.16-3.17-3.18-3.19).



Figura 3.15 – Ricostruzione parziale dell'area di Mondeval de Sora. La forma irregolare del modello 3D ottenuto è dovuta al comando manuale, e quindi impreciso, del drone utilizzato in fase di presa.



Figura 3.16 – Particolare della ricostruzione. La risoluzione del modello 3D ottenuto è tale da permettere una precisa visuale della superficie rilevata e della sua composizione.

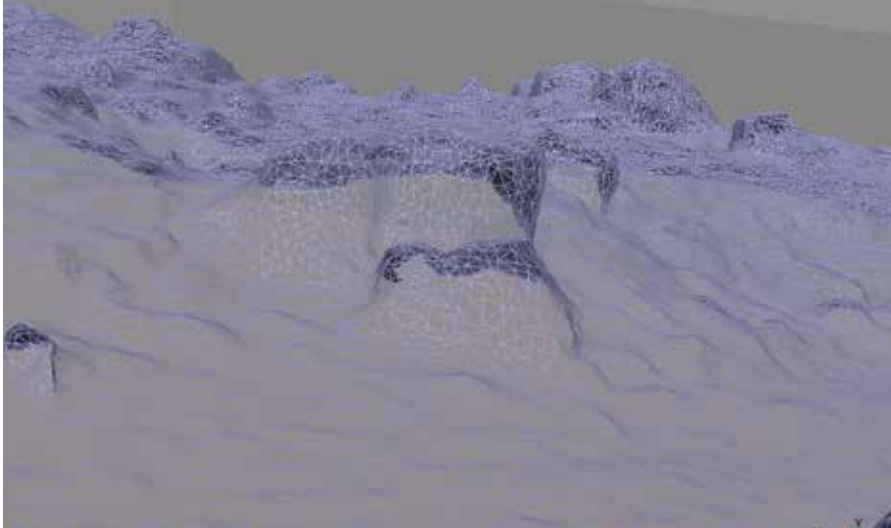


Figura 3.17 – Immagine della mesh poligonale generata per la ricostruzione del modello tridimensionale del sito di Mondeval de Sora. La geometria della superficie è descritta mediante diversi elementi quali vertici, spigoli, facce e poligoni.



Figura 3.18 – Vista dall'alto del modello. Si noti l'area non ricostruita per mancanza di fotogrammi.



Figura 3.19 – Vista perpendicolare al modello.



## CAPITOLO 4

# DIGITAL IMAGE PROCESSING

### 4.1 INTRODUZIONE

L'*image processing* è una disciplina che ha come fine la modifica di un'immagine attuata mediante l'utilizzo di algoritmi che sfruttano l'elaborazione numerica dei segnali<sup>1</sup>.

Il risultato ottenuto è dunque un'immagine elaborata o un dato numerico rappresentativo di una particolare caratteristica del dato iniziale.

In generale i processi di elaborazione trovano il loro punto di partenza nelle caratteristiche stesse delle immagini raster, in quanto memorizzate in forma di matrice di pixel, ognuno dei quali contenente informazioni sul colore e sulla luminosità del punto cui è associato. I software dedicati permettono all'utente di cambiare questi valori, ottenendo ad esempio un dato in output con informazioni modificate o altrimenti non percepibili<sup>2</sup>.

Questa pratica, oggi molto utilizzata nel campo dei Beni Culturali, si sviluppò all'inizio degli anni Sessanta ed era inizialmente dedicata alla trasformazione di immagini satellitari, medicali o per il riconoscimento ottico di caratteri. La "semplice" applicazione al fine di migliorare le fotografie entra nella routine di post produzione solo negli anni Settanta e Ottanta, quando i progressi tecnologici permisero una maggiore diffusione dell'apparecchiatura necessaria e vennero divulgati i primi software dedicati.

Le metodologie di *image processing* sono state qui per enfatizzare e delineare meglio il perimetro e la profondità millimetrica delle incisioni rupestri (Figg. 4.1 e 4.2).



Figura 4.1 – Incisione cruciforme studiata mediante metodologia RTI; appartiene alla porzione sommitale del Sasso Rosso.



Figura 4.2 – Il reperto SV317 rinvenuto nella Piana delle Baste; le incisioni che presenta sono state studiate mediante l'utilizzo di filtri di *edge detection*.

<sup>1</sup> Tecnica di analisi ed elaborazione digitale dei segnali elettrici, si basa sull'uso di processori dedicati con elevato grado di specializzazione.

<sup>2</sup> AA.VV. *Reflectance transformation imaging systems for ancient documentary artefacts*.

## 4.2 REFLECTANCE TRANSFORMATION IMAGING

### 4.2.1 Definizione

Il *Reflectance Transformation Imaging* (RTI) è una delle tecniche di *image processing* più utilizzate; questa metodologia ebbe origine nel 2000 presso i laboratori Hewlett-Packard, grazie al lavoro di Tom Malzbender, ed è oggi largamente applicata allo studio dei Beni Culturali<sup>3</sup>.

Quando si studia un oggetto, spesso si avverte la necessità di ruotarlo al fine di coglierne tutti i particolari visibili ad occhio nudo e la tecnica RTI è utilizzata proprio al fine di superare questa fase di analisi di un reperto, utilizzando la luce come strumento per enfatizzarne le caratteristiche morfologiche.

Partendo da un certo numero di fotografie digitali dell'oggetto in esame, le immagini RTI consentono infatti una visualizzazione interattiva dello stesso, a seconda di come l'utente orienta l'illuminazione generata virtualmente.

L'RTI permette quindi la descrizione geometrica della superficie rispetto alla luce, rivelando informazioni difficilmente percepibili tramite osservazione diretta<sup>4</sup>.

Le immagini generate possono assomigliare ad una normale fotografia bidimensionale, ma in realtà contengono informazioni tridimensionali sulla geometria dell'oggetto, descritta attraverso l'assegnazione da parte del software utilizzato di un valore di riflettanza<sup>5</sup> ad ogni pixel. In questo modo il programma è quindi in grado di prevedere quali informazioni di luce e ombra si generano sulla superficie inquadrata, rendendo interattivo l'utilizzo di queste immagini al cambiare della posizione di un punto luce.

Il *Reflectance Transformation Imaging* è dunque una metodologia di analisi di reperti basata su immagini e non richiede la generazione di una geometria complessa come nel caso del rilievo tridimensionale.

---

<sup>3</sup> CROWTHER C., CROWTHER K.

<sup>4</sup> MALZBENDER T., GELB D., WOLTERS H., ZUCKERMAN B. 2000.

<sup>5</sup> Con il termine riflettanza si indica la relazione tra la luce che incide su una data superficie e il grado di riflessione che essa genera. È quindi rappresentata dal rapporto matematico tra intensità del flusso radiante incidente e intensità del flusso radiante riflesso. Ogni corpo, se sottoposto a irraggiamento, presenta una determinata proprietà di riflessione, assorbimento e trasmissione del raggio luminoso. La riflettanza è quindi il potere riflessivo di un corpo sottoposto a radiazione luminosa.

## 4.2.2 Acquisizione dei dati

Le immagini RTI sono create dall'elaborazione congiunta di diverse fotografie digitali dell'oggetto, acquisite con la macchina fotografica in posizione zenitale.

In ogni fotografia, grazie all'ausilio di un punto di illuminazione mobile (torcia), la luce è proiettata da una differente posizione, producendo così una serie di scatti dello stesso oggetto con una variazione di luci e ombre.

La macchina fotografica utilizzata per l'acquisizione è una reflex digitale modello Nikon D80 (scheda tecnica al paragrafo 2.3.2), posizionata ad una distanza sensore-oggetto pari a circa un metro.

La fotocamera è stata impostata in modalità scatto automatico, con un intervallo di 2 secondi tra un'acquisizione e quella successiva.

In fase di acquisizione è inoltre necessario affiancare all'oggetto una sfera solida riflettente al fine di marcare la direzione della sorgente luminosa che, cambiando posizione ad ogni immagine, crea un emisfero di punti luce.

