

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Tesi di Laurea Magistrale

**CONFRONTO TRA TECNICHE DI REMOTE
SENSING PER LA CARATTERIZZAZIONE DI
UN AMMASSO ROCCIOSO PRESSO LE GOLE
DI SCASCOLI, LOIANO (BO)**

Candidato:

Nicola Carretta

Relatore:

Prof. Matteo Berti

Correlatori:

Dott. Gianluca Benedetti

Prof. Marco Dubbini

Dott. Stefano Ferro

Sessione Ottobre 2016

Anno Accademico 2015-2016

Alle persone che mi hanno sostenuto in questo percorso,
che continueranno a farlo nonostante tutto,
traendo gioia dai miei traguardi,
mostrando pazienza per i miei errori
e credendoci forse più di quanto io stesso non faccia.

Grazie.

SOMMARIO

RIASSUNTO	9
1. INTRODUZIONE	10
1.1 SCOPO DEL LAVORO	10
1.2 FASI DEL LAVORO	11
1.3 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	12
2 FENOMENI DI CROLLO NELL'AREA DI SCASCOLI	13
2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO	13
2.2 GEOMORFOLOGIA GENERALE	19
2.3 EVENTO 2002	22
2.4 EVENTO 2005	24
3 RILIEVO FOTOGRAMMETRICO AEREO DELLA SCARPATA ATTUALE TRAMITE UAV	27
3.1 METODOLOGIA UTILIZZATA	27
3.1.1 <i>Computer Vision</i>	27
3.1.2 <i>La fotogrammetria digitale</i>	27
3.1.3 <i>SFM, Structure from Motion</i>	31
3.1.4 <i>Scala di restituzione e GSD</i>	36
3.1.5 <i>Mezzi aerei a pilotaggio remoto</i>	37
3.1.6 <i>GNSS (Global Navigation Satellite System)</i>	39
3.1.7 <i>Software per processamento dati fotogrammetrici</i>	44
3.2 CAMPAGNA DI MISURA	45
3.2.1 <i>Rilievo con APR professionale UAV1</i>	48
3.2.2 <i>Rilievo con APR amatoriale UAV2</i>	50
3.3 ELABORAZIONE DATI	51
3.3.1 <i>Dataset UAV1</i>	51
3.3.2 <i>Dataset UAV2</i>	57
3.3.3 <i>Dati di output</i>	59
3.4 RILIEVO LASER SCANNER DI BIBLIOGRAFIA (POST CROLLO 2005)	61
4 CONFRONTO RILIEVO UAV CON RILIEVI TLS E GEOMECCANICO	61
4.1 PENDENZE DELLA PARETE	62
4.2 INDICE DI ASPERITÀ	64
4.3 POSIZIONE DELLA POINT CLOUD	68
4.4 ORIENTAZIONE DEI PIANI DI DISCONTINUITÀ	78
4.4.1 <i>Rilievo geomeccanico manuale</i>	79
4.4.2 <i>Rilievo digitale delle giaciture</i>	81
4.5 VOLUME DEGLI AGGETTI	86
4.6 CINEMATISMI DI INSTABILITÀ	89
4.6.1 <i>Scivolamento planare</i>	91
4.6.2 <i>Scivolamento di cunei</i>	92
4.6.3 <i>Ribaltamento</i>	93
4.7 MODELLAZIONE NUMERICA DEI FENOMENI DI CROLLO	95
4.7.1 <i>Teoria dei crolli</i>	95
4.7.2 <i>Modellazione numerica dei fenomeni di crollo</i>	100
4.7.3 <i>Strumenti per la modellazione</i>	101
4.7.4 <i>Rocfall (analisi dei crolli in 2D)</i>	102
4.7.5 <i>Coefficienti di restituzione</i>	103

4.7.6	<i>Calibrazione e analisi</i>	104
4.7.7	<i>Endpoint</i>	105
4.7.8	<i>Energia</i>	106
4.7.9	<i>Confronto delle altezze</i>	111
4.7.10	<i>Passo di campionamento</i>	112
4.7.11	<i>Rotomap (analisi dei crolli in 3D)</i>	114
5	CONCLUSIONI	119
6	BIBLIOGRAFIA	122

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1.	LOCALIZZAZIONE MULTI-SCALA DELL'AREA DI STUDIO IN CUI È INDICATA LA PROVINCIA E I COMUNI DI PERTINENZA E NEL RIQUADRO UNA PANORAMICA DI DETTAGLIO OTTENUTA DALLA SOVRAPPOSIZIONE DEL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO ATTUALE ALLE ORTOFOTO AGEA 2012.	12
FIGURA 2.	SCHEMA TETTONICO GENERALE CHE ILLUSTRA LE DINAMICHE COMPRESSIVE RESPONSABILI DELLA CHIUSURA DELL'OCEANO LIGURE - PIENONTENSE A PARTIRE DALL'OLIGOCENE MEDIO, E LA CONSEGUENTE FORMAZIONE DI UNA CATENA A FALDE EST-VERGENTE (RICCI LUCCHI, 1986).....	13
FIGURA 3.	A) PRINCIPALI LINEAMENTI TETTONICI APPENNINICI TRA CUI SPICCA LA LINEA DEL SILLARO CHE METTE A CONTATTO LE UNITÀ LIGURIDI CON QUELLE DEL BACINO UMBRO MARCHIGIANO. B) SCENARIO TETTONICO IPOTIZZATO LUNGO LA LINEA DEL SILLARO, IN CUI I PROCESSI DI DENUDAZIONE AGENTI SULLE UNITÀ DEL COMPLESSO LIGURE DAVANO LUOGO A PROCESSI DEPOSIZIONALI DI AMBIENTE PROFONDO NEL PROSPICIENTE BACINO DI NEOFORMAZIONE DURANTE TUTTO IL CORSO DEL PLIOCENE (RICCI LUCCHI, 1982).	14
FIGURA 4.	ESTRATTO DEL FOGLIO 237 DELLA CARTA GEOLOGICA IN SCALA 1:50000 E RELATIVO SCHEMA TETTONICO-STRUTTURALE IN CUI IN ROSSO È EVIDENZIATA L'AREA MOSTRATA IN CARTA, DA CIÒ SI EVINCE COME IL TORRENTE SAVENA SCORRA INCASSATO TRA LE UNITÀ APPARTENENTI AL DOMINIO EPILOGURE; È POSSIBILE DISTINGUERE ANCHE L'ENORME DEPOSITO DI FRANA DGPV DENOMINATA "GRANDE FRANA DI SCASCOLI".	15
FIGURA 5.	STRALCIO DELLA CARTOGRAFIA GEOLOGICA IN SCALA 1:10000 FORNITA DALLA RER TRAMITE SERVIZIO DIGITALE WMS.	15
FIGURA 6.	SEZIONE STRATIGRAFICA SCHEMATICA CHE ILLUSTRA I RAPPORTI GEOMETRICI TRA LE FORMAZIONI DI ANTOGNOLA, CONTIGNACO E GRUPPO DI BISMANTOVA (PAPANI ET AL., 2004).	16
FIGURA 7.	SPACCATO STRATIGRAFICO SCHEMATICO DEI RAPPORTI DI DISCONTINUITÀ ESISTENTI TRA LA FORMAZIONE DI PANTANO (PAT) E DI CIGARELLO (CIG) (FOGLIO 218).	18
FIGURA 8.	SEZIONE GEOLOGICA DELLA GRANDE FRANA DI SCASCOLI NELLA SUA CONFORMAZIONE ATTUALE, IL CORPO DI FRANA È COSTITUITO DA QUATTRO AMMASSI ROCCIOSI SCIVOLATI SOSTANZIALMENTE IN BLOCCO, COSTITUITI DALLA SUCCESSIONE SEMIALLOCTONA EPILOGURE DI CUI FANNO PARTE LE FORMAZIONI DI CONTIGNACO, PANTANO E MONTERUMICI (LANDUZZI & BERNAGOZZI, 1996).....	19
FIGURA 9:	SEZIONE GEOLOGICA SCHEMATICA, RIFERITA AL PROFILO PRE-CROLLO 2005, CHE ATRAVERSA LE GOLE DI SCASCOLI SECONDO UNA ORIENTAZIONE NW-SE. E' POSSIBILE NOTARE L'ASIMMETRIA DEL PROFILO DOVUTA ALLA PRESENZA DI UNA STRUTTURA MONOCLINALE: A CAUSA DI TALE CONFORMAZIONE STRUTTURALE LUNGO IL VERSANTE DESTRO (SE) GLI STRATI IMMERGONO A FRANAPOGGIO, MENTRE LUNGO QUELLO SINISTRO (NW) GLI STRATI IMMERGONO A REGGIPOGGIO (MARCHI ET AL., 2013).	20
FIGURA 10.	ESTRATTO DELLA CARTA GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICA DELL'AREA IN OGGETTO, IN CUI SONO OSSERVABILI: I QUATTRO AMMASSI ROCCIOSI SCIVOLATI IN BLOCCO CONTRASSEGNA TI DALLA NUMERAZIONE PROGRESSIVA DA 1 A 4, I DEPOSITI DI CROLLO SUL VERSANTE SINISTRO DELLA VALLE CONTRASSEGNA TI DALLE AREE IN GIALLO, E I QUATTRO ORDINI DI TERRAZZI FLUVIALI A MONTE DELLA GRANDE FRANA DI SCASCOLI DISTINGUIBILI DALLE DIVERSE TONALITÀ DI AZZURRO (LANDUZZI & BERNAGOZZI, 1996).	21
FIGURA 11.	SCHEMA EVOLUTIVO DEL FENOMENO DI MESSA IN POSTO DELLA GRANDE FRANA DI SCASCOLI, IN CUI SI NOTA LA DRASTICA RIDUZIONE DI AMPIEZZA DELL'ALVEO DEL TORRENTE SAVENA (FERRO, 2003, MODIFICATA DA LANDUZZI & BERNAGOZZI, 1996).	22

FIGURA 12. FOTO AEREA SUCCESSIVA ALL'EVENTO DI CROLLO DEL 2002, IN CUI È POSSIBILE NOTARE IL LAGO DI SBARRAMENTO FORMATOSI A MONTE E IL CANALE DI SFOGO CHE LE ACQUE HANNO APERTO IN DESTRA IDRAULICA PER GENTILE CONCESSIONE DI PROTEZIONE CIVILE, REGIONE EMILIA ROMAGNA.	23
FIGURA 13. CONFRONTO DI IMMAGINI STORICHE: A SINISTRA L'ORTOFOTO EFFETTUATA NEL 1988 PRESENTA UNA COPERTURA VEGETALE STABILE CHE È INVECE ASSENTE NELL'ORTOFOTO EFFETTUATA NEL 1994, IN CUI È POSSIBILE NOTARE LA ROCCIA AFFIORANTE.....	23
FIGURA 14. SCHEMA DEL CINEMATISMO PIÙ PROBABILE: IN SEGUITO AL SUPERAMENTO DELLO SFORZO DI TAGLIO DEL PONTE DI ROCCIA BASALE (RAPPRESENTATO DAL SEGMENTO DE) È STATO GENERATO UNO SCIVOLAMENTO ROTAZIONALE DEL BLOCCO DHE CHE HA SUCCESSIVAMENTE INDOTTO INSTABILITÀ NELLA PORZIONE AGGETTANTE SUPERIORE DHFB, LA QUALE HA DATO ORIGINE A UN CROLLO CON CHIARE EVIDENZE DI RIBALTAMENTO (GOTTARDI ET AL. 2004).....	24
FIGURA 15: FOTO AEREA DEL DEPOSITO DI CROLLO, PER GENTILE CONCESSIONE DI GIOVANNI BERTOLINI (RER).....	25
FIGURA 16: NICCHIA DI DISTACCO IN CUI È OSSERVABILE LA DIFFERENZA DI STATO DI ALTERAZIONE DELLE DUE DISCONTINUITÀ (GAMBASSI, 2007).....	26
FIGURA 17. SCHEMATIZZAZIONE DI UN SISTEMA OTTICO E RELATIVO OGGETTO DI INTERESSE: LO SPAZIO OGGETTO È PROIETTATO SULLO SPAZIO IMMAGINE TRAMITE IL CENTRO DI PRESA O (CANNAROZZO ET AL., 2012).....	28
FIGURA 18. RAPPRESENTAZIONE GRAFICA (A) E MATEMATICA (B) DELLE EQUAZIONI DI COLLINEARITÀ CHE LEGANO OGNI PUNTO DEL FOTOGRAMMA ACQUISITO CON IL SUO CORRISPETTIVO REALE.....	28
FIGURA 19. A) SCHEMA OTTICO DI UNA COMUNE MACCHINA FOTOGRAFICA DI TIPO REFLEX. B) MODELLO DI RAPPRESENTAZIONE DI UNA SCENA REALE TRIDIMENSIONALE SU UN PIANO BIDIMENSIONALE RAPPRESENTATO MATERIALMENTE DAL SENSORE FOTOSENSIBILE.	29
FIGURA 20. A) INDETERMINAZIONE DELLA POSIZIONE DEL PUNTO A LUNGO IL RAGGIO OTTICO R1. B) SE SI DISPONE DI DUE IMMAGINI A DIVERSO CENTRO DI PRESA CONTENENTI LO STESSO OGGETTO, I SUOI PUNTI SONO DEFINITI UNIVOCAMENTE DALLA INTERSEZIONE DEI RAGGI OMOLOGHI R1 ED R2 (CANNAROZZO ET AL., 2012).....	30
FIGURA 21. L'ALGORITMO SIFT SCOMPONE UNA IMMAGINE IN UN DATABASE DI TIEPOINT DESCRIPTOR O FEATURES. LE LINEE INDICANO I SINGOLI KEYPOINT E L'AREA NELLA QUALE ESSI GIACCONO (WESTOBY ET AL., 2012).....	33
FIGURA 22. SCHEMA DI GEOMETRIA EPIPOLARE.....	33
FIGURA 23. RAPPRESENTAZIONE DEL PROCESSO DI APPLICAZIONE DI GEOMETRIA E VINCOLI EPIPOLARI E TRIANGOLAZIONE: IL PRIMO CASO SI VERIFICA ALL'INTERSEZIONE DELLE SEMIRETTE, MENTRE IL SECONDO SI VERIFICA NEL PUNTO P.	34
FIGURA 24. SCHEMATIZZAZIONE 2D DELL'ALGORITMO DI BALL PIVOTING, IN CUI UN CERCHIO DI RAGGIO R RUOTA DA PUNTO A PUNTO CONNETTENDO I VARI PUNTI INCONTRATI CON UN SEGMENTO: QUANDO LA DISTANZA TRA DUE PUNTI SUCCESSIVI È TROPPO GRANDE NON SARÀ CREATA ALCUNA CONNESSIONE, GENERANDO COSÌ DEI BUCHI.....	35
FIGURA 25. CONSIDERANDO LA DIMENSIONE DEL SENSORE E D QUELLA DEI RELATIVI PIXEL, ESISTE UNA PROPORZIONE CHE LEGA TALE DIMENSIONE CON QUELLA VIRTUALMENTE PROIETTATA SULLA SUPERFICIE REALE INDAGATA L E IL CORRISPETTIVO ELEMENTO MINIMO RAPPRESENTABILE D.	36
FIGURA 26. ESEMPI DI ASSETTO E STRUTTURA DEI PIÙ COMUNI MULTIROTORI.	37
FIGURA 27. SCHEMA COSTRUTTIVO DELLE COMPONENTI ESSENZIALI DI UN MULTIROROTRE, IN QUESTO CASO A 4 MOTORI.	38
FIGURA 28. PRINCIPIO DI MISURAZIONE DI PSEUDORANGE: IL SEGNALE EMESSE DAL SATELLITE, PERCORRENDO LA DISTANZA CHE LO SEPARA DAL RICEVITORE, GIUNGE SFASATO DI $\Delta(T)$, SI RENDE QUINDI NECESSARIA UNA FASE DI CODIFICA DEL SEGNALE AL FINE DI CALCOLARNE LO SFASAMENTO TEMPORALE E SUCCESSIVAMENTE LA DISTANZA.	41
FIGURA 29. DIFFERENZA SINGOLA.	42
FIGURA 30. DIFFERENZA DOPPIA.	43
FIGURA 31. DIFFERENZA TRIPLA.	44
FIGURA 32. FASE DI ACQUISIZIONE GPS DEI TARGET POSIZIONATI PREVENTIVAMENTE ALLA FASE DI RILIEVO FOTOGRAMMETRICO.	46
FIGURA 33. UBICAZIONE PLANIMETRICA DEI TARGET UTILIZZATI PER IL PROCESSO DI GEOREFERENZIAZIONE IN GIALLO, E DEI PUNTI DI CONTROLLO UTILI A STABILIRNE L'ERRORE DI POSIZIONAMENTO IN VERDE.....	47
FIGURA 34. DISPOSIZIONE DEI CENTRI DI PRESA DEI TRE SET DI IMMAGINI CATTURATE: AEREO NADIRALE E OBLIQUO, E TERRESTRE.	48
FIGURA 35. OPERAZIONI PRELIMINARI DI IMPOSTAZIONE DEL VOLO PROGRAMMATO, E PILOTAGGIO MANUALE DELL'UAV AD OPERA DEI TECNICI SAL ENGEENEERING.	49

FIGURA 36. A) FASE DI DECOLLO DALLA GABBIONATA IN DESTRA IDRAULICA. B) DISPOSIZIONE DEI CENTRI DI PRESAIN SEGUITO AL PILOTAGGIO MANUALE.	50
FIGURA 37. NUVOLA SPARSA DEL MODELLO UAV1, COMPOSTA DA 84472 PUNTI.....	52
FIGURA 38. A) PROIEZIONE DEL PUNTO IN BASE AI SOLI PARAMETRI INTERNI ED ESTERNI DELLA CAMERA IN OGNI FOTOGRAMMA. B) UNA VOLTA CALCOLATE LE COORDINATE 3D DEL PUNTO, QUESTO VINE RIPROIETTATO SULLE IMMAGINI ORIGIE IN CUI APPARE, LA DISTANZA TRA PUNTO INDIVIDUATO INIZIALMENTE E PUNTO RIPROIETTATO COSTITUISCE IL REPROJECTION ERROR.	53
FIGURA 39. NUVOLA DENSA DI PUNTI UAV1.....	54
FIGURA 40. MESH OTTENUTA DAL RILIEVO UAV1.	55
FIGURA 41. UBICAZIONE DEI GCP IN CUI SONO MOSTRATI SIA QUELLI REALMENTE MISURATI TRAMITE GPS, CHE QUELLI VIRTUALI UTILIZZATI PER GEORIFERIRE LE FOTO DA TERRA.	56
FIGURA 42. A) MAPPA DI SOVRAPPOSIZIONE DEI FOTOGRAMMI DEL RILIEVO UAV1, IN CUI SI NOTA COME TUTTA L'AREA DEL MODELLO RISULTA IPERDETERMINATA . B) STIMA DELL'ERRORE DI POSIZIONAMENTO DEI CENTRI DI PRESA DELLE CAMERE.	57
FIGURA 43. A) NUVOLA SPARSA DEL RILIEVO UAV2. B) NUVOLA DENSA DEL RILIEVO UAV2.....	58
FIGURA 44. MESH POLIGONALE DEL RILIEVO UAV2.	58
FIGURA 45. A) MAPPA DI SOVRAPPOSIZIONE DEI FOTOGRAMMI DEL RILIEVO UAV2. B) STIMA DELL'ERRORE DI POSIZIONAMENTO DEI CENTRI DI PRESA DELLE CAMERE.	59
FIGURA 46. A) ORTOFOTO DELL'AREA DI INTERESSE. B) DSM DELL'AREA DI INTERESSE.....	60
FIGURA 47. A) NUVOLA DI PUNTI DI OUTPUT COME APPARE NELLA SUA FORMA GRAFICA. B) STRUTTURA CODIFICATA DI UNA NUVOLA DI PUNTI IN CUI OGNI COLONNA DELLA MATRICE È ADIBITA A CONTENERE UNA CERTA INFORMAZIONE COME COORDINATE X Y Z, INFORMAZIONI COLORE R G B, E ORIENTAZIONE DELLE NORMALI.....	60
FIGURA 48. OUTPUT IN SCALA DI GRIGIO DELL'ANALISI DI PENDENZA EFFETTUATA SULL'INTERA ESTENSIONE DEI TRE DATASET E RELATIVO PARTICOLARE DELLE PENDENZE IN UNA FINESTRA DI CAMPIONAMENTO COMUNE.....	63
FIGURA 49. ISTOGRAMMI DI FREQUENZA RELATIVI AI VALORI DI PENDENZA RISCONTRATI UNA PORZIONE DI RILIEVO COMUNE A TUTTI I DATASET: DA SINISTRA VERSO DESTRA SONO MOSTRATI I RISULTATI DEI RILIEVI UAV1, UAV2, LASER.....	63
FIGURA 50. SCHEMATIZZAZIONE GRAFICA DEL METODO DI CALCOLO DEL TRI, ESPRESSO COME SCARTO QUADRATICO MEDIO DELL'ELEVAZIONE DI UNA CELLA RISPETTO A QUELLE AD ESSA VICINE. VARIAZIONI DI QUOTA PIÙ MARCATE CONFERISCONO ALLA CELLA ANALIZZATA UN INDICE DI ASPERITÀ PIÙ ELEVATO (CASI A E B), MENTRE VALORI POCO DIVERSI DALL'ANDAMENTO MEDIO GENERANO UN INDICE TENDENZIALEMNTE PIÙ BASSO (RILEY ET AL., 1999, MODIFICATO).....	64
FIGURA 51. ESEMPIO BIDIMENSIONALE DI COME LA VARIABILITÀ LOCALE DELL'INDICE DI ASPERITÀ INTERESSI LA DISTRIBUZIONE DELLE TRAIETTORIE DEI BLOCCHI: NEL CASO 1 IN CUI LE NORMALI N1 ED N2 SONO ISOORIENTATE, LE COMPONENTI NORMALI E TANGENZIALI DEI MOTI DI RIMBALZO SARANNO PARALLELE TRA LORO E QUINDI INVARIANTI, NEL CASO 2 INVECE NON VI È PARALLELISMO TRA LE NORMALI ALLA SUPERFICIE DI RIMBALZO N1 ED N2, CIÒ SI TRADUCE IN UNA VARIAZIONE DELLA TRAIETTORIA TRA IL PRIMO E IL SECONDO RIMBALZO.	65
FIGURA 52. OUTPUT IN SCALA DI GRIGIO DELL'ANALISI DI ASPERITÀ EFFETTUATA SUI TRE DSM, RISPETTIVAMENTE NELL'ORDINE UAV1 UAV2 LASER.....	65
FIGURA 53. FINESTRA DI CAMPIONAMENTO NELLA QUALE È STATA EFFETTUATA L'ANALISI DI ASPERITÀ E RELATIVI RISULTATI DI FREQUENZA DELLA DISTRIBUZIONE: SI PUÒ NOTARE COME MENTRE GLI ISTOGRAMMI DEI DATASET UAV SIANO QUASI DEL TUTTO SOVRAPPONIBILI, VI È UNA CERTA DIFFERENZA DI AMPIEZZA NELLA CODA DI DISTRIBUZIONE LASER, CHE PRESENTA UN MAGGIOR NUMERO DI DATI A ELEVATO INDICE DI ASPERITÀ.	66
FIGURA 54. A) PROFILI ORIZZONTALIZZATI RIFERITI ALLA SEZ. 1 IN CUI SI PUÒ OSSERVARE UN DIFFERENTE GRADO DI DETTAGLIO NEL CAMPIONAMENTO DELLA SUPERFICIE SOPRATTUTTO TRA DATO LASER E DATO UAV. B) OUTPUT DI DE-TRENDING DELLE TRE SEZIONI.....	67
FIGURA 55. A) SUPPONENDO DI ESEGUIRE IL RILIEVO DI UN DETERMINATO OGGETTO IN DUE TEMPI DIFFERENTI ADOPERANDO UNO STESSO SISTEMA DI RIFERIMENTO LE INFORMAZIONI GEOMETRICHE GENERATE SARANNO SOVRAPPONIBILI POICHÉ RIFERITE ALLO STESSO SISTEMA. B) NEL CASO IN CUI IN TEMPI DIVERSI SI UTILIZZINO DIFFERENTI SISTEMI DI RIFERIMENTO, SI INTRODUCE UNA INCOGNITA CHE È RAPPRESENTATA DALLA RELAZIONE GEOMETRICA DI ROTOTRASLAZIONE CHE INTERCORRE TRA LE ORIGINI DEI DUE SISTEMI DI RIFERIMENTO (IL PUNTO INTERROGATIVO TRA LA CROCE ROSSA E LA CROCE VIOLA). IN TAL MODO SI PERDE LA POSSIBILITÀ DI EFFETTUARE CONFRONTI IN TERMINI ASSOLUTI TRA I DUE RILIEVI.	68

