

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Strumenti e metodi geomatici per lo studio di un'antica cava etrusca



Relatori:

Prof. Andrea Maria Lingua

Prof. Daniele Peila

Candidata:

Alice Lazzarato



È ridicolo voler misurare con esattezza le dimensioni di un essere naturale: il cavallo è senza dubbio più grande del cane e più piccolo dell'elefante, ma né il cane, né il cavallo, né l'elefante hanno dimensioni strettamente e rigidamente determinate: c'è dovunque un margine di imprecisione, di "giuoco", di "più o meno", di "pressappoco". [...] Ora è attraverso lo strumento di misura che l'idea dell'esattezza prende possesso di questo mondo e che il mondo della precisione arriva a sostituirsi al mondo del "pressappoco".

Alexandre Koyré

(da *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Torino, 1967)

Abstract

Il rischio idrogeologico in Italia è diffuso in modo capillare. Diversi sono i fattori naturali che predispongono il nostro territorio a crolli in roccia, frane e alluvioni. La prima causa è senza dubbio la conformazione geologica e geomorfologica, caratterizzata da un'orografia giovane, quale quella alpina, e da rilievi in via di sollevamento.

Per questo motivo, le tematiche legate allo studio degli ammassi rocciosi sono da sempre di primaria importanza. I metodi tradizionali di rilievo di una parete in roccia, per l'analisi successiva di rischio crolli, prevedono l'azione di un geologo specializzato direttamente in quota. È chiaro come questa operazione non sia semplice e richieda molte competenze multidisciplinari.

Con questa tesi ho voluto studiare l'utilizzo di metodi geomatici per rilievi geotecnici, in particolare l'uso della fotogrammetria (aerea e terrestre) e di scansioni laser scanner. La parete studiata, che si trova all'interno del parco archeologico di Baratti e Populonia, ricopre molta importanza dal punto di vista storico e culturale, essendo essa un'antica cava di epoca etrusca.

Utilizzando differenti metodi di rilievo ho potuto cogliere i limiti e i pregi di questi.

The hydrogeological risk in Italy is widespread. There are several natural factors that predispose our territory to collapses in rock, landslides and floods. The first cause is undoubtedly the geological and geomorphological conformation, characterized by a young orography, such as the alpine one, and by mountains in the way of lifting.

For this reason, the issues related to the study of rock masses have always been of primary importance. The traditional methods of surveying a rock wall, for the subsequent analysis of collapse risk, envisage the action of a specialized geologist directly at altitude. This operation is not simple and requires many multidisciplinary skills.

With this thesis I wanted to study the use of geomatic methods for geotechnical surveys, in particular the use of photogrammetry (aerial and terrestrial) and laser scanner scans. The studied wall, which is located inside the archaeological park of Baratti and Populonia, holds great importance from the historical and cultural point of view, as it is an ancient Etruscan cave.

Using different methods of surveys, I could grasp the limits and the merits of these.

La fotogrammetria sia aerea che terrestre, ha permesso di giungere ad un'ottima stima di giacitura dei piani di discontinuità, utilizzando il software CloudCompare.

Il rilievo con laser scanner ha dato anch'esso dei buoni risultati per il calcolo della giacitura mentre per il calcolo di spaziatura, apertura e persistenza, si sono riscontrati dei problemi in quanto la nuvola presentava molti buchi.

È stato infine eseguito un tentativo di misura anche utilizzando la visione stereoscopica tramite il software StereoCAD la quale, sfruttando la visione tridimensionale della parete, ha permesso di effettuare alcune di queste misure in modo più semplice e veloce, in particolare per quanto riguarda la spaziatura.

È importante sottolineare come, questi dati, possano essere inseriti all'interno di un GIS e in questo modo possano essere resi fruibili a diversi utenti. Si potrà così avere traccia nel tempo degli spostamenti che avvengono nell'ammasso roccioso, qualora vengano fatti ulteriori rilievi a distanza di tempo. Questa implementazione è sicuramente molto utile in contesti dove il rischio di crolli in roccia è più elevato, dove la creazione di un database con le diverse configurazioni di una certa parete rocciosa nel tempo può fornire uno strumento accessibile da più enti per la mitigazione del rischio e per lo studio di tale zona.

The photogrammetry both aerial and terrestrial, has allowed to reach an excellent estimate of lay of the plans of discontinuity, using the CloudCompare software.

The survey with laser scanner also gave good results for the calculation of the dip and dip direction, while for the calculation of spacing, openness and persistence, there were problems because the cloud had many holes.

Finally, a measurement attempt was also performed using stereo vision using the StereoCAD software, which, by taking advantage of the three-dimensional view of the wall, made it possible to carry out some of these measurements in a simpler and faster way, in particular as regards spacing.

It is important to underline how these data can be inserted into a GIS and in this way, can be made accessible to different users. In this way it will be possible to trace over time the movements that take place in the rock mass, if further measurements are made after a certain period of time. This implementation is certainly very useful in contexts where the risk of rock collapses is higher, where the creation of a database with the different configurations of a certain rock wall over time can provide an instrument accessible by several bodies for risk mitigation and for the study of this area.

Sommario

ABSTRACT.....	5
SOMMARIO	9
INDICE DELLE FIGURE.....	13
INDICE DELLE TABELLE	17
1. INTRODUZIONE E OBIETTIVI DELLA TESI	13
1.1. IL PROBLEMA DEI CROLLI IN ROCCIA E NUOVI METODI SEMIAUTOMATICI	13
1.2. IL PROGETTO DEL TEAM DIRECT	13
1.3. METODOLOGIA DI ANALISI	14
2. IL PARCO ARCHEOLOGICO DI BARATTI E POPULONIA.....	17
2.1. IL SISTEMA INTEGRATO DEI PARCHI ARCHEOLOGICI, DEI MUSEI E DEI PARCHI NATURALI DELLA VAL DI CORNIA..	17
2.2. INQUADRAMENTO STORICO E TERRITORIALE	18
2.2.1. <i>Storia del Territorio</i>	19
2.2.2. <i>La città alta</i>	20
2.2.3. <i>Età romana</i>	21
2.2.4. <i>Le necropoli</i>	23
2.3. L'INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA	26
3. STRUMENTI E METODI PER IL RILEVAMENTO A GRANDISSIMA SCALA	33
3.1. RETE DI INQUADRAMENTO.....	33
3.1.1. <i>Il posizionamento GNSS</i>	35
3.2. RETE DI RAFFITTIMENTO	38
3.2.1. <i>Funzionamento teorico degli strumenti topografici</i>	38
3.2.2. <i>Acquisizione RTK</i>	40
3.3. RILIEVO DI DETTAGLIO.....	41
3.3.1. <i>Rilievo con laser scanner</i>	41
3.3.2. <i>Rilievo fotogrammetrico (Close Range Photogrammetry)</i>	44

4.	ACQUISIZIONE DATI	63
4.1.	RETE DI INQUADRAMENTO CON RICEVITORI GNSS	63
4.2.	RETE DI RAFFITTIMENTO	66
4.3.	RILIEVO DI DETTAGLIO	69
4.3.1.	<i>Rilievo con Laser scanner</i>	<i>69</i>
4.3.2.	<i>Rilievo fotogrammetrico.....</i>	<i>70</i>
5.	ELABORAZIONE DEI DATI	77
5.1.	LE RETI GNSS	77
5.1.1.	<i>Il software Leica GeoOffice.....</i>	<i>77</i>
5.2.	IL CALCOLO DELLA RETE TOPOGRAFICA	81
5.2.1.	<i>Il software StarNet</i>	<i>81</i>
5.3.	I DATI TLS	84
5.3.1.	<i>Il software Scene</i>	<i>84</i>
5.4.	I DATI FOTOGRAMMETRICI	87
5.4.1.	<i>Il software Photoscan.....</i>	<i>87</i>
6.	ANALISI SULLA QUALITÀ DEI DATI RACCOLTI.....	91
6.1.	ACCURATEZZA E PRECISIONE	91
6.2.	QUALITÀ SECONDO LA NORMA.....	93
6.3.	LA DENSITÀ DEL DATO	95
6.4.	APPLICAZIONI POSSIBILI	98
7.	STUDIO GEOMECCANICO DEL SITO	101
7.1.	CARATTERIZZAZIONE DELLE ZONE DI DISTACCO	101
7.1.1.	<i>Uso di tecniche di rilievo a distanza</i>	<i>101</i>
7.2.	IL TRATTAMENTO DELLE NUVOLE DI PUNTI CON CLOUDCOMPARE	102
7.2.1.	<i>Nuvole ottenute con tecniche fotogrammetriche</i>	<i>103</i>
7.2.2.	<i>Nuvola ottenuta con TLS</i>	<i>106</i>

7.3.	OSSERVAZIONI SULLE CARATTERISTICHE STRATIGRAFICHE DELLA PARETE	107
7.4.	DISCONTINUITÀ	110
7.4.1.	<i>Giacitura</i>	110
7.4.2.	<i>Spaziatura</i>	119
7.4.3.	<i>Persistenza</i>	122
7.4.4.	<i>Apertura</i>	125
7.5.	CARATTERISTICHE VOLUMETRICHE DEI BLOCCHI CHE POSSONO STACCARSI	126
7.6.	RESTITUZIONE STEREOSCOPICA	129
7.6.1.	<i>Accenni teorici di stereoscopia</i>	129
7.6.2.	<i>Il software StereoCAD</i>	130
7.7.	CONFRONTO TRA I DIVERSI METODI	133
7.8.	FRUIZIONE DEI RISULTATI IN AMBIENTE GIS	134
8.	CONCLUSIONI	137
9.	RIFERIMENTI	139
9.1.	BIBLIOGRAFIA	139
9.2.	SITOGRAFIA	142
10.	ALLEGATI	143
10.1.	MONOGRAFIE DEI VERTICI	143
10.2.	REPORT LEICA GEO OFFICE	147
10.3.	REPORT STARNET	148
10.4.	REPORT PHOTOSCAN	149

Indice delle figure

Figura 1	Schema del lavoro svolto, dall'acquisizione ai prodotti finali.....	15
Figura 2	Inquadramento territoriale.....	16
Figura 3	Luoghi di interesse all'interno dei parchi.....	16
Figura 4	I parchi della Val di Cornia.....	18
Figura 5	Localizzazione Acropoli di Populonia.....	21
Figura 6	Strada lastricata di epoca romana	22
Figura 7	Terrazzamento di epoca romana	22
Figura 8	Localizzazione Necropoli di San Cerbone.....	24
Figura 9	Localizzazione Necropoli delle Grotte.....	25
Figura 10	Dettaglio: parete di scavo della cava delle grotte.....	26
Figura 11	Dettaglio con fessure per l'estrazione dei blocchi.....	26
Figura 12	Carta geologica 100k.....	28
Figura 13	Carta Geologica 10k.....	29
Figura 14	La colonna stratigrafica riprodotta dallo studio di Cortemiglia et Al. 1984 (modificata), in cui si osservano i tre cicli marini.....	30
Figura 15	Esempio di tomba ipogea del tipo "a camera"	31
Figura 16	Dettaglio stratigrafia	32
Figura 17	Diagramma delle attività di rilevamento svolte	33
Figura 18	Schema del processo di misura di fase.....	37
Figura 22	Schema teodolite	39
Figura 21	Acquisizione RTK	40
Figura 23	Sistema di riferimento centrato sul TLS.....	43
Figura 24	Principio della misura della distanza con misura di fase	44
Figura 25	Fotogramma nelle posizioni negativa e positiva e schema di un fotogramma	45
Figura 26	Relazione fra le coordinate di punti immagine e di punti oggetto.....	46
Figura 27	Piano di volo.....	47
Figura 28	Orientamento relativo e assoluto.....	48
Figura 29	Distorsione radiale positiva	49
Figura 30	Distorsione radiale negativa	49
Figura 31	Distorsione tangenziali.....	49
Figura 32	Distorsione affine	49

Figura 33	Definizione del sistema di coordinate dei pixel.....	51
Figura 34	Schema per la creazione di una nuvola densa	52
Figura 35	Processo Structure from Motion.....	53
Figura 36	Rappresentazione di un punto SIFT descritto utilizzando un istogramma di magnitudo e direzione del gradiente attorno al punto di interesse.	54
Figura 37	Numero di keypoint differente per due immagini: di un suolo ghiaioso (a) e di un suolo innevato (b).....	54
Figura 38	Paragone RANSAC e minimi quadrati.....	57
Figura 39	Diagramma flusso di dati per il processo di bundle adjustment.....	59
Figura 40	Esempio di target ad alta visibilità.....	61
Figura 41	Numero di satelliti	64
Figura 42	Mappa del cielo	65
Figura 43	DOP	65
Figura 19	Schema posizionamento di punti di inquadramento e di dettaglio	67
Figura 20	Rappresentazione della rete topografica creata, con vertici e punti di dettaglio	67
Figura 44	Leica MultiStation.....	68
Figura 45	Eidotipo scansioni laser.....	69
Figura 46	Laser Scanner Faro Focus 3D S 120.....	70
Figura 47	Canon EOS 5DsR.....	70
Figura 48	DJI Mavic Pro	71
Figura 49	Schermata di ItalPoS	78
Figura 50	Compensazione delle Baseline.....	79
Figura 51	Baseline tra punti di appoggio	79
Figura 52	Rete di inquadramento.....	80
Figura 53	Esempio codice di StarNet	82
Figura 54	Network Plot di StarNet.....	83
Figura 55	Vista per corrispondenza dopo l'allineamento "Cloud to cloud"	85
Figura 56	Vista 3D	86
Figura 57	Nuvola sparsa.....	88
Figura 58	Georeferenziazione	88
Figura 59	Nuvola densa Canon.....	89
Figura 60	Accuratezza e precisione	92
Figura 61	Confronto tra densità delle nuvole	95

Figura 62	Densità approssimata della nuvola Canon in scala Logaritmica ($r=0,03$)	96
Figura 63	Densità approssimata della nuvola Mavic in scala Logaritmica ($r=0,03$)	96
Figura 64	Densità approssimata della nuvola Laser in scala Logaritmica ($r=0,03$).....	97
Figura 65	Densità del dato con laser scanner (Lato et Al. 2010).....	98
Figura 66	Diagramma di flusso per l'identificazione e il calcolo delle aree e dei volumi	102
Figura 67	Schema dell'algorithmo RANSAC.....	104
Figura 68	Calcolo delle normali.....	104
Figura 69	Creazioni piani con RANSAC	105
Figura 70	Visualizzazione nuvola senza vegetazione	105
Figura 71	Nuvola ottenuta dopo RANSAC	106
Figura 72	Parte inferiore.....	107
Figura 73	Parte superiore.....	108
Figura 74	Piani verticali di riferimento per la misurazione.....	108
Figura 75	Esempio di misurazione dello spessore.....	109
Figura 76	Facets, nuvola fotogrammetrica.....	111
Figura 77	Stereogramma nuvola Canon.....	111
Figura 78	Stereogramma nuvola Mavic.....	112
Figura 79	Facets, nuvola laser.....	112
Figura 80	Porzione nuvola laser	113
Figura 81	Stereogramma.....	113
Figura 82	Piano parallelo alla giacitura degli strati.....	114
Figura 83	Estrazione piani manualmente e calcolo della loro giacitura.....	114
Figura 84	Stereogramma dei piani estratti manualmente.....	115
Figura 85	Stereogramma da nuvola Canon.....	116
Figura 86	Stereogramma da nuvola Mavic.....	117
Figura 87	Stereogramma da nuvola Laser.....	118
Figura 88	Errore di Terzaghi	119
Figura 89	Stendimento 1.....	120
Figura 90	Esempio di misura della spaziatura	120
Figura 91	Stendimento 2.....	121
Figura 92	Diagramma di frequenza della spaziatura.....	122
Figura 93	Persistenza.....	123

Figura 94	Rilievo su finestra circolare	124
Figura 95	rilievo effettuato.....	124
Figura 96	Esempio misura apertura.....	126
Figura 97	Presenza di 3 famiglie di discontinuità e generazione dei blocchi.....	127
Figura 98	Camera Passport in StereoCAD.....	130
Figura 99	Orientamento dei fotogrammi e nuvola sparsa.....	131
Figura 100	Immagine anaglifica.....	131
Figura 101	Misura d'esempio: spaziatura	132
Figura 102	Misura d'esempio: spessore degli strati	132
Figura 103	File .LAS all'interno di un GIS.....	135

Indice delle tabelle

Tabella 1	Riassunto dati laser scanner acquisiti	70
Tabella 2	Caratteristiche droni	72
Tabella 3	Riassunto dati fotogrammetrici acquisiti	75
Tabella 4	Coordinate ed ellissi d'errore.....	80
Tabella 5	deviazioni standard StarNet	83
Tabella 6	Errore distanza target (12 e 8 scansioni)	86
Tabella 7	Parametri di valutazione di Photoscan.....	89
Tabella 8	Parametri calibrazione Mavic	90
Tabella 9	Parametri calibrazione Canon	90
Tabella 10	Livello di dettaglio, accuratezza e precisione	94
Tabella 11	Densità nuvole di punti.....	97
Tabella 12	Applicazioni tecniche relative alle varie scale nominali e classi di densità.....	99
Tabella 13	Giacitura Piani medi estratti manualmente	115
Tabella 14	Giacitura piani medi (canon).....	116
Tabella 15	Giacitura piani (Mavic).....	117
Tabella 16	Giacitura piani medi (Laser)	118
Tabella 17	Stendimento 1 e 2	121
Tabella 18	Stendimento 3, 4 e 5	121
Tabella 19	Lunghezza tracce interne al rilievo	125
Tabella 20	Giacitura Set di Discontinuità.....	127
Tabella 21	Classificazione dei blocchi per volume secondo Palmström (1995)	128

1. Introduzione e obiettivi della tesi

1.1. Il problema dei crolli in roccia e nuovi metodi semiautomatici

Il rischio idrogeologico in Italia è diffuso in modo capillare. Diversi sono i fattori naturali che predispongono il nostro territorio a crolli in roccia, frane e alluvioni. La prima causa è senza dubbio la conformazione geologica e geomorfologica, caratterizzata da un'orografia giovane, quale quella alpina, e da rilievi in via di sollevamento.

Per questo motivo le tematiche legate allo studio degli ammassi rocciosi sono da sempre di primaria importanza. I metodi tradizionali di rilievo di una parete in roccia, per l'analisi successiva di rischio crolli, prevedono l'azione di un geologo specializzato direttamente in quota. È chiaro come questa operazione non sia semplice e richieda molte competenze multidisciplinari.

Con questa tesi ho voluto studiare l'utilizzo di metodi geomatici per rilievi geotecnici, in particolare l'uso della fotogrammetria (aerea e terrestre) e di scansioni laser scanner.

Per poter affrontare questo studio ho avuto a disposizione i dati acquisiti nel parco archeologico di Baratti e Populonia, relativi ad una parete rocciosa facente parte di un'antica cava etrusca. Questi dati sono stati raccolti con laser scanner, tecniche di fotogrammetria aerea e terrestre: sarà lo scopo della mia tesi capire quale di queste tecniche porta a risultati soddisfacenti, soffermandomi inoltre sui limiti posti da ognuna di queste metodologie.

1.2. Il progetto del Team Direct

Il mio lavoro di tesi si basa su un progetto svolto dal Team Direct (Disaster Recovery Team), nato nel Dipartimento di infrastrutture, ambiente e territorio del Politecnico di Torino. Il team Direct ha come obiettivo la formazione degli studenti e la realizzazione di progetti nell'ambito delle tecnologie per il rilievo metrico 3D e del telerilevamento.

I progetti svolti da team seguono principalmente due tematiche principali: una più incentrata su attività di rilievo speditivo volto a fornire supporto in occasioni di disastri naturali mentre la seconda tematica si concentra su attività di tutela del territorio e di beni culturali ambientali, archeologici e architettonici.

L'iniziativa a cui ho potuto partecipare ha seguito il secondo filone tematico: il progetto è stato finalizzato infatti a tutelare un bene archeologico inserito in un contesto territoriale di grande importanza dal punto di vista culturale e storico. Il lavoro si colloca all'interno di un percorso che punta ad utilizzare i metodi e le tecniche della Geomatica per fornire strumenti digitali e di conoscenza legati appunto alla valorizzazione del patrimonio culturale.

Il progetto si è svolto nei parchi della Val di Cornia (Figura 2, Figura 3) con l'obiettivo di rilevare una parte del parco archeologico di Baratti e Populonia e del parco archeominerario di San Silvestro, con lo scopo di creare modelli tridimensionali dell'area e, dunque, di fornire dei nuovi mezzi di divulgazione e conoscenza di queste aree. In questo modo si potrà rendere possibile uno sviluppo dell'area dal punto di vista del turismo, ma soprattutto, dell'informazione scientifica, creando un unico sistema di conservazione dei beni culturali e paesaggistici, anche ad un livello di conoscenza più dettagliato in ambito geologico e geotecnico.

Facendo riferimento al paragrafo precedente, mi sono occupata di utilizzare le tecniche di rilievo geomatico per la descrizione dal punto di vista geotecnico di una parete rocciosa presente all'interno del parco archeologico di Baratti e Populonia.

1.3. Metodologia di analisi

In ordine, seguendo lo schema in Figura 1, andrò a descrivere l'intera procedura dell'acquisizione in situ dei dati, il processamento in laboratorio dei dati raccolti e infine, utilizzando i modelli tridimensionali ottenuti sia con tecniche fotogrammetriche che con rilievo con laser scanner, si descriverà la parete in roccia in termini di:

- Discontinuità (giacitura, spaziatura e persistenza)
- Osservazioni sulle caratteristiche stratigrafiche della parete
- Caratteristiche volumetriche e geometriche dei blocchi che possono staccarsi

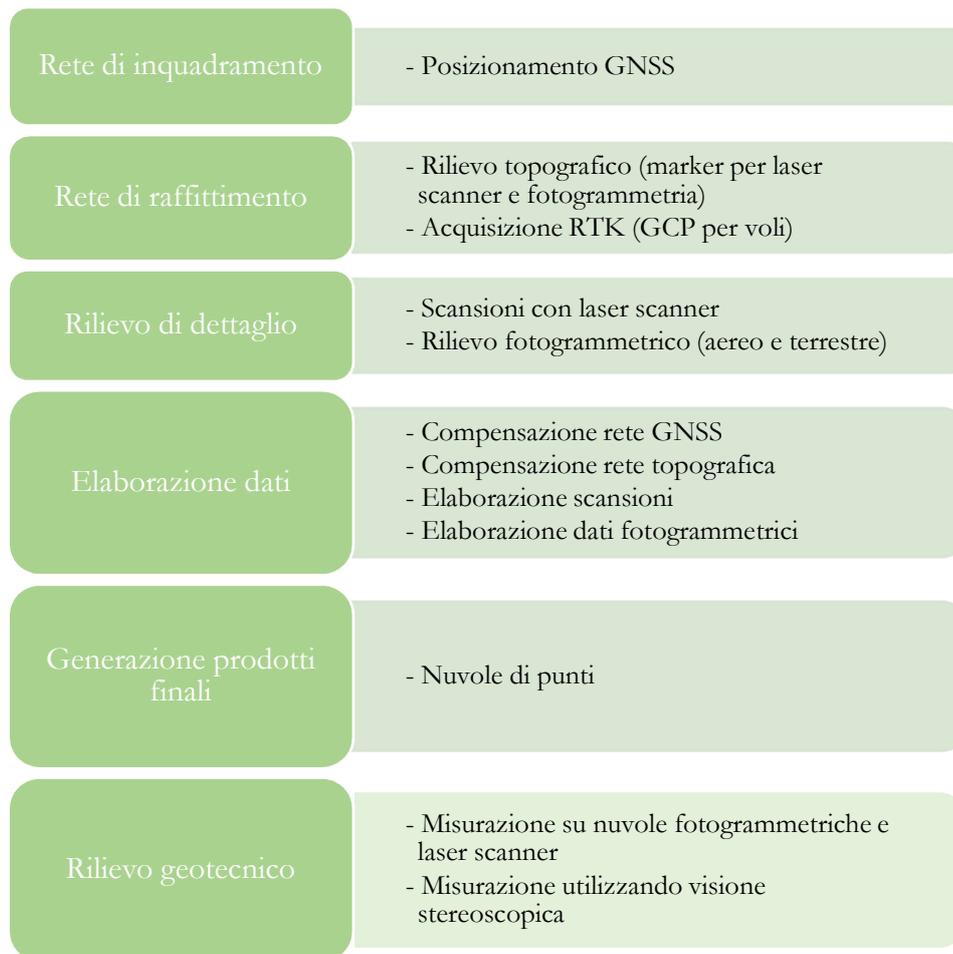


Figura 1 Schema del lavoro svolto, dall'acquisizione ai prodotti finali



Figura 2 Inquadramento territoriale

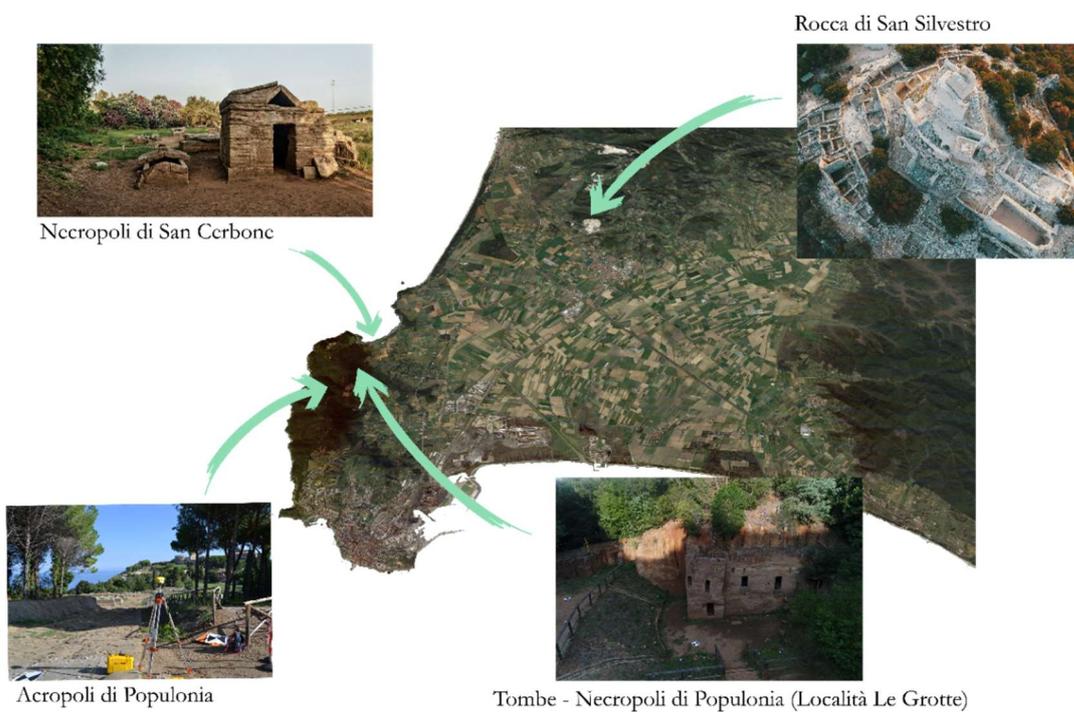


Figura 3 Luoghi di interesse all'interno dei parchi

2. Il Parco Archeologico di Baratti e Populonia

2.1. Il sistema integrato dei parchi archeologici, dei musei e dei parchi naturali della Val di Cornia

Il sistema dei Parchi si trova inserito nella Val di Cornia, dalla quale prende il nome. Questa zona si estende nell'Alta Maremma Toscana, in provincia di Livorno, ed è racchiusa nei confini dei comuni di Campiglia Marittima, Piombino, Sassetta, Suvereto e San Vincenzo. La valle, posta di fronte all'Isola d'Elba, offre scenari naturali che variano dai folti boschi di macchia mediterranea, alle spiagge incontaminate affacciate sul Golfo di Baratti, a musei a cielo aperto testimonianza delle antiche civiltà etrusca e romana che hanno abitato queste terre in passato.

Il parco archeologico di Baratti e Populonia si inserisce all'interno di questo complesso dei parchi della Val di Cornia che è formato da:

- Parco archeologico di Baratti e Populonia (Piombino);
- Parco archeominerario di San Silvestro (Campiglia Marittima);
- Parco costiero della Sterpaia (Piombino);
- Parco costiero di Rimigliano (San Vincenzo);
- Parco naturale di Montioni (Suvereto, Piombino, Campiglia Marittima)
- Parco forestale di Poggio Neri (Sassetta);
- Museo archeologico del territorio di Populonia (Piombino);
- Musei della Rocca di Campiglia (Campiglia Marittima);
- Museo del Castello e della Città (Piombino).



Figura 4 I parchi della Val di Cornia¹

“La Parchi Val di Cornia Spa è una società costituita, nel 1993, dai Comuni di Campiglia M.ma, Piombino, San Vincenzo, Sassetta, Suvereto e da soci privati per attuare e gestire il sistema integrato dei parchi archeologici, dei musei e dei parchi naturali della Val di Cornia, così come definito dagli stessi Comuni con la pianificazione urbanistica coordinata degli anni ‘80. Nel corso degli anni la compagine sociale si è ulteriormente ampliata con nuovi soci pubblici (Provincia di Livorno e Camera di Commercio), Associazioni culturali e di categoria ed imprese provenienti prevalentemente dal settore dei servizi turistici (strutture ricettive alberghiere ed extralberghiere, agriturismi, servizi per la nautica, ecc.). Nata quindi come società mista pubblico-privato, dal 2007, per una modifica alla normativa vigente (D. Lgs 42/2004, art. 115), si è reso necessario trasformare l’assetto societario raggiungendo una compagine azionaria interamente pubblica.”²

2.2. Inquadramento storico e territoriale

Il Parco archeologico di Baratti e Populonia si estende tra le pendici del promontorio di Piombino ed il golfo di Baratti. Esso comprende una parte importante dell'antica città di Populonia, l'unica città etrusca affacciata sul mare, con le sue necropoli, le cave

¹ Miniature immagini da fonti varie, vedi sitografia

² I Parchi della Val di Cornia, <http://www.parchivaldicornia.it/>

di calcarenite ed i quartieri industriali di lavorazione del ferro, proveniente dai giacimenti di ematite dell'isola d'Elba. Il parco al giorno d'oggi si estende dalla spiaggia del golfo di Baratti fino alle colline prospicienti il mare. È su queste colline che si trovano due delle maggiori necropoli della città etrusca e l'acropoli di Populonia, il grande impianto monumentale risalente al II secolo a.C.. Inoltre, nell'area si trovano anche edifici relativi alle attività produttive antiche della zona, fra le quali predominano quelle legate alla produzione siderurgica e le cave per l'estrazione dei materiali per la costruzione della città.

Il Parco è stato inaugurato l'11 luglio 1998 e ospita una delle più grandi realtà della civiltà etrusca.

*“Il Parco di Baratti e Populonia, nella sua dimensione attuale, è il frutto degli scavi archeologici condotti negli anni passati dalla Soprintendenza Archeologica e, tra il 1996 ed il 1998, dalla Società Parchi Val di Cornia sotto la direzione scientifica della dottoressa Antonella Romualdi. Ma il Parco non sarebbe potuto nascere se insieme all'impegno della Società Parchi Val di Cornia ed ai contributi stanziati dalla CEE, non si fosse stabilita una positiva collaborazione con il Ministero per i Beni e le Attività Culturali e con il Comune di Piombino; collaborazione che ha permesso di unificare in un'unica gestione aree archeologiche di proprietà statale e aree archeologiche di proprietà comunale. Queste intese sono state sancite nella convenzione stipulata l'11 luglio 1998, al momento dell'inaugurazione del parco, fra il Ministero per i Beni e le Attività Culturali e la Società Parchi Val di Cornia.”*³

2.2.1. Storia del Territorio

Populonia è una delle più note città fondate dal popolo etrusco, e affermata come potenza già a partire dall'età del ferro (IX secolo a.C.). La città ricopriva un ruolo di fondamentale importanza in quest'epoca, infatti essa sorgeva in punto strategico di approdo tra le rotte navali tirreniche che collegavano la Sardegna e la Corsica con l'Etruria. In questo modo Populonia riusciva a esercitare un forte controllo sui

³ I Parchi della Val di Cornia, <http://www.parchivaldicornia.it/it/il-parco-archeologico-di-baratti-e-populonia.html>

numerosi giacimenti minerari dell'area campigliese (attualmente visitabili nel Parco Archeominerario di San Silvestro).

Nel periodo tra il VI e il IV secolo a.C., la città divenne il principale centro di lavorazione dell'ematite di tutto il Mediterraneo. L'ematite è un minerale di cui l'isola d'Elba, situata proprio di fronte a Populonia, era molto ricca.

Populonia era divisa in due zone: una città bassa, che era principalmente dedicata alle attività portuali e sull'attività metallurgica e una città alta (l'Arcopoli) situata sulla cima del promontorio e costituita principalmente da abitazioni e templi.

2.2.2. La città alta

Le grandi capanne costruite sulla sommità del promontorio già nel IX secolo a.C. sono la testimonianza più antica della nascita della città di Populonia, tuttavia gli abitati in quest'area subirono numerose trasformazioni fino a quando vennero abbandonati nel VII secolo.

Gli scavi ancora oggi non hanno portato alla luce l'abitato dei secoli V-III a.C. ad eccezione per due cerchia murarie, una risalente al V secolo a.C. che circondava la sommità del promontorio, mentre l'altra risalente al IV-III secolo a.C. è di dimensioni maggiori e arrivava a circondare l'intera acropoli e buona parte dell'abitato che, in questo periodo, si doveva essere esteso anche lungo le pendici del rilievo principale. Con molta probabilità questa cinta muraria più estesa andava a circoscrivere l'intero abitato lasciando all'esterno solo le necropoli e la zona industriale.



Figura 5 Localizzazione Acropoli di Populonia

2.2.3. Età romana

A partire dal II secolo a.C. è certo che la città fosse ormai inserita all'interno del territorio romano, tuttavia non esistono testimonianze storiche che descrivano la conquista della città da parte dei Romani.

In tempi recenti sono venuti alla luce resti monumentali facenti parte della zona centrale dell'acropoli, interessata in piena epoca romana, da un grande rinnovamento dal punto di vista urbanistico.



Figura 6 Strada lastricata di epoca romana

Sono venuti alla luce infatti tre grandi templi affacciati su un'ampia piazza, dalla quale partiva una strada lastricata (Figura 6), costruita con le tipiche tecniche romane, che conduceva ad una monumentale facciata costituita da arcate cieche, che fungeva da terrazzamento: questa costruzione è nota come edificio delle Logge (Figura 7).



Figura 7 Terrazzamento di epoca romana

Al di sopra di questo terrazzamento si estendevano ninfei e complessi termali, mentre alla base dello stesso erano presenti una serie di ambienti con diverse funzioni, ad oggi ancora in fase di scavo.

In cima a questo sistema di terrazze era presente molto probabilmente un altro tempio: il complesso edilizio nel suo insieme costituiva probabilmente un santuario. La divinità cui tutto questo era dedicato è forse da individuare in Venere.

Verso la metà del I secolo a.C. la città dovette subire un colpo d'arresto, molto probabilmente riconducibile alla distruzione Sillana.

I recenti rinvenuti sulla spiaggia di Baratti indicano come nel corso dell'età imperiale (II-III secolo d.C.) e nella tarda antichità (IV-VI secolo d.C.) vi era ancora vita intorno alla strada che collegava la città bassa e la via Aurelia, collocata nell'entroterra.

2.2.4. Le necropoli

Diverse sono le necropoli presenti nella zona attorno a Populonia. Sui primi rilievi e sulla pianura affacciata sul golfo di Baratti è visitabile una grande necropoli risalente al VII-V secolo a.C., chiamata Necropoli di San Cerbone, qui sono presenti numerosi tombe monumentali, a tumulo e ad edicola, appartenute ai personaggi più importanti e di spicco della società Populoniese. Sono presenti inoltre diverse sepolture a sarcofago, segno di una diffusa ricchezza presente in quest'area fino al V-IV secolo a.C.

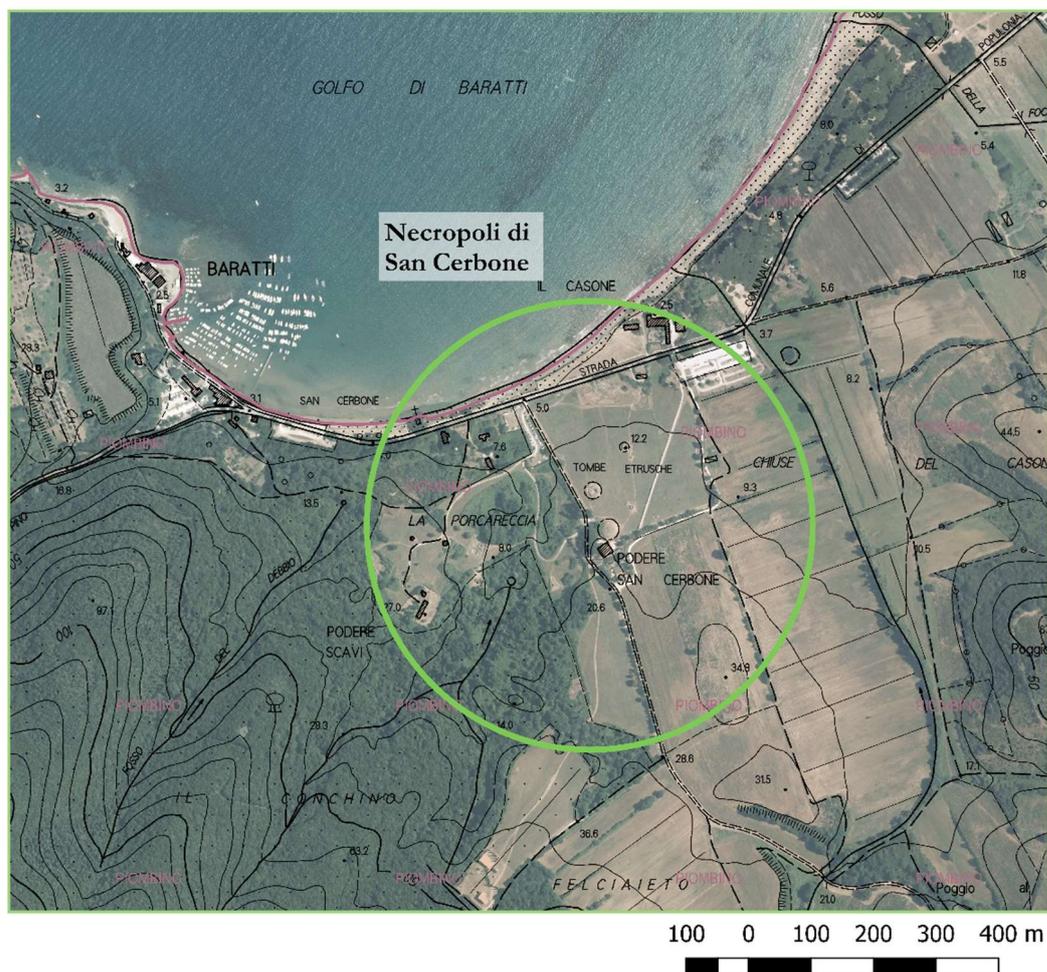


Figura 8 Localizzazione Necropoli di San Cerbone

Sulle colline presenti al di sotto della città alta, nella cosiddetta località Le Grotte (Figura 9), si trovano altre necropoli risalenti al IV-III secolo a.C.: le tombe presenti in questa zona sono caratteristiche tombe etrusche scavate nella roccia, di forma quadrangolare con tre letti funebri, a cui si accedeva tramite scale rupestri.