Mantenendo fisse le posizioni di macchina fotografica, sfera e oggetto esaminato, si procede muovendo il punto luce attorno al reperto secondo uno schema definito: si assumono delle posizioni approssimative muovendosi all'interno di una semisfera immaginaria, eseguendo tre scatti con angolatura a 30°, 45° e 60° circa ogni 30° di spostamento sul piano orizzontale, per un totale di 36 fotografie (Fig. 4.3).

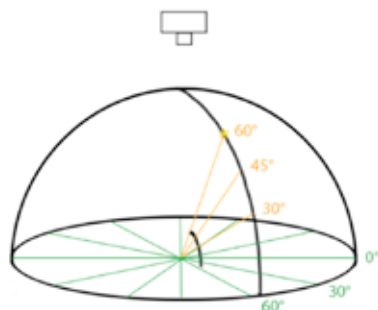


Figura 4.3 – Schema di acquisizione che illustra il posizionamento del punto luce rispetto all'oggetto.

Le diverse informazioni ottenute dagli scatti serviranno al software per generare un modello matematico che riproponga l'andamento della superficie rispetto all'illuminazione, permettendo all'utente di muovere un punto luce virtuale sull'immagine RTI apprezzando così particolari non osservabili ad un'analisi autoptica<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> PALMA G., CORSINI M., CIGNONI P., SCOPIGNO R., MUDGE M. 2010.

### 4.2.3 Il software RTIbuilder

Il software utilizzato in questo lavoro è RTIbuilder versione 2.0.2, programma *open source* che processando un set di fotografie è in grado di produrre un file RTI.

Il software è stato sviluppato da Joao Barbosa e dal suo team di ricercatori dell'Università di Minho (Portogallo), e cofinanziato dalla stessa università e dall'organizzazione non profit Cultural Heritage Imaging<sup>7</sup>.

La *pipeline* di elaborazione richiede come primo passo la creazione di una cartella del progetto, contenente una sottocartella denominata *jpeg-exports* nella quale vengono inserite le fotografie di partenza, tutte in formato .jpg.

Prima di procedere con la vera e propria elaborazione il programma impone di assegnare un nome al progetto e la selezione dell'algoritmo da applicare, a scelta tra *HSH Fitter* (per creare un file .rti) e *PTM Fitter* (per creare un file .ptm) (Fig. 4.4).

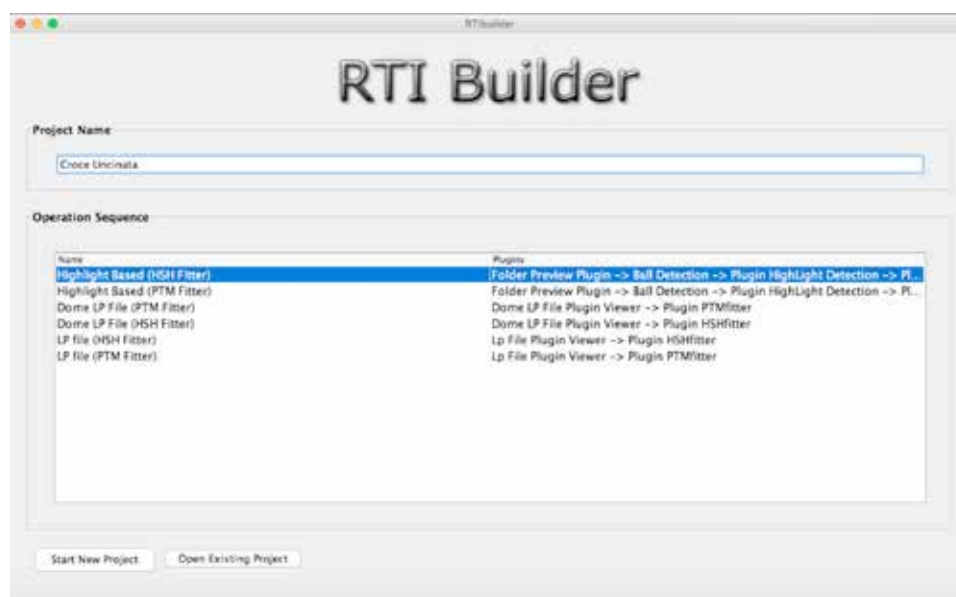


Figura 4.4 – Interfaccia grafica di RTIbuilder. Nella schermata iniziale è possibile scegliere il nome del nuovo progetto e l'algoritmo da utilizzare per l'elaborazione delle immagini.

Dato il via al nuovo progetto di lavoro (*tool Start New Project*) sarà possibile importare nel software la cartella contenente le immagini creata in precedenza (*tool Open Folder*).

Da una delle fotografie importate verrà richiesto di selezionare l'area che racchiude la sfera riflettente, necessaria per la localizzazione dei punti luce (Fig. 4.5).

<sup>7</sup> [www.culturalheritageimaging.org](http://www.culturalheritageimaging.org)



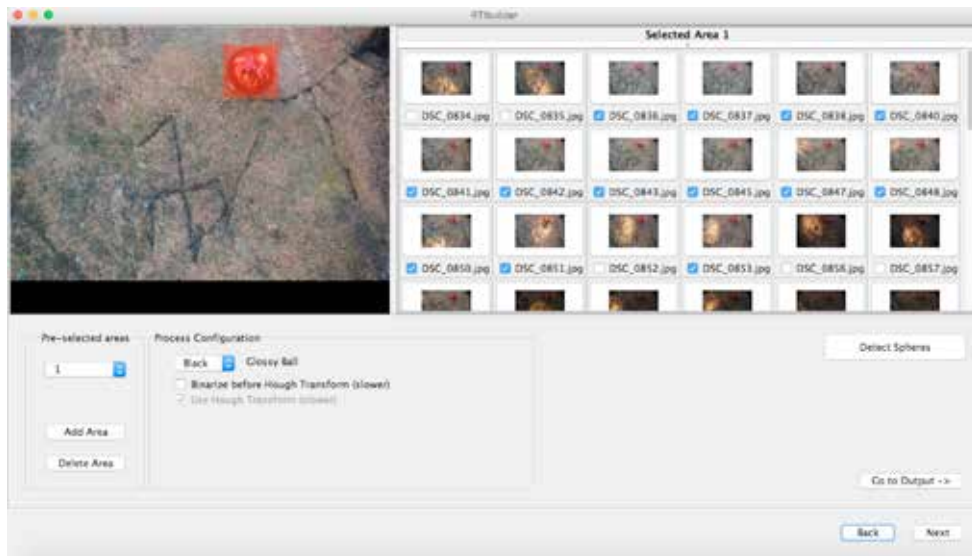


Figura 4.5 – Nell’interfaccia di RTIbuilder è possibile osservare il set di immagini importate e nel riquadro in rosso la selezione dell’area che racchiude la sfera riflettente.

Attraverso il comando *Detect Spheres* il software è ora in grado di riconoscere, in ciascuna immagine, la sfera selezionata; combinando le sfere con l’algoritmo *light position* è infine in grado di creare il file RTI. In questa fase di elaborazione è importante controllare in ciascuna fotografia il giusto posizionamento di ogni sfera, per una corretta ricostruzione del posizionamento spaziale del punto luce (Fig. 4.6).



A B

Figure 4.6 A e B – Il corretto posizionamento del centro della sfera e l’ampliamento del raggio della selezione.

Nell'ultimo *step* previsto dal software è possibile notare il punto di riflessione presente su ogni sfera, evidenziato tramite un piccolo crocino rosso. Anche in questo caso risulta opportuno il controllo del posizionamento in ogni singolo scatto (Fig. 4.7).



Figura 4.7 – Il punto luce riflesso nella sfera è individuato correttamente attraverso un crocino rosso.

RTIbuilder permette infine di ritagliare l'area di interesse (Fig. 4.8), salvando il risultato finale in *finished-files*, i file *.lp* in *assembly-files* e le eventuali immagini ritagliate in *cropped-files*.