FIGURA 56. A) MAREA TERRESTRE PRESSO LA SP DEL CENTRO DI GEODESIA SPAZIALE DI MATERA: CAMPIONAMENTO OGNI ORA PER UN ANNO. B) ESEMPIO DI STIMA DELLE VELOCITÀ GEODINAMICHE E RELATIVE DIREZIONI DI TRASPORTO (STIME NASA) (BIAGI, 2006).	69
FIGURA 57. OUTPUT DI ALLINEAMENTO DELLE NUVOLE DI PUNTI MEDIANTE L'APPLICATIVO CONVER2013 IN CUI È POSSIBILE APPREZZARE LO SCOSTAMENTO METRICO CHE RENDE IMPOSSIBILE IL CONFRONTO DIRETTO DEI DATI RILEVATI.	70
FIGURA 58. SCHEMATIZZAZIONE DEL MEODO DI CALCOLO DELLA DISTANZA TRA NUVOLE.	71
FIGURA 59. CONFRONTO DISTANZIOMETRICO RELATIVO TRA I DIVERSI OUTPUT: A) UAV1 vs UAV2. B) UAV1 vs LASER.	72
FIGURA 60. CONFRONTO DISTANZIOMETRICO TRA MESH UAV1 E NUVOLE DI PUNTI LASER. LE CLASSI DI VARIABILITÀ DAL VERDE AL ROSSO INDICANO UNA PERDITA DI VOLUME DELLA PARETE NEL TEMPO INTERCORSO TRA RILIEVO LASER E RILIEVO UAV (CIRCA 10 ANNI), MENTRE LE CLASSI DI VARIABILITÀ CHE VANNO DAL VERDE AL BLU INDICANO UN INCREMENTO DI VOLUME NEL TEMPO.	73
FIGURA 61. DISTRIBUZIONE GAUSSIANA DELLE DISTANZE TRA MESH UAV1 E NUVOLE LASER.	74
FIGURA 62. OUTPUT DELLE DISTANZE POINT TO MESH PRIMA (A) E DOPO (B) LA SELEZIONE DELL'INTERVALLO DI TOLLERANZA DI ± 0.4 M ENTRO CUI SI RITIENE ACCETTABILE LO SCOSTAMENTO TRA DATASET. EMERGE COME LA RETE IN ADERENZA MASCHERI MARCATAMENTE LA PARETE SOTTOSTANTE, CHE TUTTAVIA MOSTRA SEGNI EFFETTIVI DI CROLLO NELLE PORZIONI IN CUI VI È TOTALE ASSENZA DI PUNTI ANCHE IN SEGUITO ALLA SELEZIONE.	74
FIGURA 63. CONFRONTO MORFOLOGICO IN SCALA DI VALORI RADIOMETRICI RGB TRA OUTPUT LASER E UAV, DELLA PORZIONE DI PARETE ROCCIOSA IN CUI È STATO INDIVIDUATO UNO DEI PROBABILI CROLLI.	75
FIGURA 64. DEPOSITO ALLA BASE DELLA PARETE EVIDENZIATO SIA MEDIANTE SCALAR FIELD (A) DALLE PORZIONI DI COLORE BLU, CHE DAL CORRISPONDENTE SEGNALE RGB (B E C), RAPPRESENTANTE RISPETTIVAMENTE IL RILIEVO LASER E UAV.	76
FIGURA 65. PORZIONI DI PARETE INTERESSATE DAI FENOMENI DI CROLLO (IN ROSSO) E RELATIVI DEPOSITI (IN BLU) CON I RELATIVI INGOMBRI VOLUMETRICI.	77
FIGURA 66. PARTICOLARE DELLA PARTE TERMINALE DELLA RETE IN ADERENZA CHE SPORGE FUORI DALLA PARETE, ESSA VIENE INDIVIDUATA SOLO NEL RILIEVO LASER SIA IN FALSI COLORI CHE IN RGB (A E B), MENTRE È ASSENTE NEL RILIEVO UAV (C).	78
FIGURA 67. PLANIMETRIA GENERALE DELLE GOLE DI SCASCOLI E TRACCE DELLE DISCONTINUITÀ RILEVATE (ENSER 2003, INEDITO).	80
FIGURA 68. SCHEMATIZZAZIONE DI NORMALI A SUPERFICI CURVE E PIANE.	82
FIGURA 69. RAPPRESENTAZIONE DELLA NUVOLE DI PUNTI MEDIANTE VALORI RADIOMETRICI RGB A SINISTRA, E TRAMITE SCALAR FIELD DELLA DIP DIRECTION A DESTRA.	82
FIGURA 70. STEREO PLOT DEL RILIEVO DIGITALE UAV1, E ORIENTAZIONE MEDIA DELLE FAMIGLIE INDIVIDUATE.	83
FIGURA 71. STEREO PLOT DEL RILIEVO DIGITALE UAV1, E ORIENTAZIONE DELLE FAMIGLIE INDIVIDUATE.	84
FIGURA 72. STEREO PLOT DEL RILIEVO DIGITALE LASER, E ORIENTAZIONE DELLE FAMIGLIE INDIVIDUATE.	85
FIGURA 73. SOVRAPPOSIZIONE DELLE DISCONTINUITÀ APPARTENENTI AI 3 RILIEVI PRESI IN ANALISI.	85
FIGURA 74. TRACCE DELLE GIACITURE MISURATE CON ENTRAMBI I METODI: SOGGETTIVO A SINISTRA E DIGITALE A DESTRA.	86
FIGURA 75. SCHEMA DEL PROCESSO DI RASTERIZZAZIONE IN CUI LA TERNA DI COORDINATE (X,Y,Z) DI OGNI PUNTO NELLO SPAZIO VIENE TRASFORMATA IN UNA COPPIA (X,Y) SU UN PIANO. B) SCHEMATIZZAZIONE DEL PROCESSO DI RESAMPLING IN CUI SI PASSA DA UN MODELLO A RISOLUZIONE MAGGIORE (MA AFFETTO DA UN ELEVATO NUMERO DI CELLE PRIVE DI INFORMAZIONE) A UN MODELLO CHE SEBBENE PRESENTI UNA RISOLUZIONE INFERIORE È CARATTERIZZATO DA UNA MAGGIORE CONTINUITÀ DEL DATO.	87
FIGURA 76. PANORAMICA DEGLI AGGETTI INDIVIDUATI DAI RISPETTIVI PIANI NEI DIVERSI MODELLI UAV A SINISTRA, LASER A DESTRA.	88
FIGURA 77. DIREZIONI DI POSSIBILI DISCONTINUITÀ (1, 2 3 e 4) IN RELAZIONE ALLA GIACITURA DI UN AFFIORAMENTO ROCCIOSO: LA DIREZIONE 1 IMMERGE FUORI DAL PIANO INDIVIDUATO E RICADE NEL DAYLIGHT ENVELOPE, LA DIREZIONE 2 IMMERGE NELL'AMMASSO ROCCIOSO, QUINDI NON RIENTRA NEL DAYLIGHT ENVELOPE, MENTRE LE DIREZIONI 3 E 4 SONO CASI LIMITE POICHÉ LE NORMALI AI PIANI CHE ESSI INDIVIDUANO GIACCIONO SUL BORDO DEL DAYLIGHT ENVELOPE (LISLE, R. J. 2004).	90
FIGURA 78. A) ASSETTO SCHEMATICO DELLE POSSIBILI DISCONTINUITÀ SU UN VERSANTE. B) DAYLIGHT ENVELOPE DEI TRE MODELLI CINEMATICI DESCRITTI (WILLIE & MAH, 1974).	90
FIGURA 79. A) CONO DI FRIZIONE IN RELAZIONE AD UN BLOCCO A RIPOSO SU UN PIANO INCLINATO ($\Phi > \psi$). B) PROIEZIONE STEREOGRAFICA DEL CONO DI FRIZIONE SOVRAPPPOSTO AL DAYLIGHT ENVELOPE (WILLIE & MAH, 1974).	91

FIGURA 80. DIAGRAMMI STEREOGRAFICI DELLE ANALISI CINEMATICHE PER SCIVOLAMENTO PLANARE, IN BLU È RAPPRESENTATO, OVE PRESENTE, IL POLO MEDIO DELLA FAMIGLIA K2.	92
FIGURA 81. DIAGRAMMI STEREOGRAFICI DELLE ANALISI CINEMATICHE PER SCIVOLAMENTO A CUNEO.	93
FIGURA 82. DIAGRAMMI STEREOGRAFICI DELLE ANALISI CINEMATICHE PER RIBALTAMENTO.	94
FIGURA 83. DIAGRAMMA INDICANTE LA SOGLIA OLTRE LA QUALE IL MOTO DI CADUTA PASSA DA SCIVOLAMENTO A CROLLO VERO E PROPRIO.	95
FIGURA 84. INFLUENZA DELLE FAMIGLIE DI GIUNTI (KK1, KK2 E KK3) SULLE SUPERFICI DI ROTTURA E SULLA POSIZIONE DEI PONTI DI ROCCIA NEL CASO DI UN VERSANTE POTENZIALMENTE INSTABILE (PARONUZZI P., SERAFINI W. 2005).	96
FIGURA 85. POSSIBILI MOTI DI PROPAGAZIONE DI UN BLOCCO SOGGETTO A CROLLO (DEL MASCHIO ET AL. 2007).	97
FIGURA 86. A) TIPOLOGIE DI MOTO DEI BLOCCHI DURANTE LA DISCESA LUNGO UN PENDIO IN FUNZIONE DELLA PENDENZA DELLO STESSO. B) MECCANISMI DI ROTTURA DELLE PARETI ROCCIOSE (WILLIE & MAH, 2005).	98
FIGURA 87. RAPPORTO TRA LE VELOCITÀ PRIMA E DOPO L'URTO (DEL MASCHIO ET AL. 2007).	101
FIGURA 88. PANORAMICA GENERALE DELLE SEZIONI INDAGATE PER L'ANALISI DI CADUTA MASSI 2D IN CUI È EVIDENZIATO IN ROSSO L'INTERVALLO ENTRO CUI LA MODELLAZIONE NUMERICA RIPORTA LA PRESENZA DI BLOCCHI SULLA SEDE STRADALE.	105
FIGURA 89. A) SEZ. 5 (DATASET UAV2) PARAMETRIZZATA SECONDO I DATI DI BIBLIOGRAFIA RINVENUTI. B) ESITO TOTALE DELLA MODELLAZIONE IN CUI SONO MOSTRATE TUTTE LE TRAIETTORIE DEI BLOCCHI. C) TRAIETTORIE CRITICHE PER LE QUALI I BLOCCHI RAGGIUNGONO LA SEDE STRADALE, QUESTE SI CONCENTRANO IN DUE GRUPPI ACCOMUNATI DA RIMBALZI SU PORZIONI DI VERSANTE INCLINATO A CIRCA 40°.	106
FIGURA 90. DISTRIBUZIONE DI FREQUENZA DEGLI ENDPOINTS RELATIVI ALLE SIMULAZIONI EFFETTUATE SULLE SEZIONI TRACCIATE NELL'INTERVALLO CRITICO COMPRESO TRA SEZ. 4 E SEZ. 6.	106
FIGURA 91. ESEMPI DI POSSIBILI GEOMETRIE DI FRATTURAZIONE E FORMAZIONE DI BLOCCHI UNITARI DI ROCCIA (PALMSTRON, 2005).	107
FIGURA 92. DIMENSIONI MEDIE DEI BLOCCHI RILEVATI IN CAMPAGNA.	108
FIGURA 93. DISTRIBUZIONE DI FREQUENZA DELL'ENERGIA LUNGO IL DATA COLLECTOR POSTO IN SEZ.5 NEI PRESSI DELLA ROTTURA DI PENDIO $x=36$ M.	109
FIGURA 94. A) DISTRIBUZIONE DI FREQUENZA DELL'ENERGIA CALCOLATA LUNGO IL DATA COLLECTOR IN CORRISPONDENZA DELLA SEDE STRADALE IN SEZ. 5. B) DISTRIBUZIONE DI FREQUENZA DELL'ENERGIA CALCOLATA LUNGO IL DATA COLLECTOR IN CORRISPONDENZA DELLA SEDE STRADALE IN SEZ. 6.	110
FIGURA 95. CONFRONTO TRA LE TRAIETTORIE MODELLATE LUNGO LA SEZ. 6: NEL MODELLO UAV2 IN NUMERO DI TRAIETTORIE CRITICHE EVIDENZIATE È MAGGIORE RISPETTO AL CORRISPETTIVO EVIDENZIATO NEL MODELLO LASER.	110
FIGURA 96. A) ANDAMENTO CUMULATIVO DELLE ALTEZZE DI RIMBALZO DEI BLOCCHI IN SEZ.3 B) ANDAMENTO CUMULATIVO DELLE ALTEZZE DI RIMBALZO DEI BLOCCHI IN SEZ.5.	111
FIGURA 97. SEZ. 5, CONFRONTO DELLE TRAIETTORIE AL VARIARE DELLA TOPOGRAFIA: GLI IMPATTI DEI BLOCCHI SUL PRIMO GRADINO VEGETATO MOSTRANO COME SIA DIVERSA LA RISPOSTA ALLA TOPOGRAFIA NEI TRE MODELLI.	111
FIGURA 98. GRAFICO A DISPERSIONE DELLE FREQUENZE DI ARRIVO DEI BLOCCHI E RELATIVE PROGRESSIVE METRICHE: SI PUÒ NOTARE COME LA DISTRIBUZIONE A PIENA RISOLUZIONE TENDA A RAPPRESENTARE ARRIVI PIÙ CONSISTENTI OLTRE IL VALLO PARAMASSI RISPETTO ALLE ALTRE TRE DISTRIBUZIONI.	112
FIGURA 99. DIVERSI OUTPUT GRAFICI DI MODELLAZIONE RIFERITI RISPETTIVAMENTE A: MODELLO A PIENA RISOLUZIONE, RICAMPIONAMENTO MANUALE, RICAMPIONAMENTO 0.5 M, RICAMPIONAMENTO 1 M.	113
FIGURA 100. GRIGLIA DI CALCOLO ESTRATTA DAI DSM DEI TRE MODELLI, RISPETTIVAMENTE UAV1, UAV2, LASER: LE CELLE ROSSE PUR FACENDO PARTE DEL GRIGLIATO SONO STATE DISATTIVATE POICHÉ CONTENGONO INFORMAZIONI CALCOLATE DAL SOFTWARE SOLO IN BASE AGLI ALGORITMI DI INTERPOLAZIONE.	116
FIGURA 101. DISTRIBUZIONE PLANIMETRICA DEI BLOCCHI APPARTENENTI AI TRE MODELLI.	117
FIGURA 102. GRIGLIATO ALTIMETRICO DI CALCOLO ESTRATTO DA ROTOMAP PER I MODELLI UAV1 E LASER: SI NOTA LA DIVERSA MODELLAZIONE DELLA PORZIONE SUPERIORE DELLA PARETE ROCCIOSA, CHE NEL MODELLO UAV1 È DATA DA ISOLINEE PIÙ RAVVICINATE MENTRE NEL MODELLO LASER PRESENTA ISOLINEE PIÙ LARGHE NELLA MEDESIMA PORZIONE.	118

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1. SPECIFICHE TECNICHE DELLE OTTICHE UTILIZZATE NEL VOLO UAV1.	48
TABELLA 2. SPECIFICHE TECNICHE DELLE OTTICHE UTILIZZATE NEL VOLO UAV2.	51

TABELLA 3. STIMA DELL'ERRORE DI POSIZIONAMENTO DEI PUNTI DI CONTROLLO ESTERNI: SI PUÒ NOTARE COME TALE ERRORE RISULTI INFERIORE ALLA DIMENSIONE DEL PIXEL.....	56
TABELLA 4. PANORAMICA DELLE SPECIFICHE TECNICHE DEI PIÙ COMUNI APPARATI DI MISURAZIONE LASER IN COMMERCIO, IN ROSSO È EVIDENZIATO IL MODELLO UTILIZZATO NEL RILIEVO DELL'AREA DI STUDIO. ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.	
TABELLA 5. VALORI DELL'INDICE RMS-H CALCOLATI PER LE TRE SEZIONI.....	68
TABELLA 6. DISCONTINUITÀ RILEVATE SUL FRONTE D MEDIANTE RILIEVO SOGGETTIVO.....	81
TABELLA 7. FAMIGLIE DI DISCONTINUITÀ UAV1.	83
TABELLA 8. FAMIGLIE DI DISCONTINUITÀ UAV2.	84
TABELLA 9. FAMIGLIE DI DISCONTINUITÀ LASER.	85
TABELLA 10. MISURE DI VOLUME EFFETTUATE SUGLI AGGETTI PRECEDENTEMENTE INDIVIDUATI.....	88
TABELLA 11. COEFFICIENTI DI RESTITUZIONE.	104
TABELLA 12. CLASSI DI TERRENO PARAMETRIZZATE PER LA SUCCESSIVA ANALISI TRAIETTOGRAFICA 3D.....	116

Riassunto

Le Gole di Scascoli, Loiano (BO), sono caratterizzate da fenomeni di versante complessi: nello specifico in sinistra idraulica rispetto al torrente Savena che le incide queste mostrano una marcata tendenza evolutiva per crollo e ribaltamento. Negli ultimi 25 anni si sono verificati eventi parossistici sempre più frequenti: nel 1992, nel 2002 e nel 2005 con volumi di roccia coinvolti rispettivamente di 7000 m³, 20000 m³ e 35000 m³. Il sito riveste quindi grande rilevanza sia per i processi in atto che a causa del forte fattore di rischio che rappresenta per la strada di fondovalle ad esso contigua e per i relativi utenti.

Il lavoro di tesi è stato finalizzato allo studio dei fenomeni di versante di una parete rocciosa inaccessibile nota in letteratura come “ex-Mammellone 1” mediante tecniche di telerilevamento quali TLS (Terrestrial Laser Scanning) e CRP (Close Range Photogrammetry) al fine di fornire un supporto dati più solido al rilievo geomeccanico soggettivo dell’area svolto nel 2003 da ENSER Srl in seguito ai fenomeni di crollo del 2002 che provocarono ingenti danni alla sede stradale. Lo sviluppo di tecnologie e metodi innovativi per l’analisi territoriale basata sull’impiego di UAV (Unmanned Aerial Vehicle, meglio noti come Droni), associata alle tecniche di fotogrammetria digitale costituisce un elemento di notevole ausilio nelle pratiche di rilevamento in campo di sicurezza e tempi di esecuzione. Il lavoro ha previsto una iniziale fase di rilevamento areo-fotogrammetrico mediante strumentazione professionale e amatoriale, a cui è seguita l’elaborazione dei rispettivi modelli nei formati di output seguenti: point cloud, ortofoto, DTM, mesh e giaciture di famiglie di discontinuità.

I diversi output sono stati confrontati dal punto di vista geomorfologico, geometrico, geomeccanico e di modellazione numerica di caduta massi. Le analisi geomorfologiche sono state condotte sui DTM raster indagando la mappa delle pendenze e l’indice di asperità. Dal punto di vista geometrico sono state effettuate analisi distanziometriche tra nuvole di punti, misura del volume degli oggetti e rilievo digitale delle giaciture. I confronti geomeccanici hanno interessato le famiglie di discontinuità precedentemente rilevate e la natura dei meccanismi cinematici di rottura possibili, mentre gli output di modellazione numerica bidimensionale e tridimensionale sono stati confrontati sulla base dei punti di arrivo dei blocchi, sulle traiettorie da essi descritte, sull’energia totale di impatto e sull’altezza massima raggiunta.

Dal lavoro è stato possibile indagare l’evoluzione morfologica del sito in esame negli ultimi 10 anni, confrontare diversi metodi di rilevamento e analisi dati, sperimentare la robustezza e ripetibilità geometrica del metodo fotogrammetrico per il rilievo di fronti rocciosi e mettere a punto un metodo semiautomatico di individuazione e analisi delle giaciture delle discontinuità.

1. Introduzione

1.1 Scopo del lavoro

Questo lavoro di tesi riguarda lo studio di una parete rocciosa parzialmente inaccessibile, e dei fenomeni di versante ad essa connessi, mediante l'impiego di due differenti tecniche di telerilevamento, quali Terrestrial Laser Scanning (TLS) e Close Range Photogrammetry (CRP), che si pongono l'obiettivo di affiancare e allo stesso tempo andare oltre l'approccio geomeccanico classico atto ad indagare i fronti rocciosi e le dinamiche connesse alla modellazione ed analisi dei fenomeni di crollo in roccia.

Solitamente le analisi strutturali di ammassi rocciosi vengono effettuate per mezzo di rilievo geomeccanico di campagna: ciò può risultare oneroso se non impossibile a causa delle difficoltà di accesso al sito, eccessiva pericolosità o altezza dei fronti rocciosi, o semplicemente per l'elevata estensione degli affioramenti (Coggan et al., 2007). Le tecniche di remote sensing tra cui TLS e CRP rappresentano un utile ausilio alla caratterizzazione delle discontinuità degli ammassi rocciosi da indagare. Lo sviluppo di metodologie innovative di rilievo del territorio basate sull'impiego di Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), associato alle tecniche di Close Range Photogrammetry, e più in generale nell'applicazione di algoritmi derivanti dalla Computer Vision che negli ultimi anni hanno visto crescere esponenzialmente i loro campi di applicazione, ha determinato un incremento notevole della tipologia di dati che potenzialmente possono essere estratti in seguito ai processi di rilevamento. Le stesse tecniche di elaborazione e gestione dei dati hanno di pari passo subito una forte evoluzione permettendo la fruibilità di informazioni che prima d'ora erano relegate alla sola pratica manuale. Alla luce di tali considerazioni appare chiaro come in contesti ambientali complessi, di difficile o impossibile accesso, lo sviluppo di metodologie alternative che affianchino il rilievo classico, costituiscano un forte elemento di interesse dal punto di vista tecnico offrendo vantaggi sia legati alla sicurezza degli operatori che ai tempi di rilievo. La comprensione dei maggiori punti di forza e limitazioni di queste tecniche analitiche permette di individuarne il campo di applicabilità e le modalità con cui possano essere implementate e affiancate ai rilievi tradizionali al fine di raggiungere una migliore caratterizzazione dell'ammasso roccioso. L'area di studio oggetto del confronto tra diverse metodologie di rilievo è situata lungo le gole di Scascoli, nel comune di Loiano (Bo) ed è nota per i numerosi fenomeni di crollo avvenuti in epoca storica, di cui i più recenti documentati nel 2002 e 2005. Tale sito si dimostra di forte interesse come caso di studio sia per le condizioni geologiche e geomorfologiche peculiari da cui è caratterizzato, sia a causa del forte elemento di rischio che rappresenta per la prospiciente strada di fondovalle e i relativi utenti. Alla luce di tali premesse, il presente lavoro si pone l'obiettivo di

individuare i vantaggi e le limitazioni delle tecniche di rilievo prese in considerazione confrontandone le evidenze strumentali e gli output finali, e allo stesso tempo proporre un approccio metodologico semi automatico atto al riconoscimento degli elementi morfologico - strutturali tipici dell' area di interesse. È stato possibile svolgere questo studio grazie al supporto tecnico delle società di ingegneria ENSER srl e SAL engegneering srl, che hanno curato rispettivamente le parti progettuali e di rilevamento relative al progetto di monitoraggio dello stato dei luoghi commissionato dalla Provincia di Bologna per la parete denominata "ex mam1" delle gole di Scascoli.

1.2 Fasi del lavoro

L'elaborato di tesi si sviluppa su 6 capitoli. Di seguito vengono illustrate le parti del lavoro:

- Ricerca bibliografica, mirata alla documentazione sui processi geologici attivi nell'area di studio e alla parametrizzazione geomeccanica della parete rocciosa, nonché al reperimento delle basi dati necessarie al successivo confronto.
- Attività di rilievo fotogrammetrico e topografico/geodetico di campo, volto alla modellazione tridimensionale dell'attuale fronte roccioso.
- Attività di rilievo delle dimensioni medie dei blocchi, volta a stimare il volume roccioso unitario ai fini della successiva modellazione numerica dei crolli.
- Elaborazione dati rilevati in campagna, il cui obiettivo è quello di estrapolare il modello tridimensionale della parete rocciosa.
- Analisi morfologico, strutturale, e di caduta massi sui modelli precedentemente elaborati.
- Confronto quantitativo tra le tecniche utilizzate.
- Conclusioni e spunti per possibili sviluppi sul tema affrontato.

1.3 Inquadramento geografico

L'area di studio è ubicata nella porzione meridionale della provincia di Bologna, circa 5 km a nord del comune di Loiano (Bo), e 3 km a Est del comune di Monzuno (Figura 1) in località Casette. E' costituita da una parete rocciosa la cui altezza media risulta essere di circa 80 m ed estensione laterale di circa 100 m; questa si trova in sinistra idrografica rispetto al corso del torrente Savena che in questa zona scorre incassato tra gli affioramenti rocciosi formando le gole di Scascoli e giace parallela alla sede stradale della omonima strada provinciale di fondovalle. Le coordinate del ciglio di scarpata nel sistema di riferimento WGS84 sono: 44° 18' 51.45" N - 11° 17' 36.95" E. L'area di studio ricade nel settore nord orientale del foglio 237 (Sasso Marconi), della cartografia geologica ISPRA in scala 1:50000 progetto CARG (Figura 4,) e più specificatamente nell'elemento 237082 (Guarda) della carta tecnica regionale.



Figura 1. Localizzazione multi-scala dell'area di studio in cui è indicata la provincia e i comuni di pertinenza e nel riquadro una panoramica di dettaglio ottenuta dalla sovrapposizione del rilievo fotogrammetrico attuale alle ortofoto AGEA 2012.

2 Fenomeni di crollo nell'area di Scascoli

2.1 Inquadramento geologico

L'area di studio è ubicata nell'Appennino Settentrionale e più specificatamente nel settore emiliano di quest'ultimo, caratterizzato dalla presenza in affioramento delle falde di ricoprimento del Dominio Ligure ed Epiligure. L'Appennino settentrionale è una catena a falde (Panini et al., 2002; Elter 1960), sviluppata principalmente nel Terziario in seguito alla collisione tra due blocchi continentali rappresentati dalla zolla Europea e dalla microplacca Adriatica, caratterizzata dalla sovrapposizione e deformazione dei diversi domini paleogeografici meso-cenozoici più interni su quelli più esterni. Il processo di collisione tra queste due zolle continentali è stato preceduto dalla chiusura dell'oceano ligure-piemontese, precedentemente interposto tra di esse (Abbate et al., 1970).

La chiusura dell'oceano Ligure-piemontese (Figura 2) e la collisione tra le due masse continentali hanno portato alla formazione di un prisma di accrezione costituito da rocce deformate per raschiatura e appilamento a spese degli originari sedimenti depositi sui seguenti Domini (Treves, 1984): il Dominio Ligure (che attualmente costituisce la falda tettonica più alta dell'intero edificio montuoso) corrisponde ai resti dell'area oceanica chiusa in seguito alla collisione tra Africa ed Europa durante il periodo che va dal Cretaceo all'Eocene (Ricci Lucchi, 1986), il Dominio subligure che si è sviluppato sulla crosta assottigliata africana adiacente alla zona oceanica, e il Dominio tosco-umbro di pertinenza adriatico-padana. Quindi rocce che occupavano inizialmente aree paleogeografiche tra loro affiancate vengono a sovrapporsi con i terreni del Dominio ligure accavallati su quelli del subligure e di ambedue sul Dominio tosco-umbro-marchigiano (Panini et al., 2002).

A partire dall'Eocene medio, quando si sviluppa la fase intra-continentale dell'orogenesi appenninica, le unità tettoniche precedentemente deformate e impilate, subiscono gli effetti di un regime tettonico inizialmente compressivo e successivamente distensivo che porta alla formazione di sovrascorrimenti e falde nelle unità liguri e subliguri, e alla formazione di bacini intramontani a tergo delle unità tettoniche in compressione. Sulle unità già tettonizzate al limite esterno della catena in formazione, si instaurano bacini satellite di piggy back nei quali si mettono

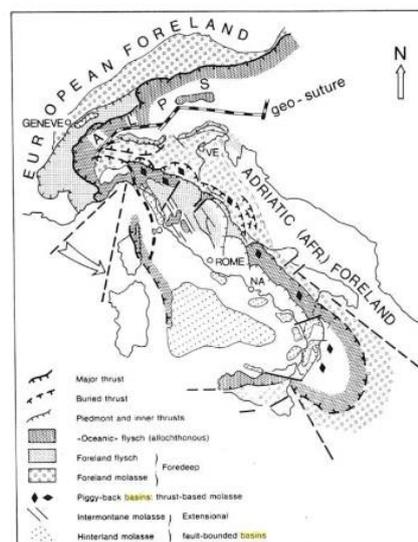


Figura 2. Schema tettonico generale che illustra le dinamiche compressive responsabili della chiusura dell'oceano Ligure - Piemontese a partire dall'Oligocene medio, e la conseguente formazione di una catena a falde est-vergente (Ricci Lucchi, 1986).

in posto le formazioni appartenenti al Dominio epiligure, a sedimentazione di ambiente marino piuttosto profondo caratterizzate da depositi clastici di genesi appenninica, costituiti essenzialmente da breccie poligeniche, marne ed argille emipelagiche, torbiditi e corpi arenacei risedimentati (Ricci Lucchi, 1986).

L'assetto strutturale dell'appennino emiliano ed in particolare delle unità liguri e subliguri è il risultato di deformazioni polifasiche iniziate nelle prime fasi di chiusura dell'Oceano ligure – piemontese (Cretaceo) e proseguite sino a tempi recentissimi: tuttavia la strutturazione delle principali unità tettoniche liguri si deve alla fase tettonica Mesoalpina di età eocenica media, mentre alla fase neoalpina, collocabile tra l'oligocene superiore e il miocene inferiore, si deve la definitiva chiusura del bacino subligure e la tettonizzazione marcata della Successione epiligure. Per quanto riguarda invece l'assetto strutturale attuale dell'intero settore appenninico, questo è il risultato delle fasi deformative più recenti di età tortoniana messiniana e plio-quadernaria (Panini et al., 2002).