In prossimità di queste tombe si trova la cava su cui si concentra il mio lavoro di tesi. La cava veniva utilizzata per estrarre blocchi di “panchina”, un’arenaria morbida locale utilizzata per la maggior parte delle costruzioni di Populonia. Nella parete è possibile vedere l’inclinazione del fronte di cava (Figura 10): per l’estrazione dei blocchi si seguiva l’inclinazione del sedimento di sabbia in modo da avere blocchi con sedimentazione orizzontale.

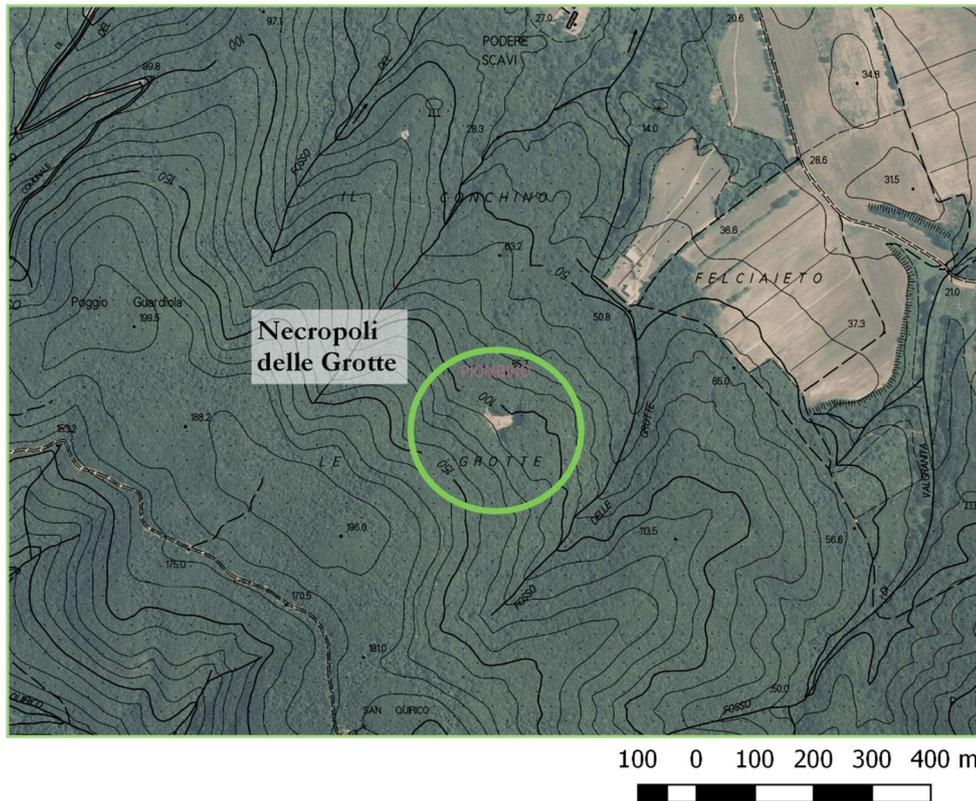


Figura 9 Localizzazione Necropoli delle Grotte

Nel momento dell'estrazione si procedeva disegnando sulla pietra 6/8 blocchi facendo una leggera incisione fino ad ottenere la sagoma completa e a tagliare i blocchi completamente (Figura 11). Per staccare i blocchi dalla parete di cava si inserivano nelle fessure create in precedenza dei cunei in legno che venivano bagnati e, gonfiandosi, aumentavano progressivamente l'apertura delle fratture; successivamente venivano sostituiti da cunei in metallo che venivano colpiti per distaccare il blocco. Dopo il distacco, il blocco veniva rifinito e liscio in modo che si potesse avere completa aderenza tra un blocco e l'altro poiché le strutture venivano fatte "a secco", cioè senza l'utilizzo di malte. Nell'area circostante il fronte di cava sono stati ritrovati numerosi blocchi rifiniti: ciò sta a significare che le operazioni di liscitura venivano fatte nella cava stessa.



Figura 10 Dettaglio: parete di scavo della cava delle grotte

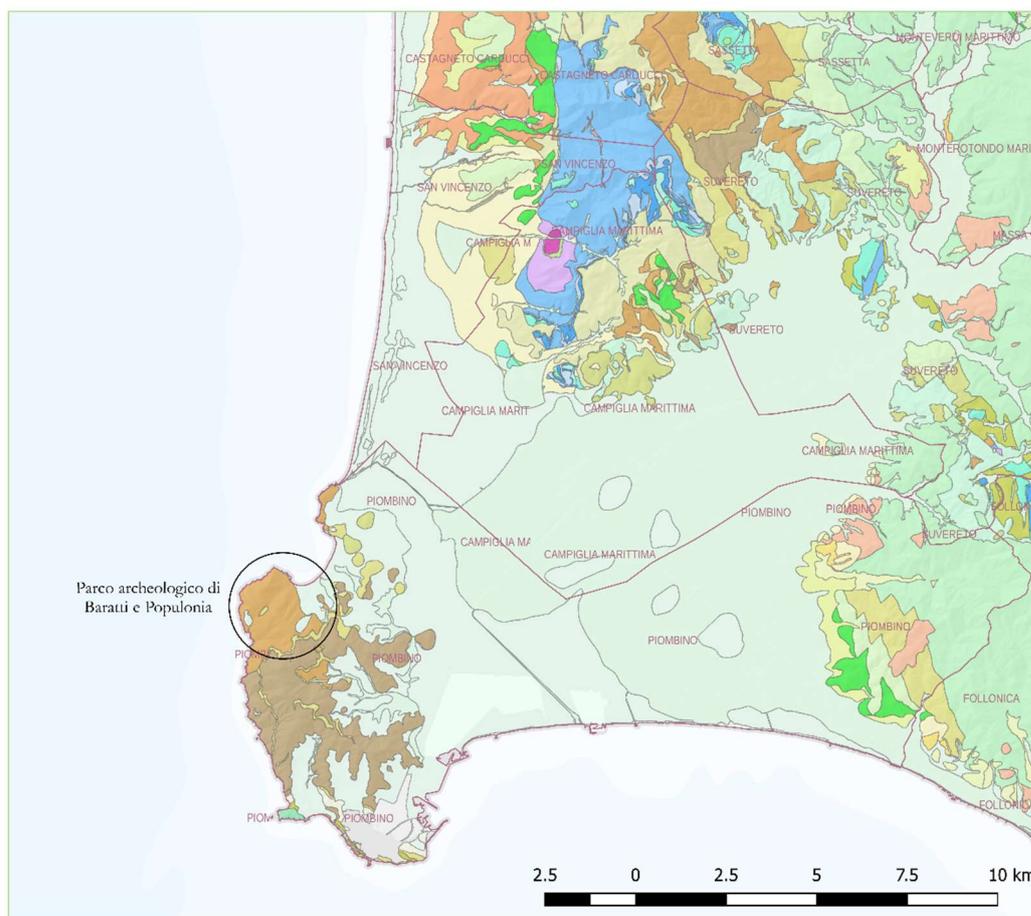


Figura 11 Dettaglio con fessure per l'estrazione dei blocchi

2.3. L'inquadramento geologico dell'area

Dal punto di vista geologico la zona delle tombe delle Grotte, dove è situata la cava, è interessata da affioramenti di “Panchina”. Questi affioramenti si registrano a partire dalla località Torraccia e proseguono, con piccoli lembi, lungo la linea di costa, fino ad arrivare a depositi significativi presso la falesia della Baia di Baratti in particolare

proprio presso la località Le Grotte e Buca delle Fate. I livelli di panchina, dagli studi, si ritiene che siano livelli di paleospaggia da ricondurre a fasi di regressione marina. Questi livelli si trattano per lo più di depositi calcarenitici formatisi per cementazione delle sabbie di spiaggia. La cementazione è stata resa possibile grazie all'abbondante presenza di carbonati di origine bioclastica e alla circolazione di acque meteoriche. Alternate a livelli di sabbie cementati sono presenti lenti di sabbie incoerenti non influenzate dallo scorrimento di acque meteoriche. I livelli quindi si presentano normalmente cementati, pressoché privi di matrice silito-argillosa e di colore giallastro. Riporto nelle pagine seguenti le carte geologiche con dettagli a 100k e a 10k, entrambe facenti parte del database geologico della regione Toscana aggiornato a Novembre 2014.



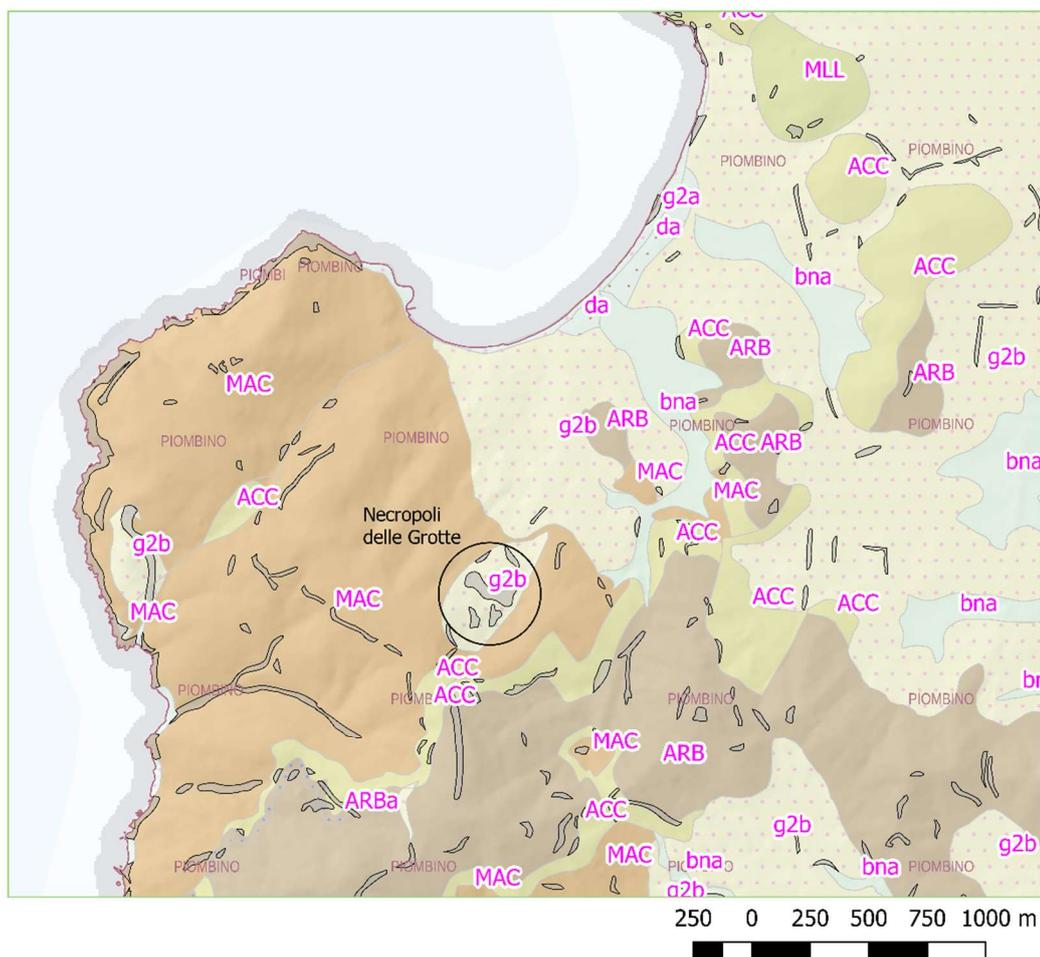
Legenda

rt_dbge1_geol.unita_geologica_areale_100k

- | | |
|---|---|
| ATR - Depositi alluvionali attuali e recenti | SIL - Formazione di Sillano: Argilliti grigio bruno e calcilutiti |
| DSP - Depositi di spiaggia | ACC - Argille e Calcari di Canelolo |
| DIA - Depositi lacustri, lagunari, palustri, torbosi e di colmata indifferenziati | ARB - Arenarie di Ponte Bratica |
| TVT - Travertini e calcari continentali | fpo - Filoni porfirici a composizione trachandesitica e riolitica |
| ALA - Depositi alluvionali terrazzati | FSP - Formazione di Salivoli-Piombino |
| VIIc - Sabbie e conglomerati | LIM - Calcare Selcifero di Limano |
| VIIb - Sabbie, sabbie ciottolose e sabbie silteose argillose e limi sabbiosi | MAC - Macigno |
| VIIa - Conglomerati e ciottolami poligenici | MAI - Maiolica |
| FAA - Argille azzurre | MAS - Calcare Massiccio |
| PLIs - Sabbie e arenarie gialle. | POD - Marne a Posidonomya |
| MhS - Depositi lacustri e lagunari | RET - Calcari a Rhactavacula Contorta |
| ROS - Depositi marini pre-evaporitici messiniani | RSA - Rosso Ammonitico |
| RAQ - Argille e argille sabbiose grigie | SCM - Scisti di Cala Moresca: Scisti di colore grigio |
| APA - Argille a Palombini: Argilliti grigie e calcilutiti | STO - Scaglia Toscana: Argilliti e argilliti silteose e marnose |
| CCI - Calcari a calponelle: Calcilutiti grigio chiare con intercalazioni di argilliti e marne | STO1 - Scaglia Toscana: Membro delle Argilliti di Brolio |
| DSA - Diaspri: Radiolariti con interstrati argillitici | STO1a - Scaglia Toscana: Litofacies dei calcari a grana fine |
| BRC - Basalti con strutture a pillow-lava | STO2 - Scaglia Toscana: Membro delle Marne del Sugame |
| OMT - Flysch di Ottone-Monteverdi | SKA - Skarn |
| RCII - Argilliti e calcari di Poggio Rocchino | RIQ - Rioliti |
| MIL - Formazione di Monte Morello: Flysch carbonatici, calcari marnosi e marne | GRA - Graniti |
| | 99 - Area non rilevabile |

Figura 12 Carta geologica 100k⁴

⁴ Regione Toscana, <http://www.regione.toscana.it/web/geoblog/-/open-geodata>.



Legenda

rt_dbge_l_geol.unita_geologica_areale_10k

- bna - Depositi alluvionali recenti, terrazzati e non terrazzati OLOCENE
- da - Depositi eolici OLOCENE
- ea - Depositi lacustri, lagunari, palustri, torbosi e di colmata indifferenziati OLOCENE
- g2a - Depositi di spiaggia OLOCENE
- g2b - Depositi di spiaggia PLEISTOCENE MEDIO - PLEISTOCENE SUPERIORE
- MLL - Formazione di Monte Morello PALEOCENE SUPERIORE - EOCENE MEDIO
- ACC - Argille e Calcari di Canetolo PALEOCENE - EOCENE
- ARB - Arenarie di Ponte Bratica EOCENE - OLIGOCENE
- ARBa - Arenarie di Ponte Bratica: Litofacies marnosa EOCENE - OLIGOCENE
- MAC - Macigno OLIGOCENE SUPERIORE - MIOCENE INFERIORE

Affioramento_arcale

- affioramento significativo

Figura 13 Carta Geologica 10k⁵

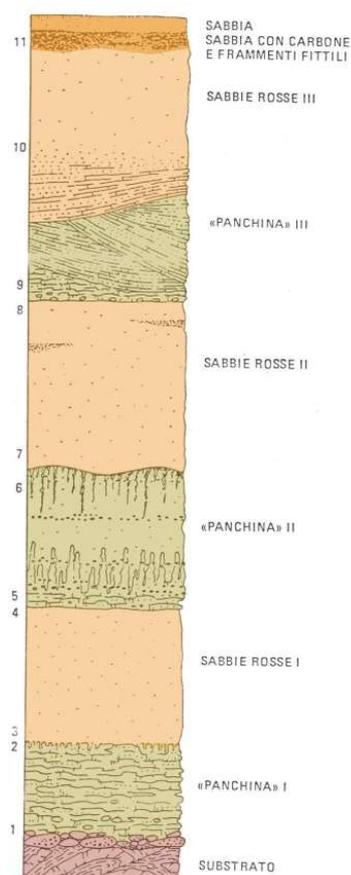


Figura 14 La colonna stratigrafica riprodotta dallo studio di Cortemiglia et Al. 1984 (modificata), in cui si osservano i tre cicli marini

Uno studio molto importante di questa area è stato svolto da Cortemiglia et Al. e riporta: “i due grandi riempimenti di “panchina” eolica delle paleovalli pretirreniane del Fosso delle Grotte e del Fosso delle Fate sono riferibili alle fasi regressive che si intercalano ai tre episodi trasgressivi documentati dalle tre paleospiagge; infatti, durante le fasi regressive si verificava l'emersione di spiagge piuttosto alte e di grandi estensioni di fondali marini sabbiosi, non difesi dalla vegetazione e sui quali i venti potevano esercitare la loro azione di prelievo e di trasporto”.

Viene evidenziato dunque come, nei depositi presenti in località Le Grotte, siano presenti caratteristiche tipiche dei depositi eolici.

Si ritiene che “[...] nonostante la diversa esposizione il significato dei due depositi sabbiosi è il medesimo. Evidentemente quelli del Fosso delle Fate furono accumulati dai venti meridionali e

⁵ Regione Toscana, <http://www.regione.toscana.it/web/geoblog/-/open-geodata>.

occidentali che durante le fasi glaciali, e quindi di mare basso, raccoglievano le sabbie dalle grandissime spiagge che si estendevano ad Ovest del Promontorio di Piombino, mentre quelli del Fosso delle Grotte furono accumulati dai venti settentrionali che raccoglievano le sabbie a Nord del promontorio stesso, al fondo dell'attuale Baia Baratti e si tutta l'estesissima piattaforma continentale antistante San Vincenzo, allora largamente emersi”⁶

I due depositi descritti di origine eolica sono stati in antichità antropizzati e sfruttati in qualità di cave di panchina eolica e sono inoltre state scavate numerose tombe ipogee (Figura 15) del periodo ellenistico (IV-III secolo a.C.). La macchia mediterranea che ricopre la zona circostante la cava delle grotte impedisce la ricostruzione più dettagliata della zona e solo nella zona antropizzata è visibile la laminazione del sedimento di natura da arenacea a grana media a calcarenitica con lamine piane del tutto simili a strati che si estendono per diversi metri con inclinazioni medie da 25° a 30° verso est (Figura 16).⁷



Figura 15 Esempio di tomba ipogea del tipo "a camera"⁸

⁶ Cortemiglia G.C., Mazzanti R., Parea C., Geomorfologia della Baia Baratti (Livorno-Toscana) e della sua spiaggia, *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, (1983).

⁷ Comune di Piombino, Provincia di Livorno, Piano particolareggiato del parco archeologico di Baratti e Populonia, Tavola G. 11, (2011).

⁸ <https://lasette.wordpress.com/2015/09/05/la-via-delle-cave-e-la-necropoli-delle-grotte/>



Figura 16 Dettaglio stratigrafia

3. Strumenti e metodi per il rilevamento a grandissima scala

In questo capitolo viene descritto l'approccio integrato alle attività di rilevamento seguito durante la campagna svolta. Esso si attua in tre fasi principali (vedi Figura 17): la realizzazione di una rete di inquadramento, di una rete di raffittimento e un rilievo di dettaglio. Queste attività saranno illustrate nel dettaglio dal punto di vista teorico nei paragrafi che seguono.



Figura 17 Diagramma delle attività di rilevamento svolte

3.1. Rete di inquadramento

La campagna di misure è stata svolta utilizzando diverse metodologie e strumentazioni. Punto focale del lavoro è la georeferenziazione di tutti i dati: ogni lavoro deve infatti basarsi su di una rete di vertici con coordinate note. La costruzione di questa rete si attua materializzando a terra su punti strategici (affioramenti rocciosi stabili, costruzioni artificiali fisse), dei vertici costituiti da chiodi o viti, rispetto ai quali si procederà a misurare. Nel momento della materializzazione di ogni vertice è fondamentale stendere una monografia accurata del vertice con tutti i dati necessari per riconoscere il punto nel futuro e per avere le informazioni sufficienti per il *post-processing*. Riporto, nella pagina seguente, a titolo di esempio la monografia del vertice 3000. In allegato si trovano le monografie degli altri due punti (4000 e 6000) materializzati in zona.



Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: Baratti - Località Le Grotte

Data: 28/09/2017

Politecnico di Torino

Operatori: Alice Lazzarato

Monografia di vertice della rete principale di inquadramento

Vertice: 3000

Planimetria di base



Disegno monografia vertice



Tipo di materializzazione: *Tassello rosso con vite*

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): *cellulare*

Huawei P9 Lite di Alice Lazzarato

Strumento di rilievo: *Antenna GNSS*

Altezza strumentale: *1.573 m (corretta)*

Strumento di misura (uncino/rotella): *rotella*

Tipo di antenna: *Geomax Zenith 1011*

Data: *28/09/2017*

Ora di acquisizione: *11.00*

Ora fine acquisizione: *12.35*

Coordinate compensate: E=622613.581 m

N=4759835.827 m Q=147.051 m

Nome sistema di coordinate: UTM WGS 84 F32

Coordinate locali: E=2613.581 m N=835.827 m

Q=147.051 m

Le collimazioni si effettuano su dei *marker* cartacei, costituiti da una scacchiera 2x2 bianca e nera ad alto contrasto. I *marker* vengono posizionati su tutti gli oggetti che saranno soggetti a rilievo.

Una volta materializzata la rete di inquadramento, la prima misurazione da effettuare è il calcolo delle coordinate di alcuni di questi punti mediante un ricevitore GNSS (Global Navigation Satellite System).

3.1.1. Il posizionamento GNSS

Il GNSS è un sistema di posizionamento e navigazione basato sulla comunicazione di segnali radio a terra, da parte di una costellazione satelliti artificiali in orbita. Il sistema che permette il posizionamento di un punto in qualunque parte del globo è costituito da tre segmenti: la costellazione satellitare, il segmento di controllo, cioè l'insieme delle stazioni a terra della NASA che controllano e manovrano la stazione e il segmento di utilizzo, cioè gli utenti dotati di uno strumento passivo (ricevitore e antenna). Il posizionamento tridimensionale di un punto nello spazio e nel tempo è possibile grazie alla misura di almeno 4 pseudo-distanze e grazie all'ipotesi di conoscere in ogni istante la posizione dei satelliti in orbita (effemeridi). Un'altra ipotesi fondamentale è il saper riconoscere da quale satellite è stato emesso il segnale e quando il segnale è stato effettivamente emesso.

Il motivo per cui si debbano osservare almeno 4 satelliti è che le misure di distanza sono funzioni di quantità temporali: il posizionamento è cioè di tipo spazio temporale, ciò che si ricava sono le quattro coordinate del punto da misurare (X, Y, Z, t). Il principio che lega la misura della distanza all'intervallo di tempo impiegato dal segnale a raggiungere il ricevitore ci richiama al funzionamento dei distanziometri ad impulsi: il satellite emette un "impulso che in realtà è un segnale molto più complesso e dal tempo di volo si determina la distanza tra la stazione e ciascun satellite ricevuto. Il segnale GNSS è un segnale sinusoidale modulato in maniera impulsiva: contiene cioè un treno di impulsi. Per riconoscere da quale satellite ci giunge l'impulso si ricorre ad un diverso treno di impulsi che modula la portante di ogni satellite. È necessario inoltre capire quale parte treno d'onda si inizia a ricevere. Ogni codice ha una lunghezza d'onda

propria: se all'interno del codice non vi sono parti che si ripetono, la ricezione di una piccola parte del codice permette di misurare, all'interno della lunghezza d'onda del codice, con quale sfasamento o con quale ritardo il segnale impulsivo giunge al ricevitore.

3.1.1.1. *Il segnale GNSS*

Il segnale è formato da due portanti (L1 e L2), due codici (C/A e P) e un codice messaggio (D). Le misure ricavabili dal segnale GNSS sono due: un tipo di misura della pseudorange sui codici e una misura su ciascuna delle fasi: la fase sulla frequenza L1 e quella sulla frequenza L2. Dal punto di vista geometrico pseudorange e fase hanno identico contenuto geometrico: la distanza stazione-satellite.

3.1.1.2. *Misura dello pseudorange*

La misura dello pseudo range è uguale al tempo di volo per la costante c di velocità di propagazione dell'onda. In realtà questo prodotto non rappresenta il range stazione-satellite in quanto il segnale non si propaga in modo ideale ed è affetto da errori di modello, sistematici, e accidentali. Il problema è capire come si può determinare il tempo di volo che è l'intervallo tra la trasmissione del segnale e la ricezione del segnale, ciò è possibile grazie al fatto che il ricevitore dispone in memoria di una copia identica del segnale dei codici (C/A o P). Questa informazione binaria, nota al ricevitore, permette di iniziare un processo di correlazione tra il segnale ricevuto e un identico segnale generato dal ricevitore. Il tempo di volo può essere misurato a meno di una certa incognita di asincronismo dell'orologio del ricevitore. Lo scarto quadratico medio teorico delle misure di pseudorange è di circa l'1%, 2% della lunghezza d'onda del segnale. Per il codice C/A lo scarto è di circa $\pm 3-6$ m mentre per il codice P è di $\pm 30-60$ cm.

3.1.1.3. *Misura della fase*

La misura della fase è più complessa. Ciò che il ricevitore misura, come nel caso dei distanziometri a misura di fase, è un sfasamento. Per definizione ciò che si misura è la fase generata dal ricevitore i , al tempo del ricevitore T , meno la fase ricevuta dal ricevitore i ma generata dal satellite k al tempo del satellite t . Viene calcolato uno sfasamento misurato sulla frequenza di lunghezza d'onda a meno di un numero intero

N di cicli che intercorrono tra il centro di fase dell'antenna del satellite e il centro di fase dell'antenna del ricevitore. Questo numero incognito viene chiamato ambiguità. Il sistema di misura è dinamico: se pure il ricevitore non si muove, in pochi secondi il satellite percorre migliaia di metri. Il ricevitore ha la possibilità di contare il numero intero N che rappresenta il numero di volte che la fase, a causa del moto del satellite, si è azzerata tra gli istanti T_0 e T . Per tale motivo, anche se le misure vengono memorizzate ad intervalli regolari di diversi secondi una perdita di contatto ricevitore-satellite anche di pochi millisecondi annullerebbe la possibilità di questo conteggio. Si riporta di seguito uno schema del processo di misura di fase (Figura 18).

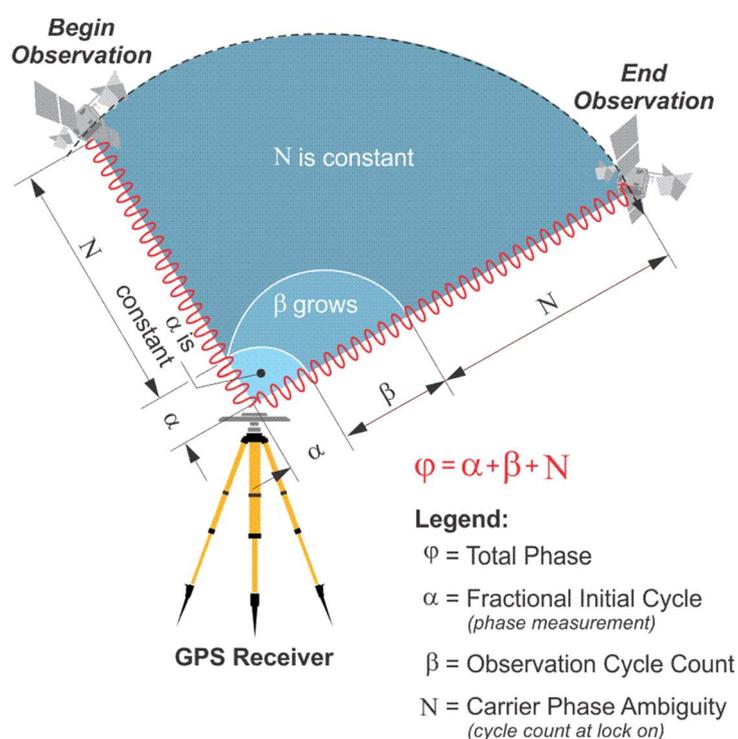


Figura 18 Schema del processo di misura di fase⁹

3.1.1.4. Errori di misurazione

Gli errori (*biase*) che influenzano le misure sia di fase che di pseudorange sono di diversa natura e non è nello scopo di questa tesi la spiegazione approfondita degli stessi. È necessario comunque sottolineare come sia possibile eliminare gli errori sistematici

⁹ PennState College of Earth and Mineral Science, Components of the Carrier Phase Observable <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1729>.

presenti utilizzando principalmente due metodi: la modellizzazione e la differenziazione. Modellizzare vuol dire cercare un modello fisico matematico del fenomeno che sia ragionevole e poi applicarlo a gran parte dell'errore. In alcuni casi la modellizzazione risulta difficile per certi *biase*; certi errori infatti sono correlati spazialmente cioè sono molto simili per punti vicini sulla superficie terrestre. Si sposta a questo punto il problema dal posizionamento assoluto al posizionamento relativo, il che significa dare meno importanza alla conoscenza della posizione assoluta di un punto sulla superficie terrestre e attribuire più importanza alla conoscenza della posizione relativa di un ricevitore rispetto ad un altro. La posizione relativa è data dalla differenza vettoriale delle due posizioni geocentriche dei ricevitori e viene chiamata base. Si ipotizza che le osservazioni dei due ricevitori siano affette da un certo numero di errori sistematici, in maniera identica sui due ricevitori. Questi *biase* sono automaticamente eliminati nella differenza delle osservazioni dei ricevitori. Nel nostro caso quelle che sono state utilizzate sono differenze di fasi che portano al posizionamento di precisione.¹⁰

3.2. Rete di raffittimento

Per creare una rete di raffittimento, si realizza una rete locale di triangolazione comprendente i vertici di nuova determinazione e un congruo numero di vertici della rete di inquadramento. Le misure (angoli e distanze) collegano i nuovi punti tra loro e a quelli della rete di inquadramento, in modo da raggiungere una adeguata ridondanza.

3.2.1. Funzionamento teorico degli strumenti topografici

Le misure topografiche vengono effettuate con una stazione totale: questo strumento è sostanzialmente un teodolite elettronico che comprende all'interno della sua struttura un distanziometro.

Per avere delle ottime misurazioni è importante che l'asse primario della stazione venga reso verticale rispetto al punto su cui è posizionata, questo è possibile grazie all'utilizzo

¹⁰ Manzino A., Dispense di Topografia, Politecnico di Torino, pp. 291-298.

della livella torica presente sulla base dello strumento. La stazione totale è in grado di effettuare misure di angoli azimutali, zenitali e distanze.

Le misure angolari azimutali e zenitali sono effettuate grazie ad un sistema di cerchi graduati la cui lettura avviene in maniera automatica mediante un dispositivo elettro-ottico. La lettura degli angoli azimutali avviene sul cerchio orizzontale mentre la lettura degli angoli zenitali sul cerchio verticale. In Figura 19 si riporta uno schema di come è strutturato internamente il teodolite.

Una volta che il cannocchiale è perfettamente allineato col punto collimato, che sia un *marker* o che sia un prisma montato su palina e reso verticale su un punto a terra della rete, si avvierà la misura e verranno letti automaticamente i valori degli angoli presenti sui due goniometri elettronici.

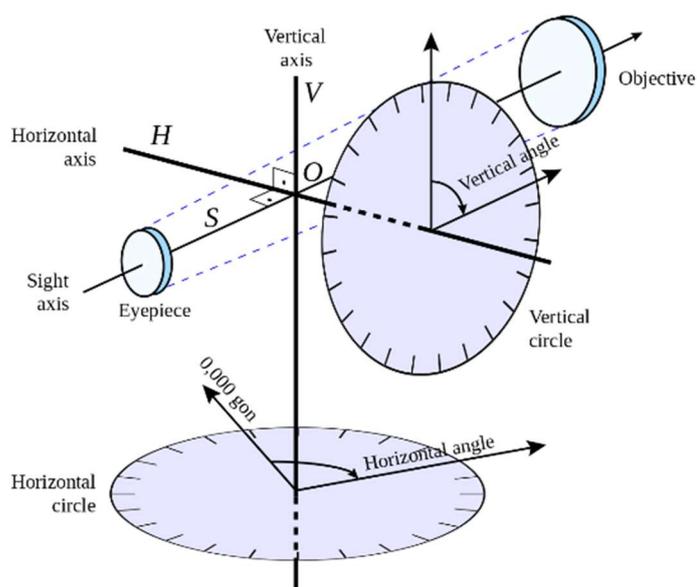


Figura 19 Schema teodolite

Per la misura della distanza invece si utilizzerà il distanziometro elettro ottico incorporato nella stazione totale. Il concetto di funzionamento è quello di emettere una radiazione ottica sulla lunghezza d'onda dell'infrarosso vicino, di modularla e di trasmetterla verso un prisma retroriflettore. Il prisma, essendo riflettente, rinvia indietro il fascio di luce emesso dalla stazione deviandolo di 180° . L'onda compie dunque un percorso di andata e ritorno. La fase del segnale emesso viene confrontata con la fase del segnale riflesso ricevuto da un dispositivo interno del distanziometro

detto comparatore di fase, determinando lo sfasamento angolare tra le due sinusoidali. Nel percorso di andata e ritorno risulta compreso un numero intero di lunghezze d'onda e una frazione di lunghezza di fase corrispondente allo sfasamento.

Differente è invece la misura di distanza effettuata con i *marker*: la collimazione dei *marker* avviene in modalità *reflectorless*, cioè senza l'utilizzo di un prisma e misurando direttamente il centro del *marker*. In questo caso la luce viene riflessa direttamente dalla superficie opaca in modo diffuso. Lo strumento percepisce l'onda riflessa e riesce a determinare l'istante in cui il segnale di ritorno arriva e a misurare la distanza.

3.2.2. *Acquisizione RTK*

RTK è l'acronimo di *Real-Time Kinematic* ed è una tecnica che utilizza l'intervallo basato su carrier e fornisce intervalli (e quindi posizioni) che sono ordini di grandezza più precisi di quelli disponibili attraverso il posizionamento basato su codice. Il concetto di base è quello di ridurre e rimuovere gli errori comuni a una stazione base e un *rover*, come illustrato nella Figura 20.

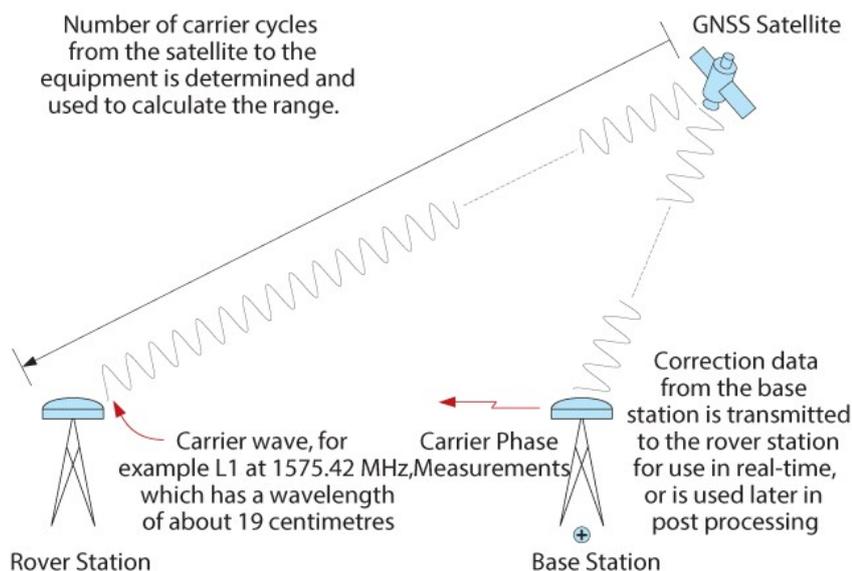


Figura 20 *Acquisizione RTK*

A un livello concettuale di base, l'intervallo viene calcolato determinando il numero di cicli di portanti tra il satellite e la stazione del *rover*, quindi moltiplicando questo numero per la lunghezza d'onda del vettore.

In pratica, i sistemi RTK utilizzano un ricevitore a stazione base singola e un numero di unità mobili. La stazione base ri-trasmette la fase della portante che osserva e le unità mobili confrontano le proprie misurazioni di fase con quella ricevuta dalla stazione base. Esistono diversi modi per trasmettere un segnale di correzione dalla stazione base alla stazione mobile. Il modo più diffuso per ottenere la trasmissione del segnale in tempo reale e a basso costo consiste nell'utilizzare un modem radio. La maggior parte delle apparecchiature per l'ispezione della terra ha un radio modem integrato come opzione standard. RTK offre miglioramenti di precisione fino a circa 20 km dalla stazione base.

Ciò consente alle unità di calcolare la loro posizione relativa entro millimetri, sebbene la loro posizione assoluta sia precisa solo con la stessa accuratezza della posizione calcolata della stazione base. La precisione nominale tipica per questi sistemi è di 1 centimetro \pm 2 parti per milione (ppm) in orizzontale e 2 centimetri \pm 2 ppm in verticale.

Sebbene questi parametri limitino l'utilità della tecnica RTK per la navigazione generale, la tecnica è perfettamente adatta a ruoli come il rilievo. In questo caso, la stazione base si trova in una posizione rilevata nota, spesso un punto di riferimento, e le unità mobili possono quindi produrre una mappa estremamente accurata prendendo correzioni relative a quel punto.

3.3. Rilievo di dettaglio

3.3.1. *Rilievo con laser scanner*

Uno degli scopi principali di tutte le attività descritte precedentemente è la georeferenziazione delle scansioni acquisite con laser scanner terrestre (TLS, Terrestrial Laser Scanner).

Il rilievo con TLS permette la misura di un gran numero di punti in breve tempo, inoltre, a differenza del rilievo con stazione totale, la procedura di misura con TLS è “non intelligente” in quanto non vengono decisi a priori i punti da misurare ma si fa in modo che tutto l’oggetto sia acquisito.

Il laser scanner genera una nuvola di punti in un sistema di coordinate locale misurando per ogni punto il valore di angolo azimutale, zenitale e di distanza (Figura 21); le informazioni aggiuntive come i valori RGB sono fornite da fotocamere digitali interne integrate nello strumento. La misurazione avviene attraverso la rotazione dello strumento e di uno specchio: in questo modo l’impulso laser emesso dallo strumento andrà a colpire tutti i punti circostanti il TLS. In base alla posizione dello specchio vengono misurati gli angoli di emissione del laser mentre mediante l’impulso viene misurata la distanza.

La scansione laser viene generalmente utilizzata per trarne informazioni di superficie al fine di generare sezioni 2D, profili e piani, e modelli 3D.

I TLS possono essere classificati in base alla loro gamma di misure o al loro principio di funzionamento: triangolazione, tempo di volo o fase. Nel primo caso, il dispositivo emette un laser sull’oggetto e sfrutta una camera per cercare la posizione della proiezione del laser sull’oggetto.