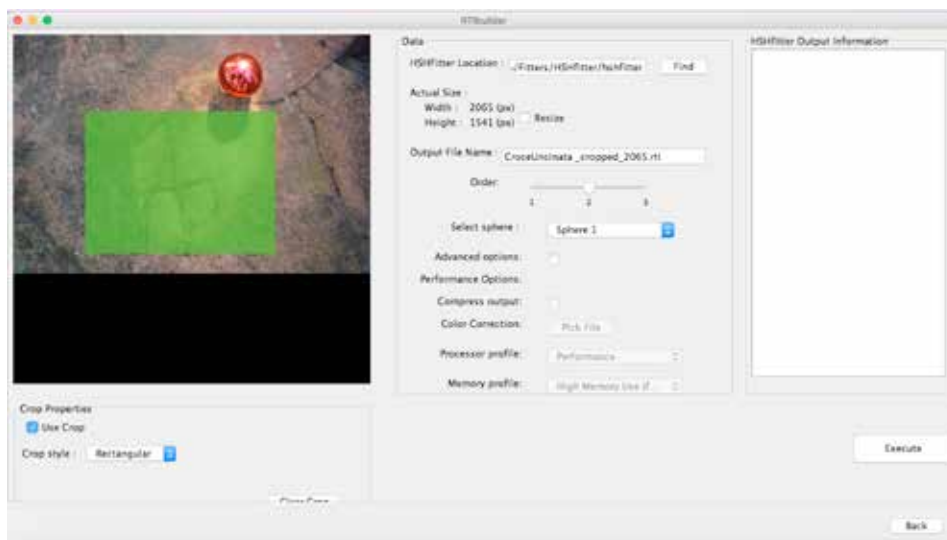


Figura 4.8 – Il software permette di selezionare e ritagliare l'area di interesse (in verde).

#### 4.2.4 Il software RTIviewer

Il software RTIviewer è un visualizzatore open source di immagini RTI o PTM (*Polynomial Texture Mapping*). Il programma, utilizzato nella versione 1.1.0, permette all'utente di interagire virtualmente con il file RTI generato, restituendo un'immagine foto realistica nella quale è possibile modificare il posizionamento della sorgente luminosa<sup>8</sup>.

L'interfaccia del software risulta di semplice utilizzo, composta da un pannello di comando che permette all'utente di interagire con l'immagine e impostare i diversi parametri di *rendering* (Fig. 4.9).

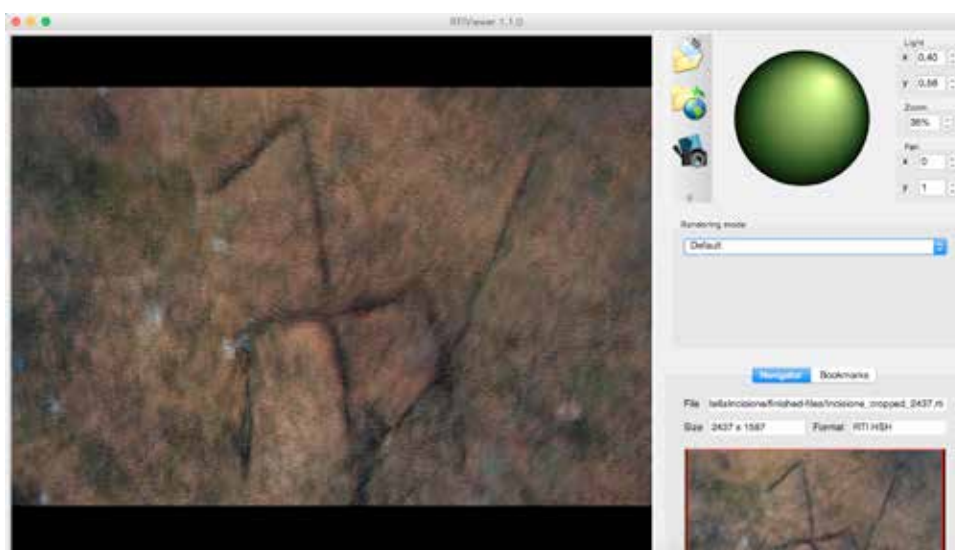


Figura 4.9 – Interfaccia grafica di RTIviewer. A destra è visibile il pannello di comando che permette all'utente di interagire in tempo reale con l'immagine.

La sfera verde visibile nel pannello di comando corrisponde al *Light Control*, tasto che consente di modificare la posizione della luce muovendo il mouse sopra di esso; in tempo reale la modifica dell'illuminazione viene quindi trasmessa all'immagine posta a sinistra.

La finestra *Rendering Dialog* permette invece di selezionare la metodologia di *Shading Enhancement* tra quelle disponibili. Le metodologie proposte, aumentando l'ombreggiatura, hanno l'obiettivo di migliorare la percezione di forme e dettagli.

Infine è disponibile il comando *Snapshot* (identificato dalla figura di una macchina fotografica), che permette di salvare le immagini ottenute.

<sup>8</sup> [www.culturalheritageimaging.org](http://www.culturalheritageimaging.org)

### 4.2.5 L'incisione cruciforme: risultati e problematiche affrontate

L'oggetto di studio al quale è stata applicata la metodologia RTI è una delle più interessanti incisioni del Sasso Rosso, presente sulla parte sommitale del masso.

Si tratta di una incisione cruciforme con due estremità uncinata dalle dimensioni approssimative di 12 cm x 8 cm, la profondità dell'incisione è di circa 2 mm.

In fase di acquisizione delle immagini le problematiche riscontrate, che hanno influito sulla qualità del file RTI ottenuto, sono essenzialmente due:

1. L'ambiente ideale di acquisizione è solitamente una stanza buia, dove l'effetto di luci e ombre è ben visibile sull'oggetto di interesse e di conseguenza negli scatti eseguiti. Nel caso studio il luogo di acquisizione è un ambiente aperto e molto soleggiato, si è reso quindi necessario oscurare l'area intorno all'incisione tramite pannelli di polistirolo e di cartone, al fine di rendere visibile l'illuminazione creata dalla torcia sulla superficie studiata. Questo ha comportato non pochi problemi, considerando la difficoltà di mantenere eretti i pannelli oscuranti senza l'ausilio di nastro adesivo o altri artifici non permessi per non danneggiare il reperto.
2. Il posizionamento zenitale della macchina fotografica viene attuato mediante un cavalletto; nel caso studio, per ottenere una posizione stabile del sensore rispetto all'incisione e una giusta distanza tra di essi, una gamba del cavalletto avrebbe richiesto l'appoggio sul Sasso Rosso, non permesso per motivi di tutela del masso. Questo ha comportato leggere variazioni di inquadratura nel set di fotografie ottenute, che hanno portato ad un effetto sfuocato dell'immagine RTI elaborata (Fig. 4.10).



Figura 4.10 – Il file RTI generato dall'elaborazione del set di fotografie.  
L'incisione appare sfuocata a causa di piccoli spostamenti della macchina fotografica in fase di acquisizione.

Di seguito alcune immagini ottenute con RTViewer, grazie alle quali è possibile cogliere il profilo dettagliato dell'incisione (Figg. 4.11-4.12).



Figura 4.11 – Immagine con *rendering mode* impostato su *Specular Enhancement*. L'obiettivo di questa modalità è di enfatizzare la percezione delle forme aggiungendo alla superficie un effetto di specularità.



Figura 4.12 – Immagine con *rendering mode* impostato su *Normals Visualization*.

## 4.3 UTILIZZO DI FILTRI

### 4.3.1 Introduzione

La seconda metodologia di *image processing* utilizzata in questo lavoro consiste nell'elaborazione di fotografie del reperto SV317 attraverso l'applicazione di filtri.

Modificare un'immagine, in questo caso una fotografia, significa variare i valori dei pixel che la compongono attraverso algoritmi specifici; nello specifico le operazioni di filtraggio sono utilizzate per il riconoscimento dei contorni, nel caso fossero poco definiti, o per renderli meglio individuabili (*edge detection*), nel caso l'immagine risulti già sufficientemente nitida.