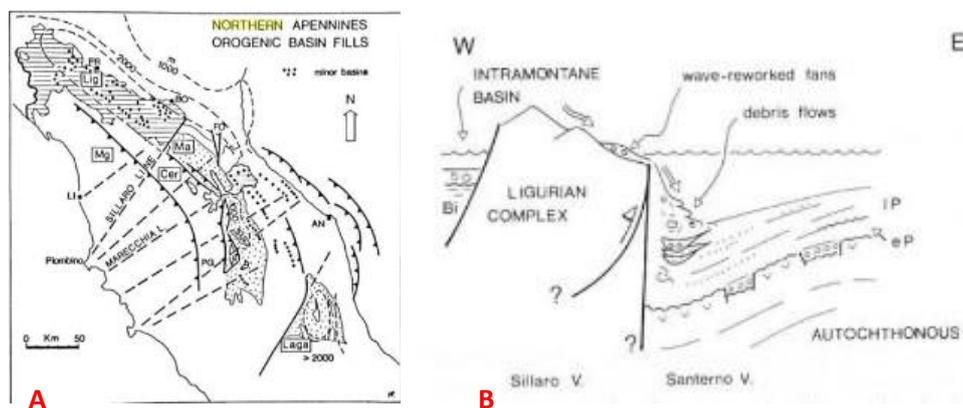


Figura 3. A) Principali lineamenti tettonici appenninici tra cui spicca la linea del Sillaro che mette a contatto le unità liguridi con quelle del bacino umbro marchigiano. B) Scenario tettonico ipotizzato lungo la Linea del Sillaro, in cui i processi di denudazione agenti sulle unità del complesso Ligure davano luogo a processi deposizionali di ambiente profondo nel prospiciente bacino di neoformazione durante tutto il corso del Pliocene (Ricci Lucchi, 1982).

Tra gli elementi tettonici regionali più rilevanti della zona di interesse spicca la linea del Sillaro, noto in letteratura (Benini et al., 2009) come lineamento tettonico trasversale ad orientazione NNE–SSO antiappenninica, che mette a contatto le unità caotiche Liguridi con la successione umbro-marchigiano-romagnola e che costituisce, tramite una serie di faglie transpressive destre e sovrascorrimenti, il limite orientale originario delle Liguridi nel settore emiliano dell'appennino settentrionale (Figura 3): questa linea tettonica presenta cinematica prettamente verticale ed è uno dei fattori di spicco degli elevati tassi di subsidenza nella porzione nord occidentale da essa delineata. Essa è considerata uno tra gli elementi tettonici principali di shear attivi durante l'orogenesi appenninica (Ricci Lucchi, 1985).

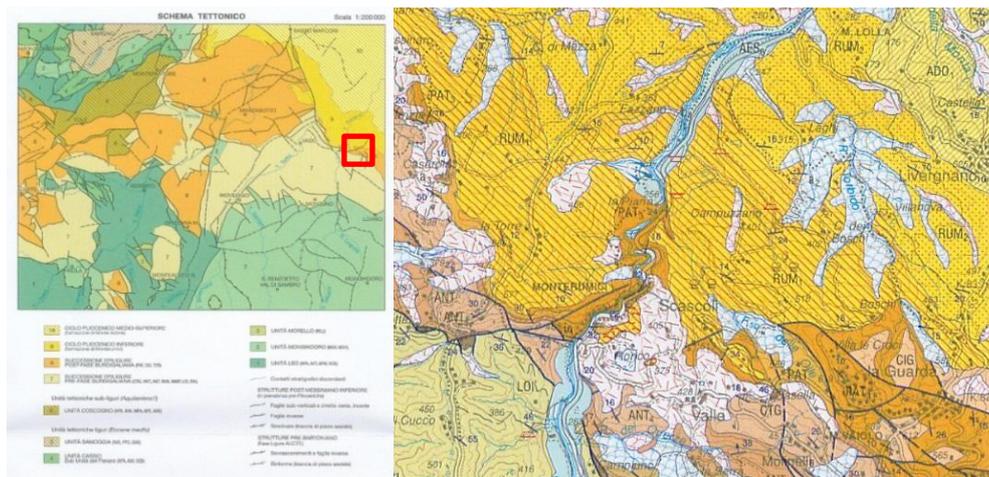
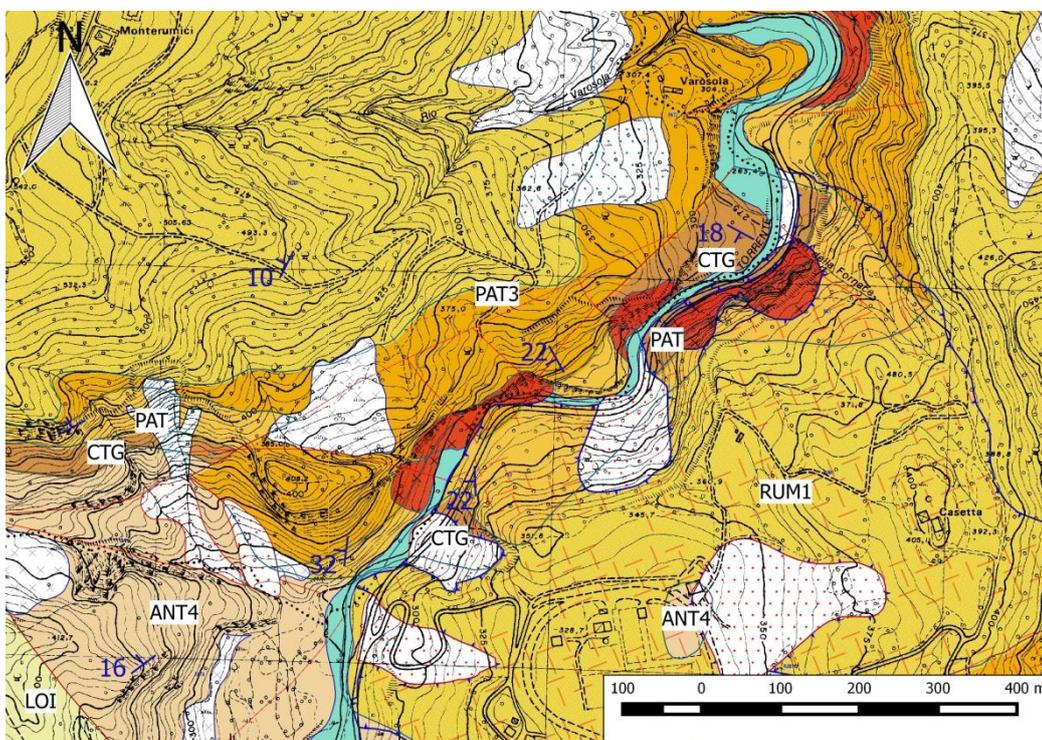


Figura 4. Estratto del Foglio 237 della carta geologica in scala 1:50000 e relativo schema tettonico-strutturale in cui in rosso è evidenziata l'area mostrata in carta, da ciò si evince come il torrente Savena scorra incassato tra le unità appartenenti al Dominio epiligure; è possibile distinguere anche l'enorme deposito di frana DGPV denominata "Grande frana di Scascoli".



Legenda

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ↓ Giacitura — Limiti unità geologiche — contatto stratigrafico o litologico certo — faglia certa — faglia incerta ▼▼▼ sovrascorrimento certo Coperture quaternarie a1a - Deposito di frana attiva per crollo e/o ribaltamento a1b - Deposito di frana attiva per scivolamento a1h - Deposito di frana attiva per scivolamento in blocco o DGPV a2b - Deposito di frana quiescente per scivolamento | <ul style="list-style-type: none"> a2g - Deposito di frana quiescente complessa a3 - Deposito di versante s.l. a6 - Detrito di falda b1 - Deposito alluvionale in evoluzione Unità geologiche ANT4 - Marne di Antognola - membro di Anconella CTG - Formazione di Contignaco LOI - Formazione di Loiano PAT - Formazione di Pantano PAT3 - Formazione di Pantano - membro di Calvenzano RUM1 - Formazione di Monterumici - membro di Scascoli |
|--|--|

Figura 5. Stralcio della cartografia geologica in scala 1:10000 fornita dalla RER tramite servizio digitale WMS.

Le gole di Scascoli si impostano lungo il torrente Savena, il quale scorre incassato nella omonima valle modellata su una monoclinale immergente verso NW, incidendo i corpi rocciosi appartenenti alle Unità epiliguri sedimentatesi sulla falda sommitale dell'intero edificio orogenico (Liguridi) (Panini et al., 2002).

In base alla bibliografia esistente e alla cartografia geologica fornita dalla Regione Emilia Romagna (Figura 4, Figura 5, Figura 6), dall'alto verso il basso in questa zona affiorano:

- Depositi quaternari, tra cui Depositi alluvionali (Olocene) costituiti da ghiaie e sabbie disposte su 4 ordini di terrazzi che costituiscono essenzialmente le alluvioni del torrente Savena. Frane quiescenti, frane attive, tra le quali emblematica risulta essere la Grande frana di Scascoli classificata come DGPV (deformazione gravitativa profonda di versante) e cartografata anche nel foglio al 50000 (Figura 4), e corpi di frana attivi di minore estensione.

- Formazione di Monte Rumici, (Pliocene inf.) che in letteratura (Benini et al., 2009) poggia mediante contatto erosivo discordante sulle unità mioceniche medio-sup. appartenenti alla successione Epiligure, e a tetto è delimitata tramite una superficie di discontinuità stratigrafica dalla formazione di Monte Adone. Essa presenta uno spessore variabile da pochi metri fino a 250 m ed è costituita da due membri, parzialmente eteropici, differenziati principalmente su base litologica: quello basale, noto come membro di Scascoli, (RUM1) consta di conglomerati eterometrici frequentemente embriciati a matrice sabbiosa grossolana, e subordinate arenarie a variabile grado di cementazione, in strati banchi generalmente spessi anche alcuni metri (Panini et al., 2002). La natura poligenica di tali conglomerati indica che questi

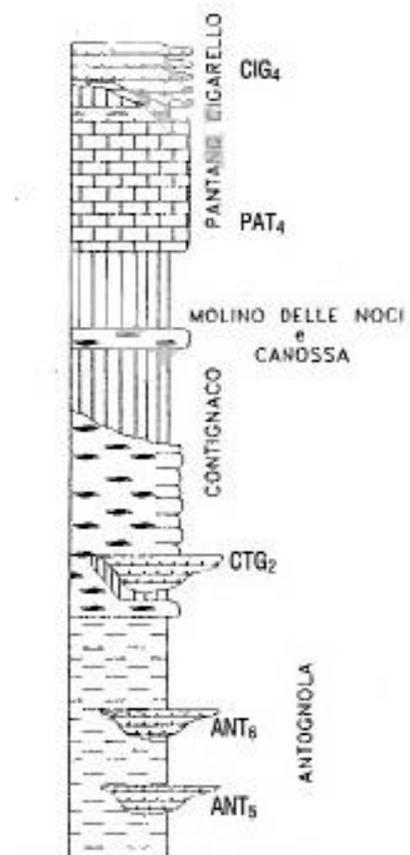


Figura 6. Sezione stratigrafica schematica che illustra i rapporti geometrici tra le formazioni di Antognola, Contignaco e Gruppo di Bismantova (Papani et al., 2004).

possano essersi generati dalla disgregazione delle Unità liguri ed epiliguri, i processi genetici che hanno messo in posto questi sedimenti sono attribuibili a trasporto fluviale. Questi conglomerati passano per graduale alternanza o parziale eteropia alle arenarie e sabbie argillose grigiastre del membro superiore, RUM2, (Benini

et al., 2009) caratterizzate da livelli a macrofossili addensati. L'ambiente di deposizione risulta essere quello di transizione da fluviale a marino marginale (Ricci Lucchi et al., 1981). Nell'area di studio questa formazione affiora nella parte sommitale del pendio, ed è composta da conglomerati scarsamente cementati che spesso generano fenomeni di debris flow (Marchi et al., 2013).

- Gruppo di Bismantova (Burdigaliano - Langhiano) (Amorosi A., 1990), è distinto in due formazioni: Formazione di Pantano e Formazione di Cigarello. Questo gruppo sedimentario si è depositato durante una fase di drastica variazione paleoambientale segnata dal passaggio da una sedimentazione torbido-emipelagica di scarpata-bacino a un ambiente di piattaforma. Il Gruppo di Bismantova è un complesso mosaico di litofacies riconducibili ad una grande varietà di ambienti deposizionali compresi tra la zona litorale e quella batiale. L'insieme delle facies di piattaforma costituisce la Formazione di Pantano, la cui evoluzione stratigrafica successiva porta nel Langhiano, ad un generale annegamento della piattaforma e alla deposizione di facies di scarpata-bacino costituite dalla formazione superiore di Cigarello (Panini et al., 2002).

La Formazione di Pantano (Burdigaliano sup. - Langhiano) risulta essere quella inferiore, depositasi in ambiente di piattaforma (Papani et al., 1987) e costituita da alternanza di areniti calcaree finissime grigio chiaro in strati e banchi di spessore variabile, con segni evidenti di bioturbazione (Papani et al., 2004), e areniti risedimentate da fini a medie e raramente grossolane, ben cementate con spessore metrico. La porzione basale di tale unità risulta costituita da un orizzonte più o meno potente di areniti con una notevole percentuale di glauconite (Panini et al., 2002). Sono presenti in modo abbastanza diffuso nel sedimento resti di Echinidi, gasteropodi, lamellibranchi, briozoi e coralli. La formazione di Pantano poggia mediante una superficie di discontinuità di importanza regionale sulla Formazione di Contignaco (Benini et al., 2009). Limitatamente all'area di studio in affioramento si rinviene il membro di Calvenzano PAT3, affiorante lungo la parete denominata "mammellone 1", esso è rappresentato in prevalenza da areniti ibride da fini a medie, a cemento carbonatico e generalmente bioturbate, organizzate in strati da medi a molto spessi, piano paralleli. Dal punto di vista meccanico tutti gli ammassi rocciosi appartenenti alla formazione di Pantano risultano abbastanza discontinui a causa di faglie e giunti: sono riconoscibili diverse famiglie di giunti che dividono l'ammasso roccioso in un sistema di blocchi poliedrici che vanno dalle dimensioni qualche m³ a qualche centinaia di m³, alcuni giunti possono essere avere aperture anche superiori ai 10 cm (Marchi et al., 2013).

La Formazione di Cigarellò, risulta essersi deposta in ambiente di transizione piattaforma esterna – scarpata in seguito all’ evento tettonico responsabile della disattivazione dei processi sedimentari che hanno dato origine alla formazione di Pantano, e al conseguente approfondimento dell’ambiente deposizionale (Papani et al., 2004). Essa è costituita da marne siltoso-sabbiose grigio scure a stratificazione indistinta, bioturbate e fossilifere in alternanza con sporadici livelli torbiditici arenaceo-pelitici. Diffusa è in generale la presenza entro le peliti di resti di gasteropodi, lamellibranchi, coralli ed echinidi (Panini et al., 2002). La Formazione di Cigarellò risulta essere caratterizzata da un generale rapporto stratigrafico di discontinuità con la Formazione di Pantano (Papani et al., 2004)(Figura 7). Sebbene in letteratura lo spessore totale del Gruppo di Bismantova ecceda i 700 metri, nelle gole di Scascoli esso non supera i 250 metri (da rilievi eseguiti da ENSER nel 2003).

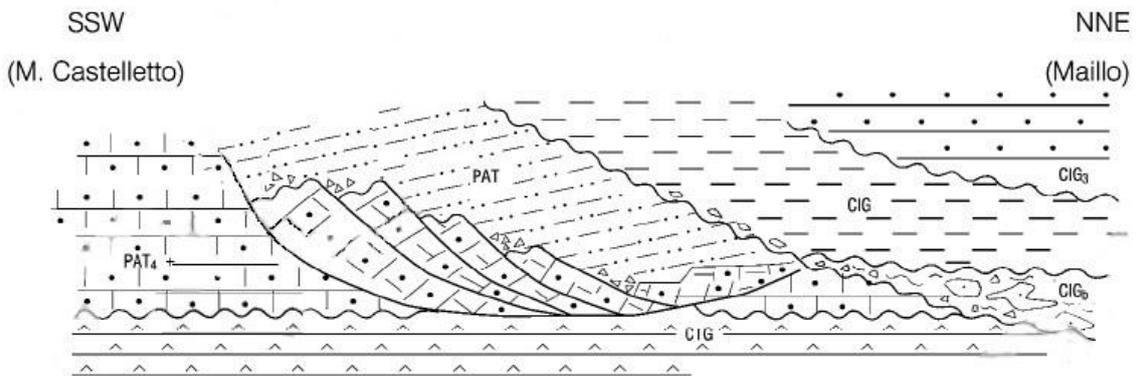


Figura 7. Spaccato stratigrafico schematico dei rapporti di discontinuità esistenti tra la Formazione di Pantano (PAT) e di Cigarellò (CIG) (foglio 218).

- Formazione di Contignaco (Aquitano – Burdigaliano) risulta delimitata a tetto dalla Formazione di Pantano mediante superficie di discontinuità, ed è caratterizzata da un contatto inferiore di passaggio graduale ed alternanza con le peliti di Antognola. Presenta una potenza variabile da alcune decine a un centinaio di metri, ed è costituita da marne e marne siltose grigio scure, spesso caratterizzate da silicizzazione secondaria, e dalla presenza di selce diffusa in liste e noduli (Panini et al., 2002), si rinvengono, inoltre, alla base locali intercalazioni di torbiditi vulcanoclastiche a grana media o fine. L’ambiente di sedimentazione è riferibile a quello di scarpata caratterizzata da ridotta sedimentazione di emipelagiti, arricchite in silice di origine bioclastica (Radiolari) (Benini et al., 2009).
- Formazione di Antognola (Rupeliano-Aquitano) in letteratura presenta uno spessore massimo di alcune centinaia di metri (Benini et al., 2009) benché nell’area di studio il suo spessore sia attestato a circa 40 m (Studio condotto da ENSER 2003, inedito). Appare costituita prevalentemente da marne argillose grigie e grigioverdi stratificate con

intercalazioni di arenarie vulcanoclastiche e torbiditi in strati medi e banchi; le superfici di fratturazione sono caratterizzate da patine magnesifere. L'ambiente di deposizione risulta essere quello di scarpata e bacino torbiditico confinato relativamente profondo, con episodici eventi di frane e colate sottomarine. In corrispondenza del fondovalle del Savena, le marne selciose ricoprono una parte del Gruppo di Bismantova, nonostante quest'ultimo sia più recente. Questa sovrapposizione anomala, si è prodotta in seguito ad un'imponente frana per scivolamento, che ha dislocato per centinaia di metri la successione Antognola-Bismantova-Monterumici (Gottardi et al., 2004) (Figura 8). In letteratura questa unità risulta delimitata a tetto dalla formazione di Contignaco mediante alternanza e passaggio graduale, mentre alla base non è del tutto chiaro quali siano i rapporti stratigrafici con le unità sottostanti (Panini et al., 2002), nell'area di studio risulta essere presente un contatto di discontinuità con la formazione di Monte Piano marcato da un brusco cambio litologico.

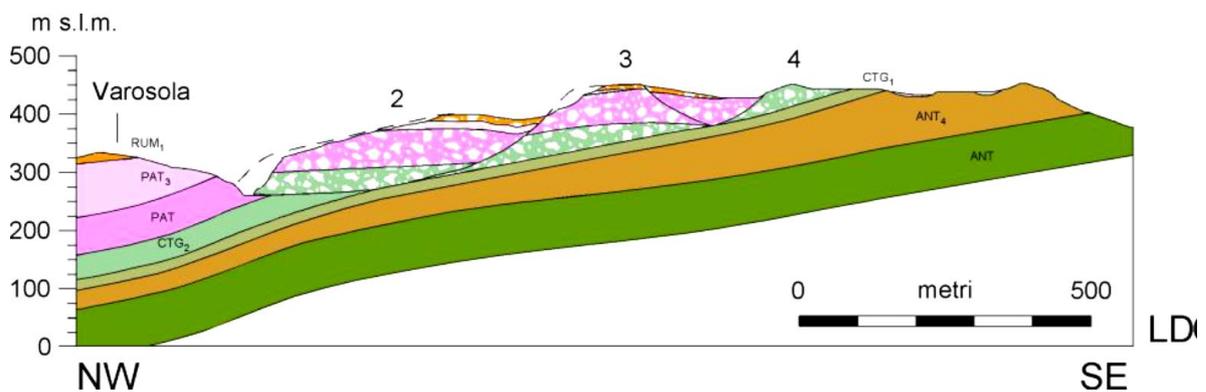


Figura 8. Sezione geologica della grande frana di Scascoli nella sua conformazione attuale, il corpo di frana è costituito da quattro ammassi rocciosi scivolati sostanzialmente in blocco, costituiti dalla successione semialloctona epiligure di cui fanno parte le formazioni di Contignaco, Pantano e Monterumici (Landuzzi & Bernagozzi, 1996)

2.2 Geomorfologia generale

L'evoluzione geomorfologica dell'area in esame è controllata principalmente dall'assetto strutturale della Successione epiligure che ha fortemente condizionato l'attività erosiva del T. Savena in questo tratto di fondovalle (Gambassi, 2006).

Le gole di Scascoli si impostano su ammassi rocciosi caratterizzati dalla presenza di una monoclinale che immerge verso NW. L'assetto tettonico locale delle formazioni interessate dalla valle ne influenza fortemente i caratteri geomorfologici: vi è infatti una netta asimmetria del rilievo sui due versanti delle gole (Figura 9).

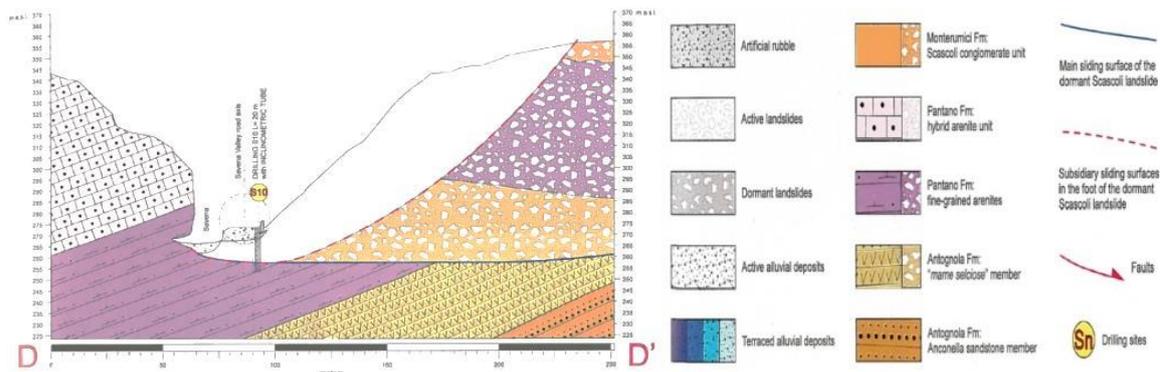


Figura 9: Sezione geologica schematica, riferita al profilo pre-crollo 2005, che attraversa le gole di scascoli secondo una orientazione NW-SE. E' possibile notare l'asimmetria del profilo dovuta alla presenza di una struttura monoclinale: a causa di tale conformazione strutturale lungo il versante destro (SE) gli strati immergono a franapoggio, mentre lungo quello sinistro (NW) gli strati immergono a reggipoggio (Marchi et al., 2013).

Il versante sinistro, caratterizzato da una stratificazione a reggipoggio, presenta un rilievo molto acclive talvolta aggettante e con dinamiche erosive principalmente dovute a crollo e ribaltamento di cui gli ultimi eventi parossistici sono stati registrati rispettivamente nel 1992, 2002, 2003, 2005: tra le cause predisponenti questi crolli è stata determinante l'azione di scalzamento al piede da parte del T. Savena (Gottardi et al., 2004) che presenta una generale tendenza a migrare verso NW. Tale tendenza evolutiva dipende da tre cause concorrenti:

- Immersione verso NW della stratificazione.
- Messa in posto della grande frana di Scascoli che in tempi storici ha ostruito il fondovalle forzando il torrente a descrivere un ampio arco convesso verso NW (Landuzzi & Bernagozzi, 1996).
- La costruzione agli inizi degli anni Ottanta di un rilevato stradale in destra idrografica affiancato da opere di difesa idraulica che forzano ulteriormente il torrente a spostarsi verso la sponda sinistra (Gambassi, 2006).

La frequenza degli eventi franosi evidenzia una risposta correlabile alle modificazioni indotte dal tracciato stradale, piuttosto che alla naturale evoluzione geomorfologica delle gole (Gambassi).

Il versante destro, con stratificazione a franapoggio, presenta delle pendenze leggermente più blande ed è interessato da un fenomeno franoso storico con segni di perdurante o residua attività che si estende alla scala di versante noto come "grande frana di Scascoli". Questa grande frana, classificabile come scivolamento roto – traslazionale multiplo profondo, interessa le gole per circa i due terzi della loro lunghezza e si è messa in posto in tempi storici mobilizzando un volume di circa 20.000.000 m³, con uno spostamento complessivo variabile dai 200 ai 400m. I principali fattori geologici responsabili della frana sono: la presenza di livelli argillosi particolarmente deboli

nella Formazione di Contignaco, la giacitura della stratificazione, a franapoggio meno inclinato del pendio, la presenza di faglie subverticali in corrispondenza degli attuali fianchi del corpo di frana (Landuzzi & Bernagozzi, 1996).

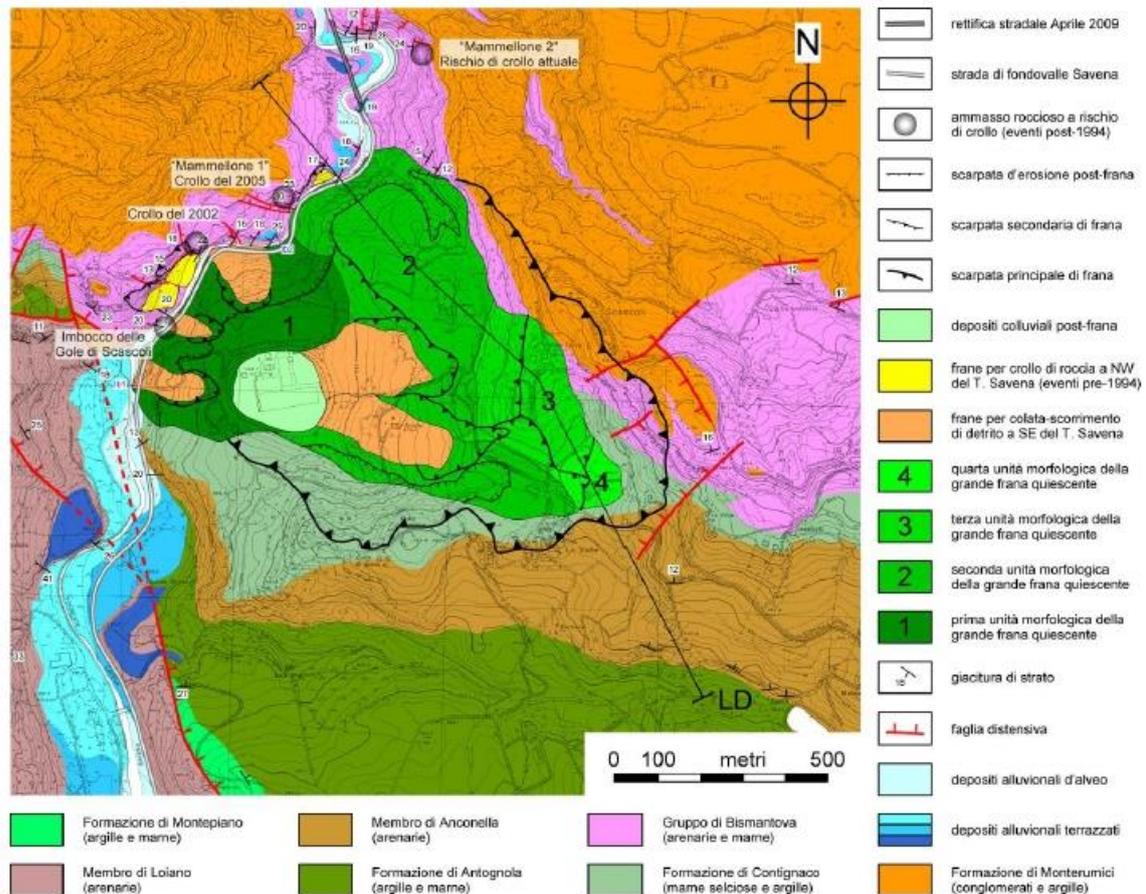


Figura 10. Estratto della carta geologico-geomorfologica dell'area in oggetto, in cui sono osservabili: i quattro ammassi rocciosi scivolati in blocco contrassegnati dalla numerazione progressiva da 1 a 4, i depositi di crollo sul versante sinistro della valle contrassegnati dalle aree in giallo, e i quattro ordini di terrazzi fluviali a monte della grande frana di Scascoli distinguibili dalle diverse tonalità di azzurro (Landuzzi & Bernagozzi, 1996).