Nel secondo caso, gli scanner utilizzano gli impulsi laser per misurare l’intervallo di tempo tra la partenza dell’impulso e l’arrivo dell’impulso riflesso dall’oggetto colpito. Nel terzo caso viene utilizzato, come nel caso precedente, un principio di misurazione basato sul tempo, ma questi laser scanner modulano la potenza del raggio laser, misurando così la differenza di fase tra le forme d’onda inviate e quelle ricevute (Figura 22).

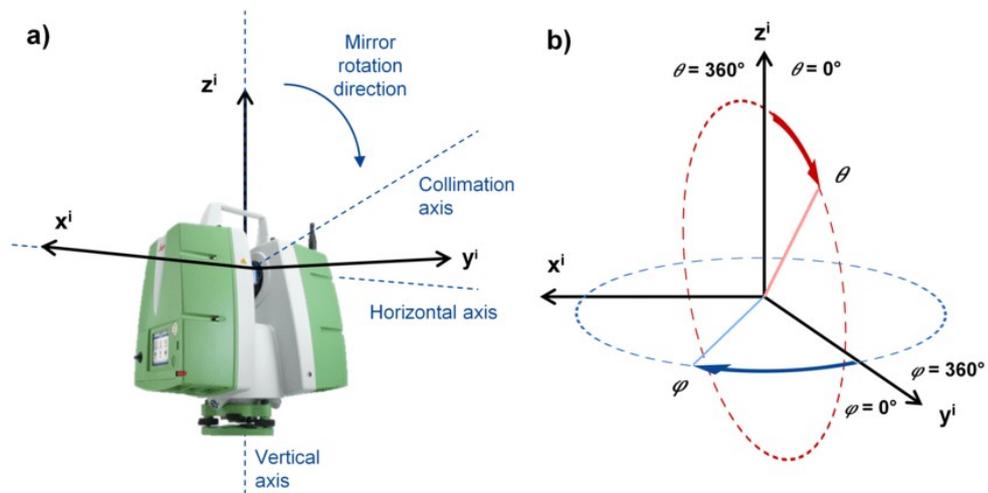


Figura 21 Sistema di riferimento centrato sul TLS¹¹

Nella campagna effettuata è stato utilizzato un TLS a misura di fase. L'onda emessa avrà equazione:

$$s_e(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

mentre quella rientrante avrà equazione:

$$s_r(t) = A \sin(\omega(t + \Delta t) + \varphi_0).$$

La distanza D è uguale a:

$$D = \frac{n\lambda}{2} + \frac{\lambda \Delta\varphi}{2 \cdot 2\pi}$$

dove n è il numero intero di lunghezze d'onda, λ la lunghezza d'onda e $\Delta\varphi$ è lo sfasamento calcolato come:

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t.$$

Per il calcolo dell'ambiguità n il laser scanner utilizza diverse lunghezze d'onde, nel caso specifico il laser scanner che è stato utilizzato per questo rilievo (Faro, vedi paragrafo 4.3.1) lavora con 3 diverse lunghezze d'onda, 2 vicine e una distante.

¹¹ Medic T., Holst C., Kuhlmann H., Towards System Calibration of Panoramic Laser Scanners from a Single Station, *Sensors* 2017, 17, 1145, www.mdpi.com/journal/sensors (2017)

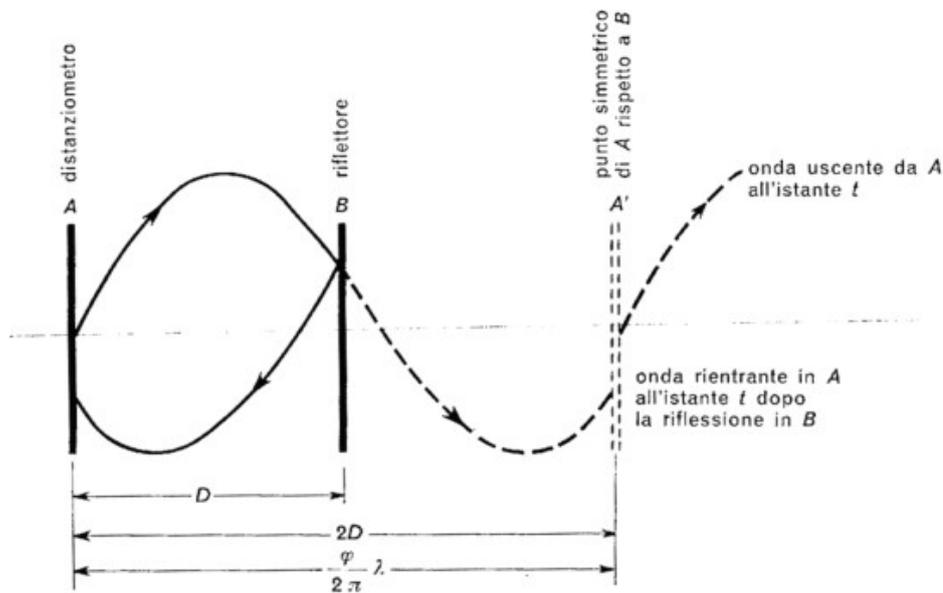


Figura 22 Principio della misura della distanza con misura di fase

È chiaro che essendo ogni scansione in un sistema di riferimento strumentale, ogni scansione avrà un sistema di coordinate proprio: in seguito utilizzando i punti comuni alle diverse scansioni è possibile rototraslare le scansioni e allinearle. Per la registrazione delle scansioni è stato utilizzato il *software* Scene

3.3.2. Rilievo fotogrammetrico (Close Range Photogrammetry)

3.3.2.1. Principi teorici di fotogrammetria

I fotogrammi acquisiti sia da terra (fotogrammetria terrestre) che da droni (fotogrammetria aerea), permettono di determinare la posizione e la forma degli oggetti con una procedura di restituzione fotogrammetrica. Dalle misure fotogrammetriche infatti è possibile derivare le coordinate numeriche di punti di un qualsiasi oggetto tridimensionale, la cartografia plano altimetrica del territorio e immagini metriche.

Per ricostruire la posizione e la forma degli oggetti a partire dai fotogrammi acquisiti è necessario conoscere le relazioni geometriche in base a cui si sono formate le fotografie. I fotogrammi possono essere considerati come una prospettiva centrale, geometricamente rigorosa, dell'oggetto fotografato. In Figura 23 si riporta lo schema di un fotogramma.

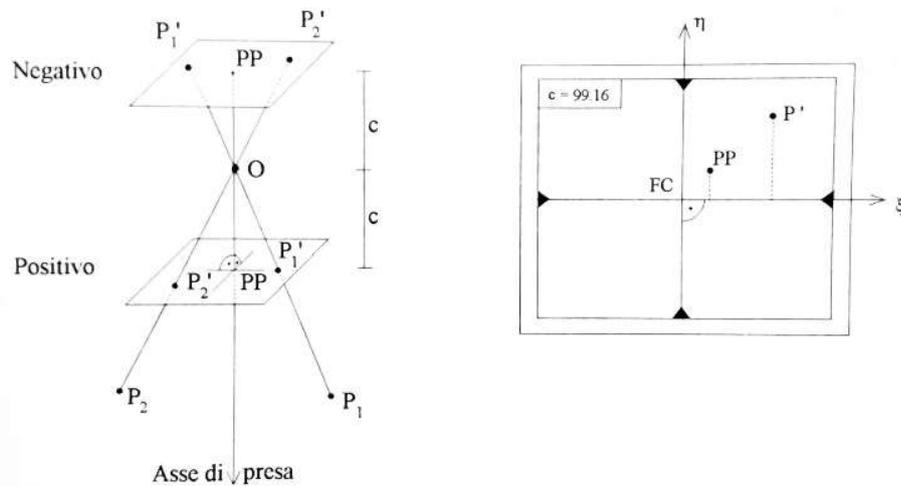


Figura 23 Fotogramma nelle posizioni negativa e positiva e schema di un fotogramma

Le relazioni fra le coordinate ξ ed η di un punto immagine P' e le XYZ del corrispondente punto oggetto P sono schematizzate di seguito (Figura 24) e sono legate dalle equazioni di collinearità in forma di prospettivizzazione (Equazione 1): i parametri r_{ik} sono gli elementi della matrice di rotazione spaziale R che indica l'assetto spaziale del fotogramma relativo al sistema di coordinate terreno XYZ . Gli elementi della matrice R possono essere espressi in funzione delle tre rotazioni nello spazio ω, φ e κ .

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Equazione 1 Equazioni di collinearità in forma di prospettivizzazione

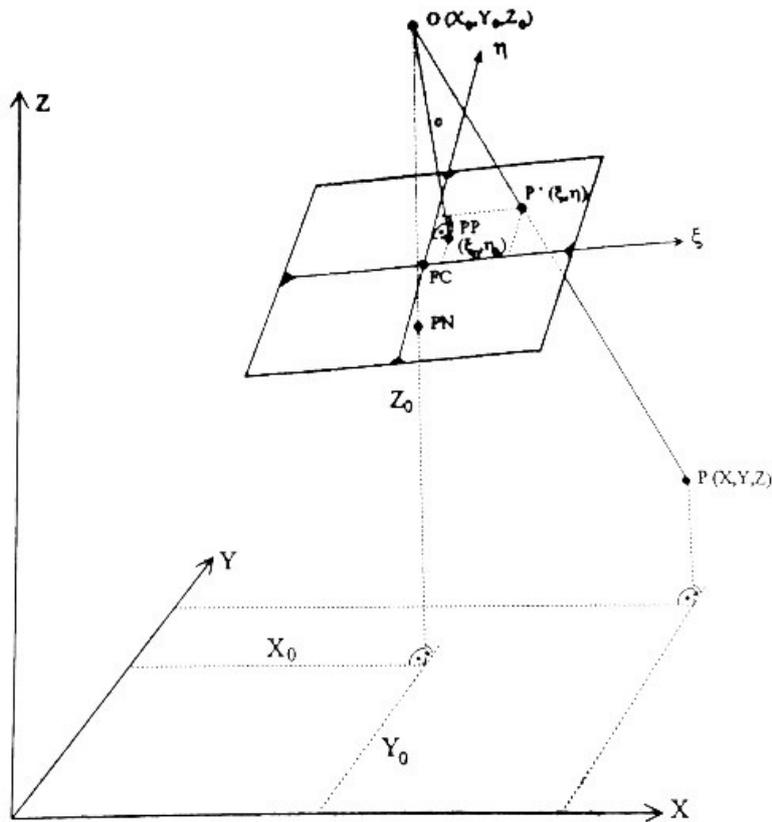


Figura 24 Relazione fra le coordinate di punti immagine e di punti oggetto

Andando a ricavare dalle equazioni di collinearità in forma di prospettivizzazione le coordinate oggetto X e Y , ottenendo le equazioni di collinearità in forma di restituzione (Equazione 2), è chiaro come per ottenere la geometria spaziale di un oggetto sia sufficiente un fotogramma.

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

Equazione 2 Equazioni di collinearità in forma di restituzione

Per ricavare però informazioni sulla dimensione Z dell'oggetto è necessario un secondo fotogramma.

Le trasformazioni definite nelle equazioni precedenti richiedono la conoscenza di diverse variabili indipendenti noti come parametri d'orientamento. I parametri d'orientamento interni sono:

ξ_0 e η_0 = Coordinate immagine del punto principale *PP*;

c = Distanza principale.

I parametri d'orientamento esterno sono invece:

$X_0Y_0Z_0$ = Coordinate oggetto del punto di presa;

ω, φ e κ = 3 angoli di rotazione del fotogramma.

La definizione della prospettiva centrale richiede dunque 9 parametri in totale, di cui i 3 di orientamento interno sono noti e vengono determinati dal costruttore della camera mediante un procedimento di calibrazione della camera. I parametri d'orientamento esterno invece possono essere determinati con metodi topografici o, in fotogrammetria aerea, usando i punti d'appoggio.

È necessario quindi che un punto sia visibile da almeno due fotogrammi, questi due punti sono detti punti omologhi. Di conseguenza due fotogrammi dovranno avere un certo grado di sovrapposizione sia longitudinale, solitamente uguale al 60%, che trasversale (20-30%). Di seguito si riportalo schema di un piano di volo (Figura 25).

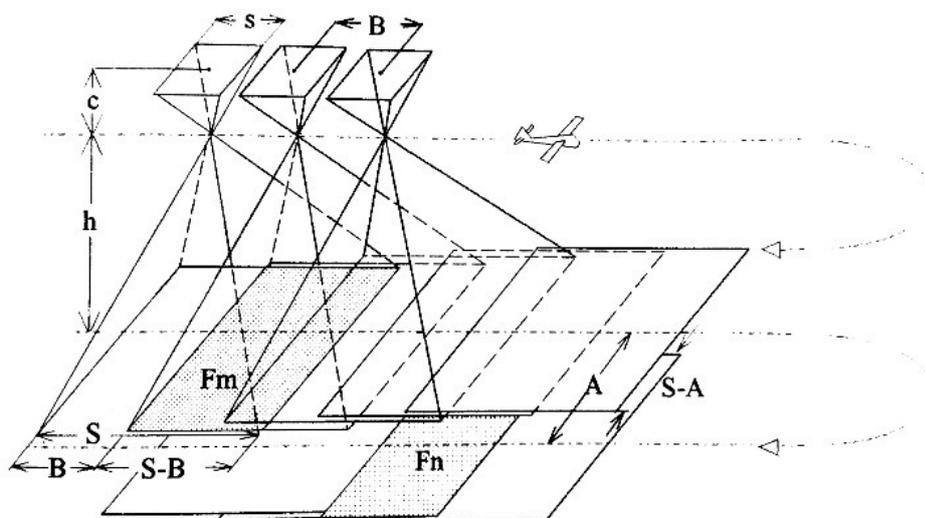


Figura 25 Piano di volo

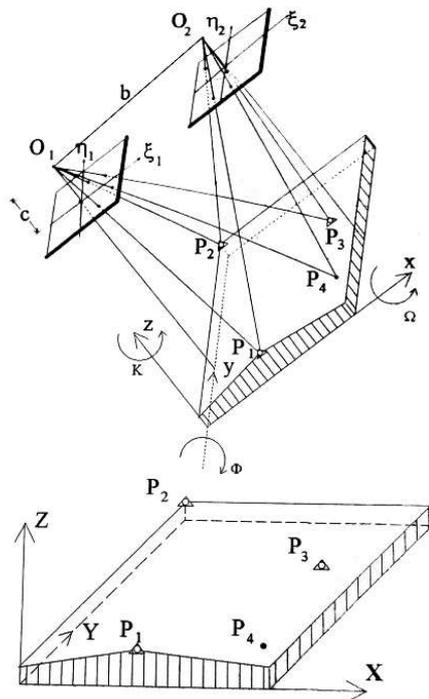


Figura 26 Orientamento relativo e assoluto

Il processo di restituzione si può suddividere in due parti: la ricostruzione dell'orientamento relativo, che genera il modello, e la ricostruzione dell'orientamento assoluto, cioè la trasformazione da coordinate modello a coordinate terreno (schema in Figura 26).

In passato queste operazioni venivano svolte grazie alla visione stereoscopica con restitutori analitici, con l'identificazione dei punti omologhi eseguita da un operatore.¹²

3.3.2.1.1. Distorsioni della camera

Le camere digitali professionali che vengono generalmente utilizzate non sono camere metriche, cioè sono soggette a distorsioni che vengono calcolate nel momento dell'orientamento delle immagini tramite il processo di *Structure from Motion* descritto nel paragrafo successivo (autocalibrazione).

¹² Karl Kraus, Fotogrammetria, Vol.1 - Teoria e Applicazioni. Libreria Universitaria Levrotto & Bella, (1994).

Le distorsioni possono essere radiali, tangenziali e affini e dipendono sostanzialmente dal sensore e dalla messa a fuoco continua.

I parametri che caratterizzano queste distorsioni sono:

k_1, k_2, k_3 per le distorsioni radiali

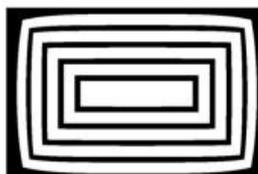


Figura 27 Distorsione radiale positiva

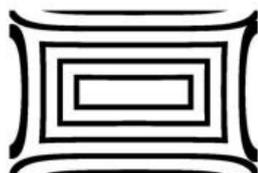


Figura 28 Distorsione radiale negativa

p_1, p_2, p_3 per le distorsioni tangenziali

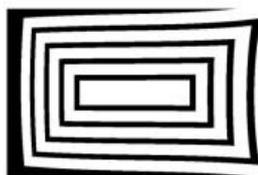


Figura 29 Distorsione tangenziali

c_1, c_2 per le distorsioni affini

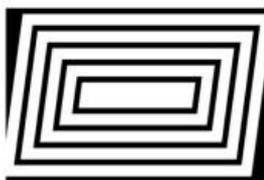


Figura 30 Distorsione affine

Il processo di autocalibrazione calcola questi parametri andando poi a correggere le equazioni di collinearità passando dalle coordinate immagine distorta alle coordinate immagine non distorta.

$$x' = x_p' - x_0' - \Delta x'$$

$$y' = y_p' - y_0' - \Delta y'$$

Equazione 3 Passaggio da coordinate immagine distorta a coordinate immagine non distorta

$$\Delta x'_{rad} = (x_p' - x_0')(k_1 \cdot r'^2 + k_2 \cdot r'^4 + k_3 \cdot r'^6 + \dots)$$

$$\Delta y'_{rad} = (y_p' - y_0')(k_1 \cdot r'^2 + k_2 \cdot r'^4 + k_3 \cdot r'^6 + \dots)$$

Equazione 4 Distorsione radiale

$$\Delta x'_{tan} = [P_1 \cdot (r'^2 + 2 \cdot (x_p' - x_0')^2) + 2 \cdot P_2 \cdot (x_p' + x_0') \cdot (y_p' - y_0')] \cdot [1 + P_3 \cdot r'^2 + \dots]$$

$$\Delta y'_{tan} = [P_1 \cdot (r'^2 + 2 \cdot (y_p' - y_0')^2) + 2 \cdot P_2 \cdot (x_p' + x_0') \cdot (y_p' - y_0')] \cdot [1 + P_3 \cdot r'^2 + \dots]$$

Equazione 5 Distorsione tangenziale

$$\Delta x'_{aff} = c_1 \cdot (x_p' - x_0') + c_2 \cdot (y_p' - y_0')$$

$$\Delta y'_{aff} = 0$$

Equazione 6 Distorsione affine

3.3.2.2. Structure from Motion

3.3.2.2.1. Cos'è la Structure from Motion

Attualmente la fotogrammetria digitale rappresenta l'evoluzione delle metodologie analitiche utilizzate per l'acquisizione e per la restituzione fotogrammetrica. Un fotogramma digitale è sostanzialmente una matrice di "pixel" le cui dimensioni sono $\Delta\xi$ e $\Delta\eta$. Ciascun *pixel* contiene un valore numerico che corrisponde al livello di colore contenuto. Ogni *pixel* avrà la sua coordinata all'interno del sistema di riferimento immagine in base all'indice matriciale ad esso corrispondente (Figura 31

Definizione del sistema di coordinate dei pixel. In fotogrammetria digitale quindi la tradizionale misura delle coordinate immagine è sostituita dall'identificazione del *pixel*.

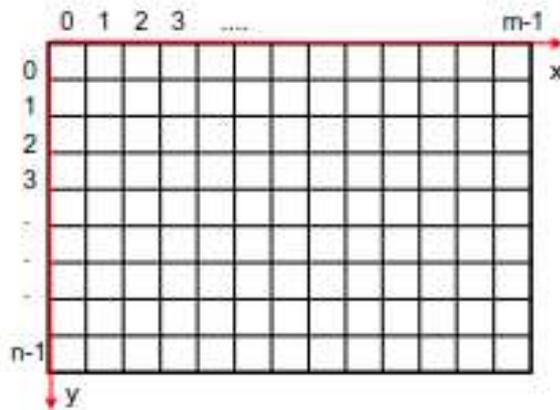


Figura 31 Definizione del sistema di coordinate dei pixel

Negli ultimi anni la tecnologia sta rendendo possibile un'evoluzione della fotogrammetria digitale (con orientamento semi-automatico) verso il metodo della *Structure from Motion (SfM)*, basato sui principi della fotogrammetria tradizionale ma molto vicino all'approccio della *computer vision*. Nella pagina seguente (Figura 32) è raffigurato uno schema riassuntivo dei passaggi per la creazione di una nuvola densa a partire da un set di immagini.

Questo miglioramento è stato reso possibile grazie allo sviluppo di nuovi algoritmi nel campo appunto della *computer vision*, la scienza che sviluppa tecniche matematiche per ricavare informazioni spaziali e strutturali da immagini. *SfM* permette la generazione di dati 3D dalla sovrapposizione di immagini, utilizzando le stesse tecniche della fotogrammetria stereoscopica. La differenza con la fotogrammetria convenzionale sta nel fatto che la presa della camera e la geometria sono ricostruite nello stesso istante utilizzando una procedura iterativa di aggiustamento con una quantità di dati molto ridondante. Questo processo lavora attraverso un'identificazione automatica di corrispondenze tra diverse immagini senza il bisogno di specificare a priori la rete di *marker*. Le caratteristiche comuni tra le immagini sono identificate in ogni fotogramma e quindi rifinite utilizzando il metodo dei minimi quadrati, a questo punto è possibile una stima iniziale della posizione della camera e delle coordinate oggetto. È importante sottolineare come questo procedimento sia applicabile in maniera più efficace ad un

set di immagini con un alto grado di sovrapposizione che catturino l'intera struttura 3D da diverse angolazioni.¹³

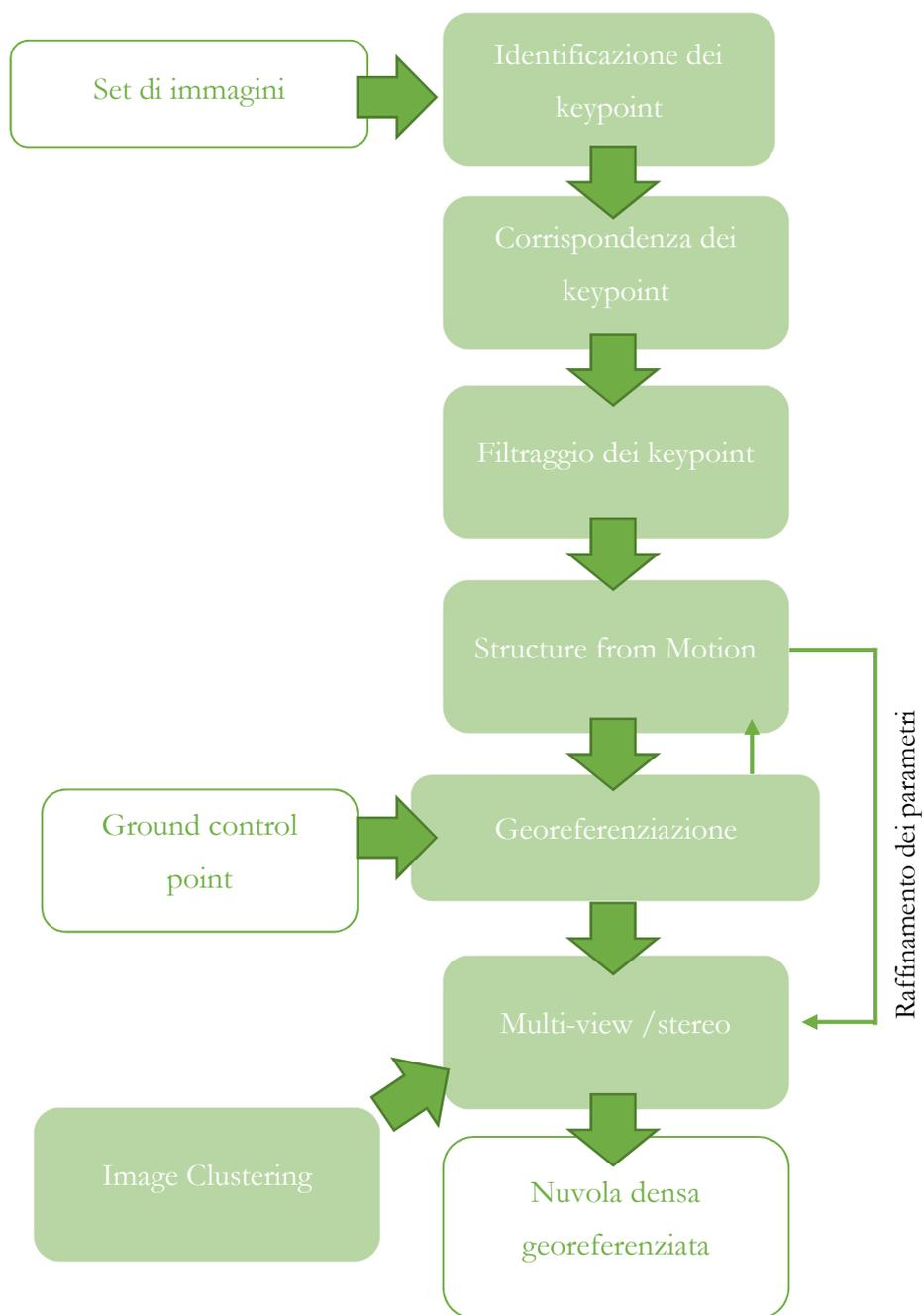


Figura 32 Schema per la creazione di una nuvola densa

¹³ Chiabrando F., Donadio E., Rinaudo F., *SfM for orthophoto generation: a winning approach for cultural heritage knowledge*, 25th International CIPA Symposium 2015, Taipei, Taiwan, (31 August – 04 September 2015).

Si riporta di seguito uno schema semplificato del processo di acquisizione (Figura 33):

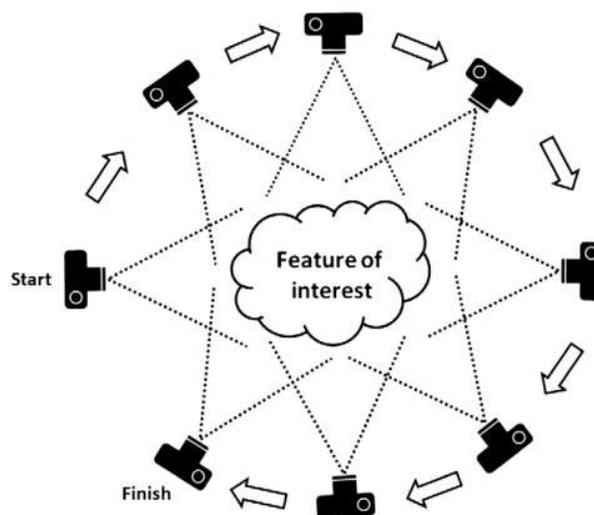


Figura 33 Processo Structure from Motion

3.3.2.2.2. Identificazione dei *keypoint*: Scale Invariant Feature Transform (SIFT)

Il problema chiave della *SfM* è la determinazione della collocazione 3D delle caratteristiche comuni nei diversi fotogrammi, catturati da differenti angolazioni. Il primo passo del processamento per risolvere questo problema è l'identificazione delle caratteristiche in ogni singola immagine che possano essere utilizzate come corrispondenza con le altre immagini. Una soluzione a questo è lo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), un sistema di riconoscimento di dettaglio.

Questo algoritmo identifica le caratteristiche in ogni immagine che sono invarianti rispetto al ridimensionamento e alla rotazione dell'immagine e parzialmente invarianti rispetto ai cambiamenti nelle condizioni di illuminazione e nel punto di vista 3D della camera.

I punti di interesse, o "*keypoint*", vengono automaticamente identificati in tutte le scale e posizioni in ciascuna immagine, seguiti dalla creazione di un descrittore di funzione, calcolato trasformando i gradienti di immagine locali in una rappresentazione che è insensibile alle variazioni di illuminazione e orientamento. Questi descrittori sono

abbastanza unici da consentire la corrispondenza delle caratteristiche in *dataset* di grandi dimensioni.

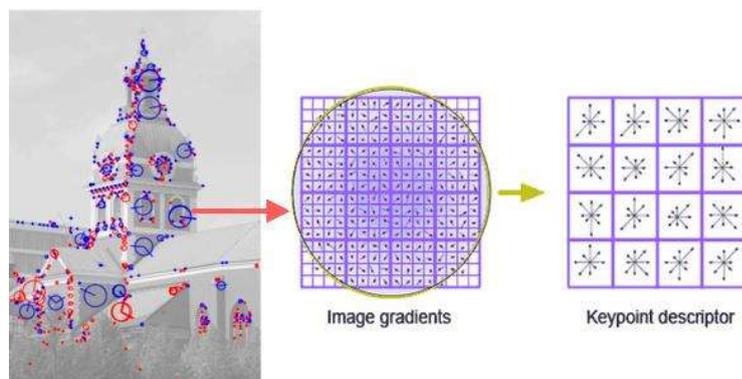


Figura 34 Rappresentazione di un punto SIFT descritto utilizzando un istogramma di magnitudo e direzione del gradiente attorno al punto di interesse.¹⁴

Il numero di *keypoint* in un'immagine è dipendente principalmente dalla texture dell'immagine e dalla risoluzione, in modo che più un'immagine è complessa e ad alta risoluzione più saranno presenti *keypoint* (esempio in Figura 35).

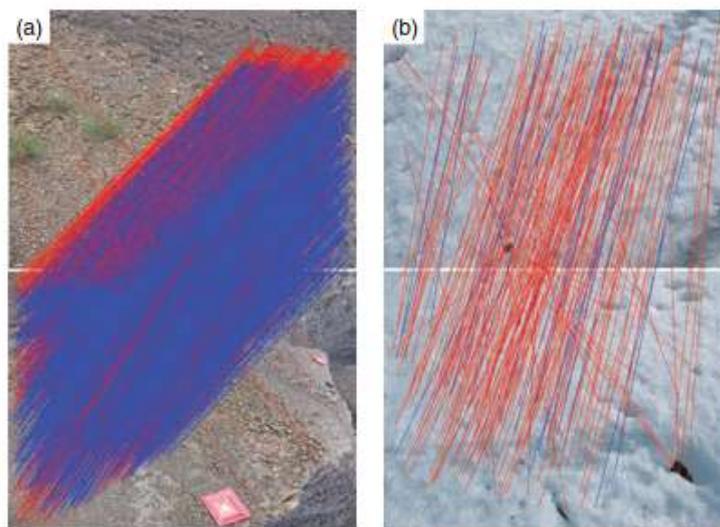


Figura 35 Numero di *keypoint* differente per due immagini: di un suolo ghiaioso (a) e di un suolo innevato (b)¹⁵

¹⁴ <https://www.codeproject.com/Articles/619039/Bag-of-Features-Descriptor-on-SIFT-Features-with-O>

¹⁵ Luhman T., Robson S., Kyle S., Harley I., Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications, Whittles publishing, (2006).

La densità, la nitidezza e la risoluzione del set di immagini, combinate con il range di texture naturali fotografate, determineranno quindi, in primo luogo, la qualità della nuvola di punti in uscita. Allo stesso modo, riducendo la distanza tra la fotocamera e la caratteristica di interesse, aumentando così la risoluzione spaziale della fotografia, si aumenterà la densità spaziale e la risoluzione della nuvola di punti finale. Variazioni nella complessità, nell'illuminazione, nei materiali nelle singole scene influenzano la *texture* dell'immagine, quindi è impossibile offrire una guida esplicita sul numero minimo di fotografie necessarie per una ricostruzione ottimale della scena.

Il requisito minimo è che le caratteristiche corrispondenti siano visibili in almeno tre fotogrammi; tuttavia è altamente raccomandato ottenere il maggior numero possibile di immagini per l'*input SfM* poiché ottimizza il numero massimo di corrispondenze *keypoint* e ridondanza del sistema.

Particolare attenzione dovrebbe essere data anche alla scelta della piattaforma di acquisizione. Ad esempio, i siti di piccole dimensioni con angoli di pendenza ripidi sono probabilmente più adatti ad un approccio esclusivamente da terra, mentre la fotografia aerea a bassa quota (*low altitude aerial photography*, LAAP) può fornire una copertura migliore su siti più grandi e quelli rilievi più attenuati. In effetti, le immagini combinate da più piattaforme possono rivelarsi ottimali, fornendo diversi livelli di dettaglio in diverse aree della scena.

Quando si acquisiscono le fotografie, è necessario prestare particolare attenzione per massimizzare la sovrapposizione adottando brevi *baseline* (cioè, la distanza tra le successive posizioni della fotografia) e ottenendo una copertura il più possibile uniforme della caratteristica o del paesaggio di interesse. Una vasta gamma di sensori di *imaging* può essere utilizzata per la *SfM*, da *video still*, fino a fotocamere digitali compatte di bassa qualità. Il requisito principale sono fotografie ben esposte delle caratteristiche di interesse. In generale, “più grande” non è necessariamente “migliore”. Considerando che la qualità e la risoluzione delle immagini sono migliorate utilizzando camere SLR (*single-lens reflex*) digitali sempre più costosi, le immagini catturate con le risoluzioni più elevate (ad esempio >12 *megapixel*) avranno quasi inevitabilmente bisogno di essere ridimensionate (con la conseguente perdita di dettagli dell'immagine) per evitare lunghi tempi di elaborazione. Se si opera in zone isolate, è necessario

prestare particolare attenzione alla robustezza e alla durata della batteria, compresi i metodi di ricarica e le prestazioni a temperature estreme.

3.3.2.2.3. *Corrispondenza dei keypoint*

Una volta che i *keypoint* sono stati localizzati in ciascuna immagine, è necessario determinare le corrispondenze tra i *keypoint* in immagini diverse. Tuttavia, non vi è alcuna garanzia che un determinato *keypoint* abbia la propria corrispondenza in un'altra immagine. Pertanto, sono richiesti metodi per scartare punti senza *matching*. Lavorando con i dati dei *keypoint* dell'algorithm SIFT, Lowe (2004) ha utilizzato il rapporto tra la distanza euclidea del vicino più vicino e quella del secondo più vicino, specificando un valore minimo di 0,8 (sebbene Snavely et al. (2008) abbassare la soglia a 0,6). Questo criterio di "rapporto di distanza" è stato osservato per eliminare il 90% delle partite false, scartando solo meno del 5% delle corrispondenze corrette.

3.3.2.2.4. *Filtraggio dei keypoint*

Per essere certi che rimangano solo corrispondenze corrette, viene applicato un ulteriore passaggio per filtrare eventuali corrispondenze errate rimanenti. Con più *keypoint* identificati in una coppia di immagini della stessa scena viene calcolata la matrice fondamentale per la coppia di immagini.

La matrice fondamentale, nel caso di orientazione relativo, matematicamente è espressa come:

$$F = (K_1^{-1})^T \cdot s_b \cdot R_2^{-1} \cdot K_2^{-1}$$

Dove:

- K_1 e K_2 sono le matrici di calibrazione delle camere (vedi paragrafo successivo)
- R_2 è la matrice di rotazione della seconda camera (la prima camera è fissata)
- s_b è una matrice simmetrica prodotto del vettore b , baseline tra le due camere e il vettore delle coordinate della seconda camera

Specificando la relazione tra le due immagini, la matrice fondamentale (o matrice F) vincola le posizioni dei *keypoint* correttamente identificati in entrambe le immagini.

Le matrici F sono calcolate con diverse iterazioni usando il minimo della mediana dei quadrati o, più comunemente, il metodo del *Random Sample Consensus* (RANSAC) (Fischler & Bolles 1981). RANSAC è il metodo più popolare perché è veloce, preciso e robusto (Sunglok et al., 2009).

Il metodo RANSAC presuppone che tutti i *keypoint* possano essere divisi in due gruppi: *inlier* e *outlier*. Viene preso un campione casuale iniziale dei *keypoint* da cui viene calcolata la matrice F utilizzando il sottoinsieme più piccolo possibile dei dati. Viene quindi calcolato l'errore di ciascun *keypoint* rispetto alla stima e viene contato il numero di punti *inlier*. Per definire gli *inlier*, deve essere specificata una soglia. Snavely et al. (2008) imposta questa soglia sullo 0,6% della dimensione massima dell'immagine, in genere sei *pixel* per un'immagine 1024×768 . Il processo di campionamento viene ripetuto su diversi sottogruppi iterativamente per un numero sufficiente di volte per garantire che vi sia una probabilità del 95% che uno dei sottoinsiemi contenga solo "*inlier*". RANSAC restituisce quindi la matrice F con il maggior numero di *inlier*. Il modello finale viene quindi calcolato utilizzando solo il set *inlier*. La robustezza del metodo RANSAC rispetto ai metodi dei minimi quadrati è dimostrata con un semplice esempio in Figura

36 Paragone RANSAC e minimi quadrati

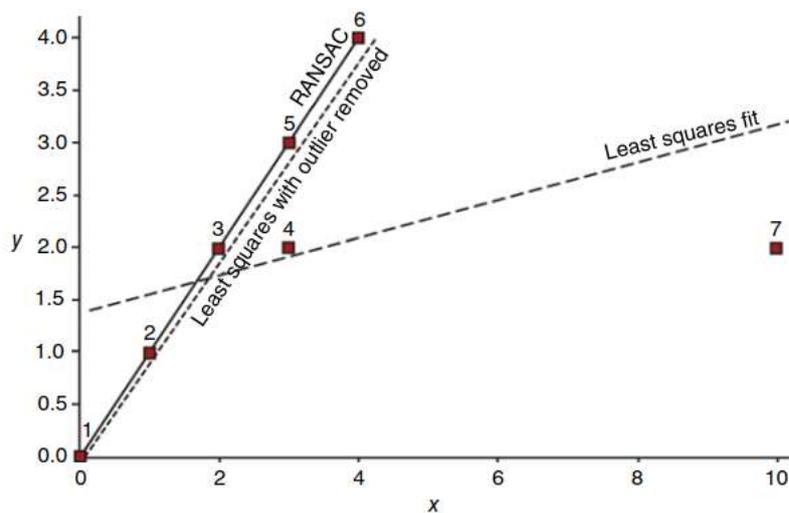


Figura 36 Paragone RANSAC e minimi quadrati¹⁶

¹⁶ Carrivick J. L., Smith M. W., Quincey D. J., Structure from motion in geoscience, Wiley Blackwell, (2016).

Un altro metodo per eliminare punti inconsistenti consiste nella creazione di cosiddette “*track*”: le tracce che comprendono un minimo di due *keypoint* e tre immagini vengono utilizzate per la ricostruzione della nuvola di punti, quelle invece che non soddisfano questi criteri vengono automaticamente scartate (Snavely et al., 2006). Utilizzando questo metodo, le caratteristiche temporanee, come le persone che si spostano attraverso l'area di interesse, vengono automaticamente rimosse dal set di dati prima che inizi la ricostruzione 3D. Questo vale anche per gli oggetti non statici catturati involontariamente nel set di *input*, ad esempio oggetti sul sensore, sul dirigibile o sulle pinze per aquiloni o sui pattini per l'atterraggio di elicotteri. In questi casi, sebbene vengano creati identici *keypoint* che fanno riferimento a tali oggetti, non sono adatti per la ricostruzione di scene in quanto la loro posizione rispetto ad altri *keypoint* è in costante cambiamento e vengono automaticamente filtrate utilizzando i vincoli di visibilità e regolarizzazione (Furukawa e Ponce, 2007).