### 4.3.2 Edge Detection

L'*edge detection* (riconoscimento di contorni) ha come scopo il marcare i punti di un'immagine digitale in cui l'intensità luminosa cambia bruscamente, in quanto sono di norma sinonimi di discontinuità della superficie dell'oggetto rappresentato, ma anche di modifica delle proprietà dei materiali e dell'illuminazione proveniente dall'ambiente circostante.

Gli algoritmi di estrazione più semplici sono maschere 3x3, i cui coefficienti sono pesati attorno al termine centrale. Ad esempio, se si vuole localizzare un punto all'interno dell'immagine, si ricorre al seguente filtro:

$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

Tale filtro evidenzia solo il pixel in forte contrasto con i circostanti. Se si verifica che:

$$|g(i,j)| \geq T$$

con T non negativo, allora il pixel (i, j) è un punto isolato.

Di conseguenza, l'operazione di *edge detection* genera in *output* immagini contenenti meno informazioni rispetto a quelle originali, poiché l'utilizzo di questi filtri elimina la maggior parte dei dettagli non rilevanti al fine dell'individuazione dei contorni, mantenendo invece solo ciò che è necessario alla descrizione strutturale e geometrica degli oggetti studiati<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> MAINI R., AGGARWAL H., 2009. *Study and comparison of various image edge detection techniques*. International Journal of Image Processing.

I metodi per il riconoscimento dei contorni sono molteplici e riconducibili essenzialmente a due categorie:

- metodi basati sulla ricerca (*search-based*)
- metodi basati sull'attraversamento dello zero (*zero-crossing*)

I primi riconoscono i contorni determinando la direzione in cui si ha il massimo gradiente locale utilizzando i massimi e i minimi della derivata prima dell'immagine, i secondi cercano invece i punti in cui la derivata di secondo ordine passa per lo zero.

L'operatore gradiente è definito come il vettore le cui componenti sono le derivate parziali nelle diverse direzioni (due nel caso di immagini):

$$\nabla f(x, y) = \left( \frac{\partial f(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right)$$

### 4.3.3 Il software Gimp

Il software *open source* utilizzato per il processamento delle immagini del reperto SV317 è Gimp (*GNU Image Manipulation Program*), nella versione 2.8.2.

Il programma, dedicato alla creazione e alla modifica di immagini digitali, fu sviluppato nell'Università di Berkeley nel 1997, grazie al lavoro di Spencer Kimball e Peter Mattis<sup>10</sup>.

L'interfaccia grafica si presenta di facile utilizzo e importata l'immagine di interesse il software mette a disposizione una vasta serie di filtri (Fig. 4.13).

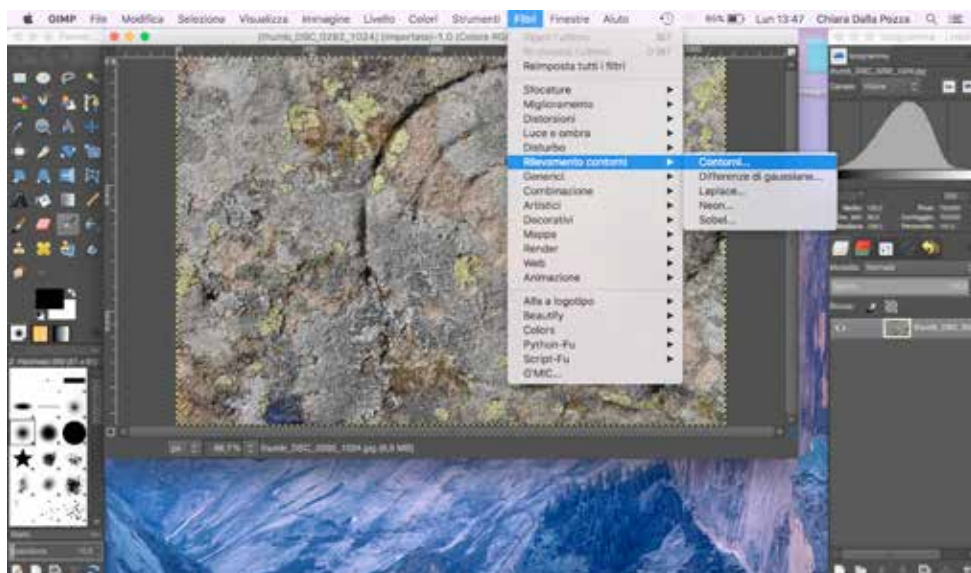


Figura 4.13 – Interfaccia di utilizzo del software Gimp. Il programma mette a disposizione dell'utente filtri diversificati, tra i quali diversi operatori per la funzione di rilevamento contorni.

<sup>10</sup> *GNU Image Manipulation Program, Manuale Utente Image Processing, 2nd Edition.*  
www.gimp.org

### 4.3.4 Il reperto SV317: risultati e problematiche

La scelta di operare con i filtri di *edge detection* su una delle immagini acquisite del reperto SV317 nasce dalla necessità di evidenziare al meglio una parte dell'incisione che si presenta strutturata in cerchi perfettamente concentrici, scolpiti con una profondità che varia tra 1 e 3 mm circa.

All'immagine di partenza, importata nel software Gimp, sono stati applicati diversi filtri per il rilevamento contorni, che si sono però rivelati inefficaci (Fig. 4.14).

Nelle immagini ottenute, infatti, le incisioni risultavano meno visibili rispetto alla fotografia iniziale; il motivo è probabilmente da ricondursi alla profondità millimetrica dei solchi, non apprezzabile con facilità dal software.

Si è scelto quindi di eseguire nuovamente l'operazione di *edge detection* utilizzando come punto di partenza il modello tridimensionale del reperto SV317, invece che un'immagine di esso, mappando la profondità della superficie mediante un software specifico.



Figura 4.14 – Risultato dell'applicazione del filtro *Differenziale*. Questo filtro di Gimp dovrebbe enfatizzare i contorni basandosi sulla differenza di colorazione tra matrice e incisione dovuto alla profondità.



### 4.3.5 Il software Meshlab

Il software *open source* utilizzato per l'operazione di *edge detection* da modello 3D è Meshlab, nella versione 1.3.3.

Questo programma è stato sviluppato nel 2005 dai ricercatori dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione di Pisa e si propone di aiutare l'operatore nelle fasi di filtraggio, pulizia, *editing* e *rendering* delle *mesh*<sup>11</sup>.

L'interfaccia grafica si presenta di facile utilizzo e permette una vasta serie di operazioni sul modello tridimensionale importato (Fig. 4.15).

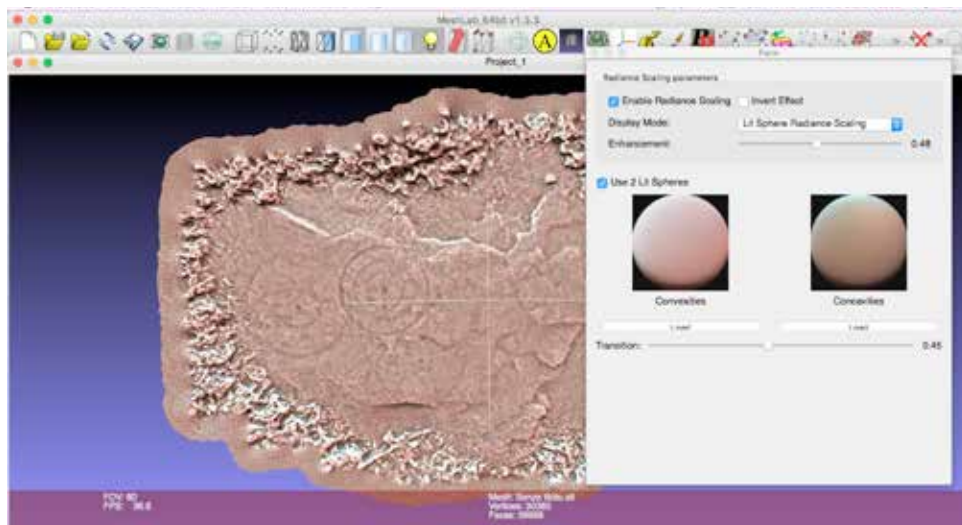


Figura 4.15 – Interfaccia grafica del software Meshlab. Nella finestra di dialogo in grigio, è possibile modificare i parametri del filtro utilizzato di *Radiance Scaling*, aumentando o diminuendo l'effetto di *enhancement* della superficie e scegliendo se delineare ulteriormente le concavità e le convessità del modello utilizzando diverse colorazioni.