La messa in posto della grande frana di Scascoli (Figura 10), ha avuto ripercussioni sia di tipo geomorfologico che di tipo stratigrafico locale. Dal punto di vista geomorfologico l'attuale configurazione della valle appare meno ampia rispetto alla configurazione pre-frana, nella quale il torrente Savena scorreva nella zona di confine tra le marne selciose di Antognola e la formazione di Bismantova (Figura 11). I rapporti stratigrafici locali, risultano interessati dall'evento in quanto, nel versante destro, le marne selciose della formazione di Antognola ricoprono una parte del Gruppo di Bismantova.

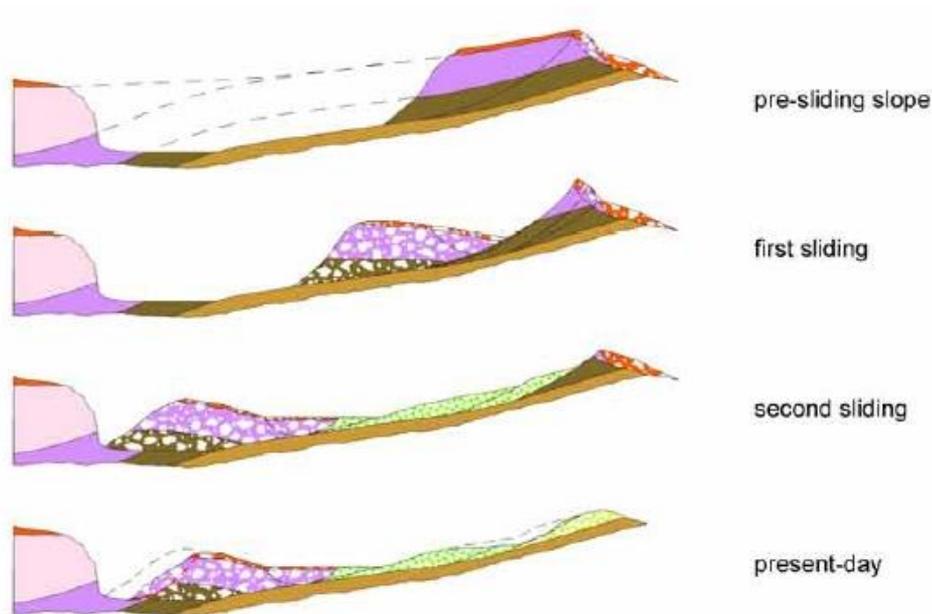


Figura 11. Schema evolutivo del fenomeno di messa in posto della grande frana di Scascoli, in cui si nota la drastica riduzione di ampiezza dell'alveo del torrente Savena (Ferro, 2003, modificata da Landuzzi & Bernagozzi, 1996).

Peculiare è la presenza di 4 ordini di terrazzi fluviali osservabili in Figura 10, il più antico dei quali denota una ampiezza anomala del deposito probabilmente legata alla temporanea ostruzione del fondovalle dovuta alla messa in posto della grande frana di Scascoli, e alla conseguente formazione di un lago di sbarramento. In questo complesso contesto geomorfologico il torrente Savena svolge un ruolo principe per quel che riguarda le dinamiche erosive del versante sinistro in quanto presenta la tendenza a migrare verso NW sottoponendo il versante ai processi di sottoescavazione e scalzamento al piede: tale dinamica è favorita sia dal contesto tettonico precedentemente illustrato, sia dalla messa in posto della grande frana di Scascoli che ha forzato il torrente a seguire l'andamento del deposito che ha invaso il fondovalle ostruendolo nella sua parte destra.

2.3 Evento 2002

In data 15 ottobre 2002, lungo il versante sinistro delle gole, si è verificato un crollo su un fronte roccioso di altezza media variabile dai 50 agli 80 m ed esteso per circa 60 che ha interessato un volume di roccia pari a 20.000 m³ coinvolgendo per 150m sia la sede stradale della strada provinciale omonima che l'alveo del torrente Savena, ostruendolo del tutto e provocando la formazione di un lago di sbarramento al piede del deposito di frana (Figura 12). Durante lo stato di emergenza successivo all'evento, al fine di fronteggiare l'emergenza idraulica legata ad un possibile evento di piena indotto dal ristagno delle acque di accumulo del torrente Savena a monte dello sbarramento, è stata predisposta l'asportazione di parte del detrito in modo da

realizzare un canale di deflusso alternativo in destra idraulica, funzionale durante le fasi di successiva demolizione e asportazione del materiale di crollo.



Figura 12. Foto aerea successiva all'evento di crollo del 2002, in cui è possibile notare il lago di sbarramento formatosi a monte e il canale di sfogo che le acque hanno aperto in destra idraulica per gentile concessione di Protezione Civile, Regione Emilia Romagna.

La parete interessata dal crollo del 2002 conta almeno un precedente storico totalmente analogo all'evento descritto: si tratta del crollo del 1992 stimabile in circa 7.000 m³ di roccia, di cui sono rimaste testimonianze nei blocchi a valle della parete, ricoperti da vegetazione stabile e nelle ortofoto del 1994 in cui la parete di roccia in oggetto appare totalmente denudata ed affiorante rispetto alle ortofoto precedenti (1988) (Figura 13).

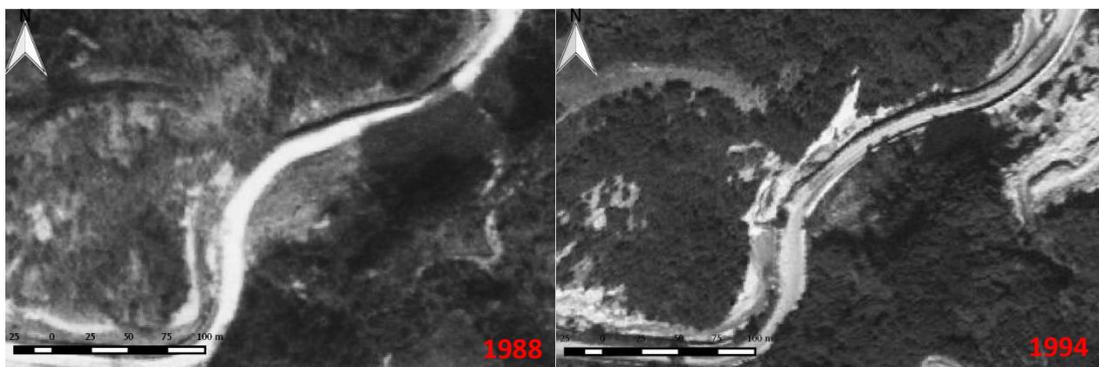


Figura 13. Confronto di immagini storiche: a sinistra l'ortofoto effettuata nel 1988 presenta una copertura vegetale stabile che è invece assente nell'ortofoto effettuata nel 1994, in cui è possibile notare la roccia affiorante.

Dal punto di vista cinematico il movimento si è probabilmente innescato per rottura progressiva a seguito di uno scorrimento traslativo-rotazionale, alla base di un cuneo di roccia (porzione DEH) del volume di circa 20.000 m³ interessato da una importante discontinuità subverticale preesistente che ne ha isolato meccanicamente il fianco destro dal resto dell'ammasso roccioso (Figura 14). Lo scivolamento iniziale ha creato instabilità nel fianco destro del cuneo, isolato dalla discontinuità e ha portato alla formazione di una nuova discontinuità sul fianco sinistro per cedimento delle resistenze a trazione della roccia che è poi evoluta in crollo e ribaltamento. La parte sommitale del cuneo risulta essersi mobilizzata in un momento immediatamente successivo rispetto al resto dell'ammasso poiché si è ribaltata e poggiata sui blocchi precedentemente caduti (Gottardi et al., 2004).

In seguito a questo evento è stato eseguito un approfondito studio geologico geotecnico dell'intera zona soggetta a dissesto, che ha condotto all'identificazione di una serie di siti a rischio critico, di questi i più importanti risultano quelli del "Mammellone 1" interessato dall'evento franoso del 2005 e quella del "Mammellone 2". Successivamente alle dinamiche descritte per l'evento del 2002, il versante in oggetto ha continuato a generare fenomeni di crollo minori già nel 2003 e nel 2005 documentati da foto satellitari e ortofoto.

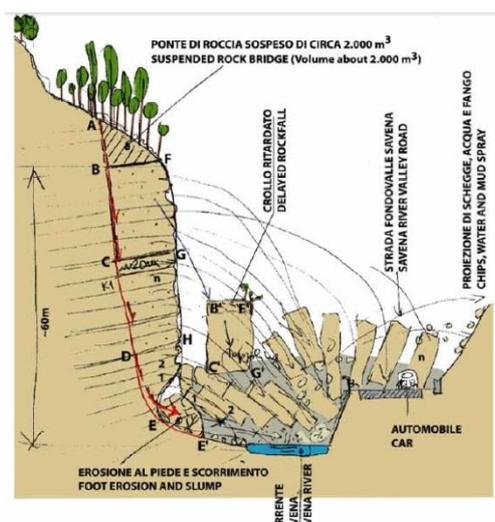


Figura 14. Schema del cinematisimo più probabile: in seguito al superamento dello sforzo di taglio del ponte di roccia basale (rappresentato dal segmento DE) è stato generato uno scivolamento rotazionale del blocco DHE che ha successivamente indotto instabilità nella porzione aggettante superiore DHFB, la quale ha dato origine a un crollo con chiare evidenze di ribaltamento (Gottardi et al. 2004).

2.4 Evento 2005

In data 12 marzo 2005 l'area denominata "Mammellone1" è stata interessata da un crollo su un fronte roccioso alto circa 60 m ed esteso 50 che ha interessato un volume di roccia pari a circa 35.000 m³ e che ha distrutto parzialmente un tratto di sede stradale lungo circa 100m e ostruito il corso del torrente Savena, provocando la formazione di un lago di sbarramento al piede del deposito di frana (Figura 15).



Figura 15: Foto aerea del deposito di crollo, per gentile concessione di Giovanni Bertolini (RER).

Il crollo ha lasciato la parete in uno stato di instabilità residua con la presenza di fratture di trazione verticali beanti a persistenza plurimetrica che, interessando uno spessore di circa 10m, ponevano a rischio di ulteriori crolli un volume di roccia stimabile in 13.000 m³: al fine di ridurre tale rischio è stato deciso di riprofilare il versante.

Durante tutta la fase dei lavori le acque del torrente Savena si sono incanalate naturalmente tra la barriera paramassi e il versante destro, erodendo al piede il pendio già al limite di stabilità e interessato dalla presenza di un deposito di frana già ben delineato del quale, dopo alcune settimane, si è riattivata la porzione al piede per scorrimento rototraslativo che dopo il parossismo ha riacquisito una nuova condizione di equilibrio limite.

L'iniziale progetto di riprofilatura del versante comportava la demolizione controllata di circa 50.000 m³ di roccia e la sagomatura a gradoni che tuttavia non è stata raggiunta a causa delle scarse proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso. Durante questa fase sono stati installati in parete diversi sensori per monitorare le fasi di scavo più critiche. Oltre all'intervento di riprofilatura il versante sinistro è stato interessato dai seguenti interventi di messa in sicurezza:

- è stato realizzato un piano basale sul settore sinistro della parete al fine di arrestare o rallentare eventuali blocchi non disaggiabili.
- è stata installata a metà altezza una barriera paramassi ad alto assorbimento di energia nel settore destro.
- è stata rivestita la parte superiore della parete con rete metallica al fine di evitare proiezioni di blocchi verso la strada.

In destra idraulica i lavori si sono svolti nel seguente modo:

- rimozione del corpo di frana instabile
- stabilizzazione del versante mediante soil nailing li dove affioravano ammassi rocciosi, mentre nei tratti in terra sono state utilizzati rivestimenti con reti a doppia torsione, biostuoie, e funi d'acciaio.
- Costruzione di gabbioni a monte della strada fondati su micropali
- Costruzione di un rilevato stradale con i materiali di risulta opportunamente pezzati provenienti dal crollo del Mamellone 1 e ultimato con terre rinforzate nella sua parte sommitale.
- Costruzione di una scogliera antiersiva a valle della sede stradale con blocchi arenacei e calcestruzzo.

Il meccanismo di rottura che caratterizza questo evento è sicuramente legato alla presenza di due discontinuità preesistenti che hanno isolato il volume di roccia coinvolto: il cuneo oggetto del crollo risultava infatti delimitato a destra da una discontinuità visibilmente degradata e a sinistra da una discontinuità solo in parte già delineata e con segni di ossidazione (Figura 16).

Inoltre dalla morfologia della nicchia di distacco che appare curva sulla porzione di roccia non alterata, si può osservare come l'ammasso roccioso si sia comportato alla stessa stregua di un mezzo continuo regolato dai processi di rottura progressiva legati al decadimento delle resistenze lungo i ponti di roccia. Da queste evidenze e dalle analisi di modellazione numerica effettuate a posteriori (Gambassi, 2007) emerge come il cuneo di roccia abbia sviluppato un cinematismo per i primi metri assimilabile allo scivolamento sul fianco destro successivamente evoluto in ribaltamento, con conseguente disgregazione in blocchi di varie dimensioni.



Figura 16: Nicchia di distacco in cui è osservabile la differenza di stato di alterazione delle due discontinuità (Gambassi, 2007).

3 Rilievo fotogrammetrico aereo della scarpata attuale tramite UAV

3.1 Metodologia utilizzata

Al fine di ottenere il modello 3D basato su nuvola di punti della parete attuale del “Mammellone 1” è stato eseguito un rilievo fotogrammetrico dell’area in oggetto mediante l’ausilio di un mezzo aereo a pilotaggio remoto di tipo multirottore dotato di camera fotografica calibrata per acquisizione dati.

3.1.1 Computer Vision

Con il termine Computer Vision sono indicate tutte le tecniche matematiche volte ad acquisire, processare ed analizzare immagini al fine di produrre informazioni numeriche (Szeliski, 2010) indipendentemente dal formato, dalle sorgenti o dai processi utilizzati a tale fine. Un sottoinsieme di queste tecniche è noto come Image-based modelling e si pone lo scopo di estrarre geometrie tridimensionali da fotogrammi bidimensionali: a seconda della fonte luminosa utilizzata si distinguono metodologie attive (fonte luminosa controllata dall’operatore) e metodologie passive (fonte luminosa naturale), mentre a seconda del numero di fotogrammi necessari alla determinazione di una geometria tridimensionale, si distinguono tecniche single-view, stereo view e multi-view, nelle quali sono utilizzati rispettivamente uno, due e più di due fotogrammi.

3.1.2 La fotogrammetria digitale

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo volta a parametrizzare metricamente nelle 3 dimensioni un oggetto fisico, o parte della superficie terrestre, partendo dall’analisi e dall’elaborazione di fotogrammi opportunamente acquisiti.

In maniera del tutto semplificata, a meno delle distorsioni dovute alla presenza delle lenti, la teoria geometrica dei sistemi ottici postula l'esistenza, per ogni sistema ottico, di due piani principali detti spazio oggetto e spazio immagine (Figura 17).

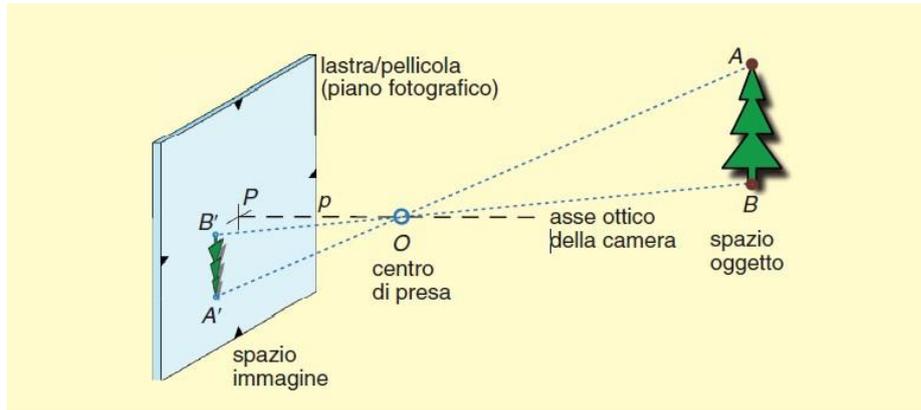


Figura 17. Schematizzazione di un sistema ottico e relativo oggetto di interesse: lo spazio oggetto è proiettato sullo spazio immagine tramite il centro di presa O (Cannarozzo et al., 2012).

Per impiegare un'immagine fotografica ai fini fotogrammetrici e quindi per ricavarne misure dell'oggetto fotografato è necessario che tale immagine sia assimilabile a una prospettiva centrale, in base alla quale i segmenti (raggi ottici) che congiungono i punti dell'oggetto con le loro corrispondenti immagini si incontrano tutti in un punto O distante pochi millimetri o centimetri (in relazione alla tipologia di ottica) dal piano in cui si forma l'immagine, detto centro di presa. Tale punto corrisponde al cosiddetto "punto nodale delle lenti".

Le relazioni che intercorrono tra le coordinate di un punto oggetto (reale) e il suo omologo punto immagine sul fotogramma, sono dette equazioni di collinearità (Figura 18) esse mettono in relazione le coordinate sul fotogramma di ogni punto immagine (nel sistema di riferimento fotogramma $\xi \eta$) e le coordinate dell'oggetto (nel sistema oggetto XYZ, normalmente cartografico per dati territoriali). Queste sono espresse da due equazioni in 3 incognite relative alle coordinate reali del punto oggetto nel sistema di riferimento oggetto.

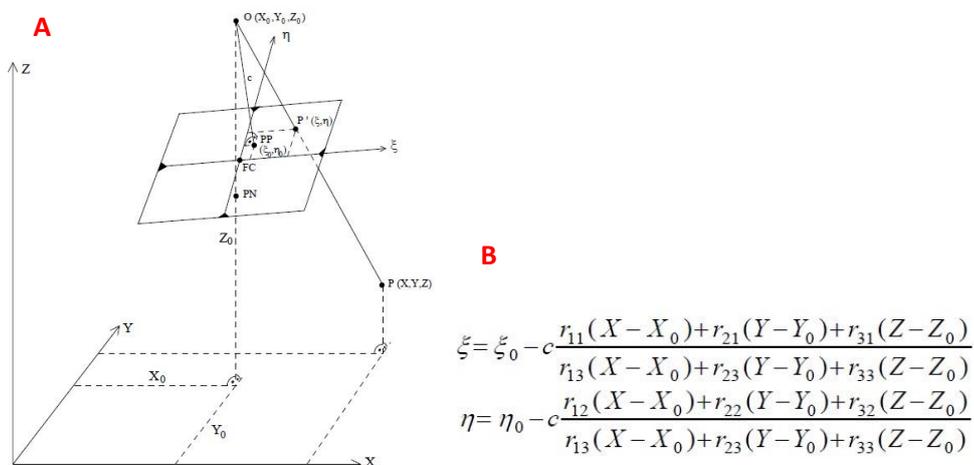


Figura 18. Rappresentazione grafica (A) e matematica (B) delle equazioni di collinearità che legano ogni punto del fotogramma acquisito con il suo corrispettivo reale.

Le equazioni di collinearità richiedono la conoscenza delle seguenti variabili indipendenti dette parametri di orientamento, i quali si dividono in:

parametri di orientamento interno

- Coordinate immagine del punto principale di miglior simmetria PPS
- Distanza principale (distanza focale)
- Coefficienti di distorsione delle lenti

e parametri di orientamento esterno, che definiscono la posizione e l'assetto della camera nel sistema di coordinate oggetto e solitamente derivano indirettamente attraverso la determinazione di una serie di Punti Fotogrammetrici d'Appoggio definiti sul terreno, individuabili chiaramente e misurati attraverso tecniche topografiche e geodetiche. Questi parametri sono:

- Coordinate del centro di presa nel sistema di riferimento oggetto
- Angoli di rotazione nello spazio (angoli di Eulero) di ciascun fotogramma nel momento dell'acquisizione definiti sempre nel sistema di riferimento oggetto.

Una macchina fotografica digitale risulta essere composta da due parti fondamentali: un sistema ottico e un sensore fotosensibile. Il sistema ottico consta di una serie di lenti e specchi opportunamente assemblati, il sensore fotosensibile è costituito da una griglia di fotodiodi ed è la sede su cui si imprime ogni immagine: uno schema geometrico semplificato ed esemplificativo può essere visto come un triangolo la cui base è costituita dal sensore, mentre l'altezza è data dalla distanza focale, ovvero la distanza fra il punto nodale delle lenti (O) e il piano del sensore (Figura 19 A). L'immagine catturata quindi, sarà la proiezione di uno spazio 3D su un piano 2D costituito dal sensore: i punti oggetto reali si proietteranno e definiranno i punti immagine virtuali giacenti sul piano del sensore e si potranno così definire le equazioni di collinearità (Figura 19 B).

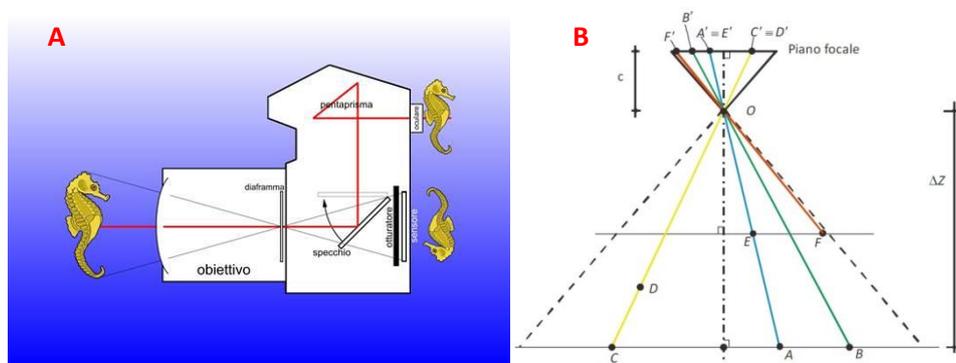


Figura 19. A) Schema ottico di una comune macchina fotografica di tipo reflex. B) Modello di rappresentazione di una scena reale tridimensionale su un piano bidimensionale rappresentato materialmente dal sensore fotosensibile.

Come appare evidente un singolo fotogramma, per sua natura bidimensionale, pur contenendo intrinsecamente delle informazioni geometriche, non è in grado di renderle fruibili in quanto il sistema di equazioni di collinearità non risulta determinato. Ad ogni punto oggetto corrisponde un punto immagine tuttavia per ogni punto immagine esistono infiniti possibili punti oggetto (Biason A. et al., 2003): infatti nella Figura 20 si può osservare come il punto immagine A' definito sul piano di una sola immagine con centro di presa O_1 , non è l'omologo del solo punto A sul terreno (punto oggetto), ma lo è anche per tutti gli infiniti punti A_1, A_2 ecc. che si trovano sul raggio proiettante r_1 (Cannarozzo et al., 2012).

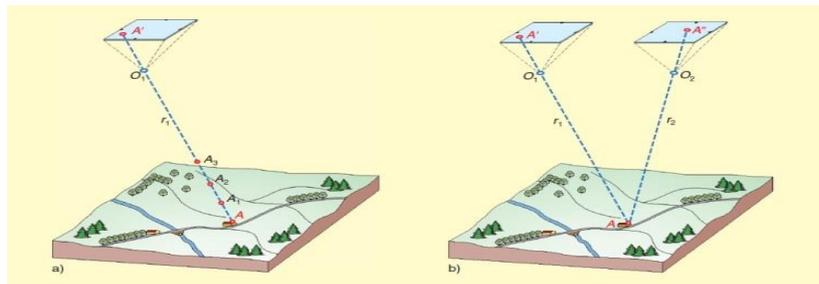


Figura 20. A) Indeterminazione della posizione del punto A lungo il raggio ottico r_1 . B) Se si dispone di due immagini a diverso centro di presa contenenti lo stesso oggetto, i suoi punti sono definiti univocamente dalla intersezione dei raggi omologhi r_1 ed r_2 (Cannarozzo et al., 2012).

Se si dispone invece di due fotogrammi con diversa ubicazione dei punti di presa, il punto oggetto sarà definito dall'intersezione dei due raggi proiettanti r_1 e r_2 : in termini matematici questo corrisponde alla risoluzione di un sistema di 4 equazioni in 3 incognite che è dunque iperdeterminato e verrà risolto con metodi di tipo statistico applicando il principio dei minimi quadrati.

Le incognite infatti rappresentano le coordinate reali del punto oggetto ($X Y Z$), mentre le equazioni contengono anche le coordinate dei due punti immagine sui fotogrammi nel sistema fotogramma (ξ, η).

Con l'avvento dell'era digitale i supporti analogici che da sempre erano stati al servizio di questa tecnica di rilievo sono stati sostituiti da quelli digitali ed in particolare il formato di memorizzazione delle immagini: esse sono infatti costituite da matrici bidimensionali di cui ciascun elemento è detto pixel, ed è l'elemento unitario che contiene l'informazione numerica (Biason A. et al., 2003). Le informazioni contenute sono quindi di tipo numerico, e in un immagine a colori, costituiscono le coordinate radiometriche delle tre bande di riferimento RGB (Red, Green, Blue) dello spettro elettromagnetico, oltre alle coordinate di posizione proprie del pixel all'interno della sua matrice di riferimento. Da ciò emerge che la fase di acquisizione coincide anche con quella di misura delle coordinate fotogramma (ξ ed η) di ogni singolo punto (pixel)

poiché durante questa fase si verifica l'assegnazione dei dati numerici ad ogni pixel: pertanto l'unità di acquisizione deve essere accuratamente definita e calibrata poiché gli errori causati da un non perfetto funzionamento della strumentazione in questa fase si ripercuotono irrimediabilmente in quelle successive.

Questa metodologia inizialmente sfruttava il principio della stereo-view (analisi di 2 fotogrammi) ma è successivamente evoluta secondo un criterio multi-view grazie all'implementazione di algoritmi propri della computer vision (Seitz et al., 2006), che hanno aperto le porte a quegli algoritmi che vengono definiti di tipo Structure from Motion.

3.1.3 SFM, Structure from Motion

I progressi nella computer vision e analisi delle immagini hanno portato allo sviluppo di un nuovo approccio fotogrammetrico chiamato Structure-from-Motion (SFM) che, associato con l'approccio Multi-View Stereo (MVS), offre un metodo completamente automatizzato in grado di produrre, ad esempio, un Digital Elevation Model (DEM) ad alta risoluzione con camere anche a basso costo.