3.3.2.2.5. Ricostruzione della scena 3D

Utilizzando le corrispondenze di feature geometricamente corrette identificate nella sezione precedente, SfM si propone di ricostruire simultaneamente:

- struttura delle scene 3D
- posizioni e orientamenti della camera (cioè stima della posa o calibrazione estrinseca)
- parametri di calibrazione della camera.

Questo avviene grazie al processo di Bundle Adjustment il cui data flow è riportato di seguito (Figura 37 Diagramma flusso di dati per il processo di bundle adjustment):

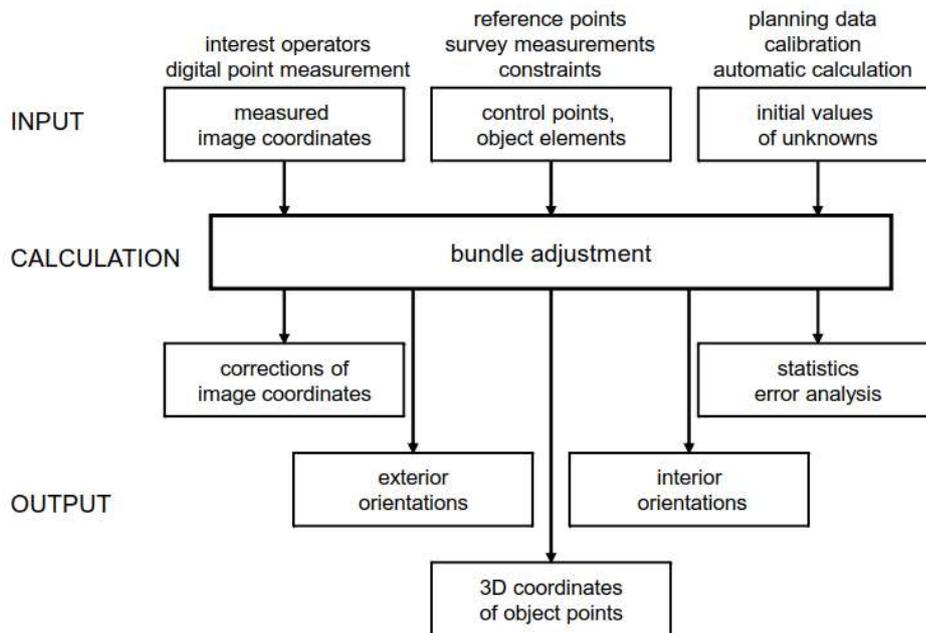


Figura 37 Diagramma flusso di dati per il processo di bundle adjustment¹⁷

Il modello matematico del *Bundle Adjustment* si basa sulle equazioni di collinearità equivalenti alle equazioni valide per la fotogrammetria tradizionale espone nel paragrafo 3.3.2.1.

$$x' = x'_0 + z' \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x'$$

$$y' = y'_0 + z' \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y'$$

Viene utilizzata la triangolazione per stimare le posizioni del punto 3D e ricostruire in modo incrementale la geometria della scena, fissata in un sistema di coordinate relativo.

I parametri esterni della camera (*exterior orientation* in figura) rappresentano la trasformazione del corpo rigido tra le coordinate della scena 3D e il sistema di coordinate della camera.

Per quel che riguarda invece l'orientamento interno, esistono molti modelli di camere per descrivere i parametri di calibrazione. Il modello più comune è una proiezione

¹⁷ Luhman T., Robson S., Kyle S., Harley I., Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications, Whittles publishing, (2006).

prospettica descritta da un modello di camera stenopeica. I parametri della camera sono definiti da una matrice triangolare superiore 3×3 nota come matrice di calibrazione della camera K :

$$K = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dove a_u e a_v ridimensionano l'immagine nelle direzioni x e y , rispettivamente, e s rappresenta l'inclinazione. Sotto l'ipotesi di pixel quadrati $s = 0$ e $a_u = a_v = a$ dove a è considerata la lunghezza focale dell'obiettivo in unità della dimensione pixel. Il punto principale (u_0, v_0) è definito come la posizione sul piano dell'immagine che interseca l'asse ottico.

L'automazione completa di questo processo, dall'estrazione dei *keypoint*, alla ricostruzione accurata della geometria della scena è un chiaro vantaggio del metodo *SfM* rispetto ai tradizionali approcci fotogrammetrici digitali. Il pacchetto di *Bundle Adjustment* utilizzato in Bundler (Lourakis e Argyros, 2009) produce nuvole di punti sparse.

3.3.2.2.6. *Post-processing e generazione del modello digitale di elevazione del terreno*

La trasformazione da un sistema relativo a un sistema di coordinate assoluto viene ottenuta attraverso l'identificazione manuale dei GCPs (*ground control points*) nella nuvola di punti e il calcolo di una trasformazione appropriata. Per fare questo viene utilizzata una trasformazione del corpo rigida decomposta in una rotazione e una matrice di traslazione, e un fattore di scala.

I *target* sono posizionati per fornire la massima visibilità (e quindi la loro comparsa evidente nelle fotografie), e contrastano il più fortemente possibile con l'ambiente circostante per facilitare il loro posizionamento nella nuvola di punti finale prima che i dati vengano trasformati (Figura 38).



Figura 38 Esempio di target ad alta visibilità

Con questa informazione esterna inclusa nel modello, il *bundle adjustment* può essere rieseguito per ottimizzare l'allineamento dell'immagine alla luce di queste nuove informazioni. Utilizzando le coordinate di riferimento note fornite nella fase di ridimensionamento e georeferenziazione, alcuni pacchetti software (ad esempio Photoscan) offrono agli utenti la possibilità di eseguire un'ottimizzazione aggiuntiva dell'allineamento dell'immagine, in base al quale i parametri interni stimati della camera e i punti 3D vengono regolati per ridurre al minimo la somma del errore di re-proiezione e errore di georeferenziazione.

4. Acquisizione dati

In questo capitolo verranno descritte le operazioni che sono state svolte nella pratica durante l'attività di rilevamento.

4.1. Rete di inquadramento con ricevitori GNSS

I primi parametri di ingresso per il progetto di una rete GNSS sono le dimensioni della zona da rilevare e la precisione dei parametri incogniti richiesta; i principali obiettivi che si vogliono raggiungere nella fase di progetto della rete GNSS sono la minimizzazione dei tempi e dei costi del rilievo, l'ottenimento di una precisione dei parametri incogniti uniforme compatibile con gli scopi del rilievo stesso e una buona affidabilità dei risultati. L'ubicazione delle stazioni avviene successivamente ad un attento sopralluogo che deve accertare la compatibilità della scelta con una serie di requisiti specifici delle stazioni GNSS. In particolare si deve avere: la mancanza di ostacoli al di sopra di 10° di elevazione per tutto il giro di orizzonte per evitare ostruzione dei segnali provenienti da alcuni satelliti; la facile accessibilità del punto per ridurre i tempi di messa in stazione; l'assenza di strutture riflettenti per un raggio di 10-15 m dall'antenna per evitare errori di *multipath*; l'assenza di fonti di disturbo nella ricezione del segnale.

Le finestre di osservazione scelte saranno quei periodi del giorno in cui siano visibili da tutte le stazioni il massimo numero di satelliti con la miglior configurazione possibile. La lunghezza del periodo di acquisizione dati per ogni sessione, infatti, dipende principalmente dalle dimensioni delle basi considerate, dalla precisione richiesta, dal numero e dalla configurazione geometrica dei satelliti in vista al momento del rilievo. In generale tale periodo diminuisce al diminuire della lunghezza delle basi, al diminuire della precisione richiesta e all'aumentare del numero di satelliti in vista. Inoltre, per il trattamento dei dati in modalità statica, gli intervalli di campionamento

(intervallo di memorizzazione delle osservazioni di fase nel ricevitore) comunemente adottati sono: 15 secondi, 30 secondi, un minuto.¹⁸

Per progettare accuratamente un'acquisizione GNSS è possibile utilizzare un software online di Trimble dal quale si possono ricavare diverse informazioni sui satelliti presenti nel cielo in un dato luogo e in una certa data. Impostando la localizzazione a Baratti e la data al 28 settembre 2017, giorno in cui si è effettuata l'acquisizione, si ottengono le seguenti informazioni.

Il numero di satelliti visibili raggiunge un massimo di 27 durante la finestra oraria intorno alle 12:00 che, come si può vedere dalle monografie in allegato, coincide con la finestra di acquisizione.

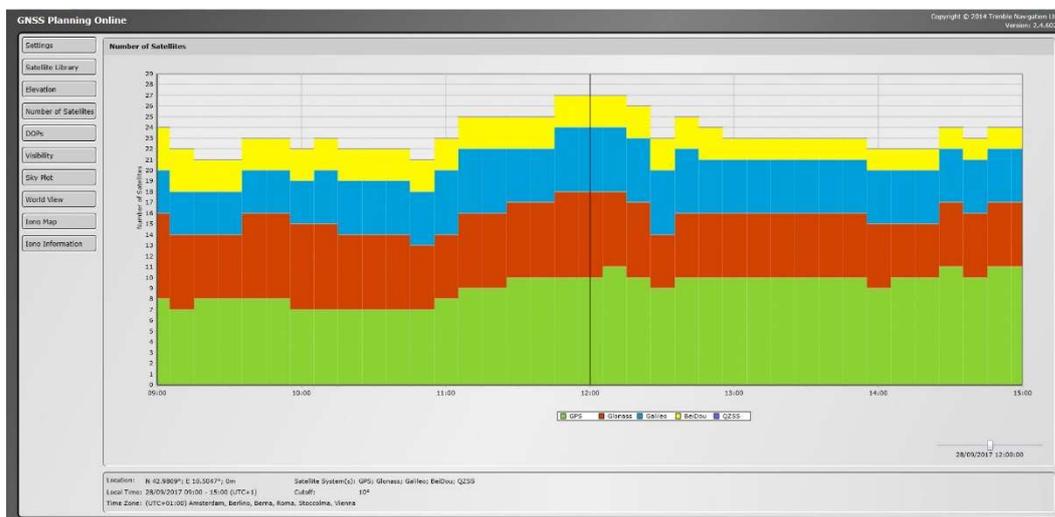


Figura 39 Numero di satelliti

Dalla mappa del cielo in Figura 40 si può vedere la posizione dei satelliti e la loro elevazione.

In Figura 41 sono invece riportati i DOP (*dilution of precision*), cioè quegli errori che dipendono dalla configurazione dei satelliti nel cielo in un certo istante. L'entità della degradazione è espressa tramite un fattore adimensionale, il DOP appunto, che indica il decremento atteso nella precisione del posizionamento geometrico. Tale fattore tende infatti ad amplificare l'errore di pseudorange.

¹⁸ Manzino A., Dispense di Topografia, Politecnico di Torino, pp. 308-309.

Sostanzialmente, più ampio è l'intervallo di acquisizione meno la configurazione geometrica dei satelliti andrà ad influire sulla precisione della misura. Inoltre, più satelliti sono presenti, più bassi saranno i DOP e più precise saranno le misure. Nel nostro caso si può notare come gli errori fossero più bassi grazie anche al fatto che in cielo fosse presente un gran numero di satelliti.

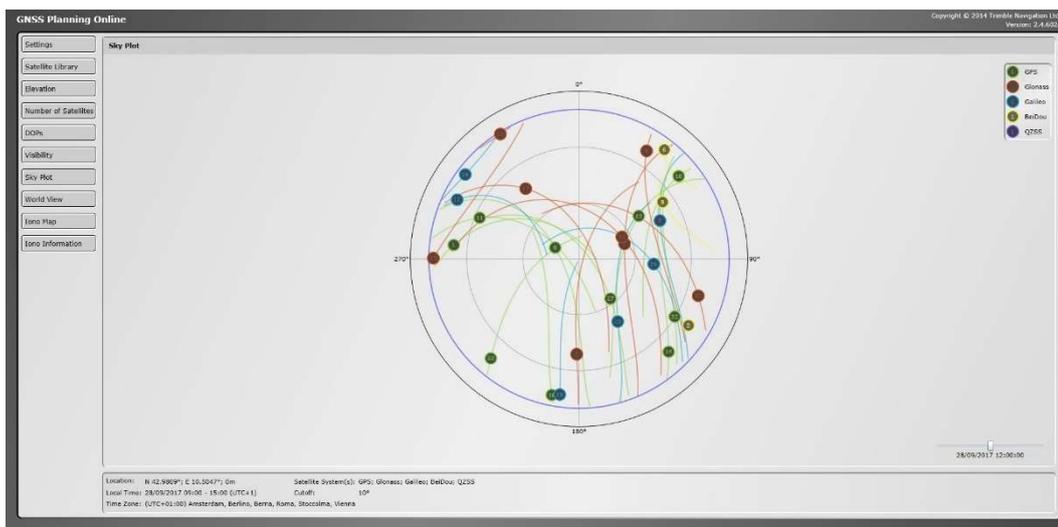


Figura 40 Mappa del cielo

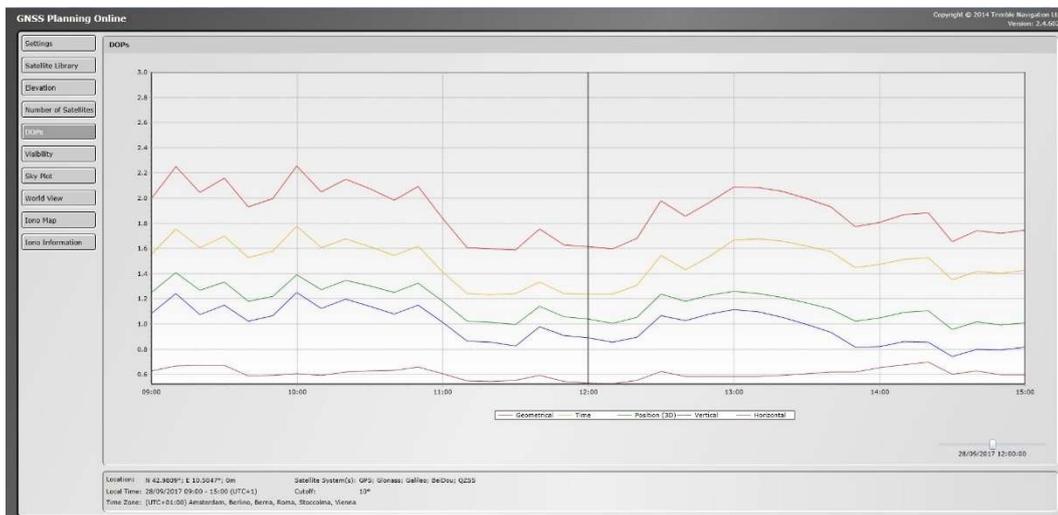


Figura 41 DOP

Nel contesto della campagna in esame si è utilizzata la tecnica di acquisizione di posizionamento relativo con elaborazione a posteriori, sui dati di fase, con metodo alle differenze doppie in modalità statica. L'antenna è stata messa in stazione su due punti diversi della rete e l'acquisizione è durata 1 ora e 35 minuti con antenne Geomax

Zenith35 e con un campionamento di 15 secondi. L'intervallo di misura ampio ha permesso di raggiungere una precisione millimetrica, questo poiché il ricevitore ha avuto la possibilità di vedere un maggior numero di satelliti e di conseguenza di effettuare un maggior numero di misure.

4.2. Rete di raffittimento

La rete topografica che è stata costruita nella cava è formata da quattro vertici (3000, 4000, 5000, 6000), rispetto ai quale sono stati misurati tutti i *marker* (punti di dettaglio) andando così a creare una rete di raffittimento. Si riporta in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** una rappresentazione della rete.

La rete di raffittimento è formata da *marker* posizionati su pareti verticali per il rilievo di dettaglio con laser scanner e fotogrammetria terrestre e da marker per il rilievo fotogrammetrico aereo (GCP, *ground control point*).

Per la misurazione dei GCP, nell'ambito specifico di questo caso studio, è stata utilizzata una stazione totale, mentre in altri casi dove l'utilizzo della stazione totale risulta impossibile si utilizza un ricevitore GNSS in modalità RTK: nel paragrafo 3.2.1 si svilupperà una breve spiegazione di questo metodo per completezza della descrizione di ciò che stato svolto sul campo.

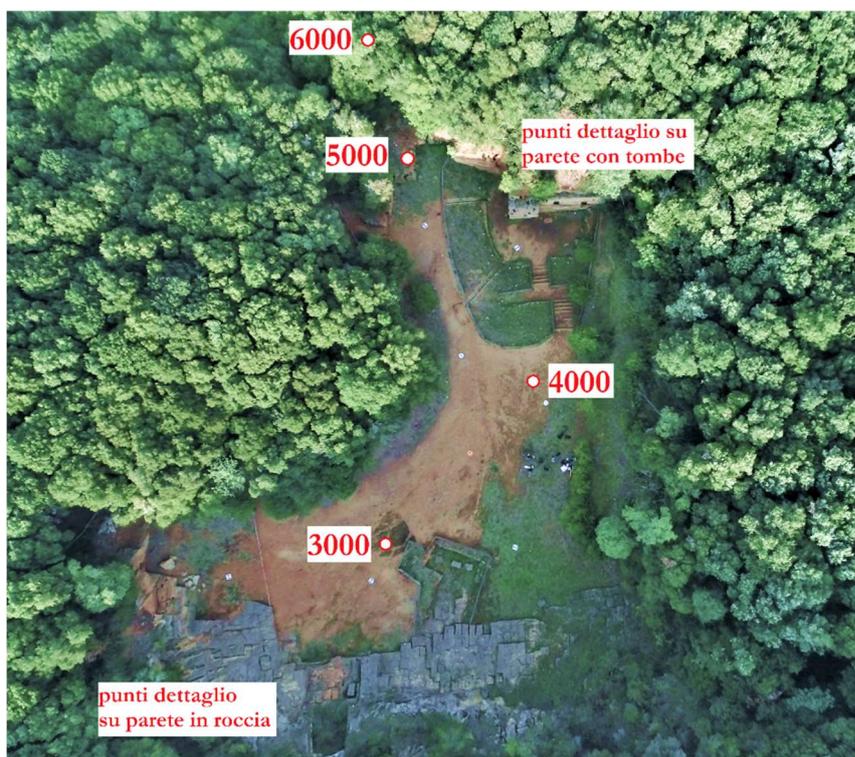


Figura 42 Schema posizionamento di punti di inquadramento e di dettaglio

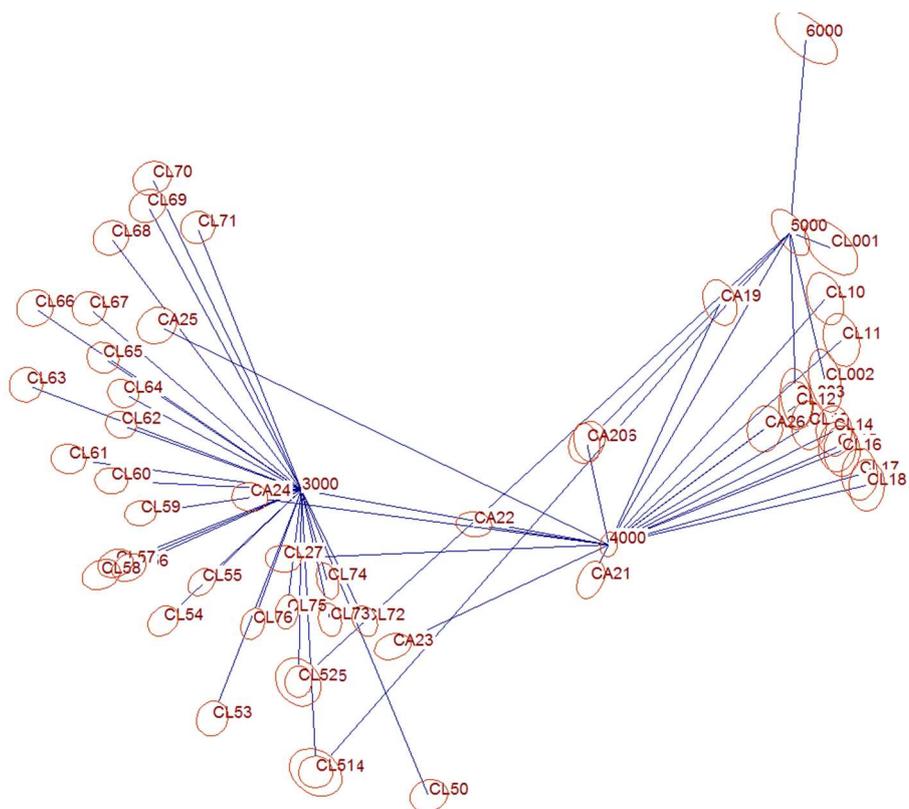


Figura 43 Rappresentazione della rete topografica creata, con vertici e punti di dettaglio

Il rilievo topografico si effettua mettendo in stazione lo strumento di misura, in questo caso la MultiStation Leica Nova MS50 (Figura 44), rendendo verticale l'asse principale e facendo sì che l'asse primario passi per il punto materializzato a terra. Per ottenere che la verticalità dell'asse primario cada sul punto materializzato a terra, si cerca di traslare adeguatamente il treppiede (strumento sul quale è posizionata a stazione), prima ad occhio e poi con l'aiuto di un piombino a gravità innestabile entro la vite di fermo. Per il perfezionamento si può contare, limitatamente a quanto detto sopra, sia sulla variazione della lunghezza delle gambe, sia sull'escursione della vite all'interno del foro sito sulla testa del treppiede. Un miglior centramento sul punto a terra è ottenibile attraverso l'uso del piombino ottico, da utilizzare solo quando il piano di rotazione dell'asse principale del teodolite è reso orizzontale con discreta precisione.

Una volta fatto ciò si può effettuare la misura degli altri vertici mediante un prisma, (il modello di prisma usato è il Prisma 360° Leica), installato su una palina di altezza nota e resa verticale grazie ad una livella sferica. Successivamente mettendo in stazione su un altro vertice da cui sono visibili la maggior parte dei *marker* posizionati sulla parte rocciosa della cava, si sono misurati tali *marker*, che nella rete sono definiti come punti di dettaglio.



Figura 44 Leica MultiStation

4.3. Rilievo di dettaglio

4.3.1. Rilievo con Laser scanner

Lo strumento utilizzato durante la campagna è stato il laser scanner Faro Focus3D S 120 (Figura 46 Laser Scanner Faro Focus 3D S 120, un TLS distanziometrico con funzionamento a misura di fase. Il range di Faro Focus3D S120 è di 120 m con un errore di distanza lineare di ± 2 mm e una risoluzione angolare di 0.009° sia in verticale che in orizzontale. Operativamente le scansioni sono state effettuate posizionando lo strumento in modo che l'insieme delle scansioni ricoprisse totalmente la parete rocciosa della cava, per fare ciò si è preferito prendere nota dei punti di scansione su di un eidotipo (Figura 45).

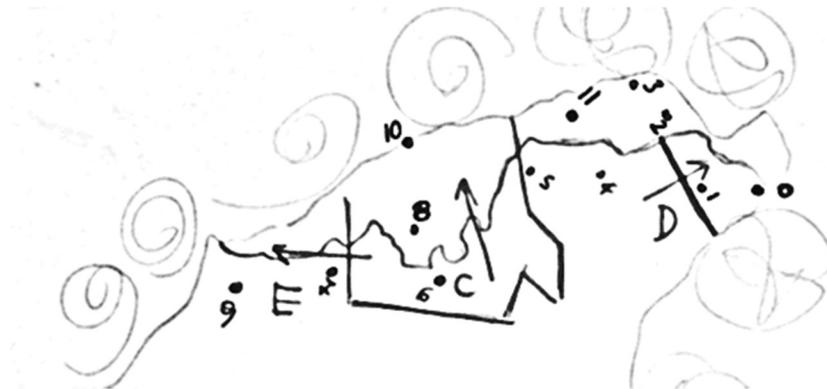


Figura 45 Eidotipo scansioni laser

L'eidotipo creato è stato poi utilizzato anche in post-processing per poter registrare con miglior precisione le scansioni. Ogni punto di stazionamento è stato inoltre scelto in modo che tra scansioni consecutive ci fosse un ricoprimento di almeno il 30% così da poter ritrovare punti comuni nelle diverse scansioni per poterle registrare con successo. È infatti necessario che in ogni scansione siano visibili almeno tre *marker* per poter rototraslare le scansioni.

Si è inoltre impostata la densità dei punti di acquisizione a 1/5 4x ottenendo nuvola in media da 24'000'000. L'impostazione 1/5 4x significa che lo scanner ogni 5 punti che colpisce ne memorizza uno e che ogni punto viene misurato 4 volte.



Figura 46 Laser Scanner Faro Focus 3D S 120

Tabella 1 Riassunto dati laser scanner acquisiti

Scansioni Laser

- Strumento utilizzato: Faro Focus3D S120
- Errore di distanza lineare di ± 2 mm
- Risoluzione angolare di 0.009°
- 12 scansioni a 1/5 4x (24 Milioni di punti l'una in media)



4.3.2. Rilievo fotogrammetrico

Il rilievo fotogrammetrico si è svolto utilizzando sia una fotocamera Canon EOS 5DsR (Figura 47) che un drone DJI Mavic Pro (Figura 48).



Figura 47 Canon EOS 5DsR



Figura 48 DJI Mavic Pro

Gli UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), o più comunemente chiamati droni, sono dei veicoli aerei senza pilota dotati di fotocamera e vengono utilizzati nella geomatica per acquisire fotogrammi. Esistono due differenti tipologie di UAV: ad ala fissa e ad elica. La caratteristica principale di questi strumenti è la possibilità che hanno di essere comandati da remoto e di seguire una rotta prestabilita mediante l'autopilota. L'integrazione a bordo tra GNSS e un sistema di navigazione inerziale permette infatti il controllo in tempo reale del drone.

Poiché la porzione da acquisire mediante volo di drone era di dimensioni piuttosto limitate si è preferito pilotare il drone in modalità manuale, dopo aver impostato l'intervallo tra due scatti fotografici consecutivi. Questa modalità ha permesso di avere un notevole ricoprimento tra una strisciata e l'altra, garantendo una quantità di dati più che sufficiente. I voli sono stati due: uno nadirale e uno a 45° entrambi ad una altezza di circa 10 m.

Le dimensioni dei fotogrammi ottenuti con il drone Mavic Pro sono di 12,35 *megapixel* (4000x3000), tutte stabilizzate grazie al sistema *Gimbal* integrato sui tre assi di movimento della camera.

Per completezza, si riporta di seguito una tabella riassuntiva (Tabella 2) di alcuni dei droni più conosciuti sul mercato con le loro caratteristiche principali.

Tabella 2 Caratteristiche droni¹⁹

<p>DJI Inspire 2</p>	
<p>Range di controllo</p>	<p>7 km</p>
<p>Tempo di volo con Payload massimo</p>	<p>27 minuti</p>
<p>Velocità massima</p>	<p>108 km/h</p>
<p>Camera integrata</p>	<p>Fpv 2 assi</p>
<p>Camere compatibili</p>	<p>Zenmuse X5S (20.8 Mp, 5,2K 30 FPS – 4K 60 FPS), X4S (20 Mp, 4K 60 FPS)</p>
<p>Stabilizzatore</p>	<p>Gimbal 3 assi</p>
<p>Peso massimo al decollo</p>	<p>4 kg</p>

¹⁹ Angeli S., Battino A., Lingua A., Maschio P., Report attività 3, Ricerca di soluzioni per video ispezione e monitoraggio. Scenari operativi e soluzioni commerciali, Politecnico di Torino, (2017).

DJI Phantom 4 Pro



Range di controllo	7 km
Tempo di volo	30 minuti
Velocità massima	72 km/h
Camera integrata	20 Mp con lente FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm format equivalent) f/2.8-f/11 auto focus a 1 m-∞
Stabilizzatore	Gimbal 3 assi
Peso massimo al decollo	1.388 kg

DJI Spark



Range di controllo	5 km
Tempo di volo	16 minuti
Velocità massima	50 km/h
Camera integrata	12 Mp con lente FOV 81.9° 25 mm (35 mm format equivalent) f/2.6 (shooting range: 2 m to ∞)
Stabilizzatore	Gimbal 2 assi
Peso massimo al decollo	0.3 kg

DJI Mavic Pro	
Range di controllo	7 km
Tempo di volo	27 minuti
Velocità massima	65 km/h
Camera integrata	12.35 Mp con lente FOV 78.8° 28 mm (35 mm format equivalent) f/2.2 (shooting range: 0.5 m to ∞)
Stabilizzatore	Gimbal 3 assi
Peso massimo al decollo	0.74 kg

Sensefly eBee	
Range di controllo	8 km
Tempo di volo	50 minuti
Velocità massima	90 km/h
Camera integrata	WX (18.2 MP)
Camera opzionale	G9X, S110 NIR/RE, Sequoia, thermoMAP
Peso massimo al decollo	0.69 kg

Per il rilievo da terra, invece, utilizzando la camera Canon EOS 5DsR, si è proceduto effettuando tre strisciate a tre diverse altezze, lungo la parete, orientando in due modi

diversi il piano del fotogramma: tre strisciate sono state scattate tenendo la direzione dell'obiettivo della camera perpendicolare rispetto alla parete, mentre tre strisciate tendono un'inclinazione di 45° sull'orizzontale rispetto al piano della parete. Anche in questo caso, si è ottenuto un buon ricoprimento della superficie in esame. I fotogrammi acquisiti hanno una dimensione 53 *megapixel*.

Tabella 3 Riassunto dati fotogrammetrici acquisiti

Fotogrammetria terrestre	Fotogrammetria aerea
<ul style="list-style-type: none">• Strumento utilizzato: Canon EOS 5DsR• 107 fotogrammi acquisiti con 6 strisciate ad altezze ed inclinazioni diverse• 53 Megapixel per immagine	<ul style="list-style-type: none">• Strumento utilizzato: DJI Mavic Pro• 301 fotogrammi acquisiti con 2 voli, uno nadirale e uno a 45°, a 10 m di altezza• 12,35 Megapixel per immagine
	

5. Elaborazione dei dati

5.1. Le reti GNSS

5.1.1. Il software Leica GeoOffice

Per processare i dati grezzi raccolti mediante i ricevitori GNSS durante il rilievo statico descritto nel paragrafo 4, si è utilizzato il *software* Leica GeoOffice (LGO). Le principali operazioni da effettuare sono l'elaborazione delle *baseline* nelle reti di controllo geodetico e la compensazione della rete.

Durante il rilievo le antenne hanno registrato i segnali ricevuti dai satelliti che sono stati ricevuti durante la finestra temporale in cui sono state attive. Grazie al fatto che, come esposto nel paragrafo dedicato al rilievo GNSS, certi *biase* sono spazialmente correlati è fondamentale che esistano, nelle vicinanze del sito in cui si sono svolte le misure, delle stazioni permanenti appartenenti alla rete dinamica nazionale. Tali stazioni sono fisse e acquisiscono dati in continuo. Grazie a queste stazioni si hanno delle registrazioni degli stessi satelliti nella stessa finestra temporale e caricando tutti i dati su LGO si possono eliminare gli errori spazialmente correlati.

Praticamente, come prima operazione è necessario scaricare i dati dalle antenne e, dal sito di ItalPoS (Figura 49), scaricare i dati di almeno tre stazioni permanenti distanti al massimo 80-100 km dalla località Le Grotte di Baratti. In questo caso sono stati scaricati i dati della stazione di Portoferraio, Gavorrano, Cecina, Grosseto e Siena.

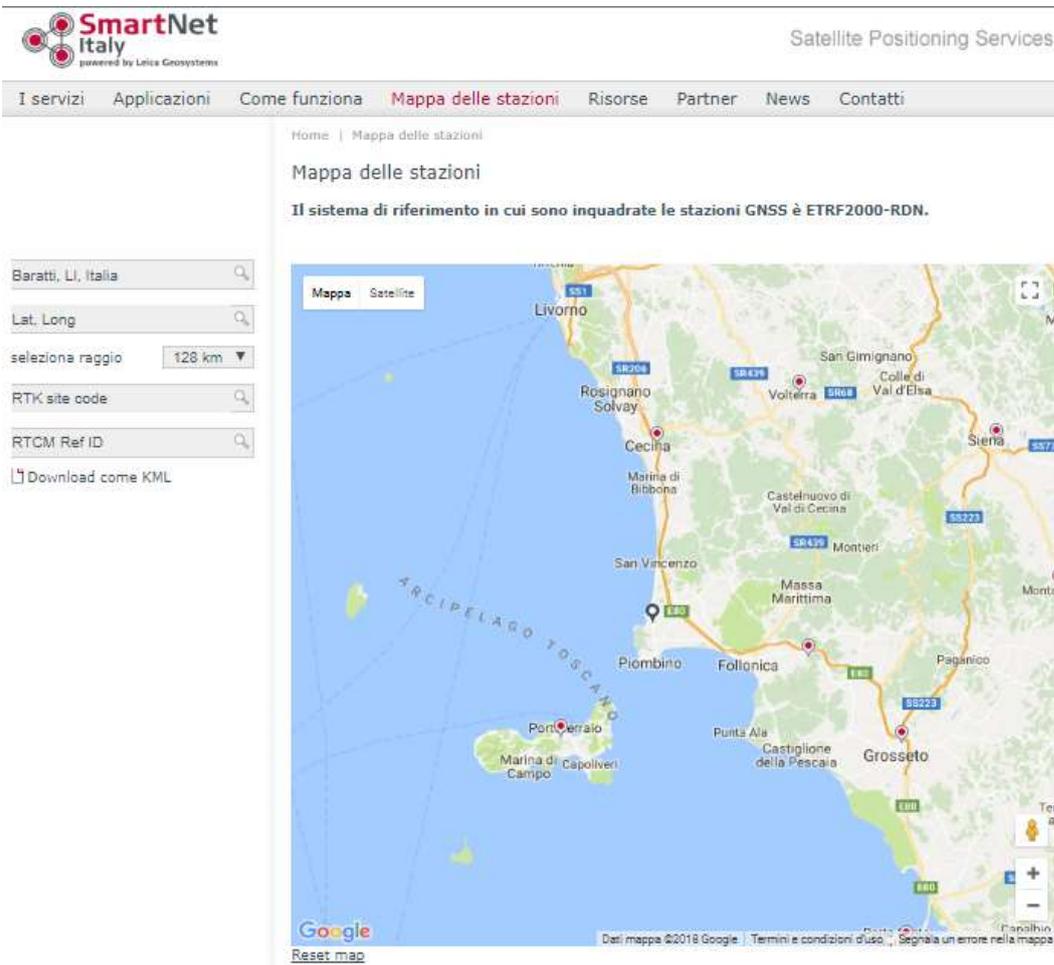


Figura 49 Schermata di ItalPoS

Dal programma di LGO, dopo aver caricato i dati, si selezionano le stazioni permanenti come “*master*” e i due punti di rilievo statico come “*rover*”. Il programma successivamente calcola le correzioni e le *baseline* e restituisce dunque le coordinate corrette dei punti materializzati in un sistema di riferimento ellissoidico. Di seguito si riportano due screenshot dal software che rappresentano rispettivamente le baseline create tra i punti di appoggio e le stazioni permanenti (Figura 50) e le baseline create tra i punti di appoggio, compensate anch’esse dal software (Figura 51).

Sarà quindi necessario convertire le quote ellissoidiche in quote geodetiche, per fare ciò è stato utilizzato il software CartLab.

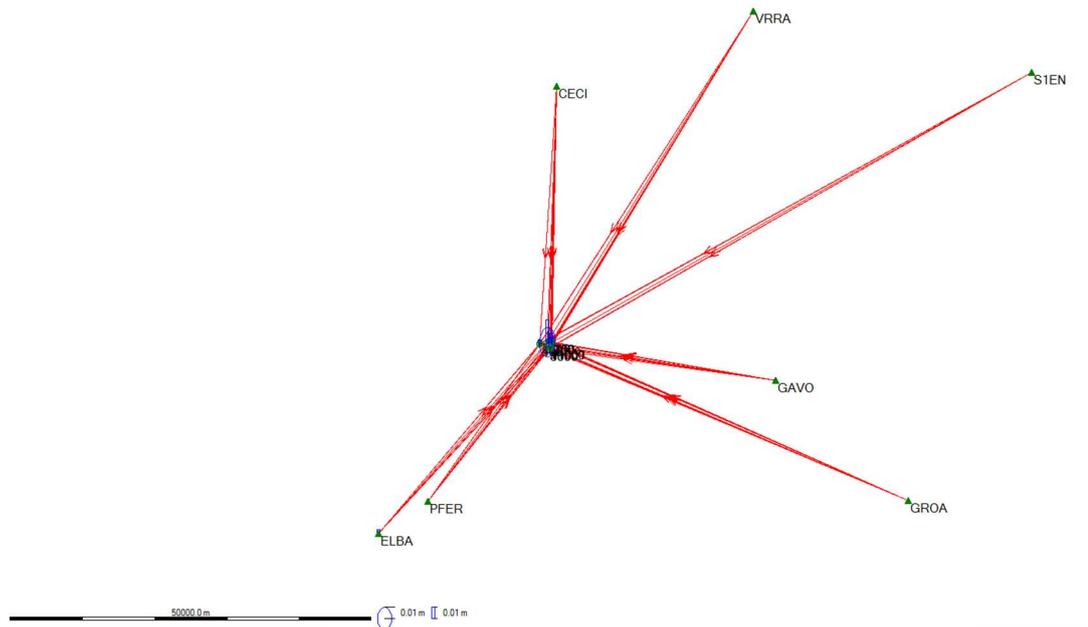


Figura 50 Compensazione delle Baseline

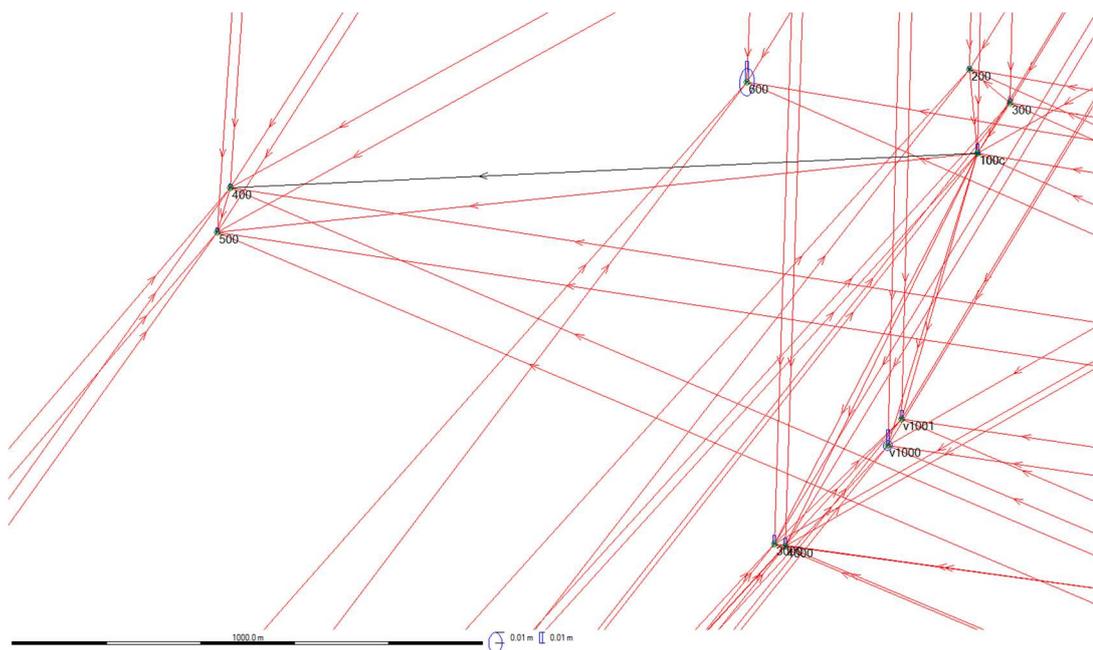


Figura 51 Baseline tra punti di appoggio

Di seguito si riporta una carta dove sono evidenziati i punti di inquadramento della rete.