<sup>11</sup> [www.meshlab.sourceforge.net](http://www.meshlab.sourceforge.net)

### 4.3.6 *Edge Detection* da modello tridimensionale: i risultati ottenuti

Il modello tridimensionale del reperto SV317, ottenuto mediante ricostruzione con Agisoft Photoscan, è stato inizialmente salvato in formato .stl e importato nel software Meshlab. Il reperto è stato quindi sottoposto all'azione del filtro *Radiance Scaling*, che attua un riconoscimento dei contorni mappando la profondità della superficie del modello.

Il risultato ottenuto sulla ricostruzione del reperto SV317 è qui di seguito riportato (Fig. 4.16).

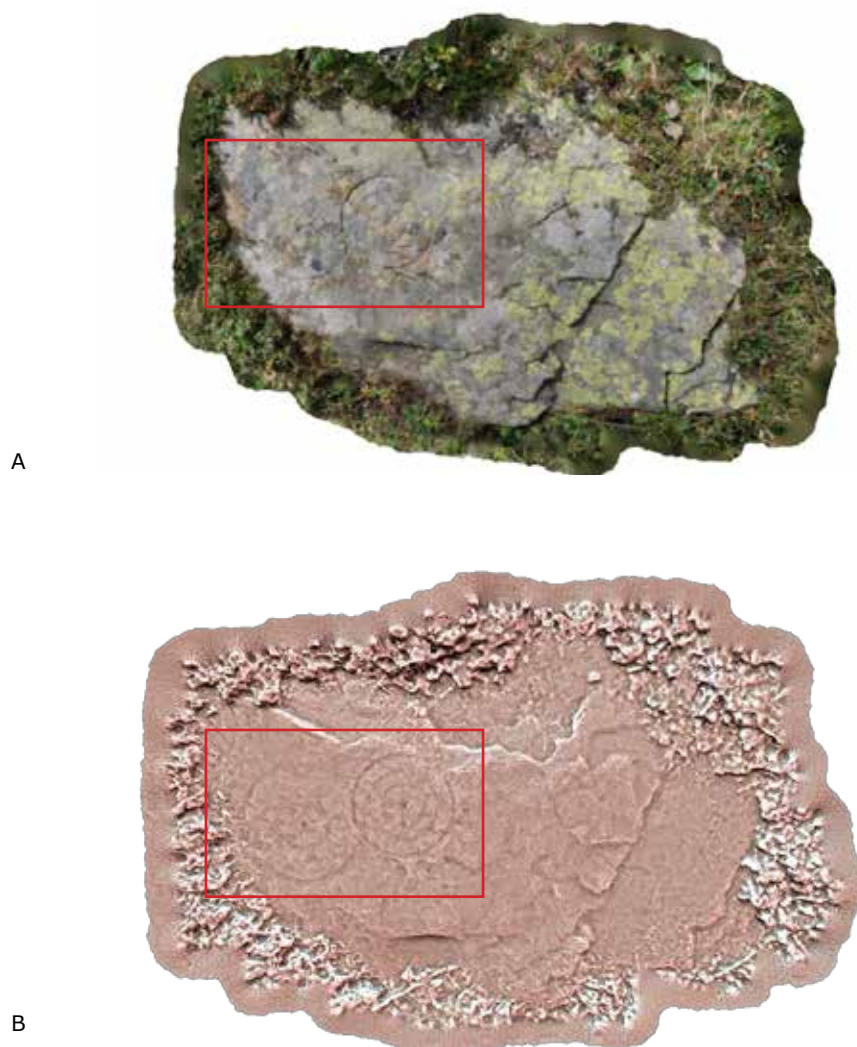


Figura 4.16 A e B – Confronto tra il modello 3D del reperto SV317 prima e dopo l'applicazione del filtro *Radiance Scaling*. Si noti la presenza di una seconda incisione circolare a sinistra di quella principale, che grazie all'operazione di enfattizzazione appare nitida e più visibile.

Constatato l'interessante risultato dell'operazione di *edge detection* su modello tridimensionale, si è scelto di enfatizzare allo stesso modo le incisioni rupestri presenti sugli altri reperti trovati nella Piana delle Baste e sul piccolo masso rinvenuto in prossimità del Sasso Rosso (Fig. 4.17-4.18-4.19).

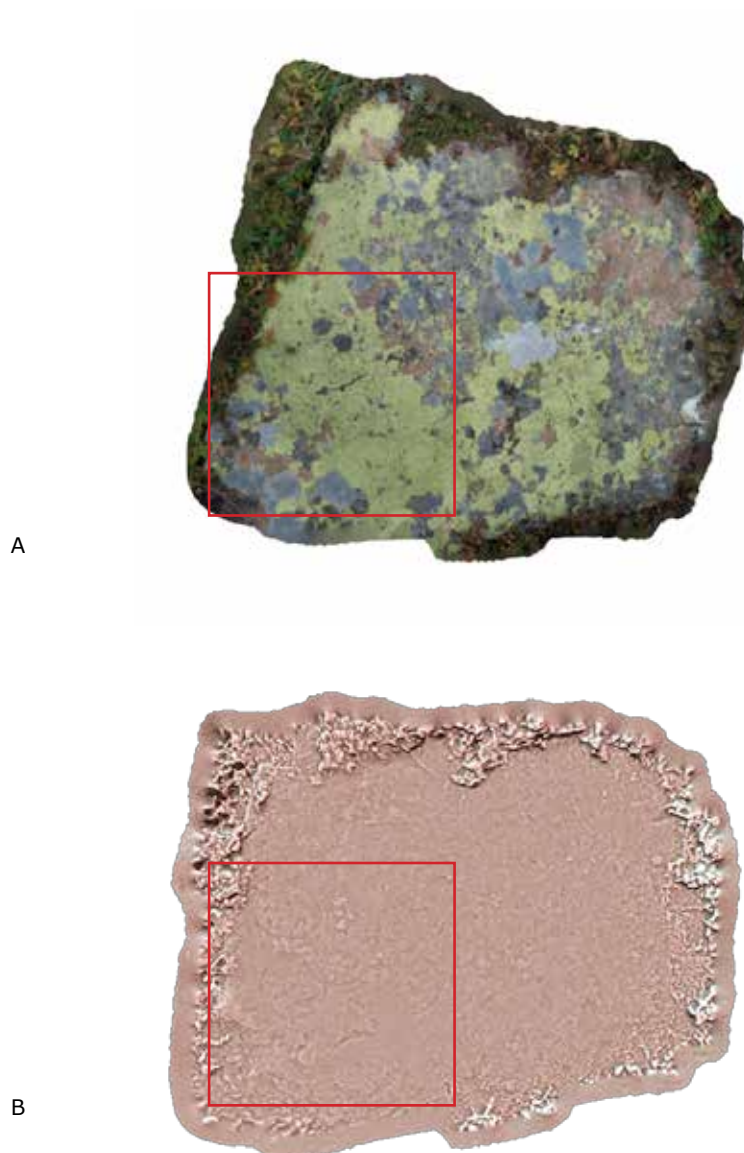


Figura 4.17 A e B – Nel modello del reperto SV312 l'applicazione del filtro *Radiance Scaling* permette di individuare cinque incisioni circolari, delle quali solo tre sono percepibili sul modello 3D iniziale a causa del lichene che copre l'intero masso.