Le tecniche basate su SfM–MVS producono modelli del terreno con accuratezze che dipendono da come vengono acquisiti i dati, dai criteri di processamento dei dati, dalla qualità dei Punti Fotogrammetrici di Appoggio e dalle strategie di rappresentazione dei dati stessi. Risoluzioni di nuvole di punti derivanti dal processo fotogrammetrico possono essere assolutamente confrontabili con i prodotti di LiDAR e TLS (Doneus et al., 2011) utilizzati per modellare con precisione oggetti con scala variabile da sub-centimetrica a chilometrica (James & Robson, 2012).

Gli algoritmi di Structure from Motion, sono noti anche per la loro capacità di ricostruire la posizione del centro di presa delle camere nello spazio e la geometria tridimensionale della scena (mediante una nuvola di punti densa) da una serie di fotogrammi sovrapponibili catturati da una fotocamera in movimento attorno alla scena. Con l'ausilio di algoritmi di stereo-matching, è possibile generare modelli 3D dettagliati delle superfici in maniera completamente automatizzata, l'orientamento assoluto del modello può essere ottenuto con la misurazione di punti di controllo attraverso tecniche topografiche e geodetiche (Doneus et al., 2011).

Successivamente alla raccolta dei dati fotografici, i processi alla base della tecnica della SfM si articolano in differenti step successivi:

- Calibrazione dei parametri di orientamento interno ed estrazione delle features (processo di autocalibrazione con definizione della nuvola sparsa)

- Definizione dei parametri di orientamento esterno
- Triangolazione aerea/bundle adjustment (definizione della nuvola densa)

Il termine “autocalibrazione” è da intendere nel senso che i parametri interni ed esterni delle camere sono determinati attraverso lo stesso dataset di immagini della scena da rappresentare, e non da un set di immagini dedicato alla calibrazione stessa (Moons, 2009). La fase di autocalibrazione, avviene contestualmente a quella di individuazione di elementi caratteristici e univoci nelle immagini, detta feature detection.

I parametri di orientamento interno vengono in prima approssimazione acquisiti dai dati Exif che ogni immagine contiene: le informazioni ivi contenute riguardano i valori dei settaggi utilizzati in fase di acquisizione, come la distanza focale e l’apertura del diaframma. Tuttavia la calibrazione vera e propria avviene durante la fase di feature detection.

La feature detection mediante una serie di algoritmi descrittivi individua sulle immagini entità e parametri differenti (Figura 21), come i valori radiometrici, elementi semplici come punti linee o aree, la presenza di relazioni spaziali topologiche tra diversi elementi: una feature per essere individuata come tale deve essere riconosciuta in un minimo di 3 fotogrammi. Uno degli algoritmi utilizzati a questo fine è noto come SIFT (Scale Invariant Feature Transform) il cui scopo è quello di riconoscere “features”, in ogni immagine, che siano indipendenti da scala, orientamento e variazioni di luminosità dei vari fotogrammi (Westoby et al., 2012), ad esso è affiancato un altro algoritmo denominato RANSAC (Random Sample Consensus) che svolge una funzione di best fitting e filtraggio su tutte quelle features (o TiePoint) che in qualche modo non garantiscono correttamente la miglior corrispondenza possibile con l’oggetto fotografato (Fisher & Bolles, 1981), tali punti vengono definiti Outlayers, ovvero valori anomali e quindi scartati dall’insieme delle feature utilizzabili come KeyPoint. Queste feature sono tracciate da un immagine all’altra consentendo una stima iniziale delle posizioni della camera che vengono in seguito raffinate iterativamente (Westoby et al., 2012).

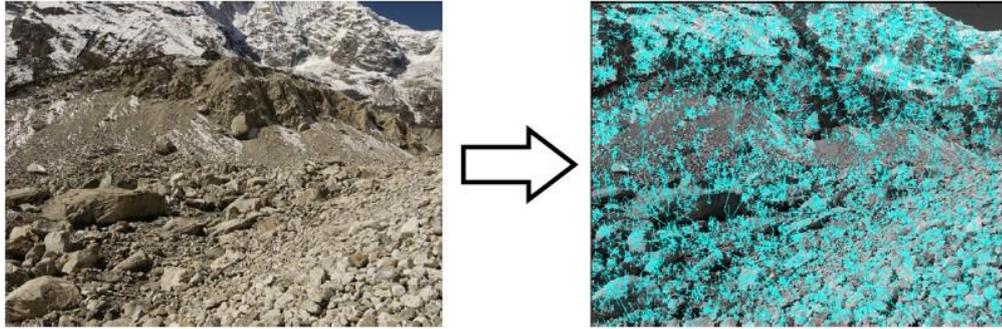


Figura 21. L'algoritmo SIFT scompone una immagine in un database di Tiepoint descriptor o features. Le linee indicano i singoli keypoint e l'area nella quale essi giacciono (Westoby et al., 2012).

Le feature così individuate nelle singole immagini vengono poi correlate tra loro mediante una serie altamente ridondante di algoritmi di autocorrelazione che definiscono la fase di image matching (Snavely, 2008). Durante questa fase i pixel di una immagine sorgente sono accoppiati a quelli equivalenti di un'altra immagine di ricerca, creando così dei vincoli geometrici come per esempio i vincoli epipolari ovvero dei criteri geometrici basati sulla geometria epipolare: questo tipo di geometria è alla base della visione stereoscopica e descrive la relazione tra due differenti viste 2D della stessa scena 3D. Vengono definiti vincoli epipolari (linee epipolari) le rette che collegano i punti immagine su ogni fotogramma ai punti di proiezione dei centri di presa dei fotogrammi adiacenti: lungo tali rette giace il corrispondente di un punto nel fotogramma adiacente (Figura 22), tali vincoli verranno poi utilizzati nella fase di triangolazione/bundle adjustment.

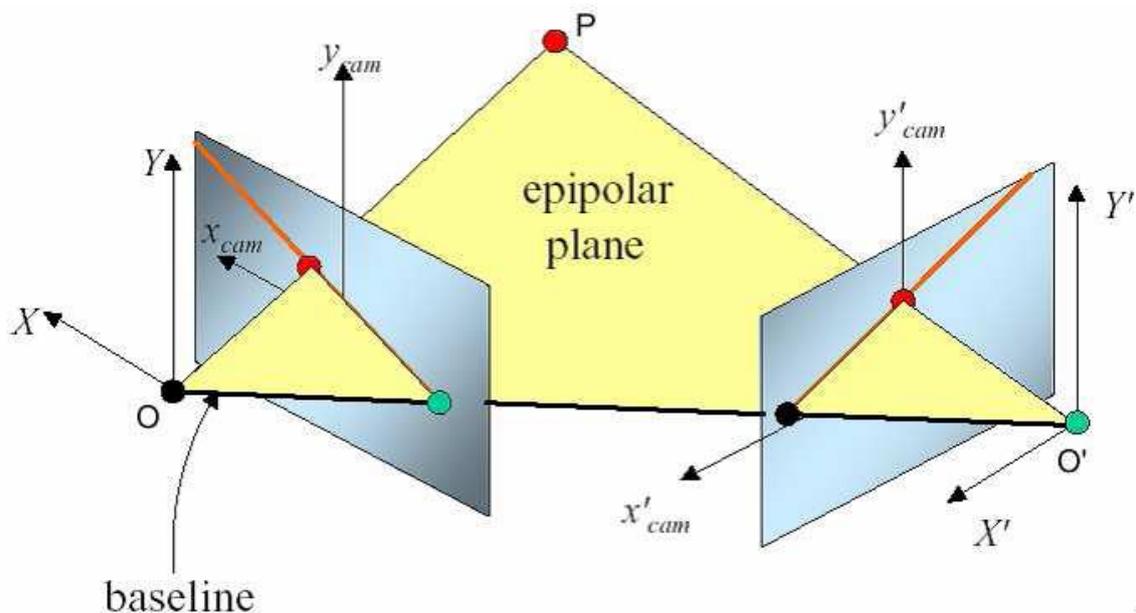


Figura 22. Schema di geometria epipolare.

Le correlazioni effettuate presenteranno altresì una serie di errori di proiezione legati in modo preponderante alle distorsioni ottiche di cui sono affette le macchine fotografiche. Queste distorsioni, calcolate durante la fase di orientamento interno, vengono minimizzate mediante algoritmi di riduzione dell'errore di riproiezione che lavorano sugli stessi parametri di orientamento interno della camera ottenuti dal precedente processo di autocalibrazione (Moons et al., 2009).

Individuate le features (o keypoints), grazie ai parametri di orientamento interno, è dunque possibile stimare i parametri di orientamento esterno di ciascun singolo fotogramma che consistono nelle coordinate spaziali e negli angoli di Eulero della camera. Una volta determinate le incognite riguardanti tutti i parametri delle camere, si passa alla fase di triangolazione aerea, che consiste nel determinare la posizione 3D di un punto da un dataset noto di immagini e delle relative posizioni nello spazio (Szeliski, 2010): ciò avviene determinando il punto che, nelle tre dimensioni, è più prossimo all'intersezione delle rette omologhe delle features individuate durante la fase di feature matching, dai vincoli epipolari (Figura 23).

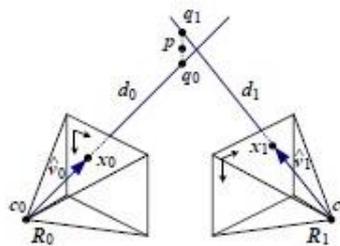


Figura 23. Rappresentazione del processo di applicazione di geometria e vincoli epipolari e triangolazione: il primo caso si verifica all'intersezione delle semirette, mentre il secondo si verifica nel punto P.

Tuttavia a causa delle distorsioni legate all'apparato fotografico, queste rette non corrisponderanno ai criteri stabiliti dai vincoli succitati: vi sarà quindi un errore nella proiezione dei punti rappresentanti le features nello spazio. Al fine di minimizzare questo errore viene applicato un procedimento su base statistica definito di Bundle adjustment che ha lo scopo di minimizzare gli errori derivanti dalle precedenti fasi di calcolo (errori di riproiezione).

Le operazioni di Bundle adjustment forniscono come output una stima definitiva delle posizioni delle camere e una nuvola sparsa di punti (Westoby et al., 2012), nella quale solamente i keypoints sono rappresentati nella scena 3D: per ottenere una nuvola di punti densa vengono utilizzati algoritmi MVS (dense multi view stereo-matching) i quali utilizzano come input tutte le corrispondenze trovate tra le *features* e le posizioni delle camere. Questi algoritmi scompongono inizialmente il dataset fotografico in sotto-gruppi di immagini sovrapponibili, in

modo tale da risultare più facilmente gestibili in termini computazionali (Westoby et al., 2012), per poi operare sui valori di tutti i pixel delle singole immagini, al fine di proiettarli correttamente sulla scena (Varhoeven, 2011): il risultato di questo processo consiste in un incremento di almeno due ordini di grandezza della densità di punti rappresentati. Poiché le posizioni dei centri di presa mancano di riferimenti spaziali assoluti, l'intero modello derivato da SfM non sarà scalato né presenterà un proprio sistema di riferimento. Il risultato di questo processo è perciò una nuvola di punti densa il cui sistema di riferimento è di tipo relativo: le trasformazioni per passare da un modello in coordinate relative a uno in coordinate assolute sono ottenute mediante l'identificazione e l'inserimento manuale di punti di controllo (GCP) a coordinate note nel modello (Westoby et al., 2012).

La nuvola densa di punti costituisce il dato di input per la successiva fase di creazione del modello poligonale detto Mesh: tra gli algoritmi principali utilizzati a tale scopo vi è il PSR (Poisson Surface Reconstruction) che utilizza come dato di partenza le normali dei punti estratti dalla nuvola, assimilate ad un campionamento della funzione che descrive la superficie del modello (Kazhdan et al., 2006).

Altro metodo deputato allo stesso compito è noto come Ball Pivoting, il cui funzionamento si basa sulla creazione di triangoli dalla nuvola di punti, tali da rispettare il seguente principio: tre punti formano un triangolo solo se una sfera di raggio definito dall'utente, li tange senza contenere nessun altro punto (Figura 24) (Bernardini et al., 1999).

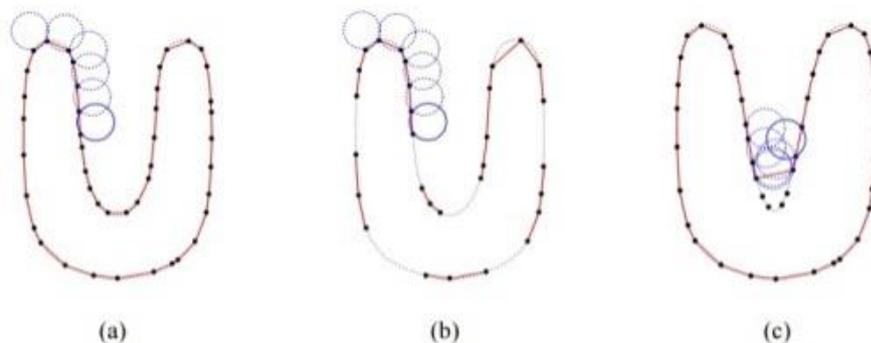


Figura 24. Schematizzazione 2D dell'algoritmo di Ball Pivoting, in cui un cerchio di raggio r ruota da punto a punto connettendo i vari punti incontrati con un segmento: quando la distanza tra due punti successivi è troppo grande non sarà creata alcuna connessione, generando così dei buchi.

Il prodotto finale, ottenuto dall'approccio SfM-MVS alla modellazione 3D, consiste in una superficie tridimensionale, la cui struttura è assimilabile a una maglia triangolare irregolare, che può successivamente essere elaborata in diversi modi a seconda degli obiettivi della ricerca condotta.

3.1.4 Scala di restituzione e GSD

A causa dell' ampio range di variabilità dei sistemi fotografici e della distanza dall'oggetto del rilievo, per confrontare in termini di risoluzione i prodotti di output, oppure i singoli fotogrammi di input, è necessario introdurre un parametro che tenga conto delle variabili in gioco quali dimensione del pixel, distanza focale e distanza dall'oggetto: il GSD (Ground Sample Distance) (Basion A et al., 2003). Questo parametro non è altro che la distanza tra i centri di due pixel consecutivi espressa in unità di misura oggetto, ovvero indica la grandezza di un pixel proiettato a terra e quindi, definisce il più piccolo dato rappresentabile nel modello (Figura 25).

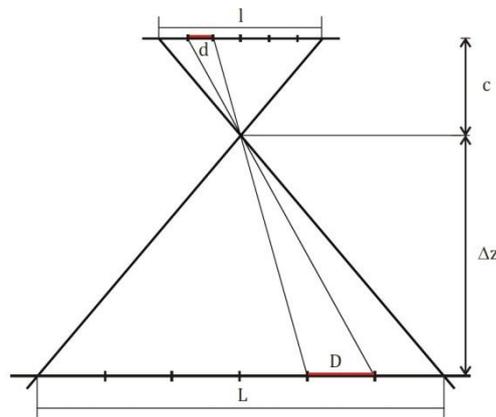


Figura 25. Considerando l la dimensione del sensore e d quella dei relativi pixel, esiste una proporzione che lega tale dimensione con quella virtualmente proiettata sulla superficie reale indagata L e il corrispettivo elemento minimo rappresentabile D.

Il GSD si calcola mediante il seguente algoritmo:

$$d : \text{GSD} = f : H$$

d=dimensione del pixel del sensore (calcolata dal rapporto tra dimensione del sensore e numero di pixel)

f= distanza focale

H= distanza dell'oggetto dal centro di presa

Il GSD è anche il parametro con cui si definisce la soglia di indeterminazione di un determinato rilievo fotogrammetrico.

3.1.5 Mezzi aerei a pilotaggio remoto

I sistemi UAV forniscono un supporto perfettamente integrato alla fotogrammetria digitale, in quanto essendo capaci di trasportare e comandare a distanza gli apparati fotografici utilizzati a tale fine, costituiscono un sistema molto versatile per il rilevamento di prossimità a basse quote.

Si definisce UAV (Unmanned Aerial Vehicle) un qualsiasi mezzo aereo a pilotaggio remoto, ovvero con l'assenza di pilota a bordo. Questa categoria così definita abbraccia una casistica estremamente ampia di velivoli che spazia da quelli ad uso militare di dimensioni paragonabili, se non superiori ai velivoli classici, fino ai modelli con peso inferiore ai 300 g.

In questa sede verrà approfondita la soluzione tecnica adottata per applicazioni di telerilevamento a bassa quota: i multicotteri. L'utilizzo di questi mezzi per il telerilevamento e più in particolare nelle applicazioni di fotogrammetria aerea, costituisce un forte elemento innovativo tanto più se accostato alle moderne tecniche di processamento dati basati sulla computer vision sopra descritte.

Gli UAV utilizzati a tali scopi si differenziano in multirotori e ad ala fissa: i primi a propulsione verticale, i secondi a propulsione longitudinale. Oggetto di questa trattazione sono i multirotori, definiti tali poiché azionati da propulsione elettrica mediante una serie di motori brushless ad elica montati sulle appendici periferiche (bracci) del telaio che costituisce il corpo del multirottore: quest'ultimo può essere di diversa forma e variare di assetto a seconda delle esigenze di volo, legate essenzialmente alla portanza e alla stabilità del mezzo (Figura 26).

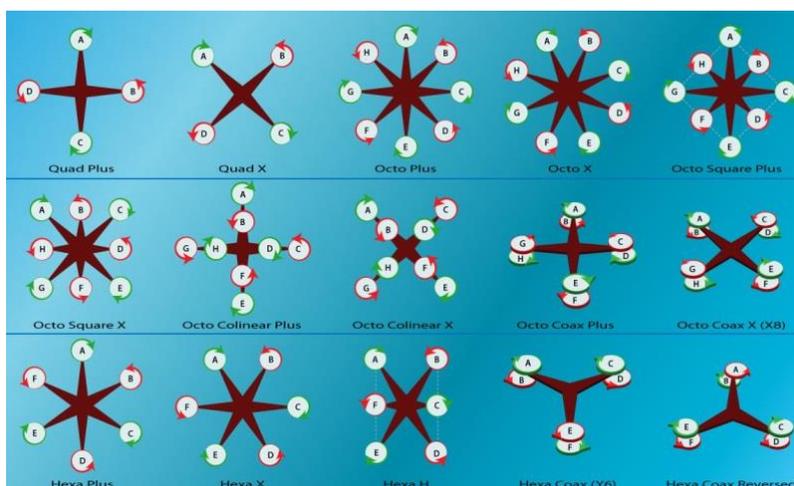


Figura 26. Esempi di assetto e struttura dei più comuni multirotori.

I motori sono alimentati da corrente continua erogata da una o più batterie a celle di polimeri di litio che generano campi magnetici variabili sugli statori dei motori, mentre i rotor, dotati di magneti permanenti, sono messi in rotazione dalla variazione di campo magnetico. Questo sistema di propulsione è governato, tramite sistemi elettronici di controllo della velocità chiamati

ESC, da una centralina di processamento dati di volo detta MCU Flight controller, la quale di fatto ha il compito di mantenere l'UAV in assetto e di tradurre i comandi provenienti dal sistema di controllo radio in input elettrici da trasferire ai motori stessi (Figura 27).

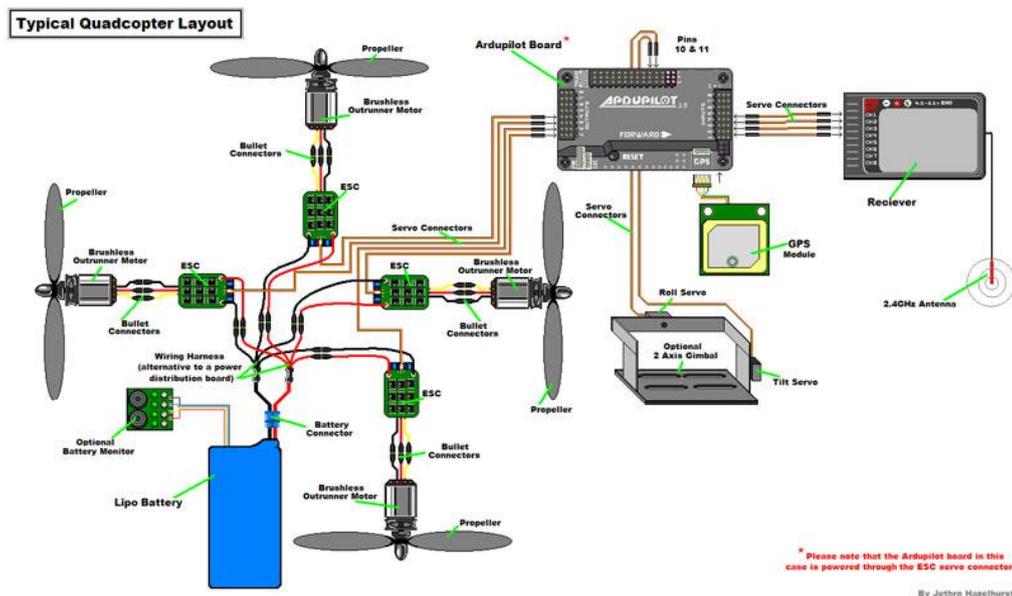


Figura 27. Schema costruttivo delle componenti essenziali di un multirorotore, in questo caso a 4 motori.

Il flight controller al fine di eseguire i vari calcoli necessari alla stabilità del mezzo, si serve di un sistema inerziale IMU e di un ricevitore GPS: il sistema inerziale è costituito da un insieme di sensori quali Giroscopio, Accelerometro, Barometro, Altimetro che permettono di calcolare con altissima frequenza i parametri di compensazione da trasferire al sistema di propulsione affinché il mezzo risulti in posizione di equilibrio, il modulo GPS ha la duplice funzione di coadiuvare la stabilizzazione del mezzo e di definizione della posizione spaziale del mezzo istante per istante durante il percorso di volo, al fine di rendere il mezzo capace di mantenere una posizione stabile nell'aria e dare la possibilità di eseguire voli programmati. Il pilotaggio di questi mezzi avviene per mezzo di segnali radio, solitamente su frequenze di 2.4 Ghz, tramite un sistema di trasmissione a terra (Radio) e un sistema ricevente a bordo del mezzo (ricevitore) che è in continua comunicazione con la scheda di volo Flight controller. Nel volo programmato la trasmissione dati è deputata a trasmettitori esterni al radiocomando interfacciati con postazioni mobili informatizzate note come Ground Station che inviano al Flight controller i dati di posizionamento GPS remoto da raggiungere, e i relativi parametri di velocità e altezza di volo.

Solitamente il sistema fotogrammetrico accoppiato al mezzo vero e proprio costituisce una parte a se stante rispetto al resto dell'apparato, sia per le differenziate esigenze dell'utenza che adopera questo tipo di sistemi di rilevamento, sia perché al fine di mantenere il sistema fotogrammetrico in una posizione prestabilita e che non vari durante il movimento del mezzo, è necessario l'ausilio di un sistema inerziale IMU parallelo i cui sensori sono disposti e rigidamente

collegati all'alloggiamento della camera: alla serie di sensori IMU è accoppiata anche in questo caso una serie di motori disposti rispettivamente sui tre assi di rotazione per garantire la completa rotazione dell'unità di acquisizione dati, necessaria per il mantenimento dell'assetto predefinito. Al fine di rendere geo-riferite le immagini catturate dal sistema fotogrammetrico a bordo del mezzo è previsto l'utilizzo di camere con modulo GPS integrato, oppure di sistemi di registrazione del segnale GPS acquisito dalla scheda di volo del mezzo.

3.1.6 GNSS (Global Navigation Satellite System)

E' stato possibile conferire coordinate spaziali al modello per mezzo dell'inserimento in esso di punti di controllo misurati sul campo mediante sistema GNSS.

Il sistema di posizionamento NAVSTAR GPS (ancora il più utilizzato rispetto agli altri sistemi quali il russo GLONASS, il cinese BEIDOU, l'ancora incompleto europeo GALILEO) si fonda sul concetto di base noto come trilaterazione o intersezione spaziale distanziometrica, secondo il quale è possibile determinare la posizione tridimensionale (planimetrica e altimetrica) di un punto in un dato sistema di riferimento, misurando le distanze tra questo e alcuni punti a coordinate note (Biasion et al., 2003). I punti a coordinate note del sistema di riferimento in questione sono costituiti da una costellazione di 24 satelliti (della costellazione GPS con 3 di riserva sempre in orbita) distribuiti su 6 orbite circumpolari progettata in modo tale da renderne visibili, dalla superficie terrestre, un minimo di 4 e un massimo di 12, in qualsiasi punto del globo.

Essendo quindi noti:

- il sistema di riferimento cartesiano geocentrico avente origine nel centro di massa della terra, denominato genericamente WGS 84 con specializzazioni in diversi sistemi quali ITRF (International Terrestrial Reference Frame) e ETRF (European Terrestrial Reference Frame)
- le effemeridi (o coordinate) orbitali dei satelliti determinate in funzione del tempo nel medesimo sistema di riferimento

è possibile ottenere le relazioni che legano le grandezze incognite, ovvero le coordinate del punto di interesse sulla superficie terrestre alle grandezze note, mediante equazioni che esprimono la distanza misurata tra satellite e punto incognito ove verrà posizionata l'antenna e il ricevitore satellitare. Disponendo di tre equazioni (definite dalla distanza tra il punto incognito e 3 satelliti) in tre incognite (le 3 coordinate geocentriche del punto incognito) il sistema sembrerebbe determinato. Tuttavia a causa delle differenze nei tempi di misura tra satellite e ricevitore

dipendenti maggiormente dallo sfasamento degli orologi a bordo del satellite (orologio di tipo atomico) e a bordo del ricevitore (orologio di tipo al quarzo) e a tutta una serie di ritardi temporali non pienamente determinabili una quarta incognita si aggiunge alle tre precedentemente elencate: lo sfasamento temporale tra satelliti e ricevitore. In questo modo al fine di determinare la posizione tridimensionale di un qualsiasi ricevitore GPS è necessario disporre di almeno 4 satelliti e delle relative 4 misurazioni di distanza satellite-ricevitore con il fine di poter aggiungere una quarta equazione al sistema matematico (Biasion et al., 2003).

Il sistema GPS statunitense può essere distinto e descritto in tre sezioni: il segmento spaziale, il segmento di controllo, il segmento utenza.

Il segmento spaziale è quello che descrive la costellazione di satelliti, disposti su 6 orbite ognuna delle quali contiene 4 satelliti operativi più 3 di riserva. Questi trasmettono a terra dati contenenti letture di tempo, le effemeridi, e altre informazioni in codifica binaria su due frequenze radio portanti (denominate L1 ed L2), tra le quali le osservabili di codice e le osservabili di fase. Gli oscillatori a bordo dei satelliti producono un segnale di frequenza nominale f_0 pari a 10.23 MHz, tale segnale è caratterizzato da elevatissima stabilità pur non essendo perfettamente costante nel tempo. A partire dalla frequenza nominale f_0 vengono generate due sinusoidi dette portanti L1 e L2 che svolgono anche la funzione di trasportare il segnale binario (i codici, costituiti da una sequenza di impulsi ± 1) modulato su di esse ovvero trasposto in frequenze in cui la transizione binaria è tradotta con un salto di 180° nella fase del segnale prodotto (Biagi, 2009). Gli oscillatori degli orologi atomici installati sui satelliti sono caratterizzati da altissima accuratezza, mentre quelli dei ricevitori hanno un comportamento più erratico nel tempo: ciò porta inevitabilmente a uno sfasamento dei segnali generati dai componenti dei due segmenti spaziale e di utenza rispettivamente. Viene definita perciò "osservabile" (di codice o di frequenza) la grandezza misurata dal ricevitore mediante la differenza tra segnale proveniente dal satellite e quello della replica generata nel ricevitore (Caprioli, 2000) la definizione delle equazioni di osservazione (date dalla differenza tra tempi o tra fasi dei segnali ricevuti ed emessi dal segmento utenza) è alla base dei metodi di misura di pseudo-range e di differenza di fase.