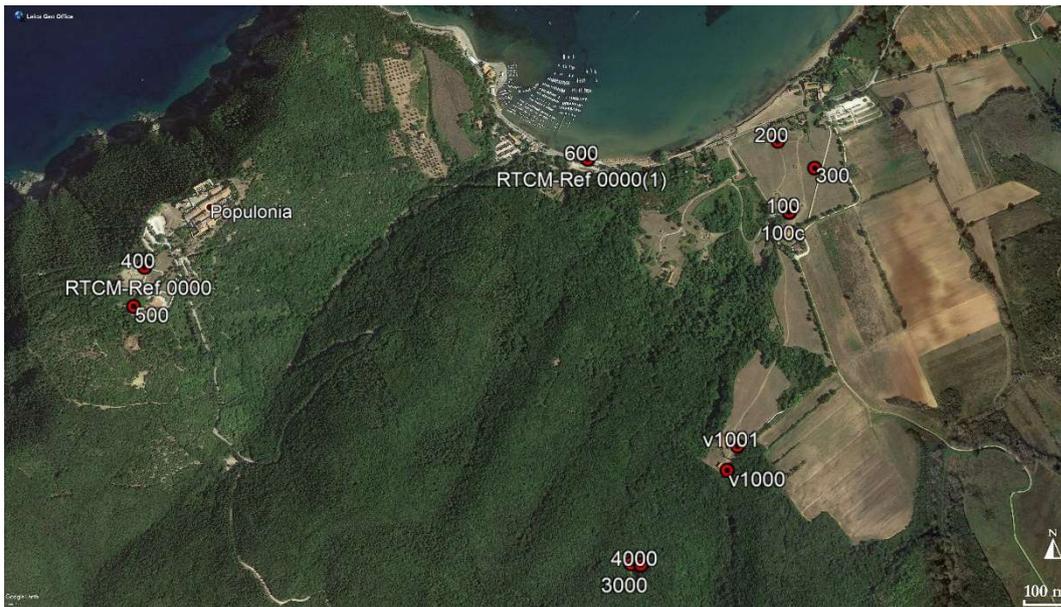


Figura 52 Rete di inquadramento

Di seguito riporto una tabella riassuntiva con le coordinate dei punti calcolati e le ellissi d'errore (*dilution of precision*) risultate da LGO.

Tabella 4 Coordinate ed ellissi d'errore

	coordinate		Dilution of precision
3000	Est	622613.5813 m	0.0025 m
	Nord	4759835.8272 m	0.0029 m
	Quota	147.0511 m	0.0077 m
4000	Est	6222637.2154 m	0.0024 m
	Nord	4759831.6514 m	0.0030 m
	Quota	145.8909 m	0.0076 m

In allegato, inoltre, riporto i report scaricabili dal software.

5.2. Il calcolo della rete topografica

5.2.1. Il software StarNet

Il *software* utilizzato per il calcolo della rete topografica misurata è stato StarNet, il quale effettua la compensazione utilizzando il metodo dei minimi quadrati²⁰.

La caratteristica principale di StarNet è la capacità di pesare tutti i dati di *input*: questo significa che, a misure note con accuratezza maggiore, darà un peso maggiore al momento della compensazione rispetto alle misure meno accurate.

Come già descritto in precedenza nel sito delle Grotte sono stati creati quattro vertici: 3000, 4000, 5000, 6000. Le coordinate dei vertici 3000 e 4000 sono state calcolate mediante rilievo statico GNSS (vedi paragrafo 4.1) e sono state inserite nel codice del programma come coordinate note. Le coordinate della stazione 3000 sono state impostate come “Fixed”, utilizzando il codice “!!!”, in questo modo le coordinate non riceveranno correzioni. Le coordinate del vertice 4000 invece sono state inserite con errore standard in Est Nord e Quota: 0.002, 0.002 e 0.05 rispettivamente.

Il metodo con cui sono state effettuate le misure dai vari vertici è il seguente: innanzitutto è necessario orientare il vertice da cui si sta effettuando la misura su almeno uno degli altri vertici (su cui è posizionato opportunamente il prisma con altezza nota) e successivamente misurare tutti i punti di dettaglio visibili, cioè i *marker*.

In questo caso i *marker* sono stati messi sulla parete di roccia e sulla parete scavata con le tombe (immagini)

²⁰ “L’approssimazione ai minimi quadrati è una tecnica di ottimizzazione volta a determinare una funzione analitica che approssimi un insieme di dati senza necessariamente passare per i dati stessi (interpolazione), o meglio che si avvicini più possibile ad un’interpolazione di un insieme di dati (tipicamente punti del piano). Infatti, se i dati provengono da misure sperimentali e sono quindi affetti da errore oppure se non sono molto precisi (poche cifre significative) allora è opportuno approssimare ai minimi quadrati anziché interpolare. In particolare la funzione trovata deve essere quella che minimizza la somma dei quadrati delle distanze dai punti.” (Prof. Maurizio Loreti, Elementi di Teoria degli Errori, Corso di Esperimentazioni di Fisica I, Dipartimento di Fisica di Padova)

Nel programma sono state inserite quindi le misure degli angoli azimutali dalla stazione posizionata in 5000 orientata su 6000 e 4000, e tutte le misure di dettaglio visibili da tale stazione. La stessa cosa è stata eseguita per le misure di angoli azimutali svolte da 4000 e da 3000. Allo stesso modo sono state inserite le misure degli angoli zenitali e di distanza.

Si riporta come esempio il codice di StarNet relativo a tutte le misure effettuate dal vertice 5000.

In allegato riporto il listato di StarNet dove sono riportati tutti le ellissi d'errore dei punti della rete con le relative coordinate compensate.

C 3000	622613.581	4759835.827	99.008	!!!	
C 4000	622637.215	4759831.651	97.848	0.002	0.002 0.05
DB 5000					
DN 6000	214.7674				
DN 4000	43.05245				
DN CL001	332.5801				
DN CL002	395.1904				
DN CL003	7.5821				
DN CL004	55.3927				
DN CL005	62.3503				
DN CA006	58.5015				
DE					
V 5000-6000	113.9568	1.535/1.605			
D 5000-6000	15.495	1.535/1.605			
V 5000-4000	103.557	1.535/1.549			
D 5000-4000	27.9144	1.535/1.549			
V 5000-CL001	128.4929	1.535/0			
V 5000-CL002	125.3977	1.535/0			
V 5000-CL003	117.5723	1.535/0			
V 5000-CL004	98.0619	1.535/0			
V 5000-CL005	101.3283	1.535/0			
V 5000-CA006	109.0975	1.535/0			
D 5000-CL001	3.6875	1.535/0			
D 5000-CL002	12.798	1.535/0			
D 5000-CL003	13.3366	1.535/0			
D 5000-CL004	55.4768	1.535/0			
D 5000-CL005	51.3758	1.535/0			
D 5000-CA006	22.7887	1.535/0			

} misure di angoli azimutali da 5000 con orientamento su 6000 e 4000
} misure di angoli zenitali (V) e di distanza (D) da 5000 su 6000 e 4000 con relative altezze strumentali
} misure di dettaglio di angoli zenitali da 5000 con relative altezze strumentali
} misure di dettaglio di distanza da 5000 con relative altezze strumentali

Figura 53 Esempio codice di StarNet

Questi risultati vengono anche schematizzati visivamente nel Network Plot, riportato di seguito e in tabella (per semplicità è riportato il massimo errore misurato sul *marker* peggiore):

Tabella 5 deviazioni standard StarNet

Punto	σ N [m]	σ E [m]	σ Q [m]
3000	0.000000	0.000000	0.000000
4000	0.001345	0.001983	0.003092
5000	0.003007	0.003667	0.004403
6000	0.004874	0.004239	0.005294
CA25	0.003068	0.002917	0.005547

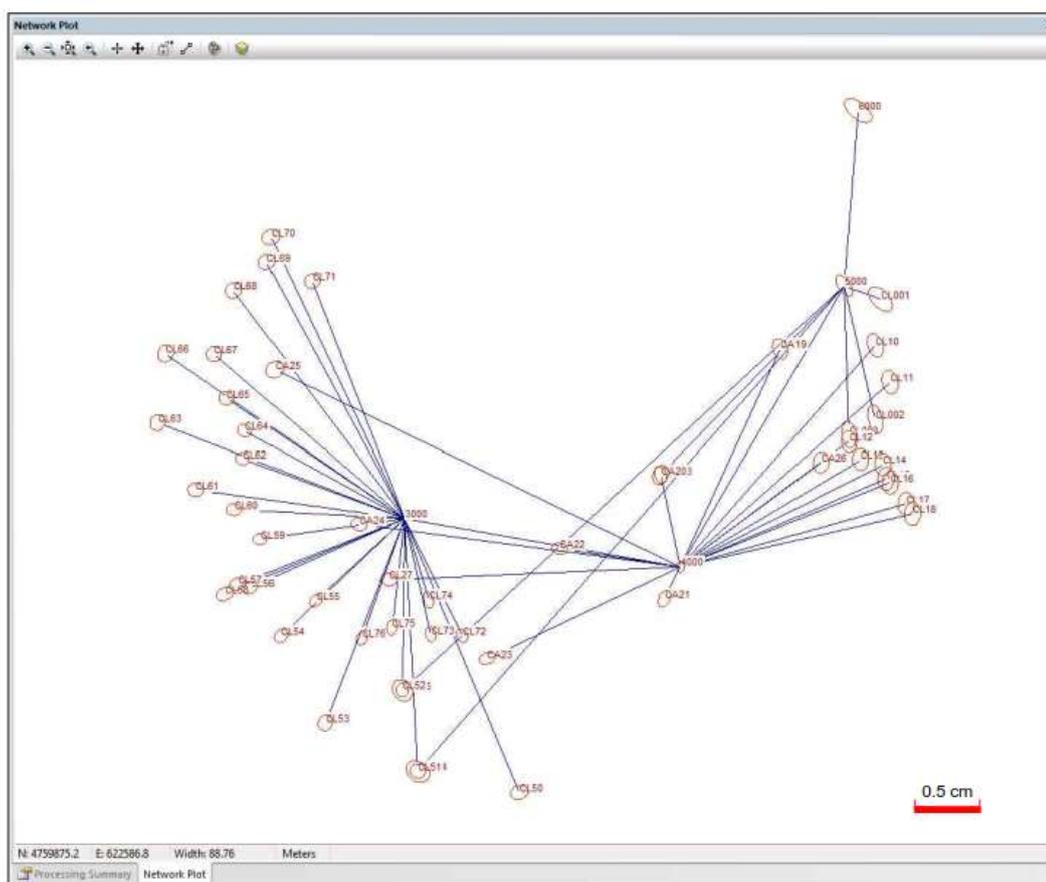


Figura 54 Network Plot di StarNet

5.3. I dati TLS

5.3.1. Il software Scene

SCENE è uno strumento *software* completo per l'elaborazione e la gestione di nuvole di punti 3D per utenti professionali concepito specificamente per la visualizzazione, l'amministrazione e l'utilizzo di dati di scansione 3D di grandi dimensioni ottenuti con scanner laser 3D come FARO Focus3D S 120, utilizzato nel rilievo in esame. SCENE elabora e gestisce i dati di scansione, offrendo un'ampia gamma di funzioni e strumenti come i filtri, il riconoscimento automatico di oggetti, la registrazione e la collocazione delle scansioni, nonché la colorazione automatica delle scansioni.

Dopo che SCENE ha preparato i dati di scansione, è possibile avviare subito la valutazione e l'ulteriore elaborazione. A tal fine, il *software* offre funzioni che vanno dalla semplice misurazione alla visualizzazione 3D tramite creazione di *mesh* ed esportazione dei dati di scansione in vari formati di nuvole di punti e CAD.²¹

Una volta aperto il programma e creato il nuovo progetto su cui lavorare, la prima operazione da effettuare è il caricamento delle scansioni. Sulla parete della cava sono state eseguite 12 scansioni (vedi Figura 45, paragrafo 4.3.1) posizionando il laser scanner in modo tale da avere un certo ricoprimento tra una scansione e l'altra e facendo in modo che tutta la parete di interesse venisse interamente rilevata.

Dopo aver caricato le 12 scansioni nel *workspace* del progetto si è proceduto con l'allineare le nuvole di punti una con l'altra approssimativamente effettuando un allineamento “*cloud to cloud*” (Figura 55).

²¹ Faro, Scene 5.3, Manuale dell'utente, (2014).

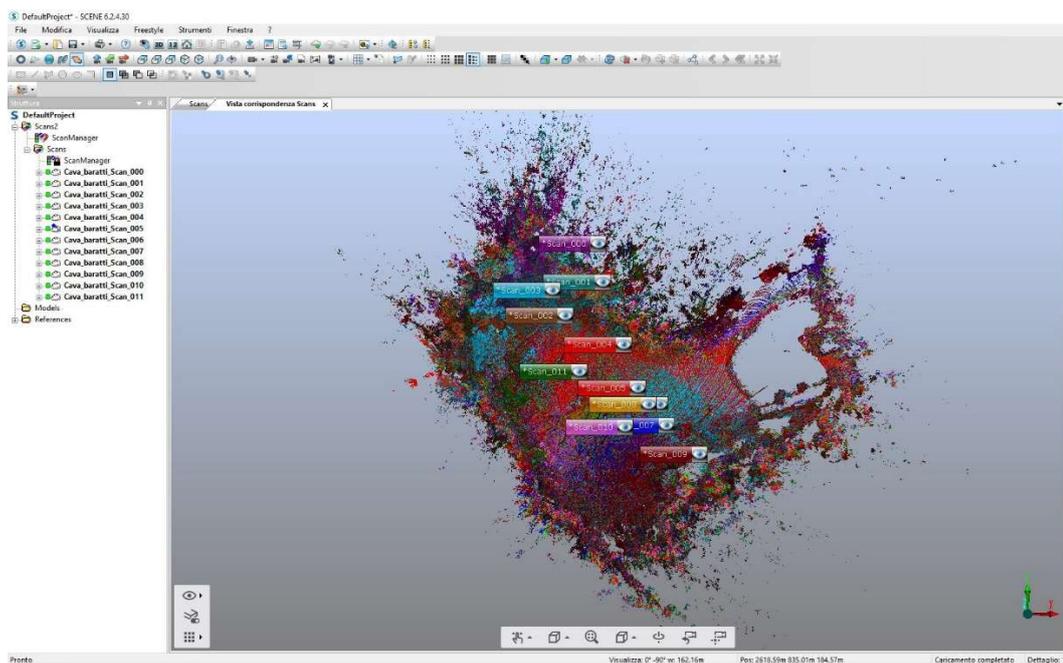


Figura 55 Vista per corrispondenza dopo l'allineamento "Cloud to cloud"

Questo tipo di procedura si effettua manualmente cercando di posizionare le scansioni nel modo corretto basandosi su punti comuni visibili. Successivamente si è inserito nel *workspace* il file contenente le coordinate dei *marker* calcolate e compensate con StarNet e ogni *marker* è stato collimato su tutte le scansioni su cui esso è visibile. La collimazione con Scene è semimanuale nel senso che, manualmente, si va ad attribuire il nome del *marker* sulla scansione ma automaticamente il programma riconosce il centro del *marker* essendo un punto di forte contrasto. Dopodiché è possibile avviare una seconda registrazione delle scansioni questa volta non “*cloud to cloud*” ma basandosi sui *marker*.

Dopo aver colorato le scansioni grazie alle acquisizioni di livello RGB effettuate dal laser scanner, si ottiene la nuvola di punti tridimensionale a colori di tutta la parete di roccia rilevata (Figura 56) costituita da circa 117'000'000 punti.

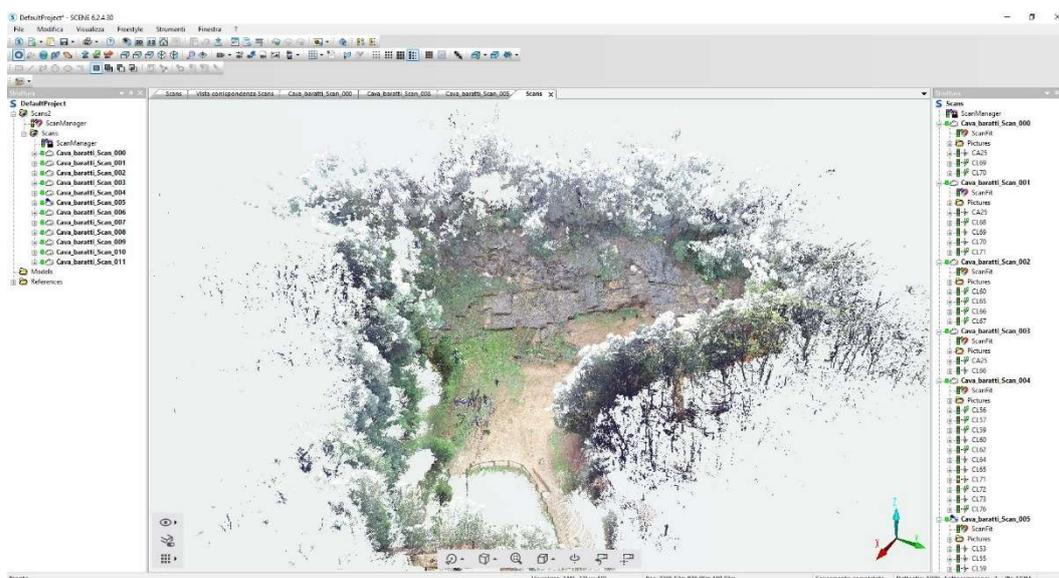


Figura 56 Vista 3D

Il principale parametro che il *software* Scene considera per la valutazione della precisione della registrazione è la distanza dei *target*, cioè quanto la coordinata inserita dall'utente del target è distante dalla coordinata utilizzata per l'allineamento delle scansioni.

Per gli scopi di questo lavoro è necessaria una precisione inferiore al centimetro per poter effettuare delle misure accurate sulla nuvola. Di conseguenza si decide di eliminare 4 scansioni dal progetto in modo da diminuire l'errore e raggiungere una precisione accettabile. L'errore di distanza dei *target* risulta essere diminuito (vedi Tabella 6) e di conseguenza si preferisce quindi utilizzare questa seconda configurazione.

Tabella 6 Errore distanza target (12 e 8 scansioni)

	12 scansioni	8 scansioni
Errore medio distanza target [mm]	24,55	4,88
Errore massimo distanza target [mm]	42,92	11,53
Errore minimo distanza target [mm]	5,93	0,74

5.4. I dati fotogrammetrici

5.4.1. Il software Photoscan

L'elaborazione dei dati fotogrammetrici è stata svolta utilizzando il *software* Photoscan. Questo *software*, prodotto dalla compagnia russa Agisoft LCC, è uno strumento avanzato, basato su immagini, per creare contenuti tridimensionali di qualità professionale. Il programma ha un'interfaccia semplice e permette la generazione di nuvole di punti sparse e dense, *mesh* 3D e altre rappresentazioni come DSM (*Digital Surface Model*) e ortofoto. Il processo di ricostruzione è composto da tre step: come già descritto nel paragrafo 3.3.2.2 il primo passo della tecnica della *SfM* consiste nell'allineamento delle immagini, nella calibrazione e nella ricostruzione 3D della geometria delle prese della camera.

Il software come prima operazione calcola, in un sistema di riferimento locale, i parametri di orientamento interno ed esterno della camera. In contemporanea genera una nuvola sparsa 3D di punti corrispondente alla collocazione dei punti omologhi stimati (Figura 57).

Le coordinate di default sono espresse in sistema locale ma poiché per i nostri scopi è necessaria una georeferenziazione in un sistema di coordinate definito, in questo terzo Photoscan permette di configurare le coordinate in un sistema definito basato su alcuni *marker* opportunamente misurati come descritto nel paragrafo 4.2, definendo una trasformazione affine del modello (Figura 58).

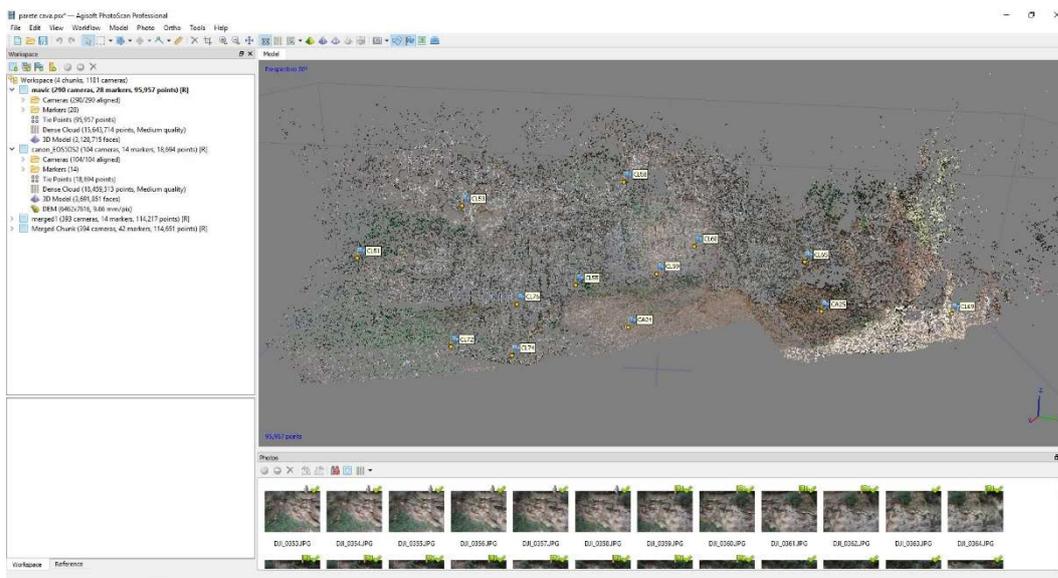


Figura 57 Nuvola sparsa



Figura 58 Georeferenziazione

Nel terzo step si applica la ricostruzione di una nuvola densa (Figura 59) a partire dalla immagine allineate, con lo scopo di costruire la geometria dettagliata del modello. In questa fase Photoscan permette di scegliere tra diversi algoritmi di *stereo-matching*. Il risultato finale è equivalente ad un modello digitale di superficie (DSM): una rappresentazione numerica della morfologia e degli oggetti.

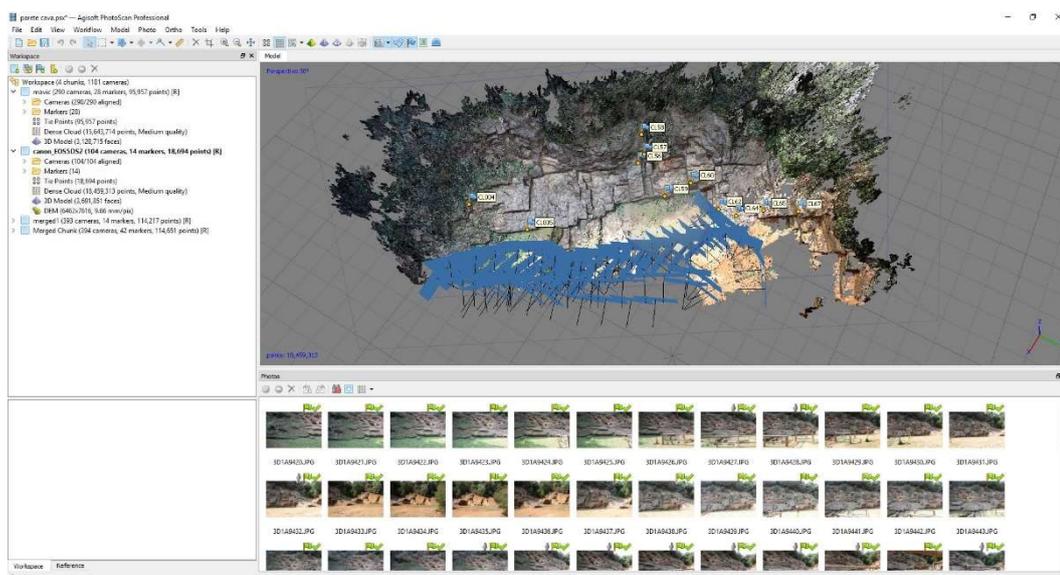


Figura 59 Nuvola densa Canon

Il software permette di generare un report dell'elaborazione svolta (in allegato). In questo sono state generate due nuvole dense di punti a partire dai fotogrammi acquisiti tramite drone e a partire dai fotogrammi acquisiti mediante la camera Canon.

I parametri di valutazione dell'elaborazione sono: l'errore dei GCP e l'errore dei *check point*. Di seguito riporto una tabella riassuntiva (Tabella 7) di questi parametri, ottenuti nelle due diverse elaborazioni.

Tabella 7 Parametri di valutazione di Photoscan

	Mavic	Canon
Errore GCP totale (m)	0.015	0.033
Errore GCP totale (pix)	0.94	9.14
Errore check point totale (m)	0.03	0.11
Errore check point totale (pix)	0.92	3.79

Gli errori dei check point sono più grandi rispetto agli errori dei punti di controllo ma possono essere trascurati poiché il software non ha effettivamente utilizzato questi punti per la georeferenziazione del modello ma soltanto come controllo ulteriore.

Questi punti infatti solitamente sono punti che sono stati tolti dall'elenco dei punti di controllo poiché andavano ad aumentare l'errore totale a causa di un'acquisizione meno accurata delle loro coordinate nel momento del rilievo.

Infine i parametri di calibrazione delle camere sono:

Tabella 8 Parametri calibrazione Mavic

FC220 (4.7 mm)

290 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
4000 x 3000	4.7 mm	1.56 x 1.56 um	No
Type:	Frame	F:	3062.25
Cx:	23.2043	B1:	-0.90703
Cy:	17.9342	B2:	-0.757598
K1:	0.110316	P1:	-0.000767555
K2:	-0.625087	P2:	0.000235829
K3:	1.41416	P3:	0
K4:	-1.09637	P4:	0

Tabella 9 Parametri calibrazione Canon

Canon EOS 5DS R (24 mm)

104 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
8688 x 5792	24 mm	4.24 x 4.24 um	No
Type:	Frame	F:	5971.67
Cx:	-1.49831	B1:	0
Cy:	-4.75023	B2:	0
K1:	-0.0771378	P1:	0.000159033
K2:	0.0644704	P2:	0.00166328
K3:	-0.0234989	P3:	0
K4:	0	P4:	0

6. Analisi sulla qualità dei dati raccolti

6.1. Accuratezza e precisione

Il risultato finale di tutte elaborazioni sono tre nuvole di punti: una ottenuta grazie ai rilievi con laser scanner, e due con rilievo fotogrammetrico. Per passare all'analisi in chiave geomeccanica della parete rocciosa è prima necessario capire qual è la qualità delle nuvole ottenute e quanto accurate e precise esse siano.

L'accuratezza e la precisione di una misura, di una posizione o di una nuvola di punti come in questo caso, indicano la qualità del dato. È importante specificare la distinzione tra accuratezza e precisione. L'accuratezza indica quanto sono vicine le misure rispetto al valore assunto come riferimento per la grandezza, tanto è alta tanto più il valore stimato è vicino al valore di riferimento. Per la determinazione dell'accuratezza è necessario confrontare le osservazioni con il valore di riferimento, ottenuto mediante misurazioni con accuratezza intrinsecamente maggiore di almeno un ordine di grandezza. L'accuratezza viene espressa mediante il valore RMSE (*Root Mean Square Error*) cioè la radice quadrata della media di un insieme di differenze tra l'insieme delle misure stimate e il valore teorico, espresse al quadrato. Ciò che può causare una bassa accuratezza dei dati è solitamente la presenza di errori sistematici o grossolani. Questi errori infatti causano una distorsione della media stimata.

La precisione invece indica quanto delle osservazioni siano vicine alla loro media stimata: essa è più alta quando le osservazioni sono concentrante intorno alla media. La precisione può essere considerata come un indice di valutazione della qualità delle misurazioni effettuate.

L'indicatore della precisione più utilizzato è la deviazione standard o scarto quadratico medio.

Si riporta di seguito un'immagine che riporta le diverse relazioni tra questi due parametri (Figura 60). L'intersezione della croce corrisponde al valore vero della

grandezza misurata mentre il cerchio grigio indica l'involuppo delle osservazioni della grandezza, il centro dell'area grigia rappresenta il valore stimato della grandezza, il raggio dell'area grigia rappresenta infine la misura dell'incertezza della stima.

In assenza di errori grossolani e sistematici, l'accuratezza e la precisione coincidono.²²

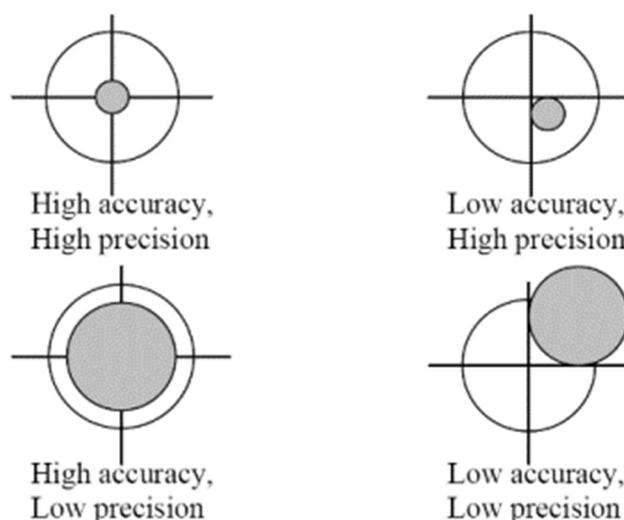


Figura 60 Accuratezza e precisione

Il *software* Photoscan permette di impostare un valore di accuratezza per il posizionamento dei *marker* manuale da parte dell'utente. Questo valore andrà ad influenzare poi l'errore di precisione che il programma calcola automaticamente. Nel nostro caso si è impostato un valore di accuratezza pari a 5 mm che ha restituito una precisione di 24 mm per la nuvola prodotta con le immagini della fotocamera Canon e di 15 mm per la nuvola creata con le immagini del drone Mavic.

Per quanto riguarda il *software* Scene, esso calcola automaticamente due tipi di errori: l'errore di distanza dei *target* collimati dall'utente e la loro coordinata e un errore di distanza tra una nuvola e l'altra. Durante il processo di elaborazione si è potuto notare che il posizionamento di alcune scansioni non riusciva a raggiungere una precisione abbastanza alta per gli scopi di questa tesi (nell'ordine dei millimetri). Questo problema è dovuto principalmente al fatto che alcune scansioni sono state effettuate ad una distanza troppo elevata dalla parete e il numero di *marker* presenti non fosse sufficiente

²² Gruppo di lavoro del Politecnico di Torino DIATI e DISEG, Buone pratiche da applicare per la gestione dei fenomeni di crollo in roccia derivanti dall'analisi condotta sullo state of art di riferimento, Politecnico di Torino (2015).

per garantirne un posizionamento corretto. Per questo motivo si è deciso di eliminare 4 delle scansioni effettuate e di tenere quelle che permettevano di avere comunque una buona nuvola raffigurante l'intera parete con un errore di 6,81 mm di distanza dei *target* e di 11,53 mm di distanza tra le nuvole.

6.2. Qualità secondo la norma

In questo paragrafo si fa riferimento a ciò che è riportato in “Buone pratiche da applicare per la gestione dei fenomeni di crollo in roccia derivanti dall'analisi condotta sullo state of art di riferimento”, (Politenico di Torino, 2015), un documento redatto da un gruppo di lavoro del Politecnico di Torino, che si è occupato di analizzare le problematiche inerenti i crolli in roccia. Il progetto illustra come operare al meglio delle possibilità scientifiche e tecniche di fronte ad un evento di crollo o ad una situazione potenzialmente pericolosa derivante da quest'ultimo.

Nel campo geotecnico sono richiesti diversi livelli di dettaglio dei dati. Il livello di dettaglio che si richiede dipende dal tipo di studio che si vuole effettuare. Si riporta di seguito una tabella (Tabella 10) che, in base agli otto livelli di dettaglio possibili, riporta la scala nominale di rappresentazione: essi sono legati secondo l'errore grafico pari a 0,2 mm da trasformare alla scala della carta a cui sono collegati l'accuratezza e la tolleranza.

L'accuratezza è espressa mediante i parametri indicati nelle norme ISO TC211 “*Geographic information/Geomatics*” mediante LE95, CE95 e SAS95%.

I valori numerici sono rappresentati in funzione di:

- Scala nominale (SN) che condiziona la precisione (σ), la tolleranza espressa per il caso monodimensionale mediante LE95, per il caso bidimensionale (CE95) e per il caso tridimensionale SAS, il minimo dettaglio che deve essere rappresentato (MinDet);
- Classe di densità (CD) espressa nelle accezioni Alta (A), Media (M) e Bassa (B) che permette di risalire, tramite il parametro di qualità, alla massima distanza tra punti di rilievo vicini (MaxD) e la conseguente densità.

Alla tabella redatta dal Gruppo di lavoro del Politecnico di Torino, è stato aggiunto il livello di dettaglio 9 per fare fronte al dettaglio necessario per questo lavoro di tesi.

Tabella 10 Livello di dettaglio, accuratezza e precisione²³

liv.	CD	SN	σ [m]	LE95 [m]	CE95 [m]	SAS [m]	MinDet [m]	Qual. [m]	MaxD [m]	Densità
0	B	1:50000	15	29	37	45	150	0,5	75	178punti/Kmq
	M	1:50000	10	20	24	30	50	0,5	25	1600punti/Kmq
	A	1:50000	10	20	241	30	20	0,5	10	10000punti/Kmq
1	B	1:25000	7,5	15	18	22	75	0,5	37,5	693punti/Kmq
	M	1:25000	5	10	12	15	25	0,5	12,5	5917punti/Kmq
	A	1:25000	5	10	12	15	10	0,5	5	40000 punti/Kmq
2	B	1:10000	3	6	7	9	18	0,5	9	12346 punti/Kmq
	M	1:10000	2	4	5	6	8	0,5	4	62500 punti/Kmq
	A	1:10000	2	4	5	6	4	0,5	2	250000 punti/Kmq
3	B	1:5000	1,5	3	3,7	4	9	0,5	4,5	0,04 punti/m ²
	M	1:5000	1	2	2,4	3	4	0,5	2	0,25 punti/m ²
	A	1:5000	1	2	2,4	3	2	0,5	1	1 punti/m ²
4	B	1:2000	0,6	1,2	1,5	1,8	4	0,5	1,8	0,25 punti/m ²
	M	1:2000	0,4	0,8	1,0	1,2	2	0,5	0,8	1 punti/m ²
	A	1:2000	0,4	0,8	1,0	1,2	1	0,5	0,4	4 punti/m ²
5	B	1:1000	0,3	0,60	0,73	0,90	2	0,5	0,9	1 punti/m ²
	M	1:1000	0,2	0,40	0,50	0,60	1	0,5	0,4	4 punti/m ²
	A	1:1000	0,2	0,40	0,50	0,60	0,5	0,5	0,2	16 punti/m ²
6	B	1:500	0,15	0,30	0,37	0,45	1	0,5	0,45	4 punti/m ²
	M	1:500	0,10	0,20	0,24	0,30	0,5	0,7	0,12	44 punti/m ²
	A	1:500	0,10	0,20	0,24	0,30	0,25	0,75	0,05	400 punti/m ²
7	B	1:200	0,06	0,12	0,15	0,18	0,5	0,5	0,12	44 punti/m ²
	M	1:200	0,04	0,08	0,10	0,12	0,25	0,7	0,036	625 punti/m ²
	A	1:200	0,04	0,08	0,10	0,12	0,12	0,75	0,02	2500 punti/m ²
8	B	1:100	0,03	0,06	0,07	0,09	0,25	0,5	0,06	278 punti/m ²
	M	1:100	0,02	0,04	0,05	0,06	0,12	0,7	0,02	2500 punti/m ²
	A	1:100	0,02	0,04	0,05	0,06	0,06	0,75	0,01	10000 punti/m ²
9	B	1:50	0,015	0,03	0,035	0,045	0,12	0,5	0,03	1112 punti/m ²
	M	1:50	0,01	0,02	0,025	0,03	0,06	0,7	0,01	10000 punti/m ²
	A	1:50	0,01	0,02	0,025	0,03	0,03	0,75	0,005	40000 punti/m ²

²³ Gruppo di lavoro del Politecnico di Torino DIATI e DISEG, Buone pratiche da applicare per la gestione dei fenomeni di crollo in roccia derivanti dall'analisi condotta sullo state of art di riferimento, Politecnico di Torino (2015).

6.3. La densità del dato

Come si può notare in Tabella 10, è presente un altro parametro fondamentale per la rappresentazione corretta di un dato cioè il minimo dettaglio da descrivere. Da questo parametro dipende direttamente la densità che deve avere una nuvola di punti per fare in modo che essa possa essere utilizzata per gli scopi richiesti come per esempio la misura di una distanza per la misura della spaziatura tra discontinuità.

Nonostante sia impossibile mantenere costante la densità dei punti di una nuvola, si deve cercare comunque di renderla il più regolare possibile. I valori riportati in tabella sono i parametri più comuni e utilizzati nella pratica.

Per calcolare la densità delle nuvole ottenute con Scene e con Photoscan si utilizza la funzione “calcolo densità approssimata di superficie” di CloudCompare. Nelle figure successive (Figura 62, Figura 63, Figura 64) viene riportato il risultato dell’analisi calcolando la densità come numero medio di punti presenti in una sfera di raggio 0,03 m, essendo di 3 cm il minimo dettaglio rappresentabile del livello di dettaglio 9A. Si fa presente che le scale di colore utilizzate per la rappresentazione non sono le stesse per le tre nuvole per questo si riporta in Figura 61 un confronto tra le tre diverse scale.