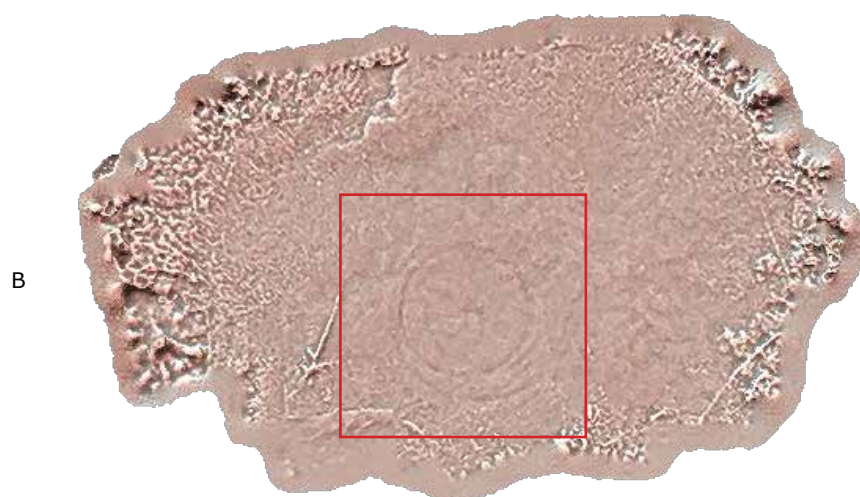
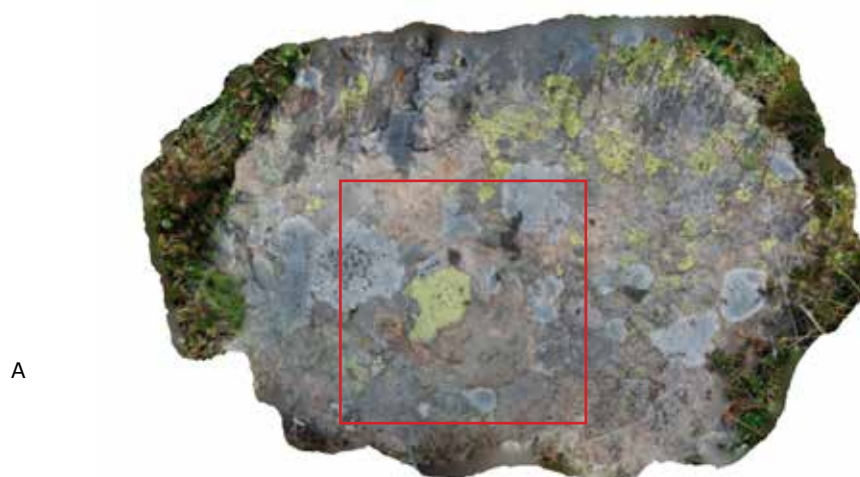


Figura 4.18 A e B – *Edge detection* applicato al modello del reperto SV310. Le incisioni presenti, che risultavano particolarmente poco visibili, sono ora più delineate.

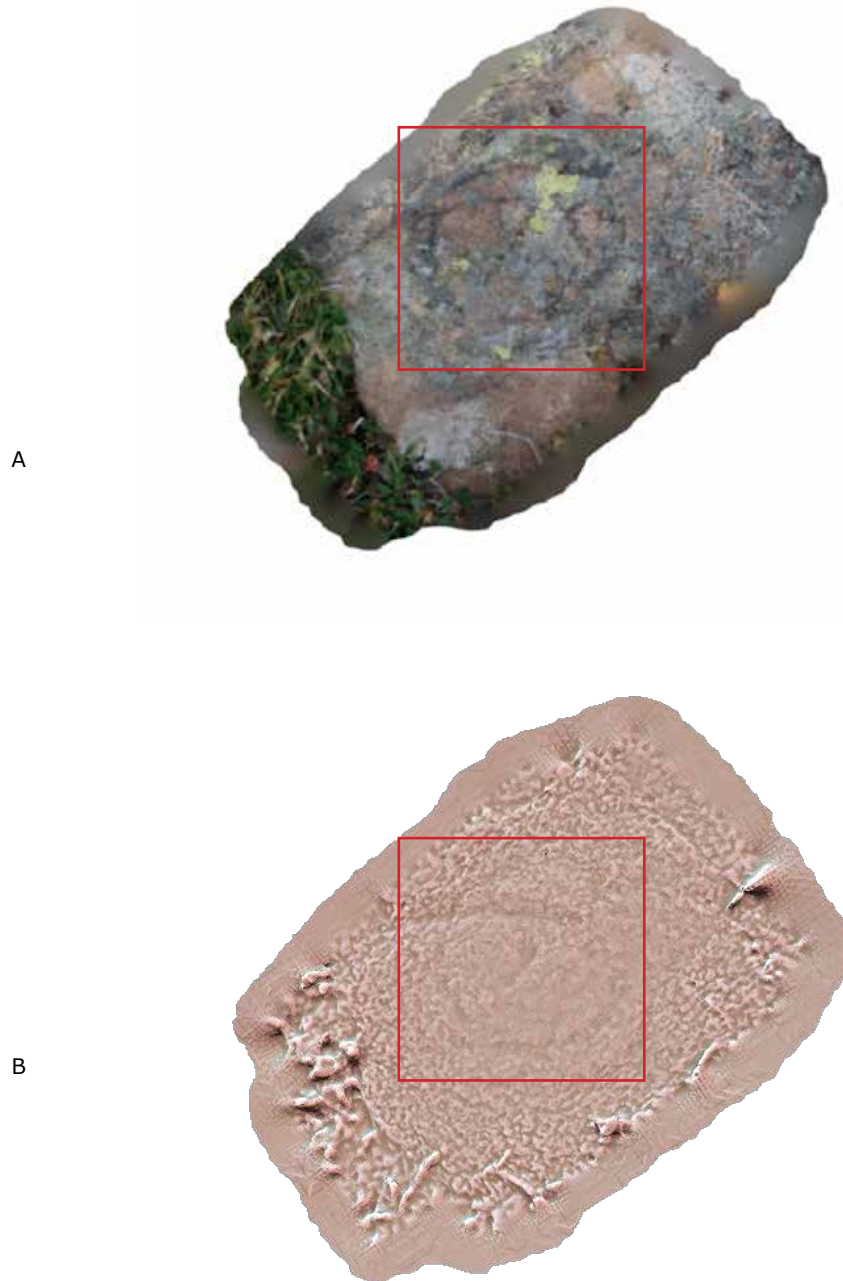


Figura 4.19 A e B – L'applicazione del filtro *Radiancance Scaling* al modello tridimensionale del reperto SV311 non ha migliorato la percezione delle incisioni che riporta, che si presentano difficilmente distinguibili e di spessore minore rispetto a quelle degli altri ritrovamenti.

Il masso rinvenuto a breve distanza dal Sasso Rosso presentava ad un esame autoptico diverse incisioni profonde circa 3-5 mm. Le incisioni, che nel modello generato risultavano poco chiare e di difficile interpretazione, sono state quindi enfatizzate mediante il filtro *Radiance Scaling*.

Il risultato ottenuto permette di indentificare quattro incisioni principali che ricordano i simboli presenti sul Sasso Rosso; in particolare si noti un verosimile "segno di casa" invisibile nella ricostruzione tridimensionale ed ora evidenziato nel riquadro (Fig. 4.20).