Il segmento di controllo è costituita da:

- 5 stazioni fisse di "tracking" a terra situate lungo la fascia equatoriale della terra, uniformemente intervallati in longitudine. Le posizioni cui posizioni definiscono il sistema di riferimento nel quale sono calcolate le orbite satellitari
- Una stazione principale di controllo detta "master" che riceve i dati dalle stazioni di tracking che vengono elaborati per calcolare le effemeridi dei vari satelliti, e per valutare

le correzioni da apportare alle orbite e agli orologi atomici e che ha il compito e la possibilità di trasmettere dati ai satelliti.

Il segmento utenza rappresenta tutto l'insieme di ricevitori satellitari utilizzati dal sistema GPS per ricevere i dati e dal corrispettivo apparato software di gestione delle sessioni di misura e di processing dei dati registrati.

- Modalità di misura

Il posizionamento avviene secondo una tecnica di "intersezione spaziale distanziometrica" riferita al sistema di riferimento geodetico di tipo geocentrico WGS84 con ellissoide GRS80 (nelle diverse specializzazioni ITRF o ETRF); esistono due metodi di utilizzo del segnale elettromagnetico proveniente dai satelliti: misura di pseudorange (attraverso l'utilizzo dei soli codici) e misura di fase. Nel presente caso di studio è stato utilizzato quest'ultimo.

- Misura di pseudorange

Questa misura è la più semplice da eseguire ma anche la meno precisa: il segnale trasmesso dal satellite è modulato in frequenza e codificato e sincronizzato con il ricevitore in modo da generare lo stesso codice nello stesso lasso temporale. In tal modo, tramite il confronto dei due segnali, è possibile determinarne il ritardo (Biagi, 2009). Conoscendo il ritardo temporale dovuto alla propagazione del segnale e la velocità di propagazione dell'onda portante nello spazio (in prima approssimazione la velocità della luce) è possibile calcolare la distanza definita appunto pseudorange poiché affetta da una serie di errori e incertezze legate principalmente alla natura previsionale delle effemeridi e alla variabilità della velocità di propagazione del segnale in atmosfera, attraversando gli strati di ionosfera e troposfera (Figura 28).

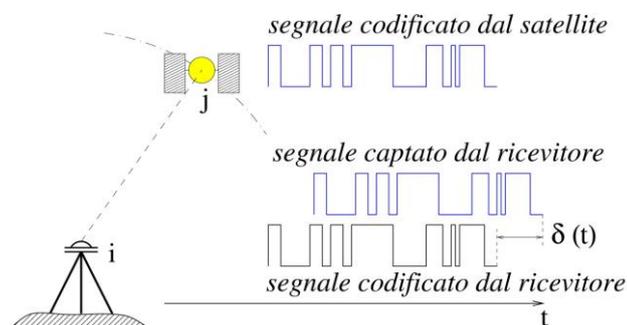


Figura 28. Principio di misurazione di pseudorange: il segnale emesso dal satellite, percorrendo la distanza che lo separa dal ricevitore, giunge sfasato di $\delta(t)$, si rende quindi necessaria una fase di codifica del segnale al fine di calcolarne lo sfasamento temporale e successivamente la distanza.

- Differenza di fase

Questa tecnica di misura, che è alla base del metodo utilizzato per il rilievo in oggetto, analizza una sorgente dati differente rispetto a quella di pseudo-range, infatti ciò che viene analizzata è la fase dell'onda portante, non il segnale di codice trasportato dalla stessa (Caprioli, 2000).

La misura vera e propria consiste nel confronto (espresso come differenza) tra la fase dell'onda portante trasmessa dal satellite, con quella di stessa frequenza emessa dal ricevitore: l'onda emessa dal satellite viene ricevuta a terra con frequenza leggermente variata a causa dell'effetto doppler tra satellite e ricevitore, mentre quella generata dal ricevitore è tenuta costante sulla frequenza nominale, perciò la differenza tra i segnali non è nulla. Per effettuare questo tipo di misura il contatto tra satellite e ricevitore deve essere stabile per un certo lasso di tempo. Per ogni misura di differenza di fase si ottiene una equazione che in seguito a una serie di semplificazioni matematiche può essere espressa in funzione delle incognite di posizione del ricevitore, delle effemeridi, e dell'offset degli orologi:

$$\frac{\sqrt{(X_s(t) - X_p)^2 + (Y_s(t) - Y_p)^2 + (Z_s(t) - Z_p)^2}}{\lambda} = [\phi(t) + N + f \cdot \delta t]$$

Le incognite che compaiono in questa equazione sono X Y Z dt e N: dove X Y Z e XYZ(s) sono rispettivamente le coordinate del ricevitore e del satellite, δt è il valore di sfasamento relativo tra orologio del satellite e orologio del ricevitore, e N è l'ambiguità di fase, vale a dire in numero intero di lunghezze d'onda che sussistono tra satellite e ricevitore. Oltre alle incognite vere e proprie, l'equazione sopra descritta presenta altri due fattori di criticità legati all'incertezza dei parametri λ (cioè la lunghezza d'onda) e delle effemeridi: il primo dovuto alla scarsa conoscenza della velocità di propagazione delle onde nella atmosfera e più i particolare della sua variazione, mentre il secondo legato alla natura previsionale delle effemeridi.

Supponendo di disporre di un secondo ricevitore, e di misurare le differenze di fase nello stesso istante tra i due ricevitori e il satellite, si otterranno 2 equazioni indipendenti (Figura 29).

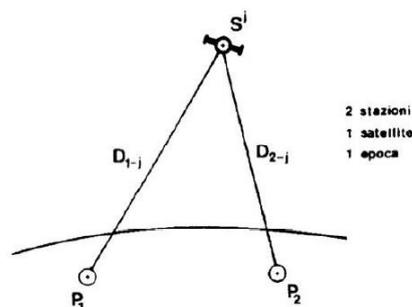


Figura 29. Differenza singola.

Si definisce differenza singola la combinazione lineare (differenza) di due equazioni di fase misurate da due ricevitori su uno stesso satellite in uno stesso istante: da questa differenza ne deriva una combinazione lineare nella quale è presente una incognita in meno (sfasamento orologio del satellite). Questo procedimento oltre a ridurre il numero delle incognite presenta un secondo vantaggio, infatti poiché la distanza tra i due punti di misura a terra è piccola rispetto alla distanza terra satellite, la differenza eseguita attenua gli errori sistematici dovuti alla imperfetta conoscenza dell'orbita e della velocità di propagazione del segnale nell'atmosfera (Biasion et al., 2003).

Se si considera, che i due ricevitori osservino simultaneamente due satelliti, è possibile scrivere quattro equazioni di fase e due equazioni alle singole differenze, queste ultime differenziate a loro volta forniscono un'equazione detta alle doppie differenze. In questo modo, vengono eliminati anche i termini legati agli errori di asincronismo degli orologi dei ricevitori (Biasion et al., 2003) (Figura 30)

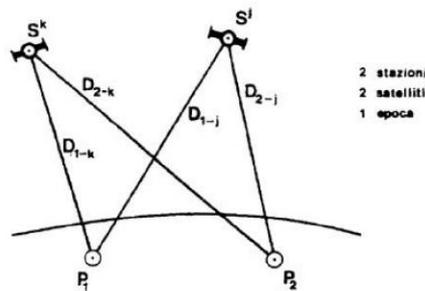


Figura 30. Differenza doppia.

Se a questo punto si ripetono le misure in tempi successivi diviene possibile ottenere due equazioni alle doppie differenze, che differenziate a loro volta si determinano anche le ambiguità di fase.

A questo punto considerando noto uno dei due punti a terra è possibile determinare le coordinate del vettore "baseline" che unisce i due vertici di misura, in modo tale da ottenere una maggior precisione, seppur relativa, su un vettore piuttosto che assoluta, su un singolo punto (Figura 31) Le accuratze a cui si può pervenire nella determinazione del vettore possono anche essere di tipo millimetrico.

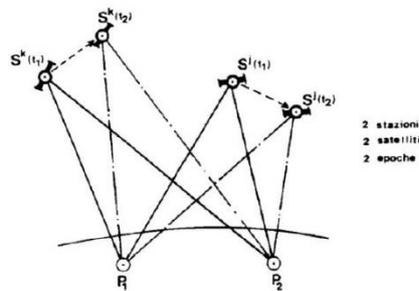


Figura 31. Differenza tripla.

Sulla base di questi assunti teorici vi sono diversi metodi pratici con cui adoperare le tecniche di misura differenziali:

- Metodo statico
- Metodo statico rapido
- Metodo cinematico
- Metodo in real time (RTK)

La tecnica adoperata per il caso di studio è quella di tipo statico rapido, in cui un ricevitore è tenuto fisso (master) su un punto di coordinate note e l'altro detto "rover" viene posizionato di volta in volta sui punti da rilevare. Il tempo di acquisizione dipende sostanzialmente dalla distanza tra il punto e il ricevitore master di riferimento. Le osservazioni vengono memorizzate all'interno di ciascun ricevitore e successivamente processate mediante software specifici. I due ricevitori devono sempre acquisire contemporaneamente.

3.1.7 Software per processamento dati fotogrammetrici

Il software utilizzato per l'elaborazione dati è Agisoft Photoscan: questo software basandosi sulle tecniche di ricostruzione 3D di tipo multi-view, utilizza gli algoritmi propri della fotogrammetria e in particolare della SfM, per ottenere dati spaziali 3D georiferiti in modo pressoché automatico (Agisoft LLC, 2014).

Questo software presenta un workflow suddiviso in quattro step successivi a cui l'utente può accedere in maniera sequenziale. E' inoltre prevista la possibilità di automatizzare tutto il processo mediante le operazioni di batch.

- Camera alignment: La prima fase consiste nell'allineamento dei fotogrammi, essa è anche quella che sfrutta a pieno gli algoritmi della SfM poiché in questa prima fase, mediante le operazioni di features extraction e matching, vengono ricostruite le posizioni geometriche dei punti di presa (Camera position) e dei punti omologhi (Tie Point e KeyPoint). Gli output forniti dal processing di allineamento consistono in 3 dataset: una nuvola di punti

sparsa costituita dai punti omologhi riconosciuti (KeyPoint), le coordinate dei centri di presa e i parametri di calibrazione della lente costituiti dalla distanza focale stimata dalle coordinate dei punti principali e dai coefficienti di distorsione radiale e tangenziale delle lenti dell'obiettivo.

- Ottimizzazione: vengono inserite le informazioni di posizionamento accurato dei target predisposti a terra con il fine di poter applicare gli algoritmi di Bundle Adjustment/Triangolazione Aerea per vincolare tutto il modello e poter anche dare le informazioni di georeferenziazione.
- Dense point cloud: La seconda fase di calcolo è finalizzata al raffittimento della nuvola sparsa: basandosi sulla posizione dei centri di presa e sulle immagini stesse, gli algoritmi di estrazione della nuvola densa, detti di stereo-matching, agiscono sui dati di ogni singolo pixel riproiettandolo in base alla posizione dei KeyPoint.
- Building mesh: Successivamente si passa alla fase di ricostruzione di una geometria solida poligonale basata sulla nuvola densa, nota come Mesh. Questa superficie è costituita da un reticolo a maglia triangolare di cui i vertici sono i punti della nuvola densa.
- Texture: Dopo aver creato la geometria di base è possibile generare una ortofoto (Agisoft LLC, 2014).

PhotoScan può generare modelli 3D georiferiti, in quanto è possibile importare nel programma i dati di posizionamento del modello (attraverso le coordinate geodetiche dei target) sia sotto forma di coordinate tabulari che direttamente come metadati dei singoli fotogrammi qualora si abbia a disposizione dati di notevole accuratezza in termini di posizionamento del centro di presa delle singole acquisizioni durante il volo del velivolo.

3.2 Campagna di misura

In data 30/03/2016 è stata effettuata la campagna di raccolta dati finalizzata alla creazione di uno o più dataset fotografici aerei necessari ad elaborare il modello 3D della parete in oggetto. Questa è stata condotta con due mezzi distinti, uno professionale e uno amatoriale, al fine di confrontarne gli output.

L'apparato strumentale utilizzato è composto da:

UAV1

- Esacottero a motori brushless dotato di apposito alloggiamento per camera fotografica
- Fotocamera Canon 600D a focale fissa nominale pari a 28 mm

- Fotocamera Canon EOS 750D con focale fissa nominale pari a 29mm
- Radiocomando costituito da trasmettitore a onde radio
- Ground station dotata di apposito software per la gestione e pianificazione del volo programmato
- Sistema satellitare geodetico a doppia frequenza Topcon GB500 con antenne di tipo geodetico
- Target topografici

UAV2

- Quadricottero DJI Phantom 3 equipaggiato con camera integrata di tipo DJI FC300X

Al fine di operare in totale sicurezza è stata disposta l'interruzione del tratto stradale interessato dai lavori durante le fasi di volo, grazie all'aiuto del personale della rete stradale autorizzato.

Sono stati posizionati nell'area interessata dal rilievo 12 target topografici per la georeferenziazione del modello e per il successivo controllo sull'errore di ri-proiezione. Questi sono stati distribuiti nel modo più omogeneo possibile compatibilmente con la morfologia della zona e cercando di ottenere una copertura satellitare massima al fine di minimizzare l'errore intrinseco della successiva fase di acquisizione GPS (Figura 32). I target utilizzati sono stati disposti sia sul ciglio della scarpata prospiciente la parete, che sul guardrail della fondovalle Savena che sui blocchi di sostegno della strada di fondovalle. Successivamente è stata eseguita la misura GPS dei singoli target con tempo di acquisizione di circa 5 minuti per ciascun target.



Figura 32. Fase di acquisizione GPS dei target posizionati preventivamente alla fase di rilievo fotogrammetrico.

In Figura 33 è illustrata la rete di punti di controllo adoperata per la successiva fase di georeferenziazione del modello estrapolato dal dataset UAV1.

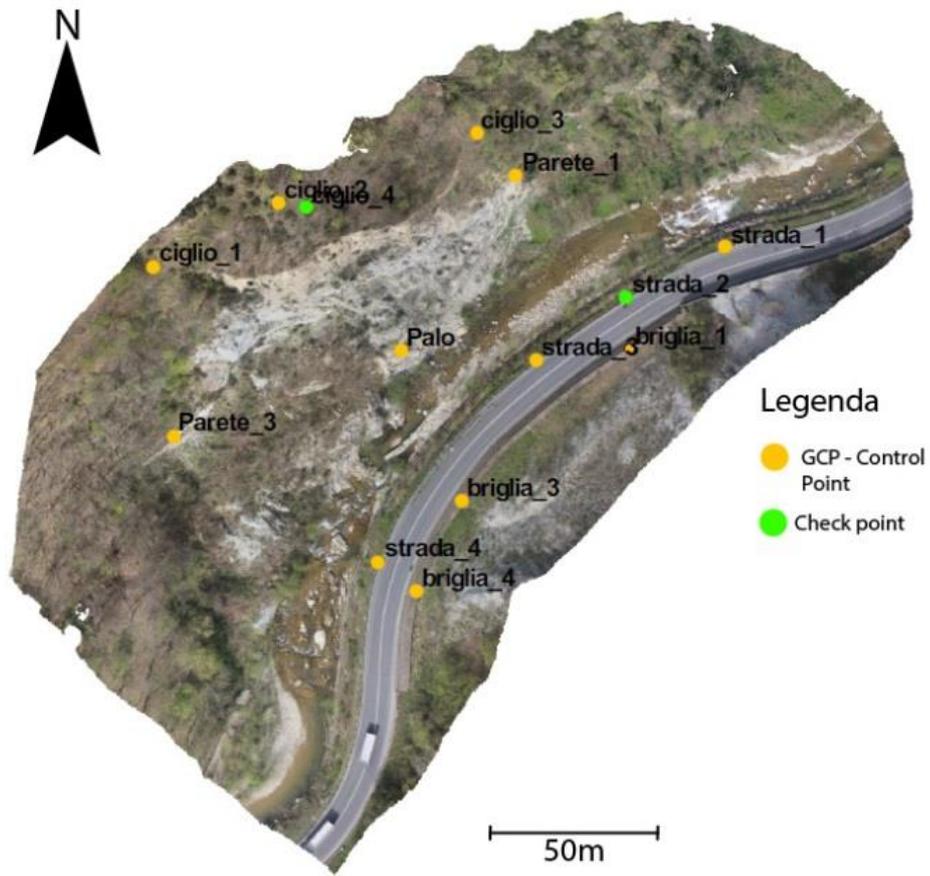


Figura 33. Ubicazione planimetrica dei target utilizzati per il processo di georeferenziazione in giallo, e dei punti di controllo utili a stabilirne l'errore di posizionamento in verde.

3.2.1 Rilievo con APR professionale UAV1

Sono stati effettuati 2 voli fotogrammetrici a quota non superiore a 70 m dal piano campagna, con ottica Canon EOS 600D, dei quali uno con camera in posizione nadirale e piano di volo programmato mediante ground station ed uno con camera obliqua pilotato manualmente al fine di garantire la rappresentazione delle porzioni aggettanti della parete, che nel dataset fotografico nadirale potrebbero essere non evidenziate. Per rendere iper-determinato il modello ed evitare la presenza di dati nulli nella porzione basale della parete in oggetto, è stato effettuato anche un rilievo fotografico da terra con ottica Canon EOS 750D (Figura 34) sempre con camera obliqua e interasse circa costante tra una presa e la successiva.

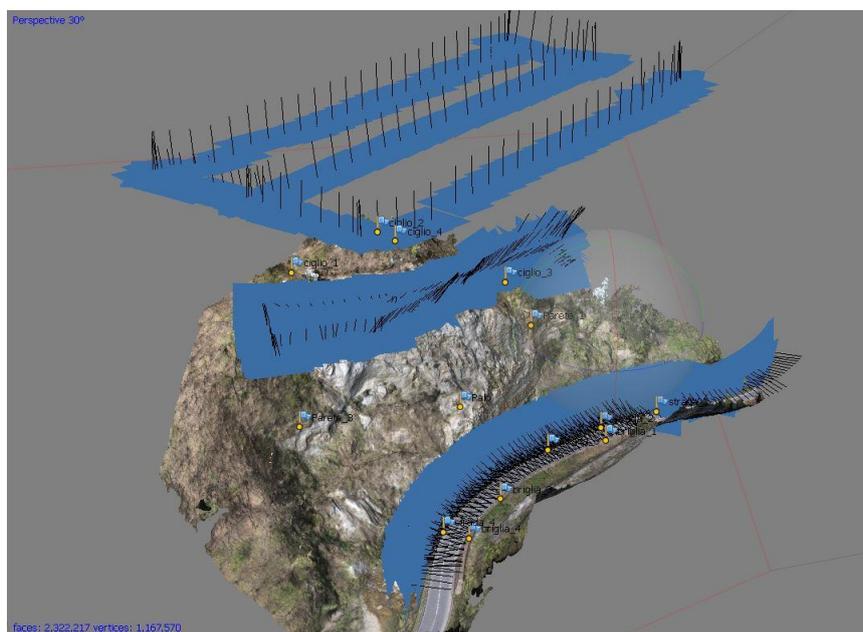


Figura 34. Disposizione dei centri di presa dei tre set di immagini catturate: aereo nadirale e obliquo, e terrestre.

Le specifiche tecniche delle ottiche impiegate vengono riportate in Tabella 1, al fine di poter effettuare una stima del GSD del rilievo.

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Supporto
Canon EOS 600D (28 mm)	5184 x 3456	28 mm	4.4 x 4.4 um	Aereo
Canon EOS 750D (29 mm)	6000 x 4000	29 mm	3.78 x 3.78 um	Terrestre

Tabella 1. Specifiche tecniche delle ottiche utilizzate nel volo UAV1.

La fase di acquisizione dati è stata preimpostata da terra con la definizione di un intervallo di scatto fisso e l'impostazione di una velocità di traslazione costante del mezzo, al fine di ottenere un ricoprimento fotografico omogeneo dell'intera area:

- Intervallo di scatto: 3 scatti/2 sec

- Velocità di traslazione: 3 m/s

In questo caso il decollo del mezzo ha avuto luogo dal ciglio della scarpata della parete oggetto del rilievo (Figura 35), inoltre è stata mantenuta come quota inferiore limite proprio l'altezza del ciglio per ragioni di sicurezza legate alla possibile perdita di segnale radio tra ricevitore in radiofrequenze a bordo dell'APR e il trasmettitore a terra: in tal modo sono state generate delle occlusioni fotografiche con piccole zone d'ombra soprattutto lungo la parte basale del modello, compensate dal set fotografico terrestre.



Figura 35. Operazioni preliminari di impostazione del volo programmato, e pilotaggio manuale dell'UAV ad opera dei tecnici SAL engineering.

Dalle specifiche tecniche della fotocamera e conoscendo l'altezza media di volo (60m) si è potuto stimare il GSD medio del rilievo adoperando la relazione che lega grandezza del pixel, lunghezza focale e distanza dall'oggetto di interesse:

$$d:GSD=f:H$$

dove:

- $d = 4,4 \mu\text{m}$
- $f = 28 \text{ mm}$
- $H = 60 \text{ m}$

$$GSD = (d \cdot H) / f = 9.4 \text{ mm}$$

Tale valore è risultato ampiamente accettabile considerati gli scopi delle analisi.

Il rilievo da terra è stato effettuato mantenendo la camera di presa parallela alla gabbionata in destra idraulica, garantendo in questo modo un indice di sovrapposizione estremamente elevato.

Allo stesso modo è stato stimato il valore del GSD per la porzione terrestre del dataset UAV1 considerando 20m come distanza media dalla parete oggetto del rilievo. Quindi essendo

- $d = 3,78 \mu\text{m}$
- $f = 29 \text{ mm}$
- $H = 20 \text{ m}$

$$\text{GSD} = (d \cdot H) / f = 2.6 \text{ mm}$$

Il dataset acquisito complessivamente consta di 742 foto, delle quali 262 aeree e 480 da terra.

3.2.2 Rilievo con APR amatoriale UAV2

In questo caso sono stati effettuati due voli a pilotaggio manuale con camera nadirale e obliqua, scegliendo come punto di decollo il muro di sostegno in destra idraulica alla base della parete oggetto del rilievo (Figura 36 A): in questo modo è stato possibile effettuare una scansione frontale degli aggetti e di tutte le caratteristiche parzialmente nascoste ad una ripresa dall'alto (Figura 36 B). In tale rilievo non sono stati utilizzati i marker topografici battuti con sistema GPS differenziale per la georeferenziazione del modello: questa scelta operativa è stata imposta sia dalle esigenze logistiche dei rilevatori sia dal fatto che l' APR DJI Phantom 3 è dotato di una camera integrata con un sistema di geotag delle immagini mediante GPS, il quale pur non garantendo l'accuratezza centimetrica ottenuta con il sistema di posizionamento differenziale, garantisce una prima organizzazione spaziale, e allineamento del dataset rilevato.

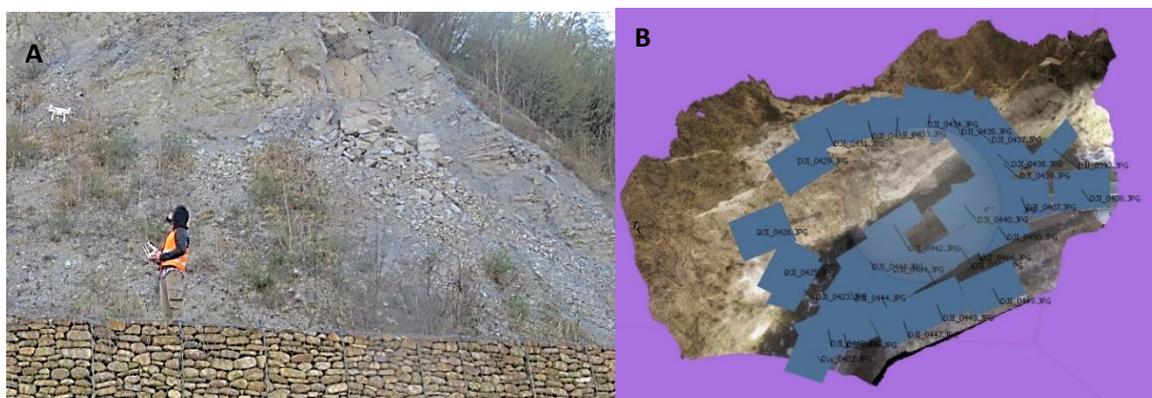


Figura 36. A) Fase di decollo dalla gabbionata in destra idraulica. B) Disposizione dei centri di presa in seguito al pilotaggio manuale.

Le specifiche tecniche delle ottiche impiegate vengono riportate in Tabella 2 , al fine di poter effettuare una stima del GSD del rilievo.

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size
FC300X (3.61 mm)	4000 x 3000	3.61 mm	1.56192 x 1.56192 um

Tabella 2. Specifiche tecniche delle ottiche utilizzate nel volo UAV2

La fase di acquisizione dati è stata gestita tramite il terminale di controllo remoto di cui è dotato l'APR, quest'ultimo collegato al trasmettitore radio via micro-usb: per mezzo di questo dispositivo è stato impostato l'intervallo di scatto a 5 secondi, e data l'impossibilità di operare un volo programmato a velocità costante, è stata mantenuta una velocità relativamente costante di circa 1 m/s.

Dalle specifiche tecniche della fotocamera e conoscendo l'altezza media di volo si è potuto stimare il GSD medio del rilievo adoperando la relazione che lega grandezza del pixel, lunghezza focale e distanza dall'oggetto di interesse:

$$d:GSD=f:H$$

dove:

- $d = 1,56 \mu\text{m}$
- $f = 3.61 \text{ mm}$
- $H = 60 \text{ m}$

$$GSD = (d \cdot H) / f = 26 \text{ mm}$$

3.3 Elaborazione dati

La sessione di elaborazione dei dataset fotografici che porta alla realizzazione della nuvola di punti in primis e a tutta una serie di prodotti secondari, è stata condotta tramite il software commerciale AgiSoft Photoscan.

3.3.1 Dataset UAV1

Il dataset fotografico in oggetto è composto da 742 immagini non georiferite appartenenti ai due voli nadirale e obliquo ed alla serie di scatti da terra.

Le immagini scattate da terra, a differenza di quelle aeree, in nessun caso individuano i target di riferimento posti sulla scena risultando perciò slegate da qualsiasi riferimento di posizione misurato. Queste sono quindi potenzialmente non comparabili e non implementabili nella elaborazione del modello finale. Per ovviare a tale problematica l'intero dataset è stato suddiviso in due sottoinsiemi di dati: quelli aerei facilmente georiferibili e ottimizzabili mediante CGP e quelli terrestri senza alcun riferimento geometrico e di dato misurato a terra. Inizialmente sono stati elaborati (secondo il workflow di Photoscan) i fotogrammi aerei al fine di ottenere un modello completamente georiferito dal quale successivamente individuare una serie di elementi morfologici riconoscibili nel dataset terrestre, estrarne le coordinate ed adoperarli in quest'ultimo come CGP per vincolare e georiferire le immagini terrestri.