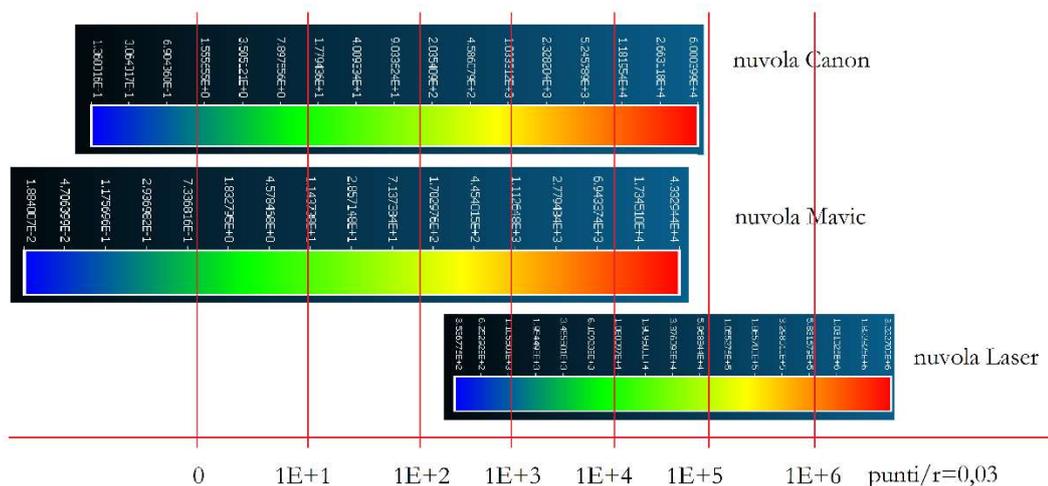


Figura 61 Confronto tra densità delle nuvole

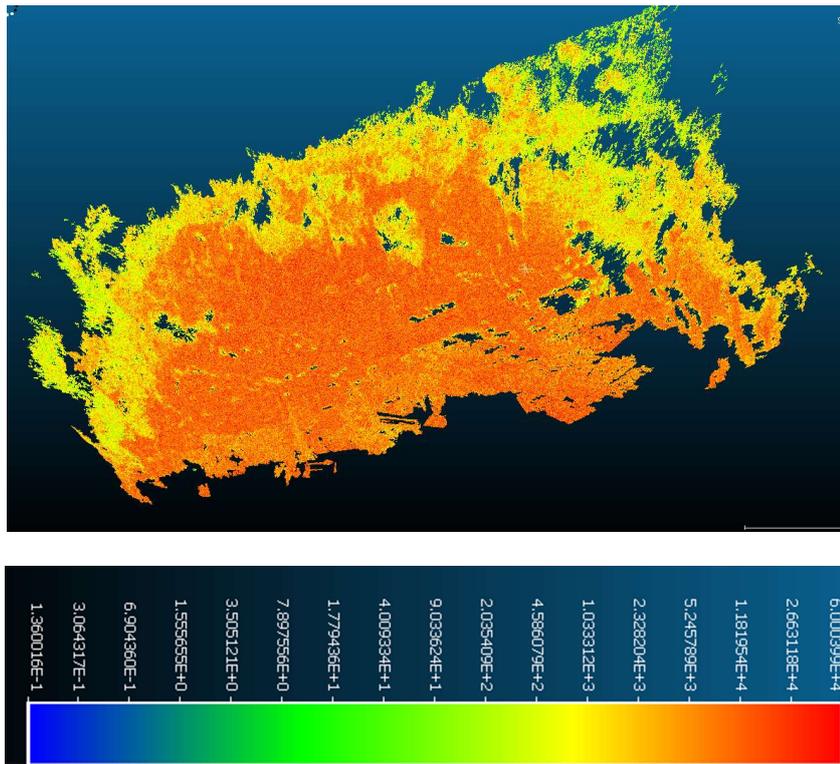


Figura 62 Densità approssimata della nuvola Canon in scala Logaritmica ($r=0,03$)

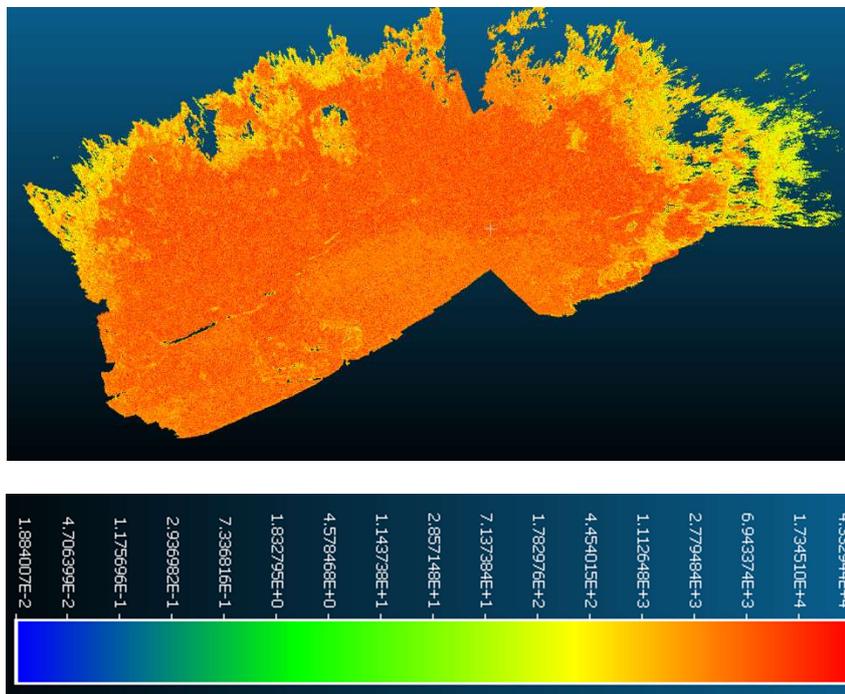


Figura 63 Densità approssimata della nuvola Mavic in scala Logaritmica ($r=0,03$)

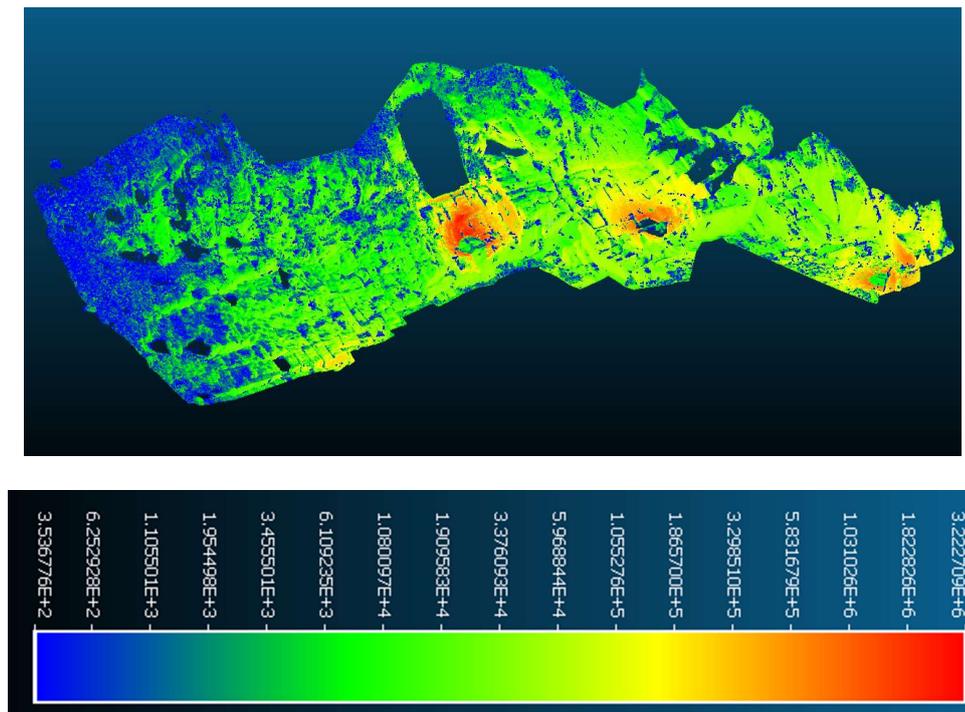


Figura 64 Densità approssimata della nuvola Laser in scala Logaritmica ($r=0,03$)

Le nuvole fotogrammetriche hanno una densità molto omogenea nella parte raffigurante la parete rocciosa, questo le rende adatte al loro utilizzo per scopi geomeccanici. Si riportano in Tabella 11 le densità massime e minime di ciascuna nuvola.

Tabella 11 Densità nuvole di punti

Nuvola	Densità massima (punti/ $r=0.03$)	Densità minima (punti/ $r=0.03$)
Canon	60000	3
Mavic	43000	30
Laser	3000000	350

Per quanto riguarda la nuvola ottenuta con TLS, la densità risulta molto meno omogenea rispetto alle nuvole precedenti nonostante essa sia notevolmente maggiore. Inoltre nella zona sinistra della parete, dove è presente una parte di parete interessante dal punto di vista geotecnico, essa risulta meno densa rispetto alle nuvole fotogrammetriche e con molti buchi. Il ridotto numero di punti in questa zona non è

sufficiente per poter permettere il suo utilizzo per scopi a fini geotecnici e geomeccanici di dettaglio.

Questo si verifica sostanzialmente per due motivi: *in primis* poiché è stato utilizzato un laser scanner terrestre ed essendo esso stato posizionato in basso rispetto alla parete, i punti misurati nella parte alta della parete sono troppo distanti e alcuni risultano nascosti (schema in Figura 65). Nella parte alta della parete infatti, essendo presenti molte irregolarità dal punto di vista geometrico, il laser scanner non è risultato essere lo strumento migliore per avere un dato completo e accurato.

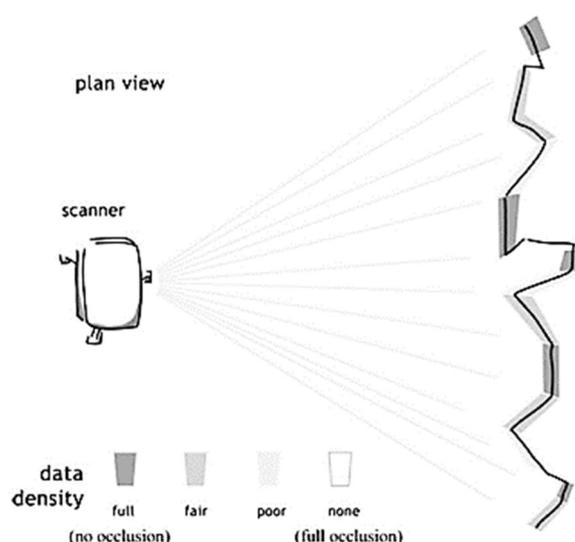


Figura 65 Densità del dato con laser scanner (Lato et Al. 2010)

In secondo luogo le 4 scansioni che sono state eliminate dal progetto, come riportato nel paragrafo 5.3.1, erano state acquisite in prossimità della parte sinistra della parete. Infatti, se si fosse riusciti ad utilizzare queste scansioni, con molta probabilità, non si sarebbero verificate queste notevoli perdite di dati.

6.4. Applicazioni possibili

Riprendendo ciò che è riportato in Tabella 10 possiamo classificare le tre nuvole come di classe 9A avendo esse più di 40000 punti al metro quadrato.

È possibile evidenziare le principali applicazioni tecniche relative alle varie scale nominali e classi di densità, indicate in Tabella 12 Applicazioni tecniche relative alle varie scale nominali e classi di densità.

Le nuvole ottenute in questo lavoro, appartenendo al livello 9, potranno quindi essere utilizzate come “prodotti cartografici per l’individuazione, il conteggio e l’analisi dei massi caduti (conteggio massi, misura del volume dei massi, area, diametro...), analisi della parete (giaciture, linee di fratturazione...)”.

Tabella 12 Applicazioni tecniche relative alle varie scale nominali e classi di densità²⁴

liv.	SN	σ [m]	densità	Ambiti applicativi	Prodotti
0	1:50000	15	178punti/Kmq	mappatura eventi pregressi a livello macro-regionale (registro crolli), come supporto per decisioni relative alle priorità di intervento e archivio sintetico di informazioni relative allo stato di fatto	cartografia numerica, modelli altimetrici (DTM e DSM) a scala regionale, ortofoto regionale
1	1:25000	7,5	693punti/Kmq	mappatura eventi pregressi a livello regionale (registro crolli), come supporto per decisioni relative alle priorità di intervento e archivio sintetico di informazioni relative allo stato di fatto	
2	1:10000	3	12346 punti/Kmq	Gestione dei dati relativi al rischio di crolli, al monitoraggio delle barriere paramassi e alle infrastrutture di protezione, mappatura eventi pregressi a livello regionale (registro crolli), come supporto per decisioni relative alle priorità di intervento e archivio sintetico di informazioni relative allo stato di fatto	cartografia numerica, modelli altimetrici (DTM e DSM) a scala regionale, ortofoto regionale
3	1:5000	1,5	0,04 punti/m2	Analisi dei tipi di terreno, destinazioni d’uso e copertura del suolo, destinazioni d’uso degli edifici, barriere e infrastrutture di protezione	cartografia numerica, rappresentazioni tematiche di dettaglio, DTM e DSM, ortofoto
4	1:2000	0,6	0,25 punti/m2	Analisi dei tipi di terreno, destinazioni d’uso e copertura del suolo, destinazioni d’uso degli edifici, barriere e infrastrutture di protezione	cartografia numerica, rappresentazioni tematiche di dettaglio, DTM e DSM, ortofoto
5	1:1000	0,3	1 punti/m2	Analisi dei tipi di terreno, destinazioni d’uso e copertura del suolo, destinazioni d’uso degli edifici, barriere e infrastrutture di protezione supporto per analisi e modellazione dinamiche dei crolli	cartografia numerica, rappresentazioni tematiche di dettaglio, DTM e DSM, ortofoto
6	1:500	0,15	4 punti/m2	prodotti cartografici per l’individuazione, il conteggio e l’analisi dei massi caduti (conteggio massi, misura del volume dei massi, area, diametro...), analisi della parete (giaciture, linee di fratturazione...)	nuove entità e shapefiles, DTM e DSM, ortofoto, raster tematici, <i>mesh</i> , TIN e nuvole di punti
7	1:200	0,06	44 punti/m2	prodotti cartografici per l’individuazione, il conteggio e l’analisi dei massi caduti (conteggio massi, misura del volume dei massi,	nuove entità e shapefiles, DTM e DSM, ortofoto, raster

²⁴ Gruppo di lavoro del Politecnico di Torino DIATI e DISEG, Buone pratiche da applicare per la gestione dei fenomeni di crollo in roccia derivanti dall’analisi condotta sullo state of art di riferimento, Politecnico di Torino (2015).

				area, diametro...), analisi della parete (giaciture, linee di fratturazione...)	tematici, <i>mesh</i> , TIN e nuvole di punti
8	1:100	0,03	278 punti/m2	prodotti cartografici per l'individuazione, il conteggio e l'analisi dei massi caduti (conteggio massi, misura del volume dei massi, area, diametro...), analisi della parete (giaciture, linee di fratturazione...)	nuove entità e shapefiles, DTM e DSM, ortofoto, raster tematici, <i>mesh</i> , TIN e nuvole di punti

7. Studio geomeccanico del sito

7.1. Caratterizzazione delle zone di distacco

La caratterizzazione della parete in esame verrà condotta principalmente con lo scopo di definire e quantificare i fattori che sono responsabili dell'instabilità dei blocchi e le caratteristiche geometriche della parete. In particolare si porrà l'attenzione su:

- Discontinuità (giacitura, spaziatura e persistenza)
- Osservazioni sulle caratteristiche stratigrafiche della parete
- Caratteristiche volumetriche e geometriche dei blocchi che possono staccarsi

Per valutare questi fattori si utilizzeranno i dati raccolti mediante le tecniche di rilievo a distanza, quali sono la fotogrammetria e il rilievo con TLS, e analizzati come descritto fino ad ora.

7.1.1. Uso di tecniche di rilievo a distanza

Al giorno d'oggi queste tecniche di rilievo a distanza rappresentano un mezzo di notevole importanza e interesse, soprattutto grazie al grande sviluppo tecnologico e alla diffusione di questi strumenti negli ultimi tempi.

Molti sono stati molti gli autori che hanno studiato e utilizzato queste tecniche in ambito geotecnico e nel contesto di stabilità in roccia. Tra questi si ricorda lo studio di Salvini et Al., 2013, che mediante i dati ottenuti con diversi metodi (rilievo tradizionale, fotogrammetria e scansioni laser scanner), giunge alla costruzione di modello di versante utilizzato per l'analisi delle traiettorie dei blocchi e delle zone di propagazione dei blocchi. Il modello è stato utilizzato inoltre per determinare i parametri strutturali delle discontinuità e dell'ammasso roccioso, per le analisi di stabilità, condotte con il metodo dell'equilibrio limite.

Un altro utilizzo delle tecniche di rilievo in remoto è stato studiato da Santana et Al., 2012. Nell'articolo viene descritto il procedimento per cui da scansioni laser sono state individuate le nicchie di distacco di un ammasso roccioso. Per quest'analisi sono stati

calcolati i principali parametri strutturali delle discontinuità (giaciture, persistenze, spaziature): a partire da questi dati sono riusciti a calcolare il volume dei blocchi in maniera stocastica con il metodo Monte Carlo.²⁵ Si riporta di seguito uno schema tratto dall'articolo di Santana et Al. per riassumere il procedimento seguito:

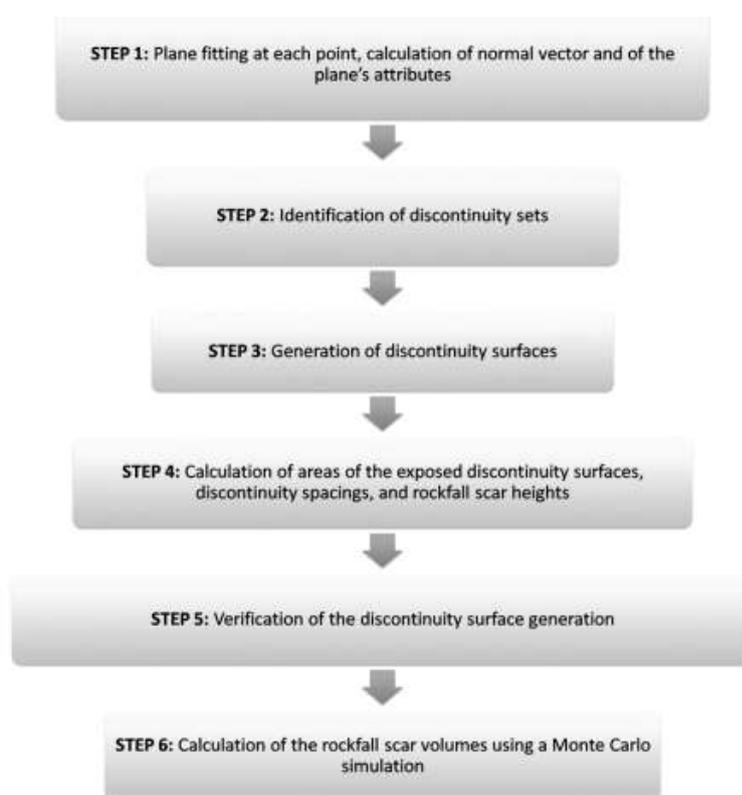


Figura 66 Diagramma di flusso per l'identificazione e il calcolo delle aree e dei volumi

7.2. Il trattamento delle nuvole di punti con CloudCompare

Le due nuvole fotogrammetriche (Canon e Mavic) e quella ottenuta con laser scanner verranno trattate separatamente, in questo modo si potrà effettuare un confronto tra i risultati ottenuti con le due differenti tecniche.

²⁵ Santana D., Corominas J., Mavrouli O., Garcia-Sellés D., Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner, *Geomorphology, journal homepage: www.elsevier.com/locate/geomorph_*(2012).

7.2.1. Nuvole ottenute con tecniche fotogrammetriche

Si specifica innanzi tutto che i passaggi effettuati descritti di seguito sono stati eseguiti allo stesso modo sia per la nuvola ottenuta con fotogrammetria terrestre (con camera Canon) che per la nuvola ottenuta con i fotogrammi acquisiti dal drone Mavic. Inoltre per rendere il processo computazionale più leggero si è preferito ritagliare le nuvole tenendo in considerazione solo la parte a sinistra della parete dove sono presenti zone più interessanti dal punto di vista geotecnico.

Uno dei problemi più grandi nel trattamento di nuvole di punti di pareti rocciose è la presenza di zone ricche di vegetazione che spesso impediscono o disturbano l'acquisizione della parete. Per questo motivo è necessario procedere con una o più operazioni di filtraggio. Una delle prime operazioni da svolgere è il ricampionamento delle nuvole, in questo modo vengono mediate le misure di distanza per ogni punto misurato e, impostando un valore di soglia di deviazione standard, vengono scartati i punti al di sopra della soglia (filtro SOR, *Statistical Outlier Removal*).

Successivamente per eliminare la maggior parte della vegetazione, avendo la parete rocciosa una morfologia complessa, è necessario un passo di segmentazione per dividere l'intero set di dati in regioni 2.5D più piccole. Il metodo proposto da Roncella e Forlani (2005) è adatto a questo scopo. Questo si basa su una tecnica di segmentazione RANSAC che richiede la definizione di due parametri di *input*: la distanza massima consentita di un punto dal suo piano di riferimento e il numero minimo di punti per regione. Un piano π è stimato da minimi quadrati in base ai soli punti appartenenti a una regione specifica²⁶. Si riporta di seguito un'immagine esplicativa di come si comporta l'algoritmo RANSAC (Figura 67): la linea rossa mostra il risultato del fitting utilizzando tutti i punti (compresi gli outlier in grigio), mentre la linea blu rappresenta il fitting ottenuto utilizzando solo i punti in blu (inliner).

²⁶ Scaioni M., Alba M., Understanding changes and deformations on multi-temporal rock face point clouds, *Paparoditis N., Pierrot-Deseilligny M., Mallet C., Tournaire O. (Eds), LAPRS, Vol. XXXVIII, Partie 3°*, Saint-Mandé, France, (2010).

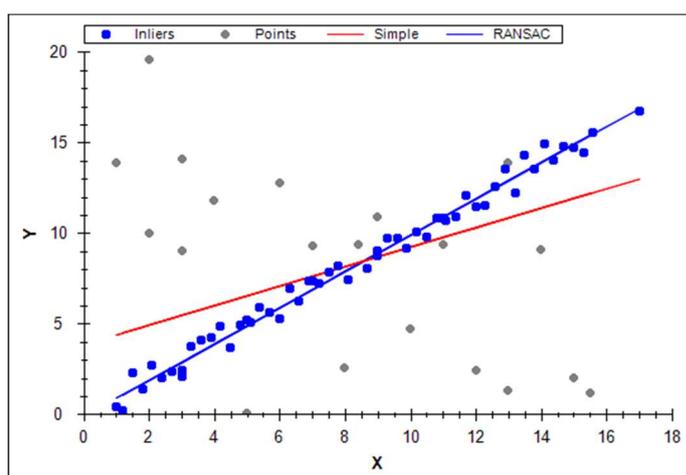


Figura 67 Schema dell'algorithm RANSAC²⁷

Prima di utilizzare il plugin RANSAC (Figura 69) è preferibile calcolare le normali mediante il comando “*compute Normals*” (Figura 68) in modo da poter impostare i parametri desiderati, l’algorithm RANSAC infatti non permette l’impostazione dei parametri per il calcolo delle normali ma utilizza impostazione di default.

Le normali sono calcolate impostando come superficie locale di approssimazione un piano, e l’orientamento delle normali verso $-Z$.

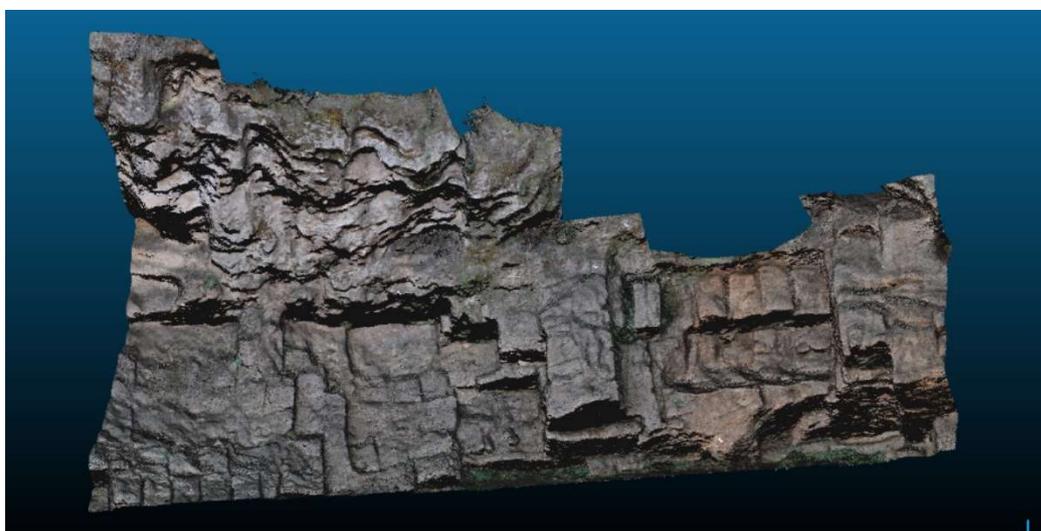


Figura 68 Calcolo delle normali

²⁷ <http://crsouza.com/2010/06/02/random-sample-consensus-ransac-in-c/>

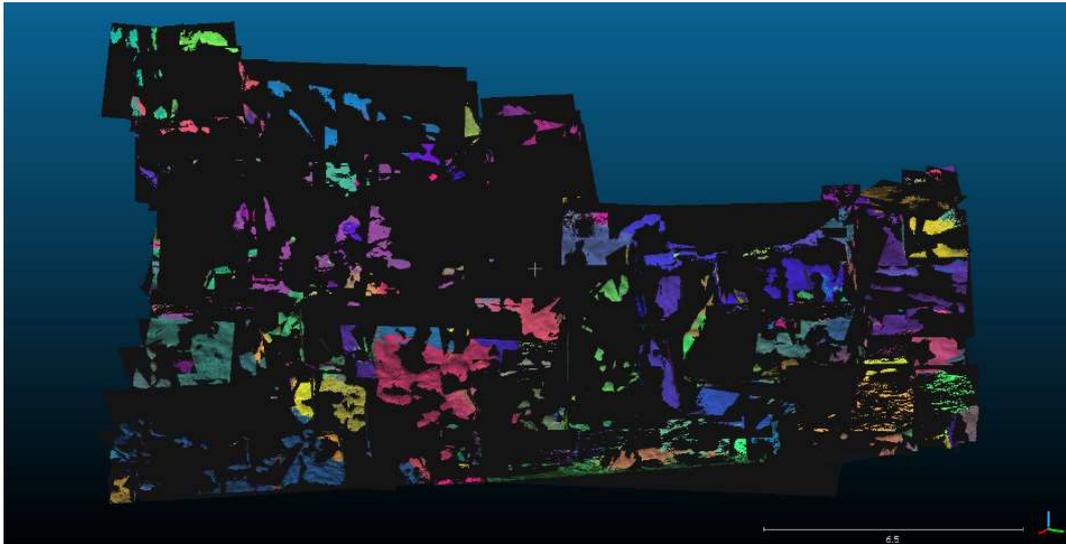


Figura 69 Creazioni piani con RANSAC

Una volta che sono state identificate le diverse regioni, ognuna con un proprio piano, è possibile esportare la nuvola così creata andando in questo modo ad eliminare i punti non appartenenti a nessun piano, cioè la vegetazione. Caricando nuovamente questa nuvola in CloudCompare si visualizzeranno solo i punti appartenenti ai piani (Figura 70).

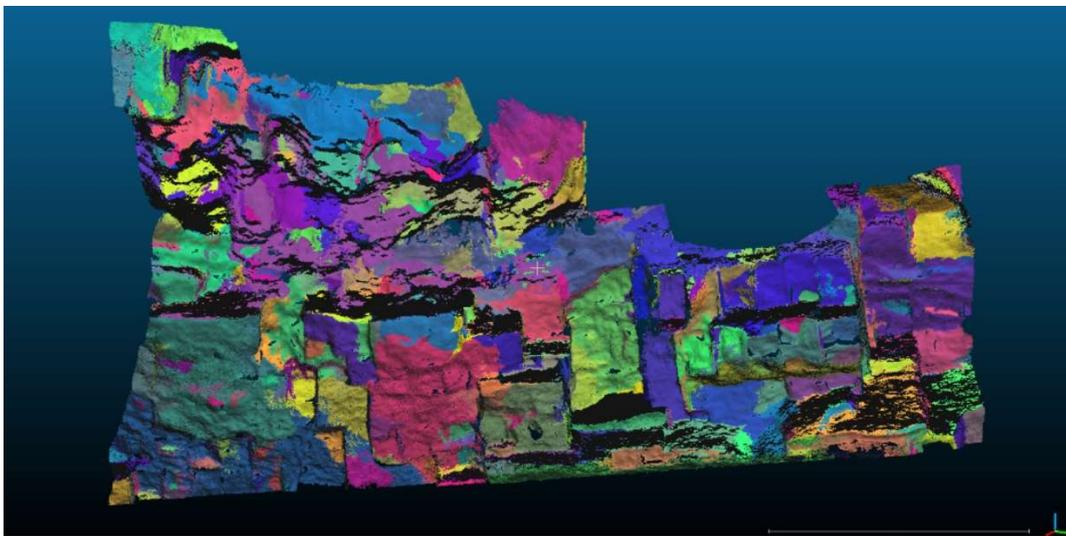


Figura 70 Visualizzazione nuvola senza vegetazione

7.2.2. Nuvola ottenuta con TLS

Come riportato nel paragrafo 6.3 la nuvola ottenuta con TLS non verrà utilizzata per rilievi di dettaglio (come la misurazione diretta sulla nuvola di piccole distanze) ma verrà utilizzata per il riconoscimento automatico delle giaciture dei piani come descritto successivamente.

Il procedimento svolto è infatti il medesimo: come prima cosa si procede alla pulizia della nuvola mediante un filtro SOR e all'applicazione dell'algoritmo RANSAC.

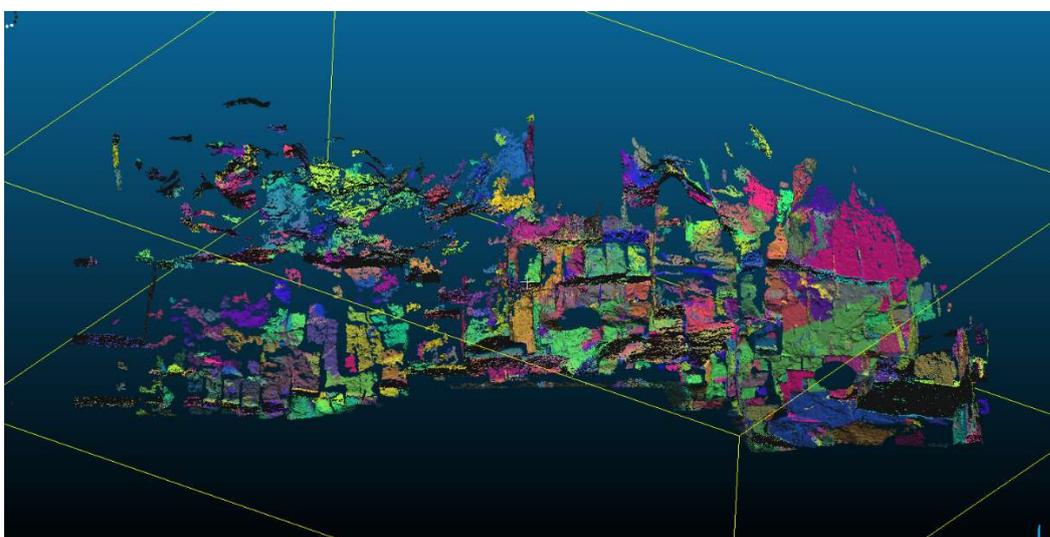


Figura 71 Nuvola ottenuta dopo RANSAC

La Figura 71 mostra il risultato dell'applicazione dell'algoritmo RANSAC sull'intera nuvola. Essendo la parte di nostra interesse nella parte sinistra della parete, in precedenza, le nuvole fotogrammetriche erano state elaborate ritagliando solo tale zona per diminuire il carico computazionale. Si vuol far notare in Figura 74, come a sinistra, nella zona esaminata nella nuvola fotogrammetrica, si ha una grande perdita di dati, dovuta al fatto che in quella zona la densità della nuvola sia minore. L'algoritmo RANSAC non è stato infatti in grado di identificare un numero sufficiente di piani per ricostruire in maniera precisa la zona di parete a sinistra. Per questo motivo si procede ritagliando la nuvola originale mantenendo solo la parte sinistra e senza applicare l'algoritmo RANSAC, tagliando manualmente le parte dove la presenza di vegetazione era più problematica (vedi paragrafo 7.4).

7.3. Osservazioni sulle caratteristiche stratigrafiche della parete

La parete in esame può essere suddivisa in due regioni distinte: una parte inferiore caratterizzata da un'evidente azione di cavatura risalente all'epoca etrusca e romana e una parte superiore, soggetta fino ad oggi alle sole azioni del vento e dei fenomeni meteorici.

La parte inferiore cavata è costituita da roccia più compatta e dura essendo esposta all'aria da tempi più lunghi, infatti, la pietra panchina è piuttosto leggera e di facile lavorabilità, presenta un aspetto ruvido e molto poroso ma acquista durezza e resistenza dopo una prolungata esposizione all'esterno.

Come già descritto in precedenza nel paragrafo 2.2.4, i blocchi venivano estratti seguendo l'inclinazione del sedimento di sabbia in modo da avere blocchi con sedimentazione orizzontale.



Figura 72 Parte inferiore

La parte superiore presenta invece una stratigrafia molto più evidente con una granulometria più grossolana. Questi strati superiori risultano essere stati nel tempo erosi dal vento e dalla pioggia in maniera più significativa rispetto alla parte cavata proprio per il fatto di avere caratteristiche meccaniche inferiori.



Figura 73 Parte superiore

Dopo aver ottenuto delle nuvole fotogrammetriche il più possibile ripulite dalla vegetazione dal rumore mediante i procedimenti descritti nel paragrafo 7.2.1 è possibile effettuare delle misurazioni di dettaglio come per esempio la misura dello spessore degli strati presenti lungo due piani scelti riportati in Figura 74 (piano 1 a sinistra e piano 2 a destra).

Per questa misurazione si è scelto di usare la nuvola Canon essendo quella in cui erano più facilmente riconoscibili gli strati presenti nella parte alta della parete.

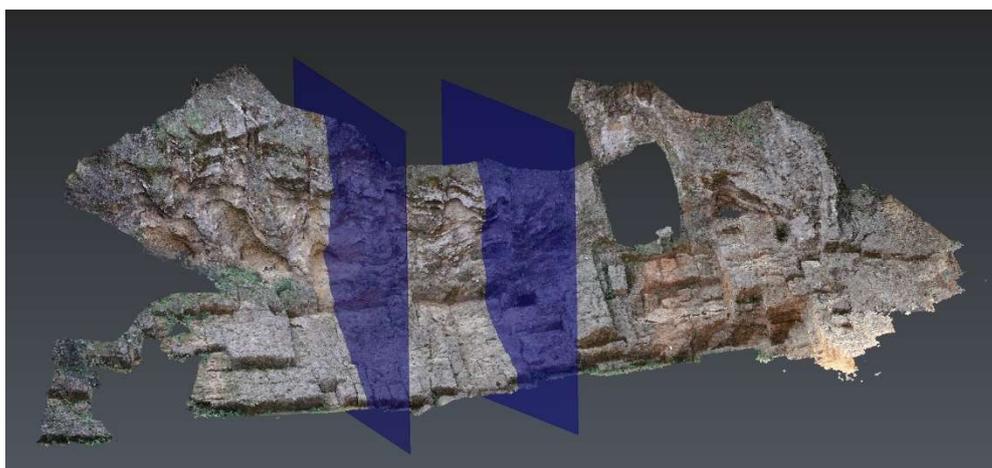


Figura 74 Piani verticali di riferimento per la misurazione

Per effettuare la misura si è utilizzato lo strumento “misura” presente nel *software* 3DReshaper (Figura 75).

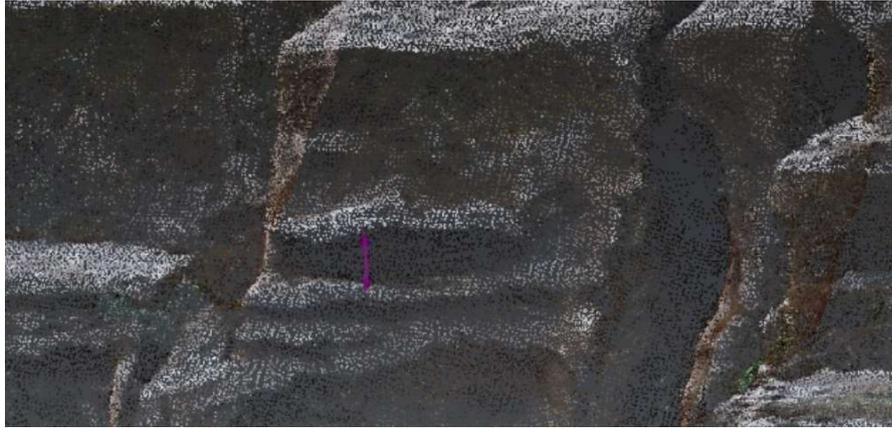
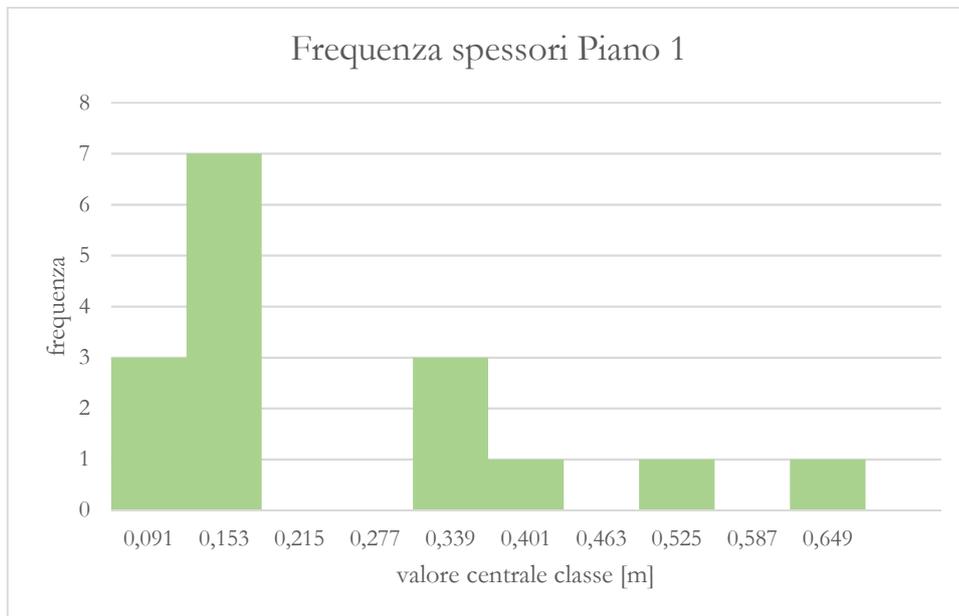
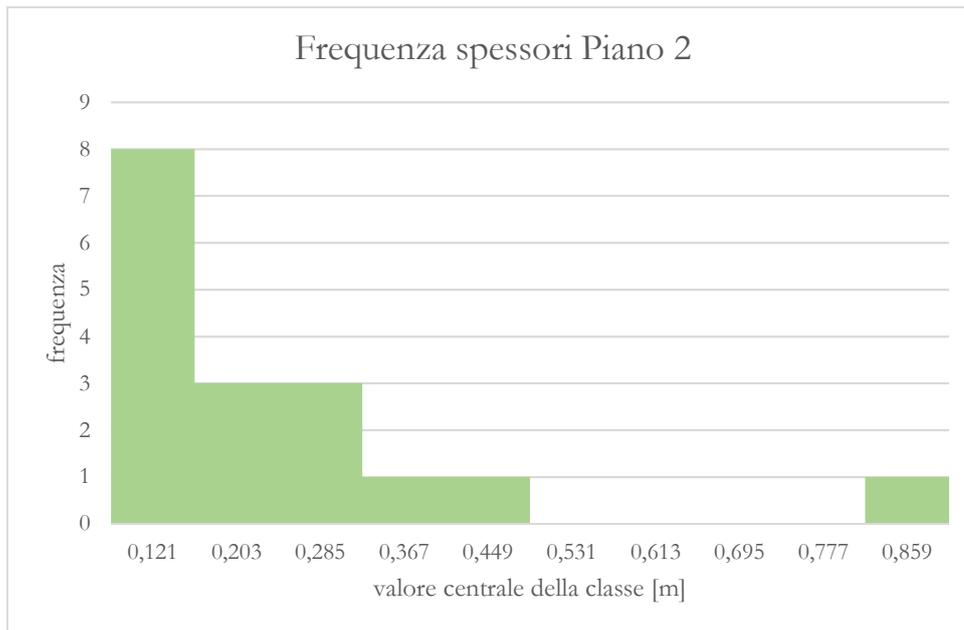


Figura 75 Esempio di misurazione dello spessore

Di seguito sono riportati i grafici che mostrano la frequenza degli spessori misurati in corrispondenza del piano 1 e del piano 2.