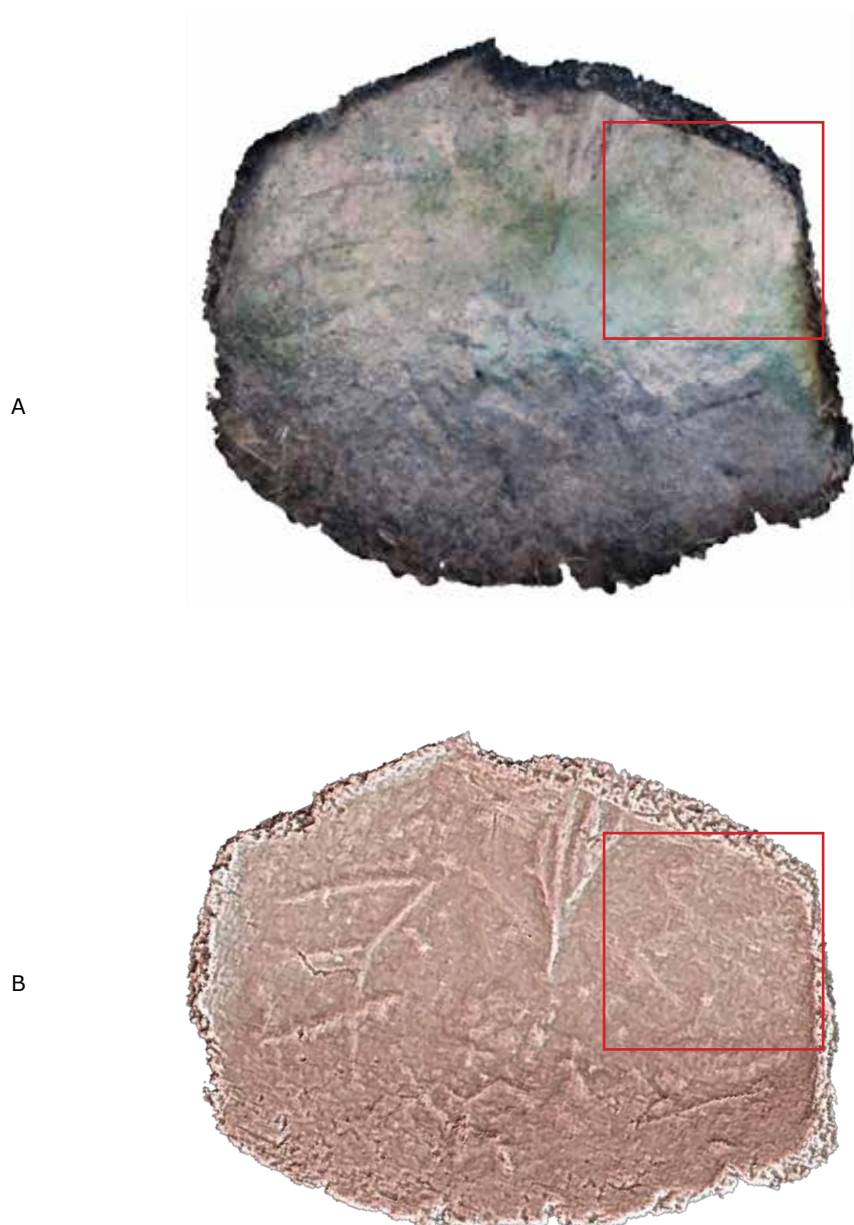


Figura 4.20 A e B – *Edge detection* applicato al modello del piccolo masso adiacente al Sasso Rosso. Le incisioni presenti, poco visibili sul modello, sono ora ben definite e riconoscibili.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV. *Reflectance transformation imaging systems for ancient documentary artefacts*.  
[http://eprints.soton.ac.uk/204531/1/ewic\\_ev11\\_s8paper3.pdf](http://eprints.soton.ac.uk/204531/1/ewic_ev11_s8paper3.pdf)

CROWTHER C., CROWTHER K. *Developing a reflectance transformation imaging system for inscription documentation in museum collections and the field*. University of Oxford.  
<http://www.digitalclassicist.org/wip/wip2011-01kp.pdf>

MAINI R., AGGARWAL H., 2009. *Study and comparison of various image edge detection techniques*. International Journal of Image Processing, vol. 3, pp. 1-11.

MALZBENDER T., GELB D., WOLTERS H., ZUCKERMAN B. 2000. *Enhancement of Shape Perception by Surface Reflectance Transformation*. Hewlett-Packard Laboratories, California.

PALMA G., CORSINI M., CIGNONI P., SCOPIGNO R., MUDGE M. 2010. *Dynamic shading enhancement for reflectance transformation imaging*. Journal on Computing and Cultural Heritage, vol. 3, art. 6, pp. 1-20.





## CONCLUSIONI

Questa tesi nasce dall'esigenza di caratterizzare il paesaggio archeologico del territorio di San Vito di Cadore, recentemente colpito da numerose frane che hanno determinato importanti cambiamenti ambientali.

I principali soggetti indagati sono rappresentati da una serie di incisioni rupestri su matrice rocciosa, prese come campione in un'area dove sono largamente presenti. Le incisioni, presumibilmente a carattere confinario per la spartizione dei pascoli, fungono da testimoni della frequentazione umana dei territori sanvitesi anche in epoche passate.

Questi reperti si trovano in una porzione di territorio d'alta quota, sottoposti agli eventi naturali e all'erosione causata dagli agenti atmosferici. Da qui l'importanza di aver creato un archivio virtuale di dati tridimensionali estremamente precisi, realizzato grazie all'utilizzo di tecniche di rilievo quali fotogrammetria terrestre e aerea.

Le ricostruzioni 3D generate in questo lavoro sono quindi utili come testimonianza per il futuro, ma rappresentano anche un valido supporto alle operazioni di tutela e valorizzazione del paesaggio in esame. Un utilizzo a fini divulgativi e didattici dei modelli 3D generati può essere oggi rappresentato dalla stampa 3D e dall'utilizzo della realtà aumentata per la creazione di percorsi virtuali, strumenti sempre più presenti nelle realtà museali e nei centri di documentazione.

Il processo di *enhancement* delle incisioni rupestri è stato invece realizzato mediante le tecniche di *Image Processing*, quali RTI e utilizzo di filtri di *edge detection*, che hanno permesso uno studio accurato di alcuni reperti che presentavano difficoltà di analisi.

Molto spesso le incisioni si presentano ricoperte da licheni o scolpite con profondità submillimetriche, caratteristiche che determinano una difficile fruizione dei reperti non solo per il pubblico ma anche per i ricercatori che ogni anno compiono ricognizioni sul territorio sanviteese.

Ecco quindi nascere l'esigenza di affiancare ai risultati del rilievo manuale le informazioni ottenute tramite processamento dei dati tridimensionali, come valido supporto alla ricerca.

Sono qui riportati alcuni esempi esplicativi, nei quali è ben chiara l'importanza di affidarsi alle tecniche geomatiche affiancate ai rilievi tradizionali eseguiti a mano.

Un primo interessante confronto è fornito dal rilievo manuale delle incisioni presenti su un piccolo masso in arenaria adiacente al Sasso Rosso.

Esaminando il modello tridimensionale del reperto è possibile notare come siano delineate le incisioni che presentano profondità sufficiente per essere rilevate con precisione (Fig. 5.1). Il rilievo manuale, eseguito dal Centro Camuno di Studi Preistorici, riporta invece tutte le incisioni presenti; inoltre denota la presenza di una incisione non visibile nel modello 3D perché coperta da licheni (Fig. 5.2).

Ecco quindi la necessità di applicare un filtro di *Edge Detection* che mappando la profondità del modello tridimensionale è in grado di evidenziare tutte le incisioni, portando alla luce anche quella nascosta, che si presenta di notevole interesse in quanto di forma molto simile ai "segni di casa" rinvenuti sul Sasso Rosso (Fig. 5.3).

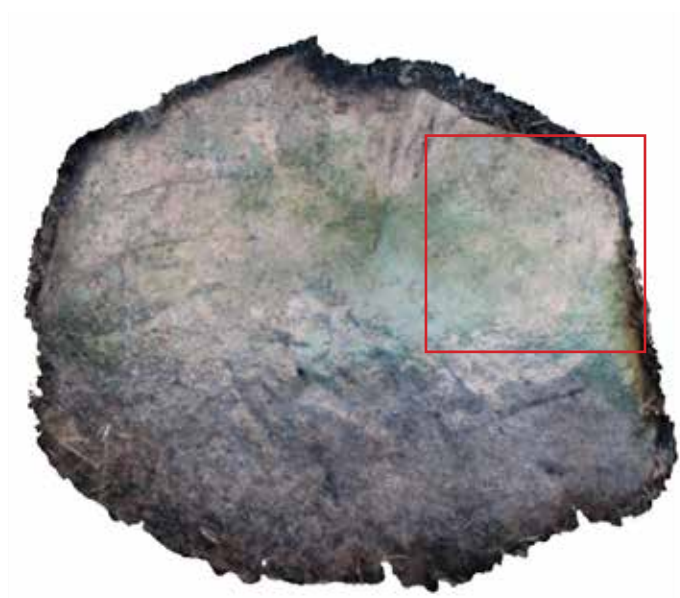


Figura 5.1 – Il modello tridimensionale del piccolo masso rinvenuto vicino al Sasso Rosso. Appaiono ben delineate solo le iscrizioni caratterizzate da una profondità non inferiore ai 2 mm.