Nel seguito viene descritto il workflow delle operazioni svolte sull'insieme dei dati aerei, e i relativi output intermedi generati dai vari processi fotogrammetrici.

Come primo step si è proceduto a generare la nuvola sparsa (Figura 37) (ovvero la geometria di base della parete), e quindi il processo di allineamento dei fotogrammi, questa è stata poi vincolata e georiferita mediante l'inserimento manuale dei GCP a cui sono state assegnate le coordinate GPS dei target topografici misurate in campagna. Per poter inserire i GCP il modello deve essere dotato di una geometria solida di base, perciò utilizzando la nuvola sparsa è stata creata una prima superficie (mesh) attraverso la quale definire nel modello i punti di controllo.

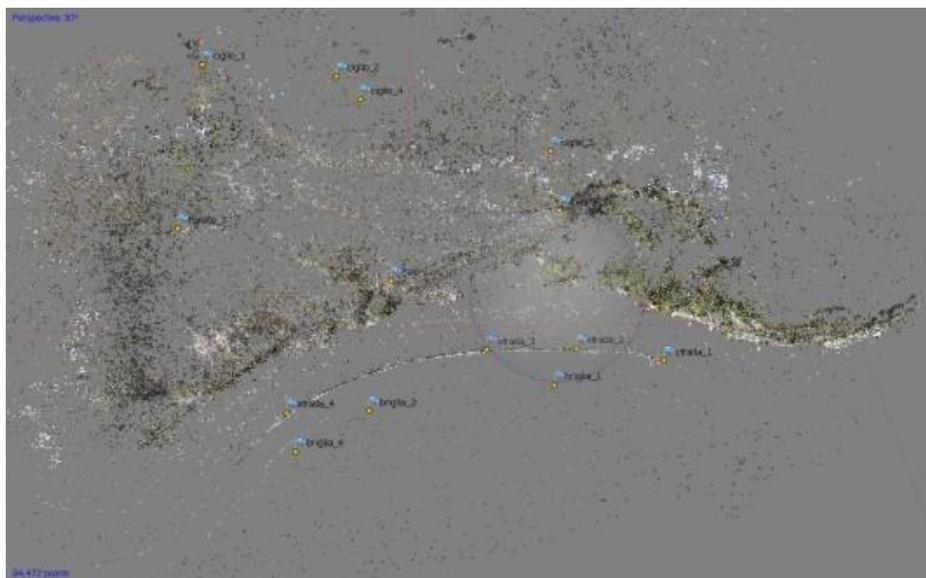


Figura 37. Nuvola sparsa del modello UAV1, composta da 84472 punti.

Al fine di ridurre la rumorosità della nuvola sparsa ed eliminare i punti che in qualche modo ne riducono l'accuratezza, questa è stata rifinita manualmente e filtrata secondo due criteri:

- Image count: Photoscan ricostruisce tutti i punti individuati da minimo due fotogrammi, tuttavia i punti individuati da soli due fotogrammi risultano posizionati tendenzialmente con uno scarso grado di accuratezza. Questo criterio di filtraggio seleziona i keypoint individuati per matching di un certo numero di fotogrammi selezionabile: quindi sono stati eliminati quelli individuati su un minimo di due soli fotogrammi poiché risultano essere i più incerti.
- Reprojection error: con questo termine si intende la distanza tra un punto proiettato sul fotogramma in seguito alla sola fase di auto-calibrazione (Figura 38 A) e lo stesso punto riproiettato sulla medesima immagine al termine della fase di Bundle adjustment, (ovvero la fase in cui vengono definite univocamente le coordinate dei punti nella scena vincolando il modello ai target attraverso procedure di tipo statistico) (Figura 38 B). Questa distanza essendo calcolata su immagini raster viene misurata in pixel e dipende sia dai parametri di auto-calibrazione che dalla qualità del punto individuato nei fotogrammi.

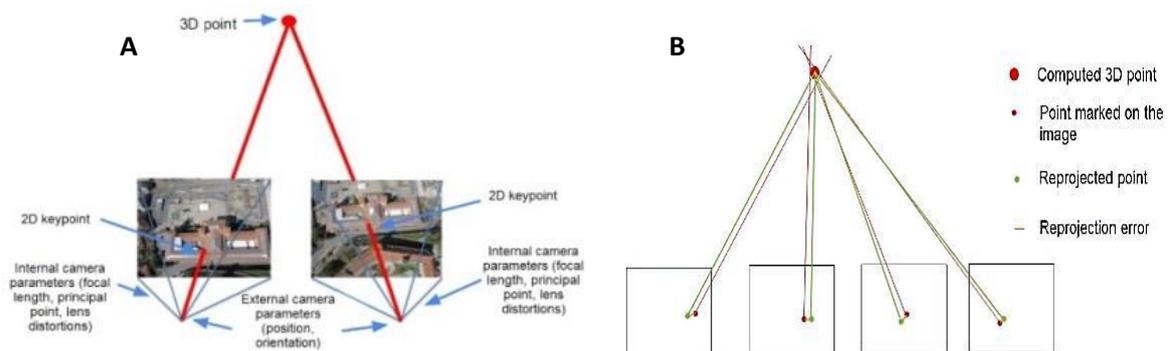


Figura 38. A) proiezione del punto in base ai soli parametri interni ed esterni della camera in ogni fotogramma. B) una volta calcolate le coordinate 3D del punto, questo viene riproiettato sulle immagini originali in cui appare, la distanza tra punto individuato inizialmente e punto riproiettato costituisce il reprojection error.

In seguito alla decimazione della nuvola sparsa è stata creata la nuvola densa (Figura 39): grazie alla elevata capacità computazionale dell'elaboratore su cui è stato ricostruito il modello i parametri di ricostruzione utilizzati sono stati impostati in modo da ottenere la massima resa qualitativa. Anche in questo caso è stata posta particolare attenzione alla eliminazione di quei dati definiti come "outlayers" della distribuzione che altrimenti avrebbero generato rumore, ciò viene reso possibile impostando nell'algoritmo di filtraggio della mappa di profondità delle singole immagini un valore di tolleranza molto basso definito "aggressive"



Figura 39. Nuvola densa di punti UAV1.

Dalla nuvola densa mediante i processi di triangolazione descritti precedentemente, è stata estratta la superficie del modello: la Mesh (Figura 40). Con questo termine si è soliti indicare un formato dati vettoriale costituito dall'insieme di vertici, spigoli e facce che definiscono la forma di un oggetto nell'ambito della modellazione 3D: le facce di una Mesh (generate in base a regole topologiche che legano i vertici di una nuvola di punti) sono formate da poligoni semplici come triangoli o quadrilateri distribuiti più o meno regolarmente secondo un grigliato geometrico. Nel modello in questione viene utilizzato un grigliato di tipo TIN (Triangulated Irregular Network): questo specifico formato di struttura dati vettoriale viene frequentemente utilizzato in ambiente GIS per la rappresentazione di dati di elevazione ed è composto da un insieme irregolare di vertici a coordinate tridimensionali (X Y Z) e spigoli che formano una rete di triangoli adiacenti.

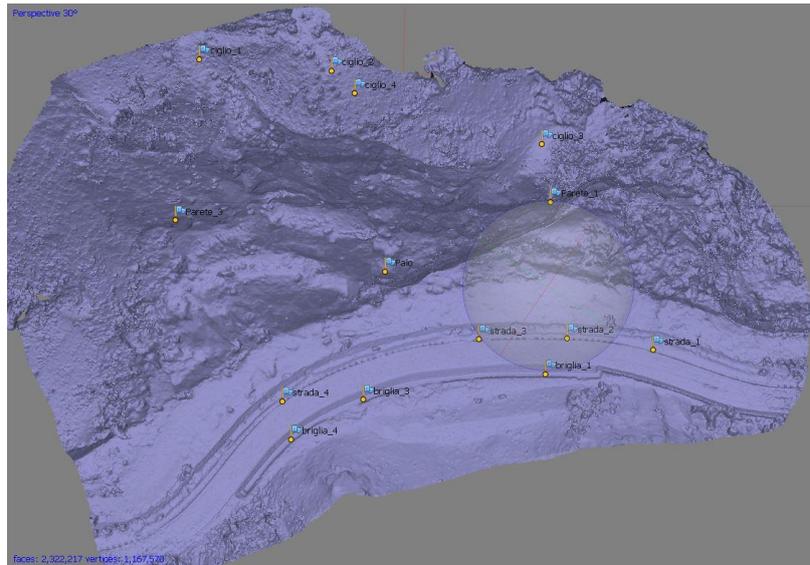


Figura 40. Mesh ottenuta dal rilievo UAV1.

La Mesh ottenuta è stata successivamente correlata con una texture mediante l'omonimo processo di texture mapping, che consiste nella proiezione di una porzione di pixel estratti dai fotogrammi del dataset (mediante svariati algoritmi dipendenti dalle esigenze di modellazione e restituzione grafica) sulla corrispondente Mesh: tale processo è possibile grazie alla parametrizzazione dei fotogrammi o di parte di essi mediante la creazione di una Texture Atlas, ovvero una mappa che assegna alle porzioni di texture gli attributi geometrici tridimensionali necessari alla loro corretta disposizione e mosaicatura della superficie di interesse.

Alla fine del processo di costruzione del modello tridimensionale è stata effettuata una verifica sulla qualità globale del modello georiferito: dei 12 target topografici utilizzati come vincolo e riferimento, due sono stati esclusi dal processo di georeferenziazione e ottimizzazione operato dal software, in modo tale da fungere come punti di controllo. Questa verifica viene eseguita calcolando lo scarto in termini di distanza (metrica e in pixel) tra il punto di controllo con il valore di coordinate realmente misurato in campagna ed il suo omologo calcolato dal programma, individuandolo direttamente sulle immagini in cui appare. Come si può notare in Tabella 3 l'errore di posizionamento dei due punti di controllo scelti risulta essere dell'ordine del centimetro, tuttavia sarebbe erroneo stimare l'errore medio globale del modello tramite le evidenze emerse dai dati qui riportati in quanto essi sono pur sempre misure puntuali che forniscono informazioni di accuratezza sull'intorno di misura e soprattutto non sono in numero sufficiente e ben distribuiti per poter avere una statistica consistente.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
ciglio_4	0.0150093	0.0559653	0.057943	5	0.147
strada_2	0.0135625	-0.0207196	0.0247638	22	0.283
Total	0.0143042	0.0421984	0.0445569		0.263

Tabella 3. Stima dell'errore di posizionamento dei punti di controllo esterni: si può notare come tale errore risulti inferiore alla dimensione del pixel.

Come emerge dalla pianta raffigurante l'ubicazione dei GCP (Figura 41) essi risultano essere in numero maggiore rispetto ai 12 punti rilevati in campagna, ciò è dovuto alle operazioni effettuate al fine di integrare i dati terrestri con quelli aerei: di fatto sono stati inseriti come nuovi GCP i punti a coordinate stimate dalla ricostruzione dei soli dati aerei al fine di attribuire alle immagini terrestri un attributo spaziale.

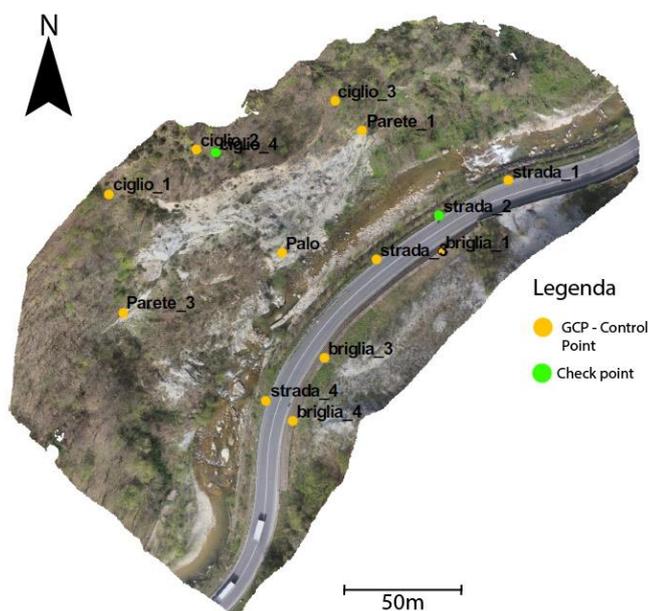


Figura 41. Ubicazione dei GCP in cui sono mostrati sia quelli realmente misurati tramite GPS, che quelli virtuali utilizzati per georiferire le foto da terra.

Ultimati i processi computazionali volti alla costruzione del modello tridimensionale è stato generato un report finale dell'intero processo che illustra i parametri di base del progetto, i risultati di processing delle varie fasi di workflow, e le stime di accuratezza. Di queste stime degna di nota è quella riguardante il tasso di sovrapposizione tra immagini nell'area di interesse (Figura 42 A): si può notare come il modello risulti estremamente ridondante, infatti ciascun punto all'interno di tutta l'area viene individuato da almeno nove fotogrammi, ciò si traduce in un elevato grado di robustezza delle relazioni geometriche tra i punti che costituiscono la nuvola densa.

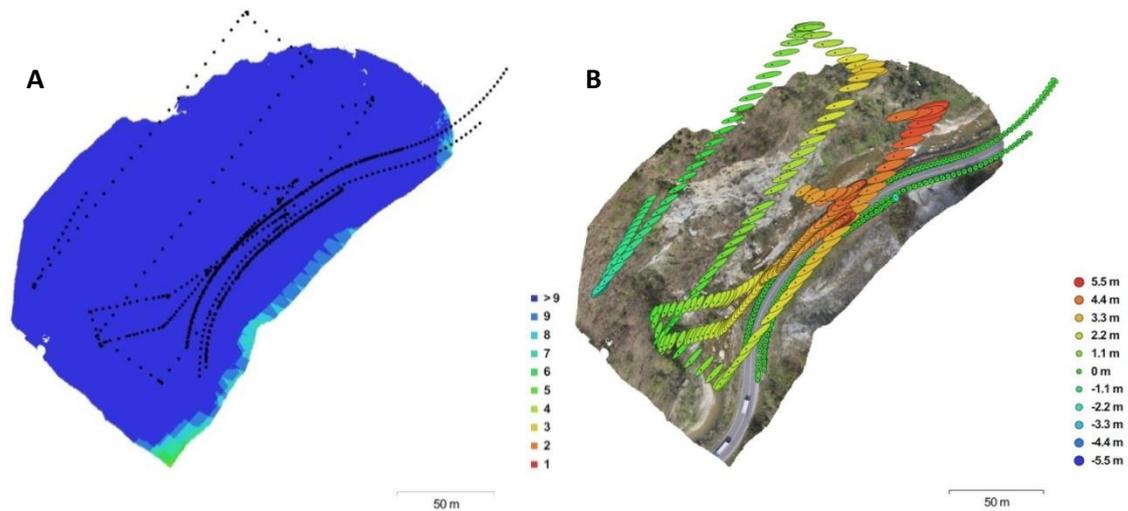


Figura 42. A) Mappa di sovrapposizione dei fotogrammi del rilievo UAV1, in cui si nota come tutta l'area del modello risulta iperdeterminata. B) Stima dell'errore di posizionamento dei centri di presa delle camere.

Altro aspetto di interesse viene descritto dalla rappresentazione delle posizioni stimate dei centri di presa delle immagini e dei relativi errori di posizionamento (Figura 42 B). Si può notare come i centri di presa delle immagini aeree presentino un certo errore di posizionamento dovuto alla stima effettuata dal software in seguito ai processi di auto-calibrazione e ottimizzazione precedentemente descritti. Per quanto riguarda invece i centri di presa delle immagini scattate da terra, essi risultano apparentemente privi di errore poiché gli attributi spaziali non sono stati assegnati preliminarmente e questi derivano indirettamente dalle coordinate misurate a terra dei GCP.

3.3.2 Dataset UAV2

La base dati di partenza in questo secondo caso è costituita da un totale di 111 immagini nadirali e oblique. La nuvola sparsa, generata dall'allineamento di tali immagini (Figura 43 A), è stata filtrata con gli stessi criteri utilizzati per il dataset UAV1, tuttavia data la ridotta quantità di fotogrammi e l'assenza di punti di controllo a terra, si è scelto di ridurre la selettività di tali algoritmi di filtraggio onde evitare una decimazione troppo spinta della nuvola sparsa e una conseguente eccessiva perdita di informazioni durante l'estrazione della nuvola densa (Figura 43 B): a tal proposito non è stato effettuato il filtraggio per "reprojection error", affidandosi al solo criterio di "image count" con soglia minima impostata a due fotogrammi per la riduzione dei dati outliers.

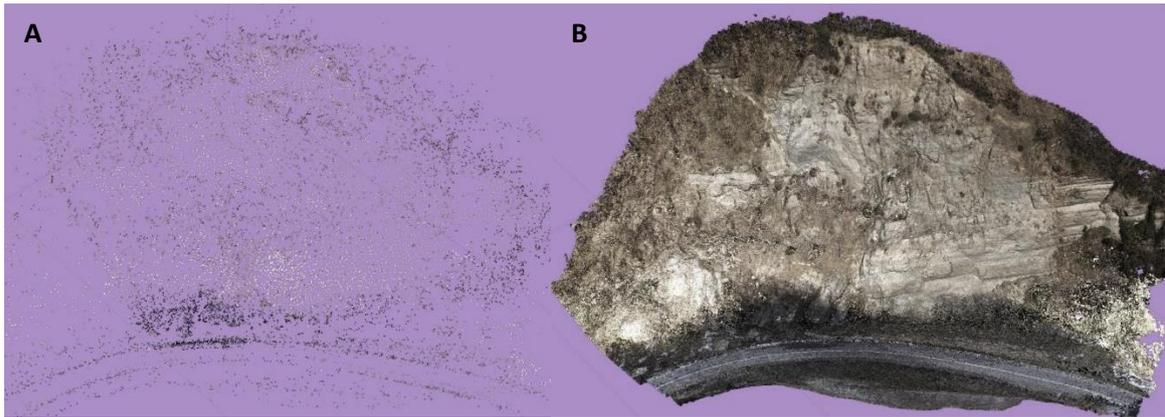


Figura 43. A) Nuvola sparsa del rilievo UAV2. B) Nuvola densa del rilievo UAV2.

Successivamente al processo di filtraggio è stata avviata la fase di creazione della nuvola densa, saltando il processo di ottimizzazione e di georeferenziazione poiché:

- nel dataset in questione non sono presenti specifici riferimenti fotografici dei target topografici utilizzati a tale scopo.
- I fotogrammi catturati risultano essere già georiferiti (con accuratezza comunque del posizionamento GPS di codice, quindi tra i 5m e i 10m) in quanto al momento dello scatto vengono scritte nei metadati "exif" le coordinate spaziali registrate dal sistema GPS di posizionamento dell'APR.

Alle fasi più importanti di ricostruzione (allineamento e creazione della nuvola densa) sono seguite quelle di generazione della Mesh (Figura 44) e texturing del modello.

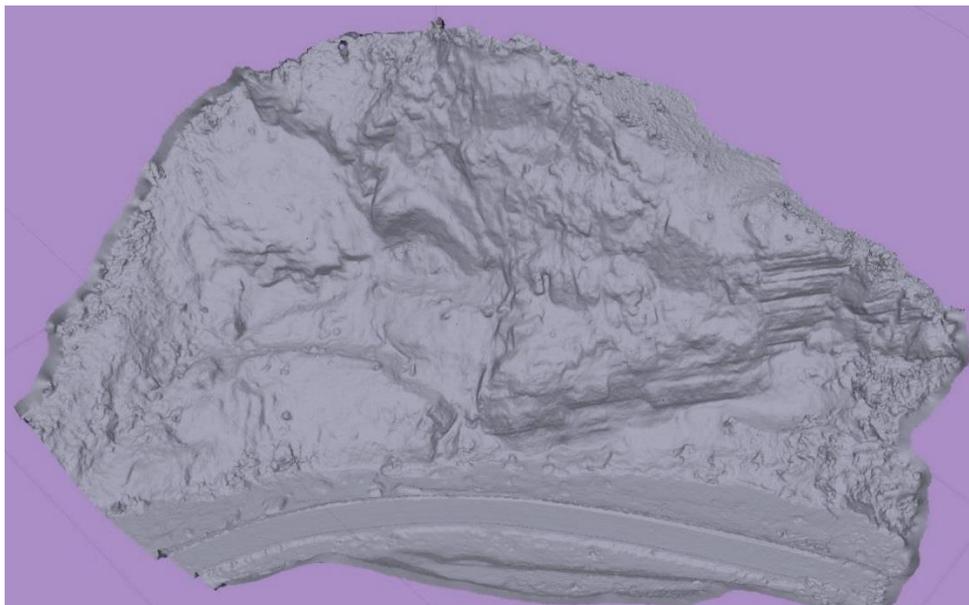


Figura 44. Mesh poligonale del rilievo UAV2.

Anche in questo caso è stato generato un report alla fine dell'elaborazione: vengono illustrate di seguito il grado di sovrapposizione tra le immagini (Figura 45 A), e all'errore di posizionamento dei centri di presa (Figura 45 B). I due dataset UAV1 e UAV2, presentano ordini di grandezza dell'errore medio sui centri di presa differente, ciò può essere dovuto a cause di diversa natura quali la presenza di CGP, la disposizione dei fotogrammi, o l'effetto di disturbo del segnale GPS operato dai versanti durante l'acquisizione dati nella parte bassa delle gole.

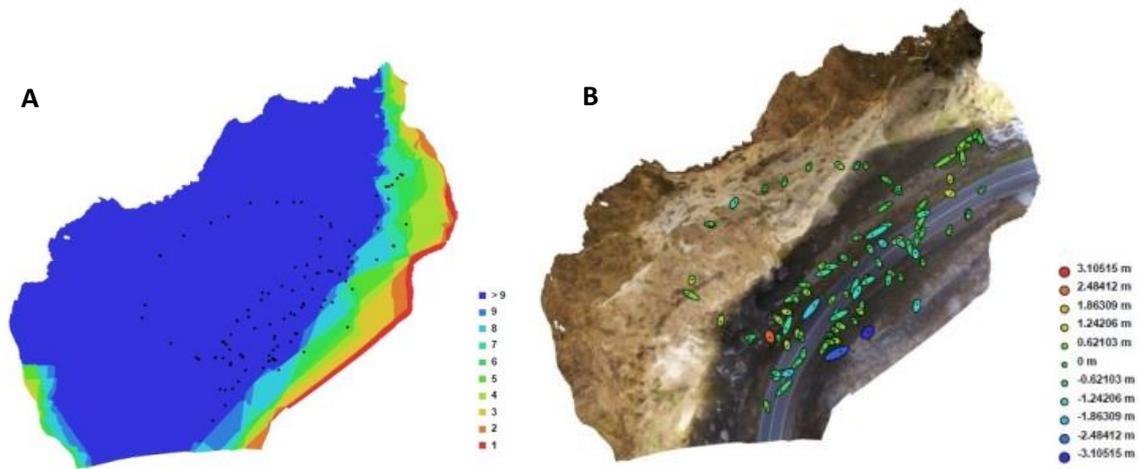


Figura 45. A) Mappa di sovrapposizione dei fotogrammi del rilievo UAV2. B) Stima dell'errore di posizionamento dei centri di presa delle camere.

3.3.3 Dati di output

Sono stati generati differenti set di dati atti a rendere una rappresentazione digitale della porzione di territorio interessata dal rilievo, ognuno dei quali presenta peculiarità specifiche a seconda del campo di utilizzo. I dati elaborati possono essere suddivisi in tre categorie: ortofoto differenziali, DEM (Digital Elevation Model) di tipo raster e nuvola di punti.

Le ortofoto differenziali derivano da una proiezione su piani predefiniti nello spazio di singole e minimali porzioni di immagine in quanto ad ogni singola porzione di immagine è possibile associare l'informazione di posizione tridimensionale. Questo fa sì che su di un qualsiasi piano posizionato nello spazio sia possibile proiettare sia le informazioni del modello tridimensionale punto per punto che le porzioni di immagini corrispondenti. Il risultato sono immagini ortorettificate, su piani specifici predefiniti a scala costante, i cui pixel contengono oltre alle informazioni colore anche le informazioni spaziali bidimensionali appartenenti al piano di proiezione. In questo modo le ortofoto possono essere utilizzabili come mappe geometricamente coerenti con la realtà che rappresentano (Figura 46 A). Nel caso in esame tali prodotti presentano un grado di

risoluzione, fornito dal valore del GSD, pari rispettivamente a 8mm e 27 mm per l'output UAV1 e UAV2.

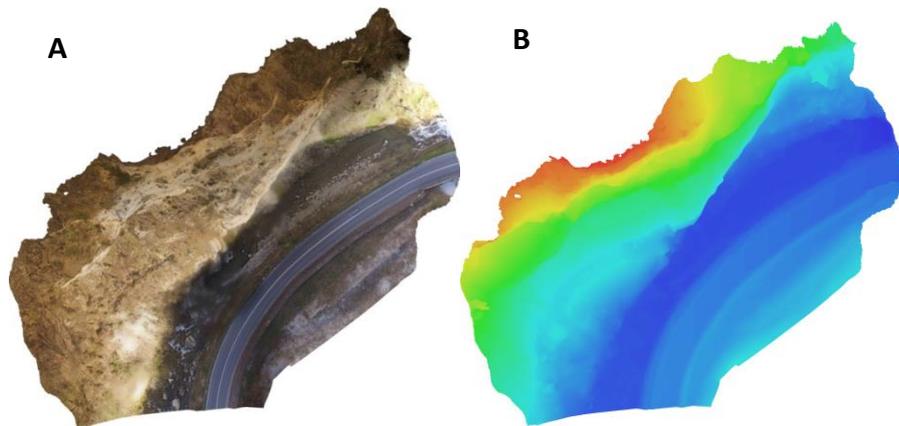


Figura 46. A) Ortofoto dell'area di interesse. B) DSM dell'area di interesse.

Un DEM di tipo raster consiste in una matrice bidimensionale i cui singoli elementi sono depositari di una informazione di elevazione: pertanto i supporti più indicati per la registrazione di questo genere di dati sono di natura matriciale (Figura 46 B). A partire dalla nuvola di punti formata da circa 5 milioni di punti sono stati generati due DEM raster a diversa risoluzione al fine di impiegarli per l'analisi morfologica e per le simulazioni di caduta massi tridimensionale e bidimensionale. Ciò è reso possibile, in ambiente GIS, grazie ad algoritmi di decimazione che operano un ricampionamento del modello di base generando un output le cui dimensioni di cella sono definite dall'utente: nel caso di studio rispettivamente di 1m e 0.5 m.

Una nuvola di punti è costituita dalla rappresentazione di un insieme di coordinate XYZ espresse in un sistema di riferimento predefinito, utile a rappresentare una superficie nelle tre dimensioni: ogni punto di tale database può contenere informazioni secondarie e/o informazioni a grandezza scalari di vario tipo come informazioni di Intensità e/o valori RGB o orientazione delle normali (Figura 47 A, B).