La media degli spessori misurati sul piano 1 è di 0.25 m mentre sul piano 2 di 0.239 m. Lo spessore minimo che è stato possibile misurare è stato di 6 cm, è dunque chiaro che per riuscire a misurare spessori inferiori a questo è necessario avere delle nuvole più dettagliate in cui la distanza media tra i punti sia submillimetrica.





7.4. Discontinuità

7.4.1. Giacitura

Per quanto riguarda le nuvole fotogrammetriche, dopo l'utilizzo dell'algoritmo RANSAC (descritto nel paragrafo 7.2) si può procedere con il calcolo delle "Facets" cioè delle superfici impostando come parametri fondamentali il numero minimo di punti per superficie e la massima distanza dei punti dalle superfici (Figura 76). A questo punto è possibile visualizzare lo stereogramma ottenuto (Figura 77).

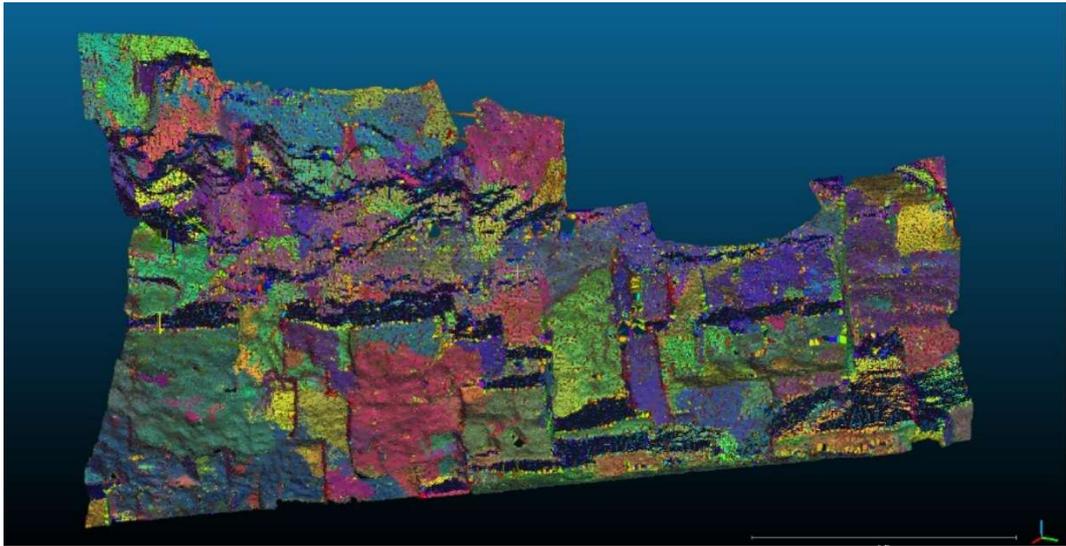


Figura 76 Facets, nuvola fotogrammetrica

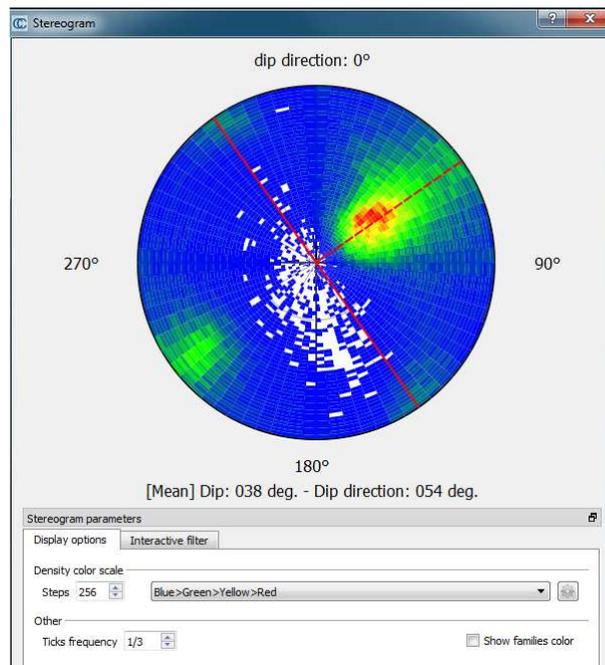


Figura 77 Stereogramma nuvola Canon

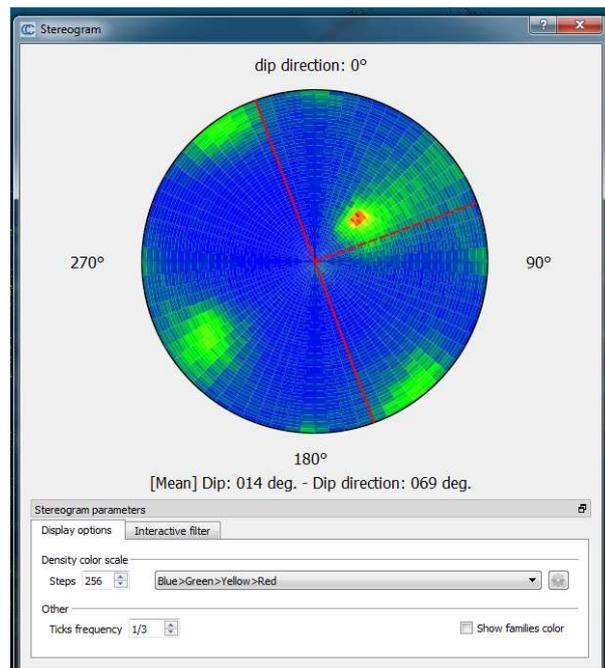


Figura 78 Stereogramma nuvola Mavic

Per quel che riguarda la nuvola laser invece, presentando la nuvola molti “buchi”, si è proceduto direttamente all’utilizzo del plugin Facets dopo aver ripulito la nuvola manualmente dalla vegetazione (Figura 79).

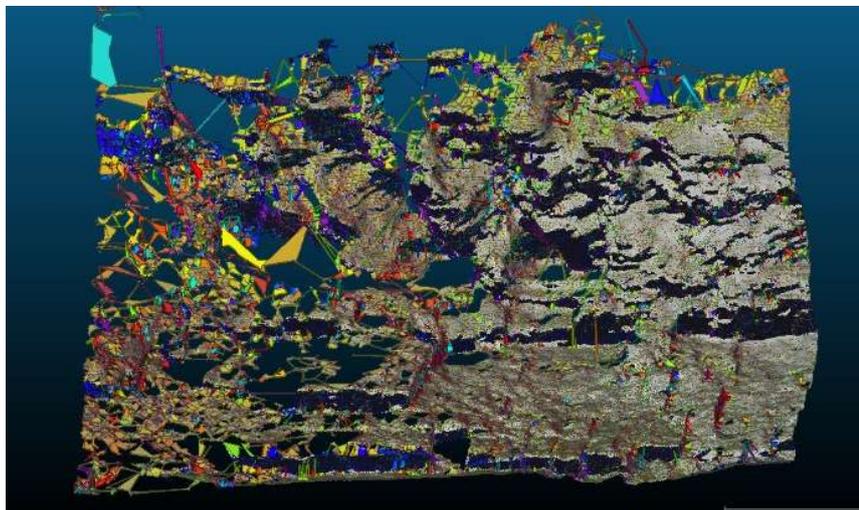


Figura 79 Facets, nuvola laser

In Figura 79 si può notare come nella parte estremamente a sinistra si ha un disturbo nel riconoscimento delle superfici poiché sono presenti in questa zona molti buchi. Per ottenere uno stereogramma significativo senza superfici errate è infatti importante

avere una superficie il più possibile priva di buchi in modo tale da non creare facets prive di significato.

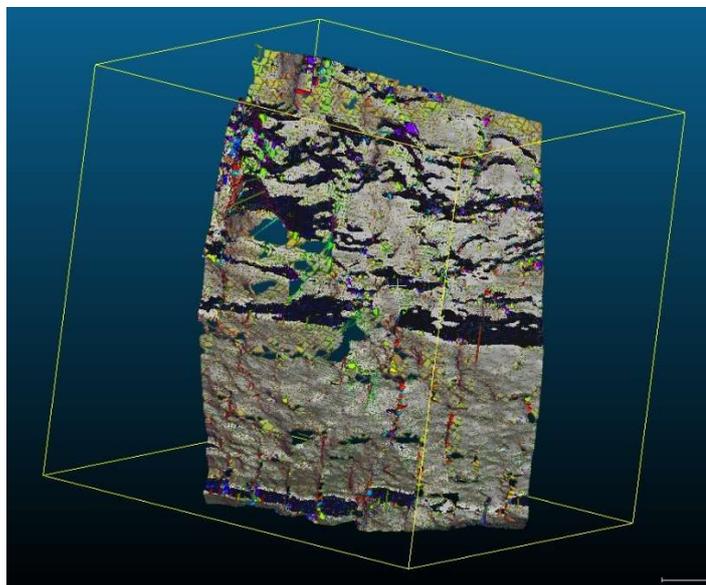


Figura 80 Porzione nuvola laser

Ritagliando ulteriormente la nuvola laser, si ottiene una porzione di nuvola (Figura 80) che soddisfa queste caratteristiche permettendo la creazione di uno stereogramma significativo (Figura 81) e raffigurante la stessa porzione di parete esaminata con le tecniche fotogrammetriche.

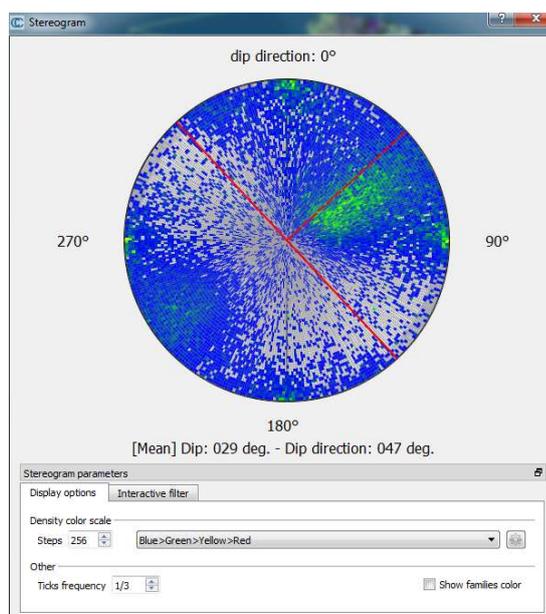


Figura 81 Stereogramma

Per valutare la correttezza di questi stereogrammi si procede all'estrazione manuale di alcuni piani significativi e ben individuabili, mediante il *software* 3DReshaper e la sua funzionalità di estrazione forme “misura, estrai forma” (Figura 82 Piano parallelo alla giacitura degli strati).

Una volta create delle nuvole di punti composte dai punti appartenenti a questi piani, queste vengono importate su CloudCompare e mediante il comando di *Plane Fitting* si può verificare la giacitura del singolo piano (Figura 83).

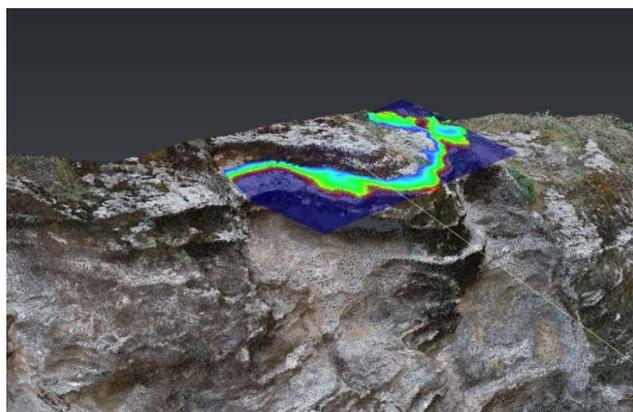


Figura 82 Piano parallelo alla giacitura degli strati

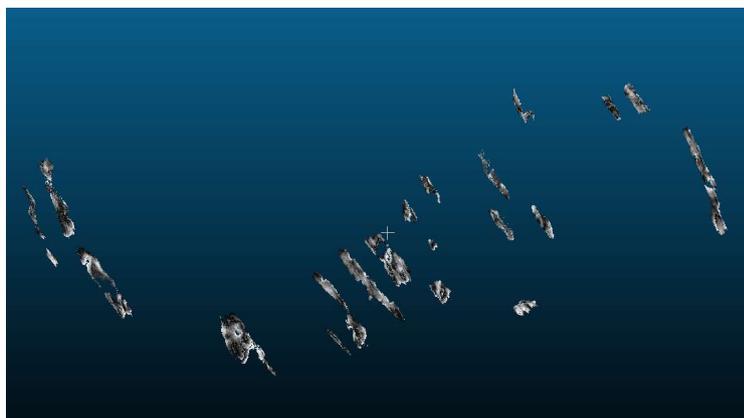


Figura 83 Estrazione piani manualmente e calcolo della loro giacitura

Dopo aver ottenuto un numero significativo di valori di *Dip* e *Dip Direction*, utilizzando il *software* Dips di Rocscience è possibile creare uno stereogramma in modo tale da poter effettuare un confronto. Il risultato è riportato di seguito in Figura 84 e sono stati individuati 3 famiglie di piani.

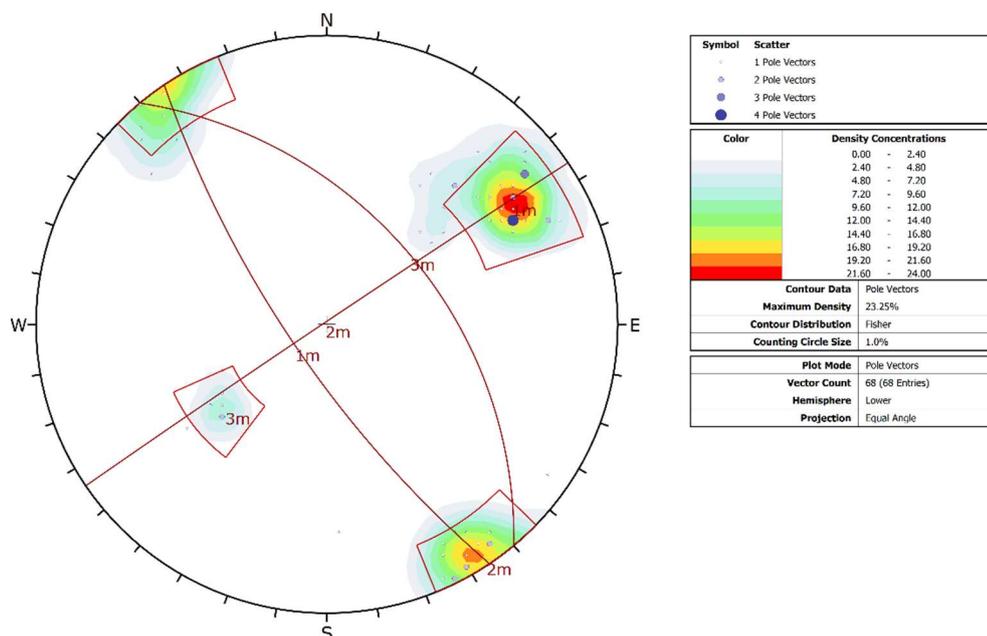


Figura 84 Stereogramma dei piani estratti manualmente

Tabella 13 Giacitura Piani medi estratti manualmente

ID Set	Dip Direction	Dip
1	56	15
2	146	1
3	230	41

Gli stereogrammi ottenuti con la procedura automatica di Facets contengono dei valori di *Dip* e *Dip Direction* non coerenti raffigurati dalle celle in blu presenti sugli stereogrammi. Questi valori sono derivanti dalla presenza di rumore e di numerose superfici disposte in maniera irregolare a causa della forma data dal vento alla parete, essi cioè che non corrispondono a nessuna discontinuità che è nel mio interesse rilevare.

Per questo motivo ho preferito importare in Dips i valori di *Dip* e *Dip Direction* calcolati da CloudCompare e creare degli stereogrammi ulteriori e verificare la giacitura delle famiglie di piani individuati con questa metodologia. Gli stereogrammi risultanti sono riportati di seguito:

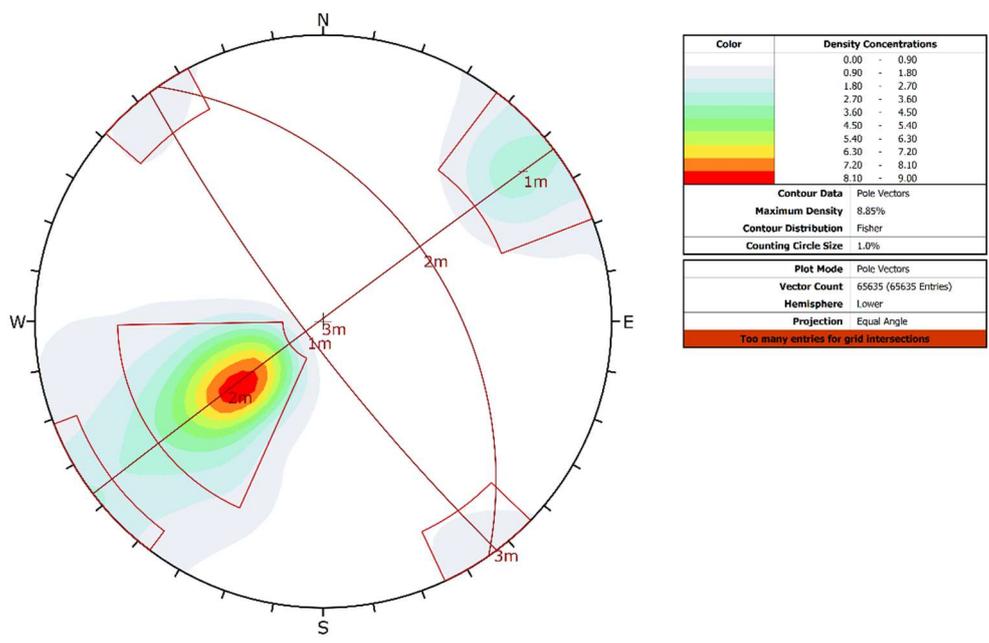


Figura 85 Stereogramma da nuvola Canon

Tabella 14 Giacitura piani medi (canon)

ID Set	Dip Direction	Dip
1	53	8
2	235	46
3	143	1

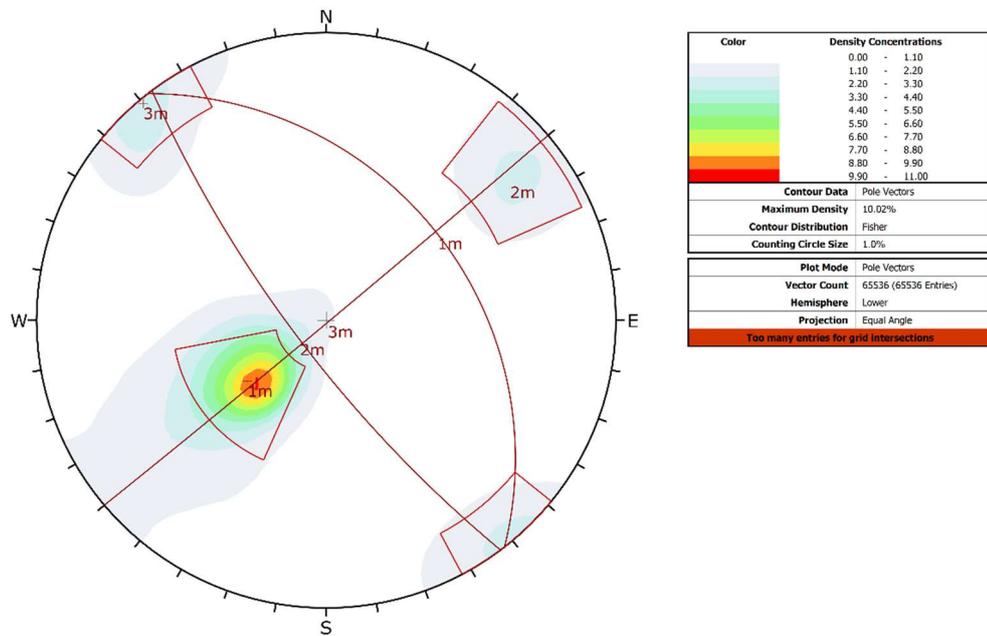


Figura 86 Stereogramma da nuvola Mavic

Tabella 15 Giacitura piani (Mavic)

ID Set	Dip Direction	Dip
1	232	52
2	53	13
3	320	1

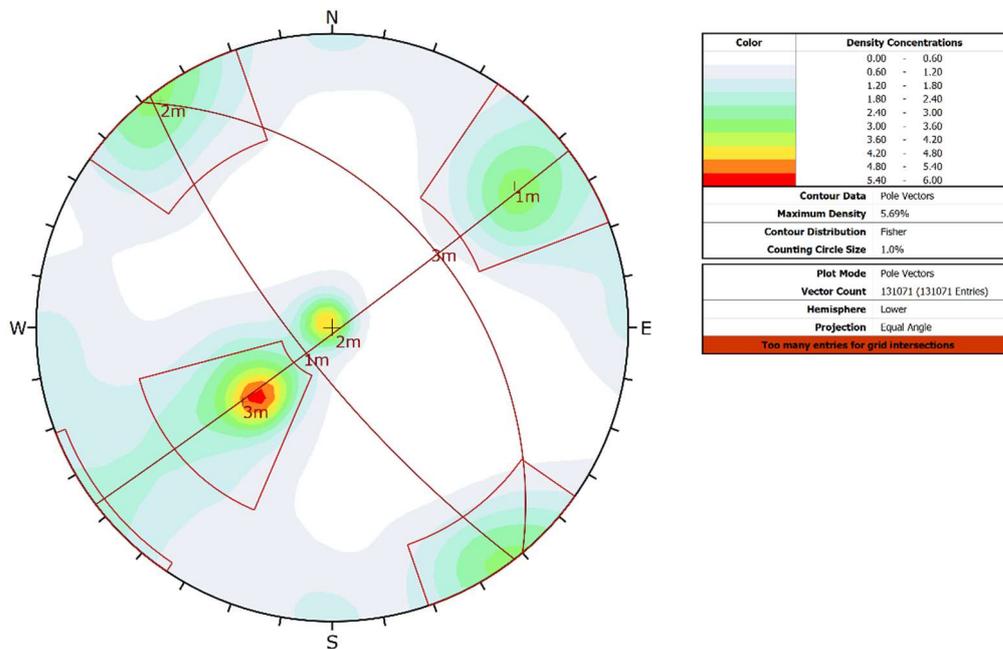


Figura 87 Stereogramma da nuvola Laser

Tabella 16 Giacitura piani medi (Laser)

ID Set	Dip Direction	Dip
1	52	14
2	323	2
3	230	47

Si nota come i quattro stereogrammi calcolati con Dips siano molto simili l'uno con l'altro e come siano state rilevate le stesse famiglie di discontinuità con le stesse giaciture a meno di $\pm 5^\circ$. Questo dimostra come le giaciture calcolate con il plugin Facets siano attendibili bensì non siano eliminabili dallo stereogramma le superfici di disturbo il che non li rende fruibili in maniera professionale. Sono invece molto utili i file in formato .csv esportabile da CloudCompare dove è presente l'elenco delle superfici individuate con relativa giacitura, questi dati infatti sono facilmente manipolabili e utilizzabili tramite Dips che presenta più funzionalità tecniche per la creazione di stereogrammi.

7.4.2. Spaziatura

La spaziatura dei giunti è la distanza perpendicolare tra due giunti all'interno di un set di discontinuità. "È ampiamente accettato che la spaziatura delle discontinuità è di grande importanza nella valutazione di un ammasso roccioso. La presenza stessa delle discontinuità riduce la resistenza di un ammasso roccioso e la loro spaziatura regola il grado di tale riduzione." (Bieniawski, 1973)

Per la misura della spaziatura si userà lo strumento di misura su 3DReshaper che permette di misurare la distanza tra due punti di una nuvola di punti. Le misure vengono effettuate seguendo degli stendimenti di lunghezza variabile. Gli stendimenti sono stati effettuati in modo da disporsi ortogonalmente alla famiglia di discontinuità formata da piani subverticali; gli stendimenti sono stati effettuati dunque con giacitura sub orizzontale parallelamente alla porzione superiore di parete come illustrato di seguito (Figura 89). Questo modo di effettuare la misura ha permesso di eliminare gli errori dovuti all'inclinazione dello stendimento che portano ad un errato valore di frequenza di rilievo (errore di Terzaghi graficamente rappresentato in Figura 88).

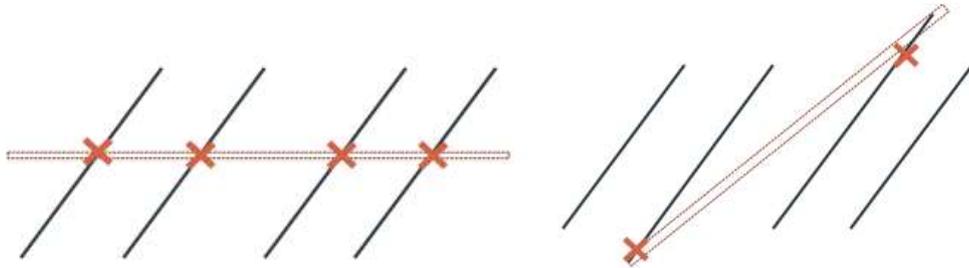


Figura 88 Errore di Terzaghi



Figura 89 Stendimento 1

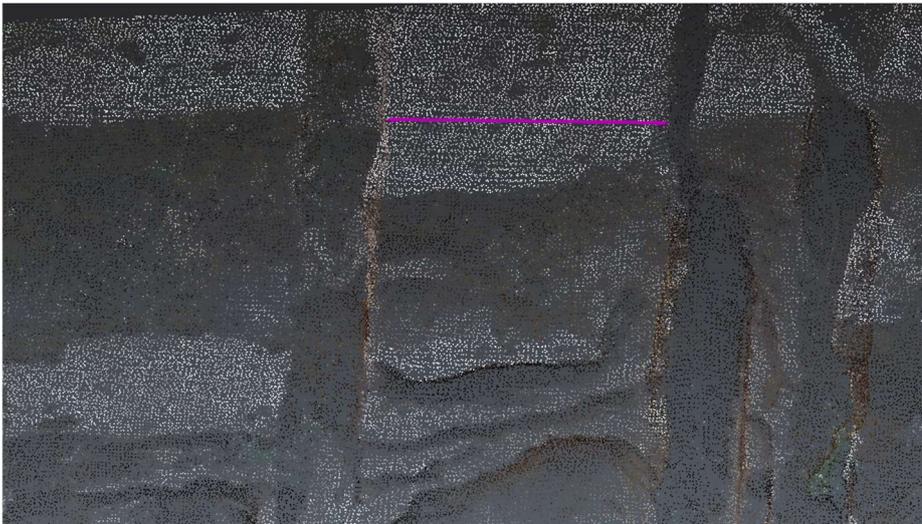


Figura 90 Esempio di misura della spaziatura



Figura 91 Stendimento 2

Di seguito si riportano i risultati dei 5 stendimenti effettuati nella parte alta della parete. Sono stati svolti solamente 5 stendimenti sulla nuvola poiché questo procedimento manuale è risultato piuttosto difficoltoso vista la complessità geometrica della parete.

Tabella 17 Stendimento 1 e 2

	stendimento 1 [m]	stendimento 2 [m]
	0,4	0,68
	0,89	1,63
	1,17	1,24
	1,71	0,34
somma	4,17	3,89
media	1,0425	0,9725

Tabella 18 Stendimento 3, 4 e 5

	stendimento 3 [m]	stendimento 4 [m]	stendimento 5 [m]
	0,38	0,17	0,29
	0,44	0,33	0,36
	0,81	0,54	0,45
	0,588	1,25	0,67
	0,47	0,52	0,89
somma	2,688	2,81	2,66
media	0,5376	0,562	0,532

La spaziatura media è calcolata come:

$$\bar{x} = \frac{L}{N} [m] = 0.73 m$$

Mentre la frequenza, definita come numero di tracce incontrate per unità di lunghezza, è calcolata come:

$$\lambda = \frac{N}{L} = \frac{1}{\bar{x}} \left[\frac{1}{m} \right] = 1.37 \frac{1}{m}$$

Si riportano ora i risultati su di un diagramma di frequenza dove sull'asse x sono riportate 10 classi di spaziatura ampie 0.154 m, mentre sull'asse y la percentuale rispetto al totale, del numero di spaziature rilevate.

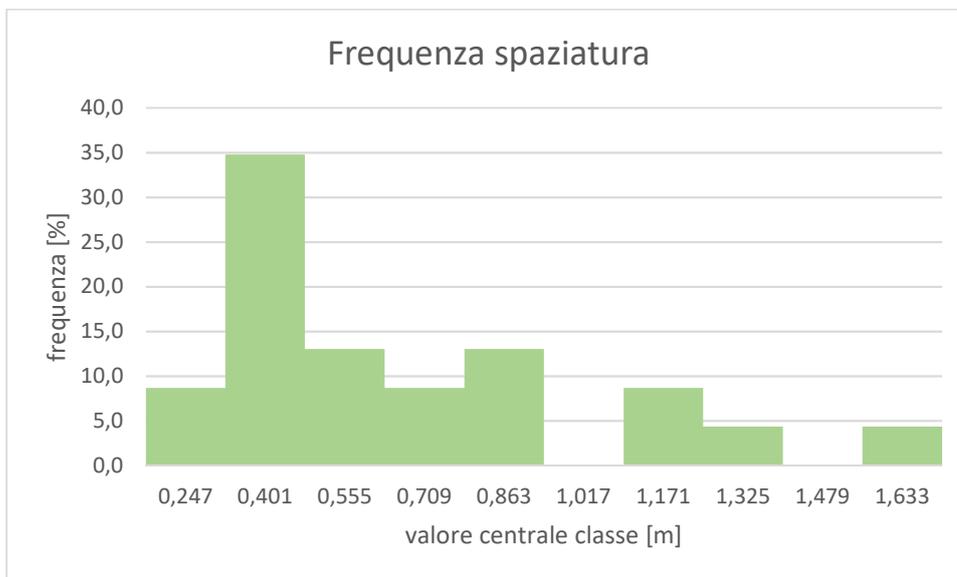


Figura 92 Diagramma di frequenza della spaziatura

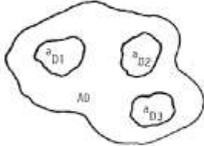
Il valore più frequente che si è rilevato è di 0.4 m.

7.4.3. Persistenza

La persistenza (o continuità) rappresenta l'estensione della discontinuità all'interno dell'ammasso roccioso. In realtà infatti, le discontinuità non hanno un'estensione infinita all'interno dell'ammasso ma attraversano anche ponti di roccia intatti. Esso è uno dei parametri più complicati da determinare.

Il valore della persistenza K è definito come il rapporto tra la somma delle aree discontinue e l'area totale di riferimento. K varia, quindi, tra 0 e 1, valori limite che rappresentano, rispettivamente, la situazione di roccia intatta e di discontinuità infinitamente estesa.

La persistenza può essere, in modo semplificato, quantificata osservando la lunghezza della traccia visibile dalla superficie esposta (Figura 93).

$$K = \lim_{AD \rightarrow \infty} \frac{\sum_i a_{Di}}{A_D}$$


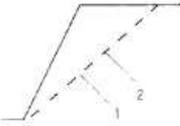
$$K = \lim_{L_S \rightarrow \infty} \frac{\sum_i l_{si}}{L_S}$$


Figura 93 Persistenza

Nel nostro caso risulta però più semplice e immediato utilizzare il metodo proposto da Zhang e Einstein (1998) che prevede la misura della persistenza ricorrendo ad un rilievo su finestra circolare che porta al calcolo della lunghezza media di traccia μ_l .

Il rilievo circolare effettuato è del tipo (Figura 94):

Dove:

N = n° totale tracce che hanno almeno una porzione nel cerchio

N_0 = n° tracce con entrambe le estremità censurate

N_2 = n° tracce con entrambe le estremità visibili

c = raggio della finestra circolare

La lunghezza media di traccia è calcolata come:

$$\mu_l = \frac{\pi(N + N_0 - N_2)}{2(N - N_0 + N_2)} c$$

La deviazione standard:

$$\sigma_l = \mu_l COV_l$$

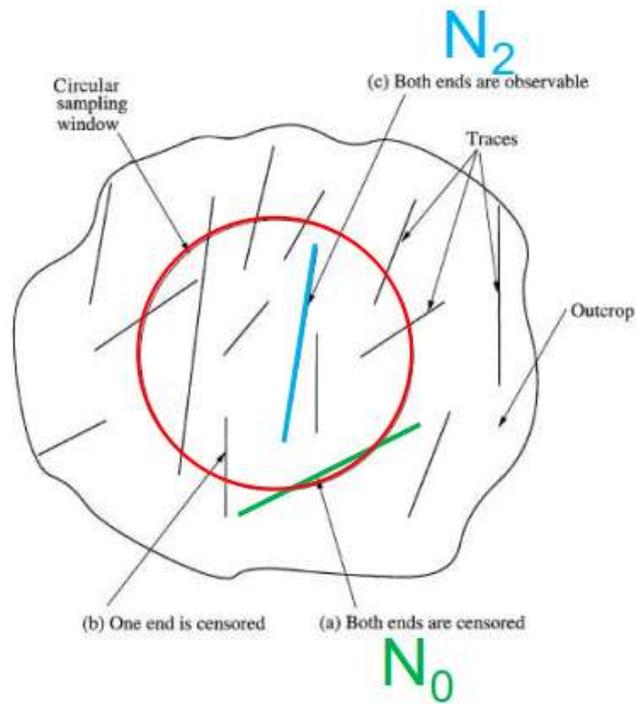


Figura 94 Rilievo su finestra circolare

Dove la covarianza COV_l è:

$$COV_l = \frac{\sigma_m}{\mu_m}$$

e μ_m è la lunghezza media delle tracce interne al cerchio e σ_m la sua deviazione standard.

Il rilievo effettuato è il seguente:

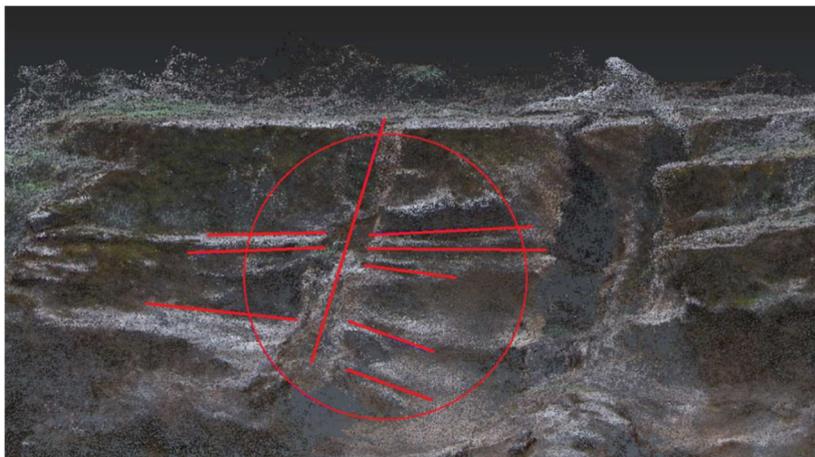


Figura 95 rilievo effettuato

I risultati ottenuti sono:

$$N = 9$$

$$N_0 = 0$$

$$N_2 = 3$$

$$c = 0.71 \text{ m}$$

Tabella 19 Lunghezza tracce interne al rilievo

Traccia n°	l interna [m]
1	1,178
2	0,39
3	0,38
4	0,25
5	0,74
6	0,8
7	0,34
8	0,45
9	0,34
μ_m	0,54
σ_m	0,30
COV_l	1,78

Risulta dunque: $\mu_l = 0.56 \text{ m}$ e $\sigma_l = 0.99$

7.4.4. Apertura

È possibile inoltre misurare l'apertura di alcune discontinuità utilizzando lo strumento di misura di 3DReshaper (vedi Figura 96). La precisione e la densità della nuvola però rende questo metodo difficoltoso in quanto le discontinuità molto chiuse non sono visibili nel dettaglio sulla nuvola.

Questo strumento può risultare efficace per l'utilizzo su parete con discontinuità con apertura nell'ordine del centimetro.



Figura 96 Esempio misura apertura

7.5. Caratteristiche volumetriche dei blocchi che possono staccarsi

Per calcolare le caratteristiche volumetriche dei blocchi che possono staccarsi si utilizza la formulazione proposta da Palmström (1996).

Questo metodo prevede la presenza di almeno 3 famiglie di discontinuità che intersecandosi vanno a formare dei blocchi. Le caratteristiche dei blocchi dipendono quindi dalla loro orientazione relativa e in particolare la dimensione degli stessi è influenzata dalla spaziatura e dalla persistenza caratteristica dei sistemi di giunti (Figura 97).

Il volume dei blocchi viene calcolato come:

$$V_b = \frac{S_1 S_2 S_3}{sen\gamma_{12} sen\gamma_{23} sen\gamma_{31}}$$

Dove S_1 , S_2 , S_3 sono la spaziatura caratteristica dei 3 sistemi di discontinuità presenti mentre γ_{12} , γ_{23} , γ_{31} sono angoli tra i piani medi dei sistemi.²⁸

²⁸ Palmström A., Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), *Tunnels and Underground Space Technology* 20, pp. 362-377, (2005).