Figura 5.2 – Immagine del rilievo manuale eseguito dal Centro Camuno di Studi Preistorici; tutte le incisioni presenti sono riportate e visibili.

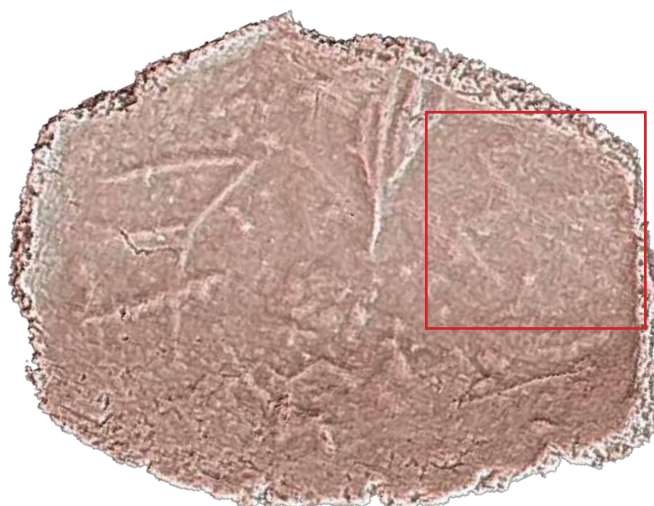


Figura 5.3 – Immagine del modello tridimensionale sottoposto a *edge detection*; anche in questo caso tutte le incisioni presenti sono ben delineate.

Un secondo esempio è fornito dal confronto tra il modello tridimensionale del reperto SV311 e il rilievo manuale dello stesso eseguito dal gruppo di archeologi responsabili del Progetto Cednea (Figg. 5.4 e 5.5). Questo particolare reperto, facente parte della serie di incisioni circolari rinvenute nella Piana delle Baste, si presenta difficile da delineare in quanto sembrano essere presenti più incisioni sovrapposte. Ecco quindi che si rende necessario un continuo confronto tra rilievo tradizionale e rilievo fotogrammetrico per una migliore fruizione di entrambi i dati.

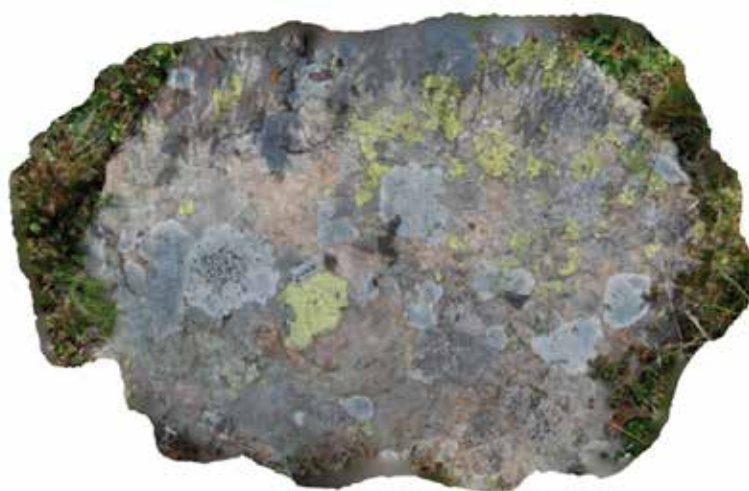


Figura 5.4 – La ricostruzione tridimensionale del reperto SV310. Le incisioni che presenta risultano sovrapposte e poco delineate.

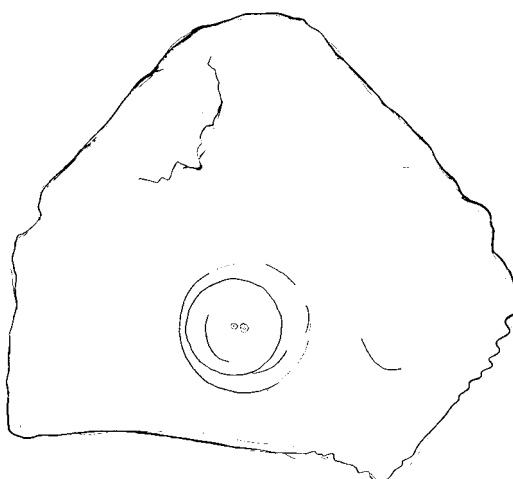


Figura 5.5 – Immagine del rilievo manuale eseguito sul reperto SV310 dagli archeologi responsabili del Progetto Cednea. Nei rilievi tradizionali le informazioni relative alla geometria della superficie e alla profondità dei segni risultano assenti, ma il perimetro dell'incisione è meglio definito.

Un possibile utilizzo, infine, dei modelli tridimensionali generati, è rappresentato dall'analisi di curvatura. Questa metodologia consente di descrivere matematicamente l'andamento della superficie, rendendo visibili incisioni particolarmente poco profonde che all'analisi autoptica non risultano apprezzabili (Fig. 5.6).

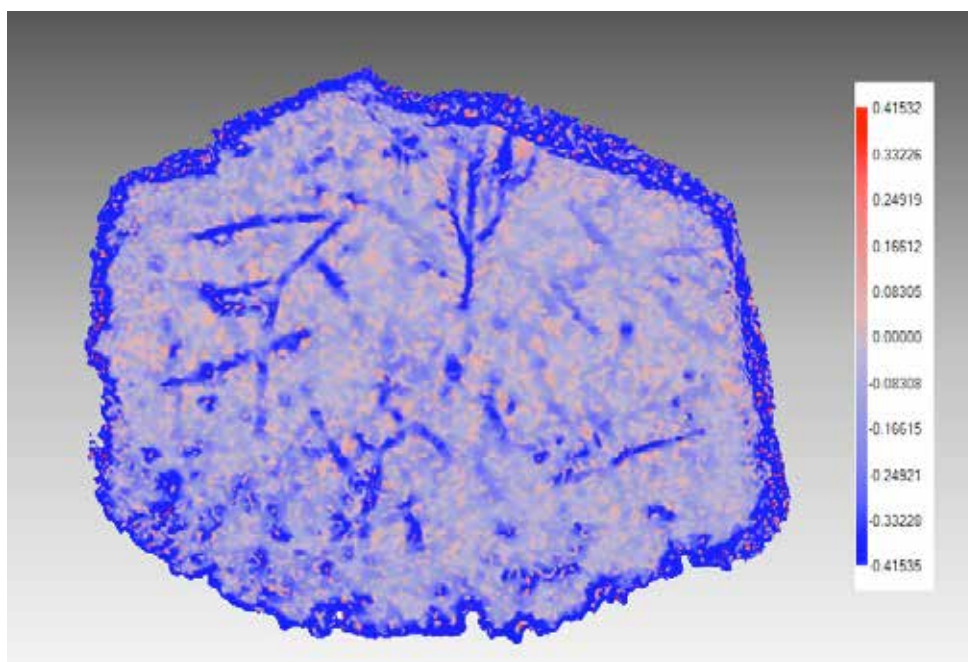


Figura 5.6 – Risultato dell'analisi di curvatura applicata al modello 3D del piccolo masso adiacente al Sasso Rosso. Il lavoro è stato eseguito con l'ausilio del software Rapidform, che ha permesso di evidenziare le variazioni di profondità della superficie utilizzando diverse colorazioni.