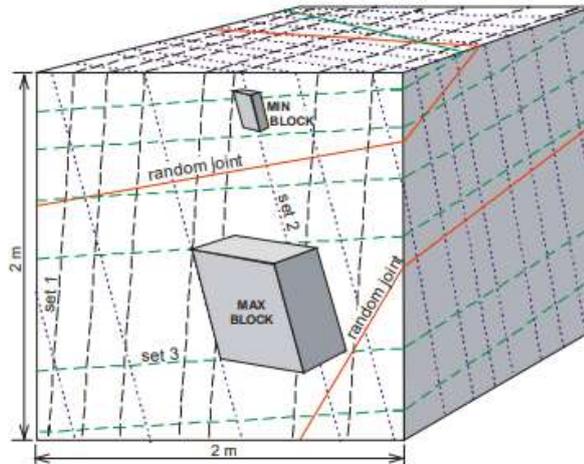


Figura 97 Presenza di 3 famiglie di discontinuità e generazione dei blocchi

Le tre famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso in esame hanno giacitura come riportato in Tabella 20 (questi valori sono stati ricavati come media dei risultati ottenuti con i quattro diversi metodi descritti nel paragrafo 7.4.1).

Tabella 20 Giacitura Set di Discontinuità

Set	Dip Direction	Dip
1 (stratigrafia)	54	13
2 (perpendicolari al pendio subverticali)	143	1
3 (paralleli al pendio sub verticali)	232	47

Gli angoli tra i piani medi dei sistemi vengono calcolati utilizzando il *software* Dips, facendo una media tra gli angoli calcolati sui quattro diversi stereogrammi e risultano essere:

- $\gamma_{12} = 89.2^\circ$
- $\gamma_{23} = 90.9^\circ$
- $\gamma_{31} = 58.3^\circ$

Le spazature caratteristiche dei tre sistemi di discontinuità invece sono state misurate utilizzando la metodologia descritta nel paragrafo 7.3 per quanto riguarda il set 1 e nel paragrafo 7.4.2 per quanto riguarda i set 2 e 3.

Le spazature caratteristiche sono le seguenti:

— $S_1 = 0.24 \text{ m}$

— $S_2 = 0.70 \text{ m}$

— $S_3 = 0.63 \text{ m}$

Il volume V_b risulta pari a 0.13 m^3 .

Seguendo la classificazione proposta da Palmström (Tabella 21) questi blocchi vengono classificati come Moderate avendo un volume compreso tra 10 e 200 dm^3 .

Tabella 21 Classificazione dei blocchi per volume secondo Palmström (1995)

	BLOCK VOLUME				
	Very small	Small	Moderate	Large	Very large
$V_b =$	$10\text{-}200 \text{ cm}^3$	$0.2\text{-}10 \text{ dm}^3$	$10\text{-}200 \text{ dm}^3$	$0.2\text{-}10 \text{ m}^3$	$>10 \text{ m}^3$

7.6. Restituzione stereoscopica

L'operazione di misurazione diretta sulla nuvola di punti è risultata macchinosa e piuttosto lenta, poiché per effettuare una misura è necessario cliccare sul punto ben preciso e scegliere accuratamente il secondo punto di riferimento. Per questo motivo si è realizzato un tentativo di restituzione stereoscopica mediante il *software* StereoCAD.

7.6.1. *Accenni teorici di stereoscopia*

La sensazione di tridimensionalità che abbiamo quando guardiamo un oggetto ci è fornita dalla presenza dei due occhi. Questi essendo distanziati tra loro (circa 6,5 cm) ci forniscono due immagini bidimensionali diverse che il cervello elabora in un'unica immagine in rilievo, permettendoci di stimare le dimensioni attraverso una valutazione differenziale relativa.

Questo effetto percettivo, che prende il nome di stereoscopia è legato all'angolo di convergenza degli assi visuali che dalle pupille si incontrano sull'oggetto osservato. Tale angolo prende il nome di parallasse stereoscopica angolare ed è tanto più piccolo quanto più distante è il punto che si sta osservando.

Il fenomeno della stereoscopia può essere ricreato artificialmente scattando due fotografie, fatte da punti diversi e opportunamente definiti, e osservandole in modo che ciascun occhio veda la sola che gli compete, attraverso delle opportune lenti. La visione in rilievo si avrà se le immagini saranno posizionate in modo che le coppie di raggi visuali omologhi si incontrino nello spazio e che gli occhi non siano sottoposti a sforzi di convergenza superiori a quelli che si avrebbero se si stesse guardando realmente l'oggetto.

L'immagine che si vedrà in generale si presenterà in diversa scala a causa della differenza tra la distanza principale dell'occhio e quella della camera e dalla diversa base. La visione ottenuta rappresenta il modello ottico.²⁹

²⁹ http://rilievo.stereofot.it/studenti/aa04/marzocca/fotog/f_rest.htm

7.6.2. Il software StereoCAD

StereoCAD è un software pensato per rendere agile e moderna la fruizione stereoscopica delle immagini da drone. È possibile infatti eseguire intuitivamente ispezioni immersive e misure 3D di grande accuratezza. Al tempo stesso sono presenti comandi CAD evoluti, ideali per la foto-restituzione cartografica e architettonica professionale.³⁰

StereoCAD permette di importare i dati scaricati direttamente da Photoscan. Sono necessari come input: le immagini contro distorte (in questo caso sono state utilizzate 5 immagini scattate dal drone), il file .out di orientamento esterno dei fotogrammi e il “camera passport”. Quest’ultimo viene però generato direttamente da StereoCAD inserendo manualmente i dati relativi alla camera nella finestra riportata (Figura 98):

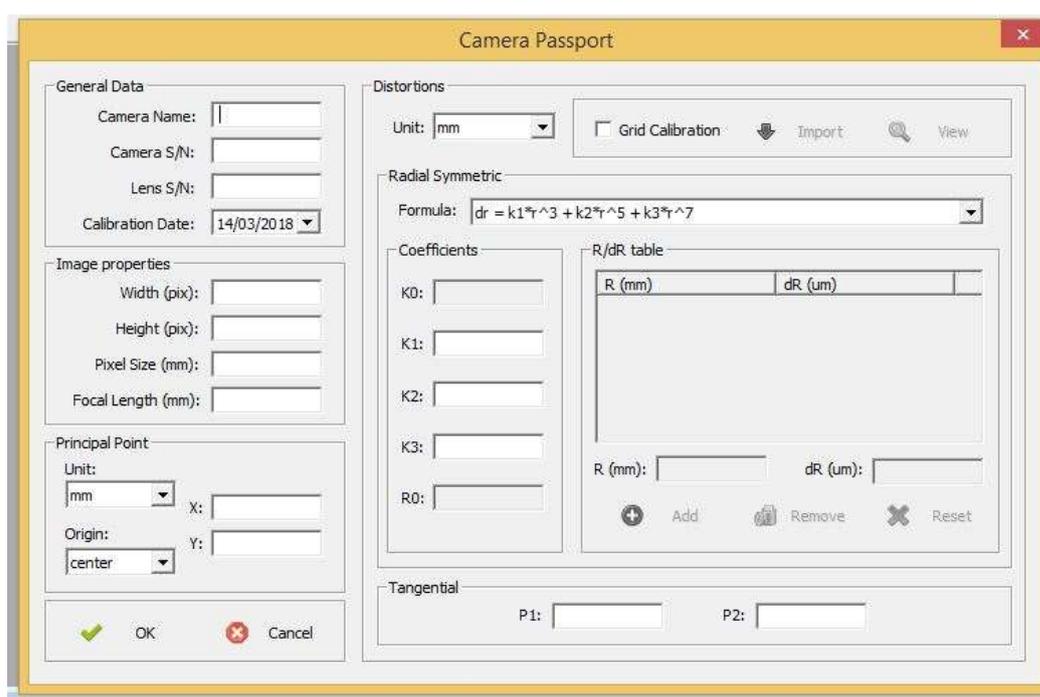


Figura 98 Camera Passport in StereoCAD

Verranno dunque inseriti:

- Dimensioni del *pixel*

³⁰ Menci *software*, StereoCAD Manuale d'Uso, ver. 2.2.1 - Rev. 1, (2016).

- Dimensione in *pixel* dei fotogrammi
- Lunghezza focale della camera

A questo punto il software visualizza i punti di presa dei fotogrammi e la nuvola sparsa di punti generata.

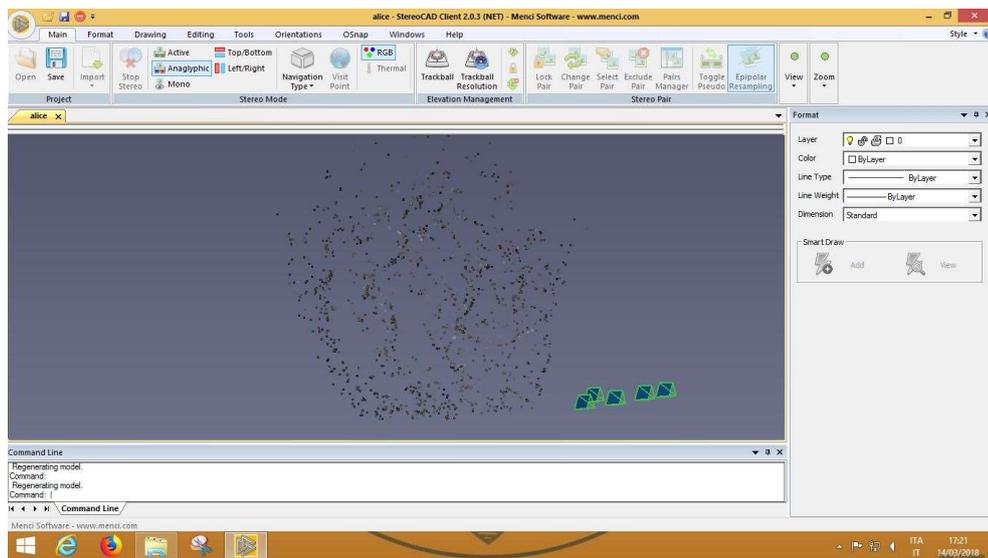


Figura 99 Orientamento dei fotogrammi e nuvola sparsa

Ora, facendo doppio click sulla nuvola si visualizza, utilizzando gli opportuni occhiali anaglifici con lenti rosse e blu, il modello ottico tridimensionale della porzione di parete catturata dai fotogrammi:

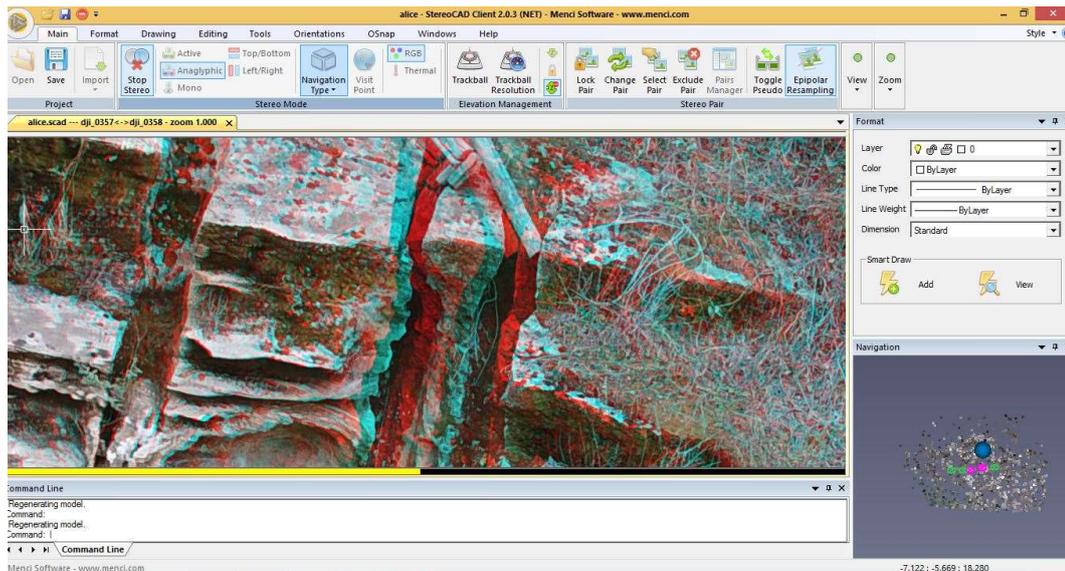


Figura 100

Immagine anaglificata

Utilizzando poi il comando distanza si può misurare precisamente la distanza tra due punti qualsiasi del fotogramma e questo è senz'altro il vantaggio di questo tipo di restituzione.

Di seguito si riporta un esempio di misurazione di spaziatura e di spessore degli strati (Figura 101, Figura 102):

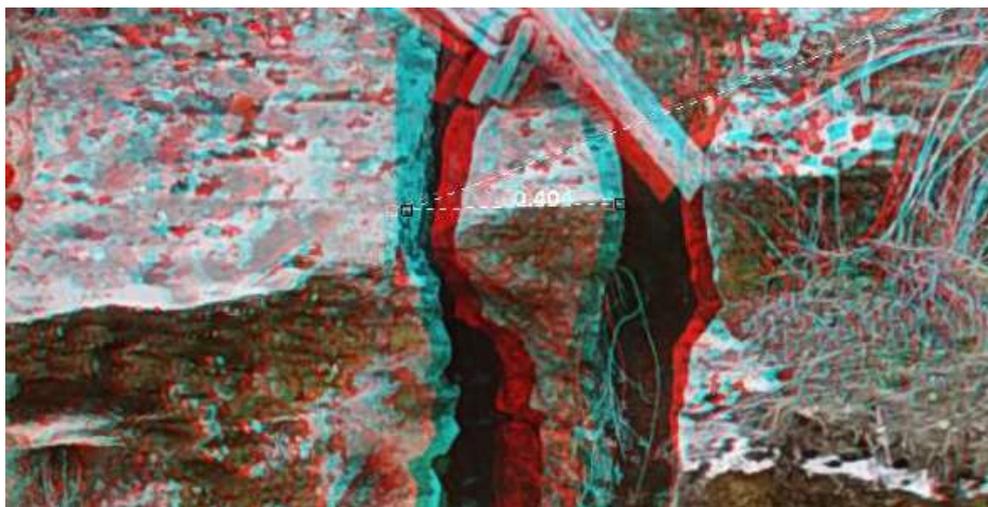


Figura 101 Misura d'esempio: spaziatura

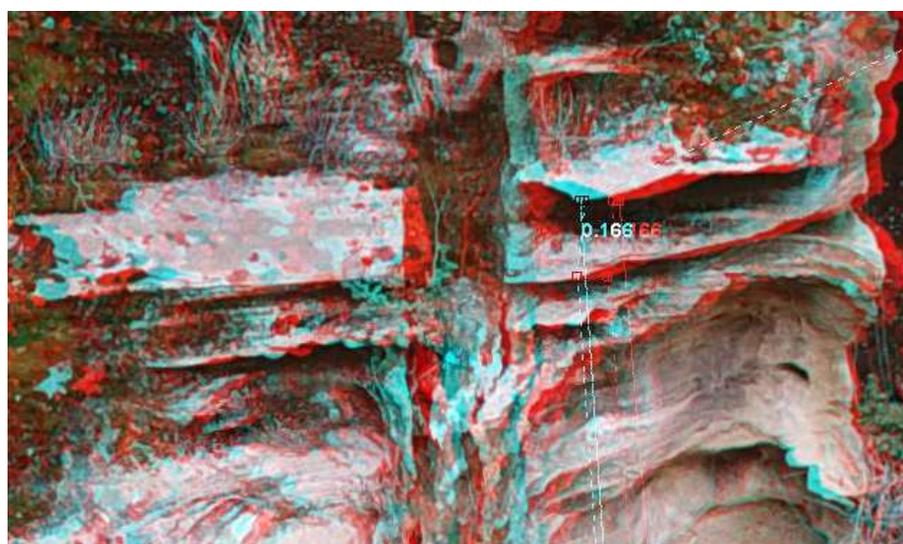


Figura 102 Misura d'esempio: spessore degli strati

Sicuramente questo metodo di misura è risultato più preciso in quanto non è necessario cliccare precisamente su un punto (come fatto utilizzando 3DReshaper), ma essendo

possibile cliccare in qualunque parte del fotogramma la distanza misurata coincideva esattamente con quella effettivamente da misurare.

Lo svantaggio sta però nel fatto di non poter misurare automaticamente la giacitura dei piani presenti in parete, cosa invece attuata con CloudCompare con ottimi risultati.

7.7. Confronto tra i diversi metodi

Al fine di effettuare un confronto chiaro tra i diversi metodi di rilievo svolti riporto la seguente tabella che mette in paragone accuratezza, tempo di misura e completezza del risultato (A, T e C in tabella) nei casi specifici di misura di giacitura, spaziatura, persistenza e apertura. Inoltre, l'ultima colonna è dedicata al confronto sulla sicurezza in cui si svolge il rilievo.

	Giacitura			Spaziatura/ Persistenza/ Apertura			Sicurezza
	A	T	C	A	T	C	
Rilievo tradizionale	++	-	-	++	-	-	--
Laser Scanner	++	+	++	+	+	-	++
Fotogrammetria aerea e terrestre con nuvola di punti	++	++	++	++	+	+	++
Fotogrammetria aerea e terrestre con stereoscopia	-	+	+	++	++	++	++

Come riportato in tabella, si è notato come il rilievo mediante fotogrammetria aerea e terrestre, utilizzando la nuvola di punti, abbia fornito degli ottimi risultato per il calcolo della giacitura in termini di accuratezza, tempo e completezza. Lo stesso non si può dire dell'uso della fotogrammetria con stereoscopia in quanto non è stato possibile calcolare in modo efficace la giacitura dei piani presenti, nonostante essi fossero ben individuabili.

Il rilievo con laser scanner ha dato dei buoni risultati per il calcolo della giacitura mentre per il calcolo di spaziatura, apertura e persistenza, si sono riscontrati dei problemi in quanto la nuvola presentava molti buchi e non fosse dunque agevole svolgere le misurazioni.

Dal punto di vista della sicurezza invece la metodologia di rilievo tradizionale è sicuramente la meno sicura, in quanto le tecniche di rilievo a distanza non necessitano la presenza di operatori specializzati direttamente in parete.

7.8. Fruizione dei risultati in ambiente GIS

Un'applicazione possibile è l'inserimento dei risultati ottenuti all'interno di un GIS (Geographic Information System).

All'interno di un GIS, utilizzando il software ArcGIS, è possibile inserire delle nuvole di punti in formato .LAS rendendole in questo modo disponibile ad un maggior numero di utenti. È inoltre possibile esportare, con il software CloudCompare, in formato shape file, le superfici identificate col plugin Facets.

Rendendo disponibili questi dati su una piattaforma come un GIS, si potrà avere traccia nel tempo degli spostamenti che avvengono nell'ammasso roccioso, qualora vengano fatti ulteriori rilievi a distanza di tempo.

Questa implementazione è sicuramente molto utile in un contesto come quello italiano dove il rischio di crolli in roccia è particolarmente elevato.

La creazione di un database con le diverse configurazioni di una certa parete rocciosa nel tempo può fornire uno strumento accessibile da più enti per la mitigazione del rischio e per lo studio di tale zona.

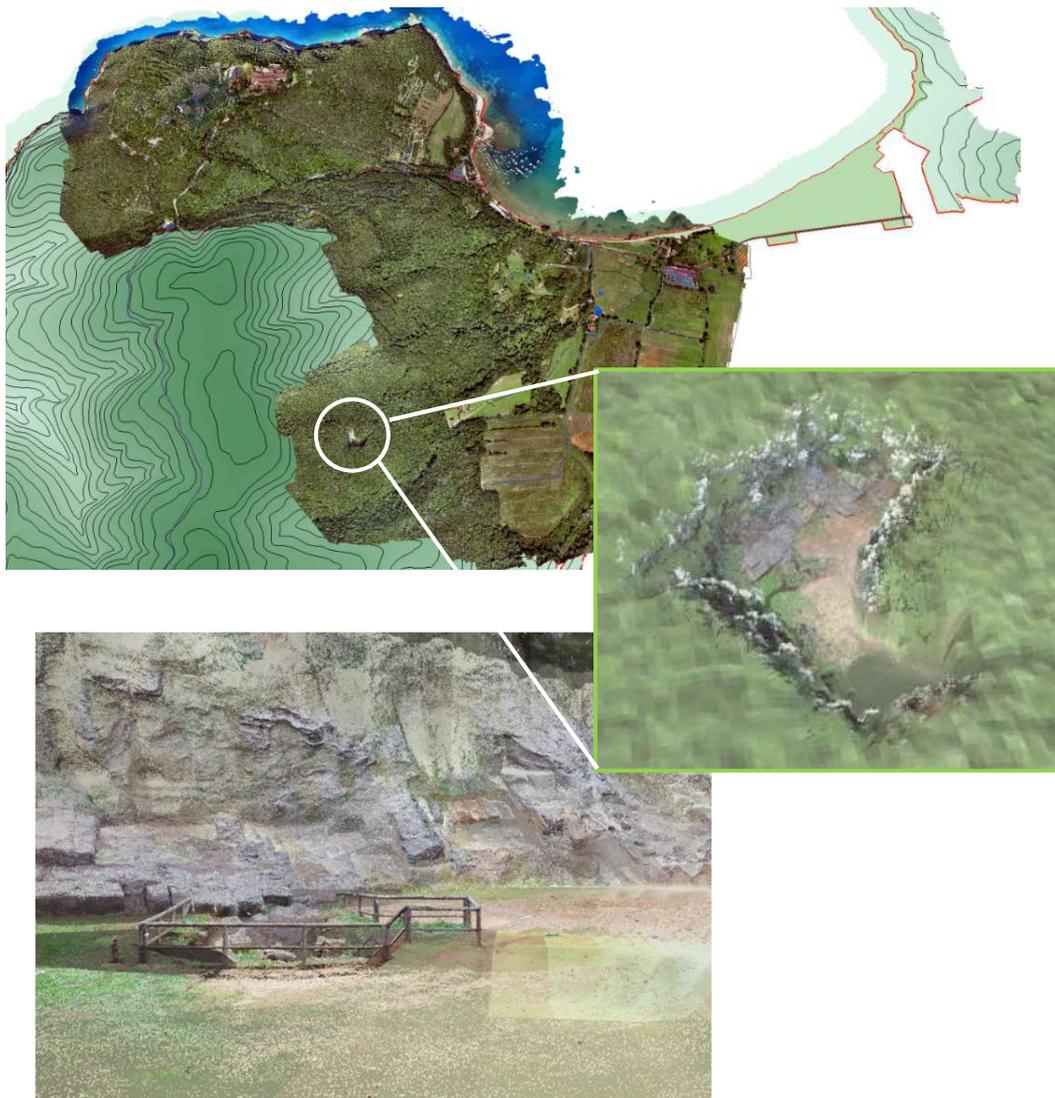


Figura 103 File .LAS all'interno di un GIS³¹

³¹ GIS del Parco archeologico di Baratti e Populonia creato da Elena Salvatore.

8. Conclusioni

A conclusione di questa tesi si può affermare di aver effettuato uno studio completo sull'utilizzo degli strumenti della geomatica per la descrizione dal punto di vista geotecnico di una parete rocciosa.

Si può innanzitutto osservare come il plugin Facets di CloudCompare, utilizzato per l'identificazione delle superfici e per il calcolo della loro giacitura, sia uno strumento molto valido a questo scopo. Per utilizzarlo in maniera più efficace è però necessario che la nuvola di punti sia ripulita dalla vegetazione, operazione che si è rivelata molto complicata, essendo la parete molto complessa dal punto di vista geometrico. Per filtrare la vegetazione è stato utilizzato l'algoritmo RANSAC sempre tramite il *software* CloudCompare. Questo metodo è stato efficace sulle due nuvole dense ottenute da acquisizione fotogrammetrica ma non è risultato altrettanto efficace sulla nuvola laser, la quale è stata ripulita manualmente. Questo problema è dovuto al fatto che la nuvola laser presentasse diversi buchi e non avesse una densità omogenea, specialmente nella zona di parete su cui mi sono concentrata.

Il rilievo fotogrammetrico è risultato dunque più adeguato in questa particolare circostanza, mentre il laser scanner potrebbe risultare sicuramente più utile per rilevare pareti con una geometria più semplice.

I rilievi che sono stati svolti sulle nuvole fotogrammetriche e laser hanno fornito risultati soddisfacenti per quanto riguarda la misurazione di spaziatura, persistenza e giacitura, invece, per quanto riguarda l'apertura, non sono risultate abbastanza dense.

È importante sottolineare come, esportando gli shape file delle superfici calcolate con Facets di CloudCompare, queste possano essere inserite all'interno di un GIS (*Geographic Information System*) e in questo modo possano essere rese fruibili a diversi utenti. In questa maniera si potrà avere traccia nel tempo degli spostamenti che avvengono nell'ammasso roccioso, qualora vengano fatti ulteriori rilievi a distanza di tempo. Questa implementazione è sicuramente molto utile in contesti dove il rischio di crolli in roccia è più elevato, dove la creazione di un database con le diverse

configurazioni di una certa parete rocciosa nel tempo può fornire uno strumento accessibile da più enti per la mitigazione del rischio e per lo studio di tale zona.

È stato infine eseguito un tentativo di misura anche utilizzando la visione stereoscopica tramite il software StereoCAD la quale, sfruttando la visione tridimensionale della parete, ha permesso di effettuare alcune di queste misure in modo più semplice e veloce, in particolare per quanto riguarda spaziatura e spessore degli strati.

Entrambe le metodologie di rilievo (utilizzando 3DReshaper e StereoCAD) sono comunque delle procedure manuali: sono quindi soggette a errori grossolani e richiedono piuttosto tempo. In futuro sarebbe auspicabile lo sviluppo e la commercializzazione di un software (come già proposto da Ferrero³²) che integri le tecniche di rilievo a distanza con i metodi di rilievo geotecnico, automatizzando questi procedimenti manuali.

Questa tipologia di rilievi sono ancora ad oggi svolti manualmente in parete da geologi esperti in condizioni lavorative pericolose: l'utilizzo di tecniche di rilievo a distanza diminuirebbe il rischio a cui gli operatori sono soggetti e l'informatizzazione dei dati raccolti fornirebbe un grande supporto per la mitigazione del rischio idrogeologico.

³² Ferrero A. M., Forlani G., Migliazza M. R., Roncella R., Segalini A., La fotogrammetria e il laser scanner per studio pericolosità di pendii in roccia, Corso di formazione e di aggiornamento professionale, Ordine degli ingegneri della provincia autonoma di Bolzano.

9. Riferimenti

9.1. Bibliografia

AA.VV., Geomatica, le radici del futuro. Tributo a Sergio Dequal e Riccardo Galetto, in Manzino A., Spalla A. (a cura di). Mestre (VE), Edizioni SIFET Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia, (2011).

Adorno V., Barnobi L., La Rosa F., Leotta A., Paratore M., Contributo della tecnologia laser scanner e della termografia IR nella caratterizzazione geomeccanica di un costone roccioso, *Atti 13a Conferenza Nazionale ASITA*, (2009).

Alba M., Barazzetti L., Roncoroni F., Scaioni M., Filtering vegetation from terrestrial point clouds with low-cost near infrared cameras, *European Journal of Remote Sensing*, 43 (2): 55-75 (2011).

Alba M., Roncoroni F., Scaioni M., Monitoraggio di pareti rocciose con terrestrial laser scanning, *Atti 13° Conferenza Nazionale ASITA*, Bari, (2009)

Angeli S., Battino A., Lingua A., Maschio P., Report attività 3, Ricerca di soluzioni per video ispezione e monitoraggio. Scenari operativi e soluzioni commerciali, Politecnico di Torino, (2017).

Bartolucci D., Principi di laser scanning 3D, Palermo, Dario Flaccovio Editore, (2009).

Carrivick J. L., Smith M. W., Quincey D. J., Structure from motion in geoscience, *Wiley Blackwell*, (2016).

Chiabrando F., Donadio E., Rinaudo F., *SfM* for orthophoto generation: a winning approach for cultural heritage knowledge, 25th International CIPA Symposium 2015, Taipei, Taiwan, (2015)

Cina A., Materiale didattico del corso di Geomatica, Politecnico di Torino, (2016).

Colucci E., Architettura e natura di paesaggi archeologici, analisi spaziali integrate in ambiente WEB-GIS per la conservazione e la comunicazione della memoria storica, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, rel. A. Spanò. F. Chiabrando, D. Brocchini, F. Noardo, (2017).

Comune di Piombino, Provincia di Livorno, Piano particolareggiato del parco archeologico di Baratti e Populonia, Tavola G. 11, (2011).

Cortemiglia G.C., Mazzanti R., Parea C., Geomorfologia della Baia Baratti (Livorno-Toscana) e della sua spiaggia, *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, (1983).

De Biagi V., Napoli M. L., Barbero M., Peila D., Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size, In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 17 n. 1, pp. 103-113. - ISSN 1684-9981, (2017).

De Biagi V., Barbero M., Napoli M. L., Peila D. Block volume-frequency law for risk analysis: an example. In: *6th Interdisciplinary Rockfall Protection RocExs 2017*, Barcelona, 22-24 May 2017. pp. 19-22, (2017).

Faro, Scene 5.3, Manuale dell'utente, (2014).

Ferrero A. M., Forlani G., Migliazza M. R., Roncella R., Segalini A., La fotogrammetria e il laser scanner per studio pericolosità di pendii in roccia, *Corso di formazione e di aggiornamento professionale, Ordine degli ingegneri della provincia autonoma di Bolzano*.

Förstner W., Wrobel B. P., Photogrammetric Computer Vision, Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction, *Springer International Publishing*, Switzerland, (2016).

Gruppo di lavoro del Politecnico di Torino DIATI e DISEG, Buone pratiche da applicare per la gestione dei fenomeni di crollo in roccia derivanti dall'analisi condotta sullo state of art di riferimento, *Politecnico di Torino* (2015).

Hoek, E., Practical Rock Engineering, Rocscience Inc, (2007).

Hoek, E., Bray, J. W., Rock Slope Engineering, Institution of Mining and Metallurgy, (1981).

Karl Kraus, Fotogrammetria, Vol.1 - Teoria e Applicazioni. Libreria Universitaria Levrotto & Bella, (1994).

Lerma J. L., Navarro S., Cabrelles M., Villaverde V., Terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry for 3D archaeological documentation: The Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. In: *Journal of Archaeological Science* 37 (2010) pp. 499–507, (2009).

- Loreti M., Elementi di Teoria degli Errori, Corso di Esperimentazioni di Fisica I, Dipartimento di Fisica di Padova
- Luhman T., Robson S., Kyle S., Harley I., Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications, *Whittles publishing*, (2006).
- Manzino A., Materiale didattico del corso di Geomatica, Politecnico di Torino, (2016).
- Manzino A., Dispense di Topografia, Materiale didattico, Politecnico di Torino (2013).
- Medic T., Holst C., Kuhlmann H., Towards System Calibration of Panoramic Laser Scanners from a Single Station, *Sensors*2017,17, 1145, www.mdpi.com/journal/sensors (2017)
- Menci software, StereoCAD Manuale d'Uso, ver. 2.2.1 - Rev. 1, (2016).
- Palmstrom A., Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD), *Tunnels and Underground Space Technology* 20, pp. 362-377, (2005).
- Salvini R., Francioni M., Riccucci S., Bonciani F., Callegari I. Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola–Iselle railway, the Italian Alps, *Geomorphology, journal homepage: www.elsevier.com/locate/geomorph*, (2013).
- Santana D., Corominas J., Mavrouli O., Garcia-Sellés D., Magnitude–frequency relation for rockfall scars using a Terrestrial Laser Scanner, *Geomorphology, journal homepage: www.elsevier.com/locate/geomorph*, (2012).
- Scaioni M., Alba M., Understanding changes and deformations on multi-temporal rock face point clouds, *Papadimitis N., Pierrot-Deseilligny M., Mallet C., Tournaire O. (Eds), LAPRS, Vol. XXXVIII, Parte 3°, Saint-Mandé, France*, (2010).
- Schnabel R., Wahl R., Klein R., Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, *Computer Graphics Forum, Volume 26, Issue 2, pp. 214–226*, (2007).
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology, journal homepage: www.elsevier.com/locate/geomorph*, (2012)

9.2. Sitografia

Regione Toscana, <http://www.regione.toscana.it/web/geoblog/-/open-geodata>.

I Parchi della Val di Cornia, <http://www.parchivaldicornia.it/>

http://www.etruschi.name/populonia/necropoli_grotte_03_it.html

<http://www.bazaretrusco.it/turismo/suvereto/foto/Parco%20Montioni/Parco%20Montioni%2006.JPG>

<https://www.enjoytoscana.it/parchi-in-toscana>

<https://www.terradeglietruschi.it/guide-mare-toscana/musei/musei-della-rocca-di-campiglia-marittima.aspx>

<https://www.codeproject.com/Articles/619039/Bag-of-Features-Descriptor-on-SIFT-Features-with-O>

<https://lasette.wordpress.com/2015/09/05/la-via-delle-cave-e-la-necropoli-delle-grotte/>

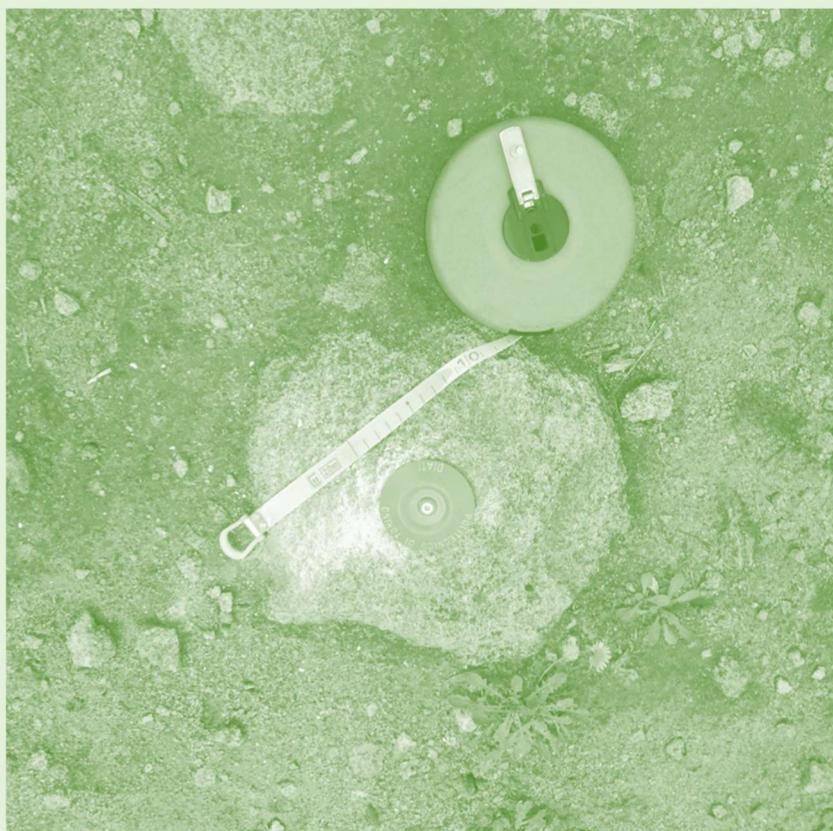
PennState College of Earth and Mineral Science, Components of the Carrier Phase Observable <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1729>.

<http://crsouza.com/2010/06/02/random-sample-consensus-ransac-in-c/>

http://rilievo.stereofot.it/studenti/aa04/marzocca/fotog/f_rest.htm

10. Allegati

10.1. Monografie dei vertici





Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: Baratti - Località Le Grotte

Data: 28/09/2017

Politecnico di Torino

Operatori: Alice Lazzarato

Monografia di vertice della rete principale di inquadramento

Vertice: 4000

Planimetria di base



Disegno monografia vertice



Tipo di materializzazione: *Tassello rosso con vite+dischetto
POLITO*

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): *cellulare
Huawei P9 Lite di Alice Lazzarato*

Strumento di rilievo: *Antenna GNSS*

Altezza strumentale: *1.518 m (inclinata)*

Strumento di misura (uncino/rotella): *rotella*

Tipo di antenna: *Geomax Zenith 2011*

Data: *28/09/2017*

Ora di acquisizione: *11.02*

Ora fine acquisizione: *12.37*

Coordinate compensate: E=622637.2154 m

N=4759831.6514 m Q=145.89 m

Nome sistema di coordinate: UTM WGS 84 F32

Coordinate locali: E=2637.2154 m N=831.6514 m

Q=145.89 m



Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: Baratti - Località Le Grotte

Data: 28/09/2017

Politecnico di Torino

Operatori: Alice Lazzarato

Monografia di vertice della rete principale di inquadramento

Vertice: 5000

Planimetria di base

Disegno monografia vertice



Tipo di materializzazione: *Chiodo rosso + dischetto Faynot industries*

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): *cellulare di Elisabetta Colucci*

Strumento di rilievo: *Multistation*

Altezza strumentale: *1.535 m (inclinata)*

Strumento di misura (uncino/rotella): *rotella*

Data: *28/09/2017*

Coordinate compensate (StarNet): E=622651.1412 m
N=4759855.7840 m Q= 99.4391 m (altezza geoidale impostata a 90 m)

Nome sistema di coordinate: UTM WGS 84 F32

Coordinate locali: E=2651.1412 m N=855.7840 m

Q=99.4391 m



Indagini geomatiche e geofisiche

Luogo: Baratti - Località Le Grotte

Data: 28/09/2017

Politecnico di Torino

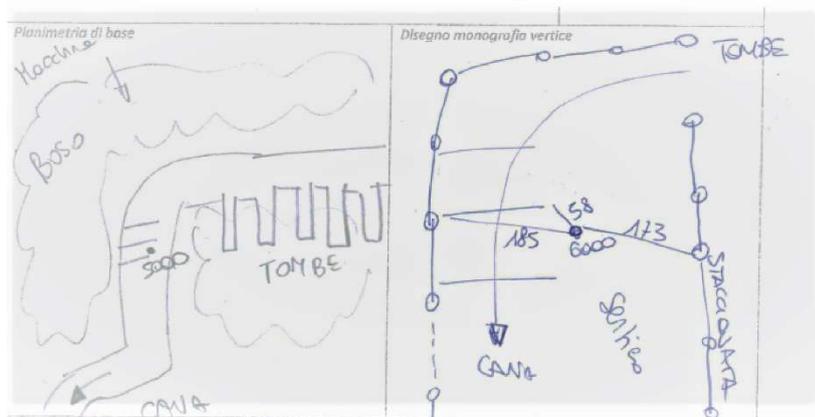
Operatori: Alice Lazzarato

Monografia di vertice della rete principale di inquadramento

Vertice: 6000

Planimetria di base

Disegno monografia vertice



Tipo di materializzazione: *vite con cerchio rosso*

Acquisizione foto (dispositivo e proprietario): *cellulare di Elisabetta Colucci*

Strumento di rilievo: *Prisma*

Altezza strumentale: *1.605 m (corretta)*

Strumento di misura (uncino/rotella): *rotella*

Data: 28/09/2017

Coordinate compensate (StarNet): E= 622652.3376 m
N=4759870.8575 m Q= 96.0084 m (altezza geoidale impostata a 90 m)

Nome sistema di coordinate: UTM WGS 84 F32

Coordinate locali: E=2652.3376 m N=870.8575 m
Q=96.0084 m

10.2. Report Leica Geo Office



10.3. Report StarNet



10.4. Report Photoscan