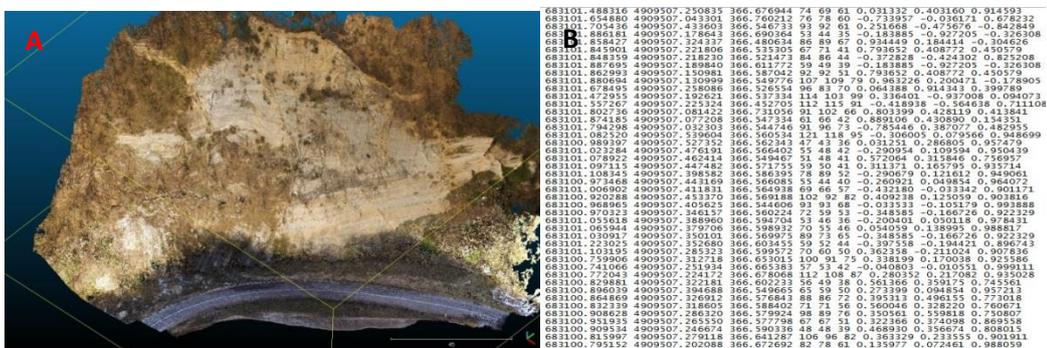


Figura 47. A) Nuvola di punti di output come appare nella sua forma grafica. B) Struttura codificata di una nuvola di punti in cui ogni colonna della matrice è adibita a contenere una certa informazione come coordinate X Y Z, informazioni colore R G B, e orientazione delle normali.

3.4 Rilievo Laser scanner di bibliografia (post crollo 2005)

Il laser scanner può essere paragonato ad una stazione totale motorizzata in grado di rilevare automaticamente un numero molto elevato di punti (migliaia al secondo) senza che sia necessario il posizionamento preventivo di prismi riflettenti sulla superficie da investigare.

Per i confronti previsti in questo lavoro di tesi sono stati utilizzati i dati relativi al rilievo laser scanner del 2006 effettuato dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze relativamente all'incarico per "ex art.17 legge n.109/94 per attività di supporto tecnico al R.U.P. per rilievi geologici e geologico tecnici nell'area delle Gole di Scascoli, comune di Loiano, Bologna)".

L'apparato strumentale utilizzato per eseguire il rilievo dell'area successivamente all'evento di crollo e ai relativi interventi di riprofilatura del versante è costituito da un laser scanner terrestre modello LMS-Z420i prodotto dalla Riegel Laser Instrument Systems, le cui specifiche tecniche sono elencate di seguito: distanza di misura fino a 1000 m, accuratezza ± 5 mm, passo di scansione verticale minimo 0.008° , passo di scansione orizzontale minimo 0.01° , velocità di scansione massima circa 12.000 punti/secondo. Il dato grezzo fornito dalla scansione in oggetto è rappresentato da una matrice di punti espressa in codifica ASCII sotto forma di file di testo delimitato da tabulazioni (.txt), i cui valori fondamentali sono le coordinate spaziali X, Y, Z dei singoli punti misurati.

4 Confronto rilievo UAV con rilievi TLS e Geomeccanico

Al fine di valutare qualitativamente le diverse metodologie utilizzabili nel rilevamento dei fronti rocciosi sono stati comparati tre dataset differenti e i loro relativi output:

- Dataset UAV2: rappresenta la base dati rilevata mediante mezzo UAV amatoriale, in assenza di punti di controllo a terra per la ri-proiezione del modello e con una risoluzione della camera di presa di 13 Mpix, minore rispetto al corrispettivo professionale, il cui GSD risulta essere di 26 mm.
- Dataset UAV1: rilievo effettuato con UAV professionale con GCP rilevati mediante GPS differenziale, e risoluzione della camera pari a 18 Mpix, con GSD pari a 09 mm
- Dataset LASER: nuvola di punti ottenuta da un rilievo TLS mediante scanner terrestre Riegel LMS-Z420i con accuratezza ± 5 mm fino a 1000m di distanza, passo di scansione verticale minimo 0.008° e orizzontale 0.01° condotto da UNIFI nel Maggio 2006 in seguito alla conclusione dei lavori di demolizione di porzioni pericolanti della parete rocciosa la cui densità media è di circa 1 punto ogni 10cm.

Questo tipo di confronto si pone lo scopo di indagare in che modo la rappresentazione della topografia varia in base al metodo di rilievo utilizzato, valutando pro e contro di entrambe le tecniche sulla base dei dati che queste restituiscono, e come ciò influisca sulla successiva modellazione numerica. I tre dataset sono stati confrontati dal punto di vista geometrico, geomorfologico, e in funzione degli output di modellazione numerica derivanti da essi mediante software open source quali QGIS e CloudCompare per le analisi geomorfologico-territoriali e di modellazione 3D mediante software proprietari quali Rockfall e Rotomap. I parametri posti a confronto sono:

- distanza tra nuvole
- mappa della pendenza
- indice di asperità
- volume delle possibili masse aggettanti instabili
- giaciture
- output da simulazione di caduta massi (endpoints ed energie mobilizzate).

4.1 Pendenze della parete

La mappa delle pendenze fornisce il valore di pendenza di ogni cella, espressa in gradi o percentuale: tale dato viene ottenuto mediante l'analisi geomorfologica del DEM, calcolando il massimo tasso di variazione della quota di ogni singola cella rispetto alle 8 celle ad essa contigue (Figura 48): l'output è costituito da una mappa in scala di grigio o falso colore il cui dato in ogni pixel è rappresentato da una intensità variabile in funzione della scala cromatica adottata.

I valori di pendenza vengono quindi estratti per tutti i dataset dai rispettivi DEM non ricampionati, con cella di dimensioni pari a 0,08m. Dall'analisi di questo parametro emerge come nel dataset LASER siano rappresentati con frequenza più elevata rispetto agli altri, i valori di pendenza superiori a 70°: poiché tali dati ricadono lungo la porzione di parete ricoperta da reti paramassi si può certamente ipotizzare che queste generino un segnale di disturbo.

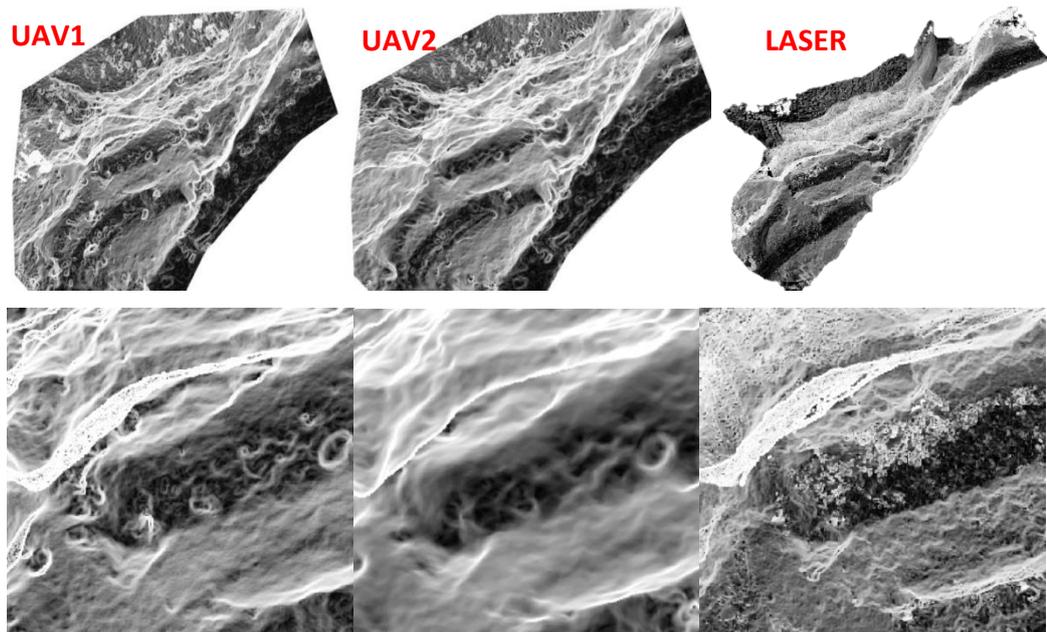


Figura 48. Output in scala di grigio dell'analisi di pendenza effettuata sull'intera estensione dei tre dataset e relativo particolare delle pendenze in una finestra di campionamento comune.

Ad un confronto qualitativo preliminare è seguita una fase analitica basata sul confronto degli istogrammi di frequenza dei singoli dataset campionati sulla stessa estensione geografica al fine di rendere quanto più rappresentativa e omogenea la popolazione campionata (Figura 49).

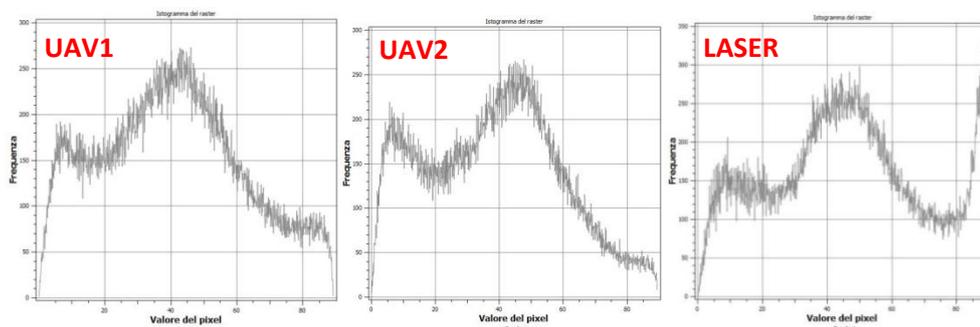


Figura 49. Istogrammi di frequenza relativi ai valori di pendenza riscontrati una porzione di rilievo comune a tutti i dataset: da sinistra verso destra sono mostrati i risultati dei rilievi UAV1, UAV2, LASER.

La distribuzione di frequenza delle pendenze assume in tutti i casi un andamento di tipo gaussiano bimodale facendo segnare due picchi di frequenza per valori di circa 7 e 45 gradi. Si può inoltre notare come le distribuzioni differiscano notevolmente nella rappresentazione dei valori di pendenza superiori a 70 gradi: questi valori presentano una frequenza circa doppia nel dataset UAV1 rispetto ai corrispettivi appartenenti al dataset UAV2, mentre vi è addirittura un picco di frequenza nel dataset LASER. Isolando i valori di pendenza superiori ai 70 gradi e rappresentandoli singolarmente, si evince che questi rappresentano porzioni attribuibili alla parte sommitale della parete rocciosa caratterizzata dalla presenza delle reti paramassi in aderenza che creano disturbo.

4.2 Indice di asperità

L'indice topografico delle asperità TRI (Terrain Ruggedness Index), viene definito come la media delle differenze di elevazione tra ogni singola cella di un DEM e le otto celle ad essa circostanti (Riley et al., 1999): tale dato fornisce indicazioni sul grado di eterogeneità della superficie topografica analizzata. In tal modo una superficie poco variabile sarà rappresentata da un output composto da celle caratterizzate da valori simili dell'indice TRI, mentre una topografia accidentata fornirà un dato più variabile (Figura 50).

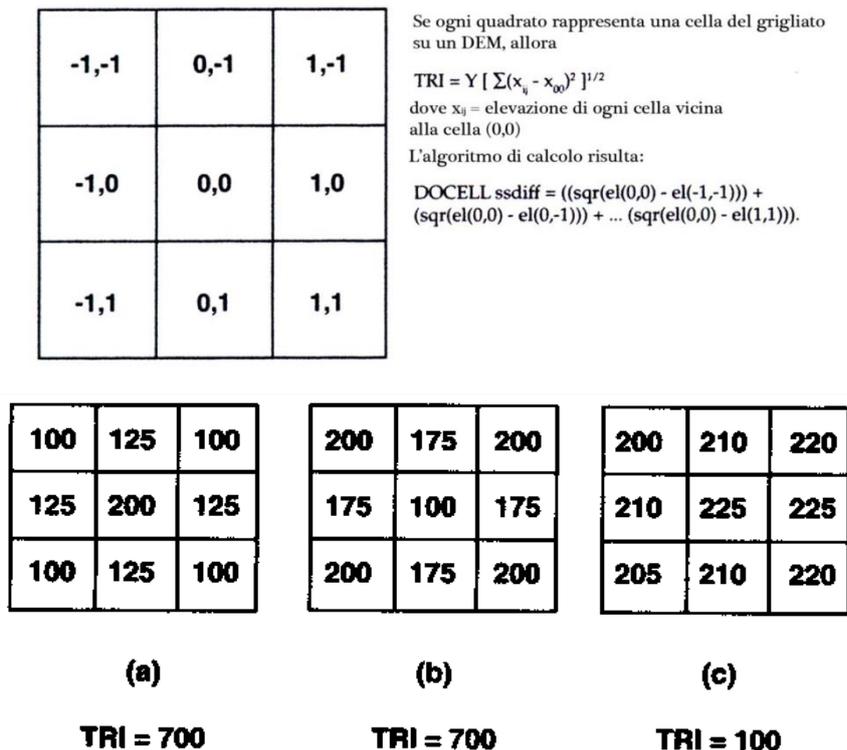


Figura 50. Schematizzazione grafica del metodo di calcolo del TRI, espresso come scarto quadratico medio dell'elevazione di una cella rispetto a quelle ad essa vicine. Variazioni di quota più marcate conferiscono alla cella analizzata un indice di asperità più elevato (casi A e B), mentre valori poco diversi dall'andamento medio generano un indice tendenzialmente più basso (Riley et al., 1999, modificato).

Le implicazioni legate alla variabilità del TRI nell'approccio alla modellazione numerica degli eventi di crollo riguardano essenzialmente le modalità di rimbalzo che i blocchi assumono in seguito all'impatto sulla superficie modellata: una superficie topografica con indice di rugosità basso e poco variabile lateralmente sarà caratterizzata da una pendenza costante sia a scala globale che a scala locale, ciò si traduce in una orientazione uniforme delle normali alla superficie di rimbalzo e quindi non vi sarà una grande variabilità nelle traiettorie di uscita dei blocchi dopo l'impatto. Al contrario una superficie accidentata a parità di pendenza globale, presenterà una forte disomogeneità di pendenza locale il che costituisce un forte elemento di variabilità per le traiettorie di uscita dei blocchi (Figura 51).

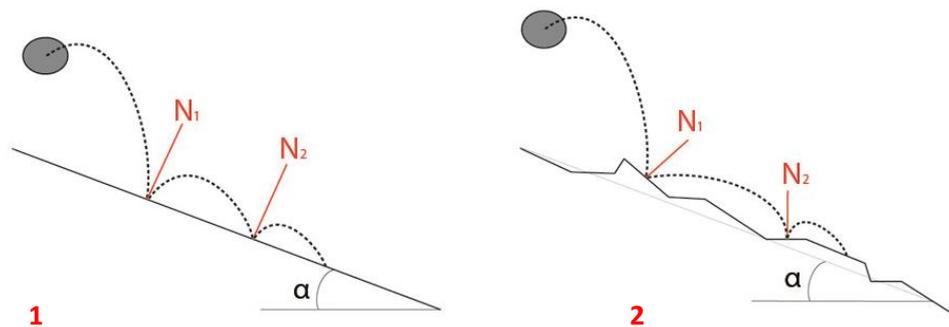


Figura 51. Esempio bidimensionale di come la variabilità locale dell'indice di asperità interessi la distribuzione delle traiettorie dei blocchi: nel caso 1 in cui le normali N_1 ed N_2 sono isorientate, le componenti normali e tangenziali dei moti di rimbalzo saranno parallele tra loro e quindi invariati, nel caso 2 invece non vi è parallelismo tra le normali alla superficie di rimbalzo N_1 ed N_2 , ciò si traduce in una variazione della traiettoria tra il primo e il secondo rimbalzo.

Dall'analisi dei dati di output generati in ambiente GIS, emerge come i dati dei due rilievi UAV siano più simili tra loro: i DEM dei dataset UAV1 e UAV2 modellano la superficie senza interferenze dovute all'effetto delle reti paramassi che invece generano un forte grado di rumorosità e di variabilità dell'indice TRI lungo la parete rocciosa (Figura 52), tale effetto si ripercuote anche sulla stima delle pendenze superiori ai 70° , come già osservato nelle analisi delle pendenze.

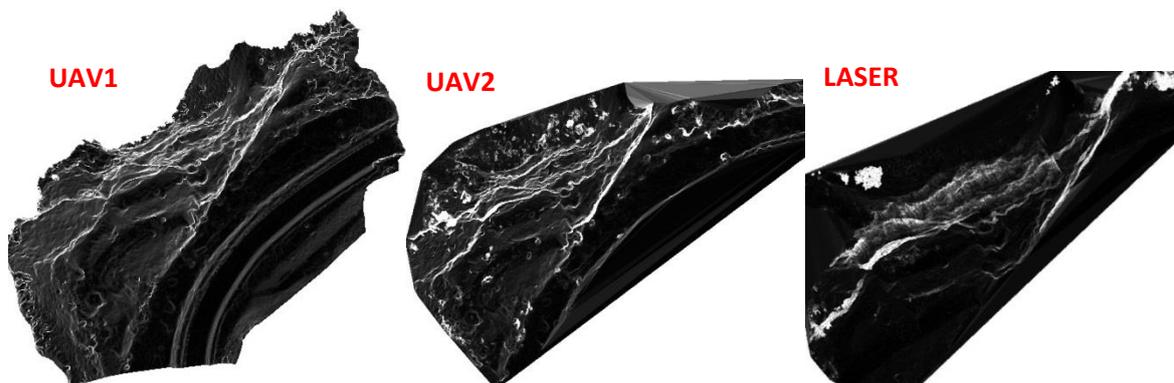


Figura 52. Output in scala di grigio dell'analisi di asperità effettuata sui tre DSM, rispettivamente nell'ordine UAV1 UAV2 LASER.

Un riscontro delle osservazioni effettuate sulle carte di asperità è dato dal confronto statistico dei dati sotto forma di istogramma delle frequenze: a tal fine è stata considerata come campione rappresentativo della distribuzione una porzione di modello comune a tutti set di dati, che fosse in grado di rappresentare l'andamento dell'indice di asperità TRI lungo la porzione entro cui questo si dimostra più variabile nei tre modelli, ovvero lungo la facciata ricoperta dalle reti paramassi. Si può notare come nella distribuzione LASER vi sia una maggiore variabilità del TRI il quale raggiunge con frequenze più elevate valori maggiori di 3, mentre nei dataset UAV il range di variabilità si dimostra essere notevolmente ridotto e le frequenze di valori di TRI superiori alla soglia indicata risultano più che dimezzate (Figura 53).

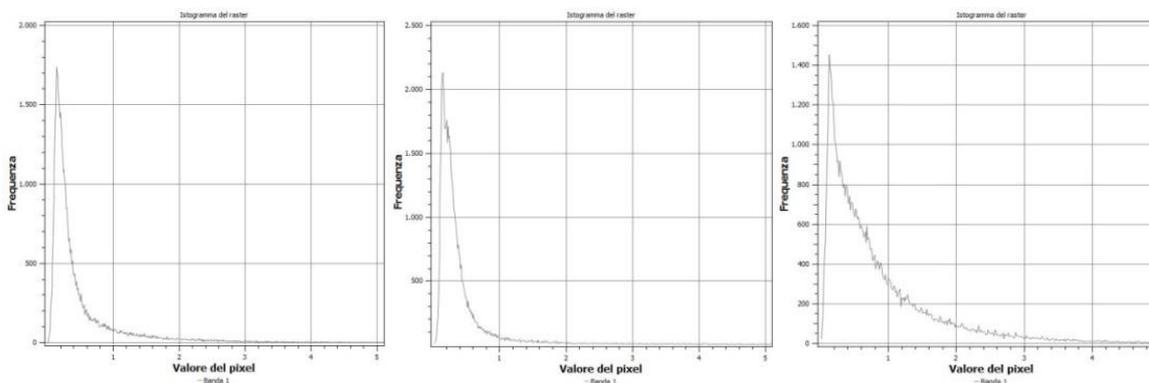
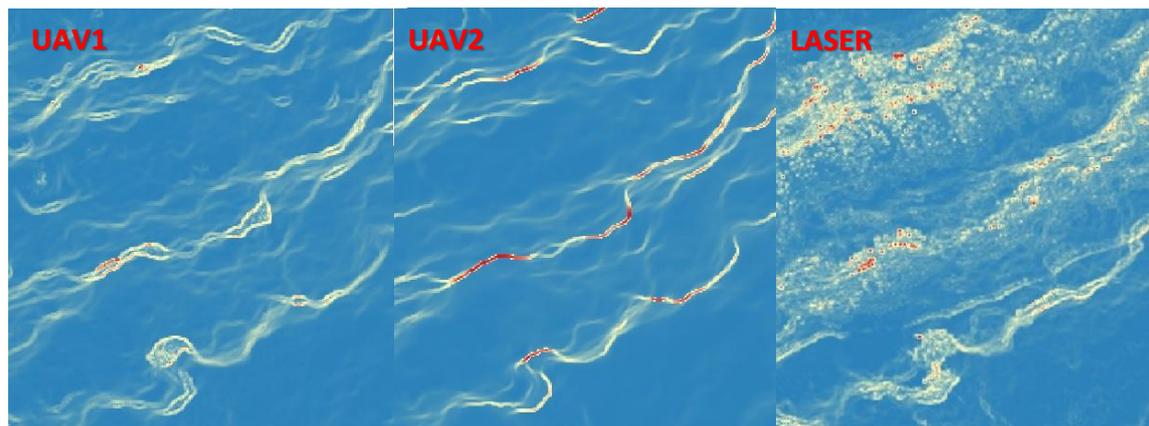


Figura 53. Finestra di campionamento nella quale è stata effettuata l'analisi di asperità e relativi risultati di frequenza della distribuzione: si può notare come mentre gli istogrammi dei dataset UAV siano quasi del tutto sovrapponibili, vi è una certa differenza di ampiezza nella coda di distribuzione LASER, che presenta un maggior numero di dati a elevato indice di asperità.

Un ulteriore approccio statistico alla determinazione dell'indice di asperità e al suo confronto tra rispettivi dataset è quello adottato analizzando una serie di profili bidimensionali: i più comuni metodi di analisi si basano sull'analisi statistica dei valori di dispersione delle altezze, delle pendenze e delle normali alla superficie. Tale analisi benché priva di termini di paragone e range di variabilità entro cui discriminare quantitativamente lo spettro di variazione effettivo dell'asperità delle sezioni, viene proposta in questa sede a conferma qualitativa di una reale e apprezzabile variazione dell'indice indagato.

Il criterio di analisi utilizzato sfrutta l'algoritmo noto come RMS H e fornisce la deviazione standard delle altezze lungo un profilo rispetto al valore medio della distribuzione: tanto più la deviazione standard risulterà elevata, tanto maggiore sarà l'indice di asperità. Sebbene tale metodologia sia in grado di fornire il parametro più comune e immediato per la determinazione degli indici di rugosità (Shepard et al., 2001), (Berti et al., 2013) attesta come anche i metodi più semplici, quali appunto quelli basati sul calcolo dell'RMS forniscano ottimi risultati se non migliori di quelli prodotti da metodi complessi basati su variogrammi bidimensionali.

L'indice RMS H è dato dalla seguente espressione

$$\text{RMSH} = \left[\frac{1}{N^2-1} \sum_{i=1}^{N^2} (z_i - \bar{z})^2 \right]^{1/2}$$

N= spessore della finestra mobile

Z_i= altezza della cella

Z= altezza media della finestra mobile

Il criterio di analisi utilizzato è invariante a seconda della scala e si applica ai valori di altezza di una superficie o di un profilo di cui si voglia indagare le caratteristiche di asperità. Tuttavia nel caso in questione, essendo l'oggetto di studio una parete rocciosa verticale spesso aggettante, una analisi della deviazione standard delle altezze non normalizzate rispetto all'andamento medio del pendio, fornirebbe un dato fuorviante e non rappresentativo della reale scabrezza del profilo. In virtù della non dipendenza dell'RMSH da qualsivoglia grandezza fisica, al fine di ovviare alla perdita di informazioni legate alla presenza di un trend nella distribuzione dati derivante dalla pendenza media del versante è stata effettuata una operazione di de-trending sulle distribuzioni statistiche da analizzare: tale operazione viene effettuata di solito sottraendo l'elevazione del piano di best fit dall'elevazione dei punti reali della superficie analizzata (Berti et al., 2013) (Figura 54 A). Nel caso in oggetto, in cui si dispone di un profilo piuttosto che di una superficie, il de-trending è stato ottenuto sottraendo ai valori di altezza del profilo quelli calcolati dalla curva di regressione lineare che meglio lo approssima.

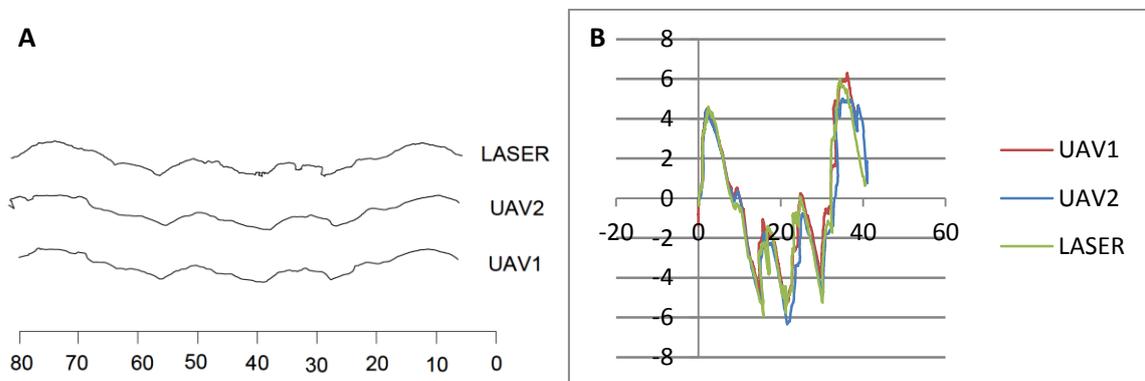


Figura 54. A) Profili orizzontalizzati riferiti alla sez. 1 in cui si può osservare un differente grado di dettaglio nel campionamento della superficie soprattutto tra dato LASER e dato UAV. B) output di de-trending delle tre sezioni.

Le analisi sopra descritte sono state condotte sui medesimi profili dei rispettivi dataset: emerge chiaramente la differenza di rugosità soprattutto tra l'output generato tramite scansione Laser e l'output fotogrammetrico (Tabella 4.): nello specifico si può notare come il dato estratto dalla nuvola di punti denominata UAV1 mostri una rugosità inferiore rispetto al valore RMSH estratto dal dataset UAV2. Questa apparentemente in contrasto con le determinazioni eseguite precedentemente, trova spiegazione nella differente densità di punti che caratterizza i profili,

infatti essendo il profilo UAV1 più denso del corrispettivo UAV2 di circa il 30% mostra una differenza di quote tra punti successivi tendenzialmente più bassa.

	UAV1	UAV2	LASER
RMS H	0.21	0.44	0.58

Tabella 4. Valori dell'indice RMS-H calcolati per le tre sezioni.

4.3 Posizione della point cloud

Poiché il dato di partenza restituito dai tre rilievi comparati in questo lavoro di tesi consiste in una nuvola di punti, è stato eseguito un confronto tra questo tipo di dati al fine di verificare quale sia lo scostamento tra l'uno e l'altro in termini di distanze relative e assolute tra punti omologhi appartenenti alle diverse nuvole. Al fine di effettuare misurazioni e confronti rigorosi e tra dati spaziali differientemente acquisiti sia dal punto di vista metodologico che soprattutto temporale, occorre che tutti i dati abbiano caratterizzazione di ripetibilità. Si rende necessario che i prodotti di output dei diversi rilievi siano definiti rigorosamente nello stesso sistema di riferimento, intendendo con tale accezione i medesimi parametri di datum geodetico e relativa proiezione cartografica. Questa premessa risulta fondamentale al fine di effettuare monitoraggi multi-temporali di un determinato oggetto di interesse: infatti due set di dati risultano confrontabili spazialmente e quindi ripetibili se e solo se i punti che ne descrivono la superficie in entrambi i casi sono legati dalle stesse relazioni geometriche definite nello stesso sistema di riferimento geodetico (Figura 55 A).

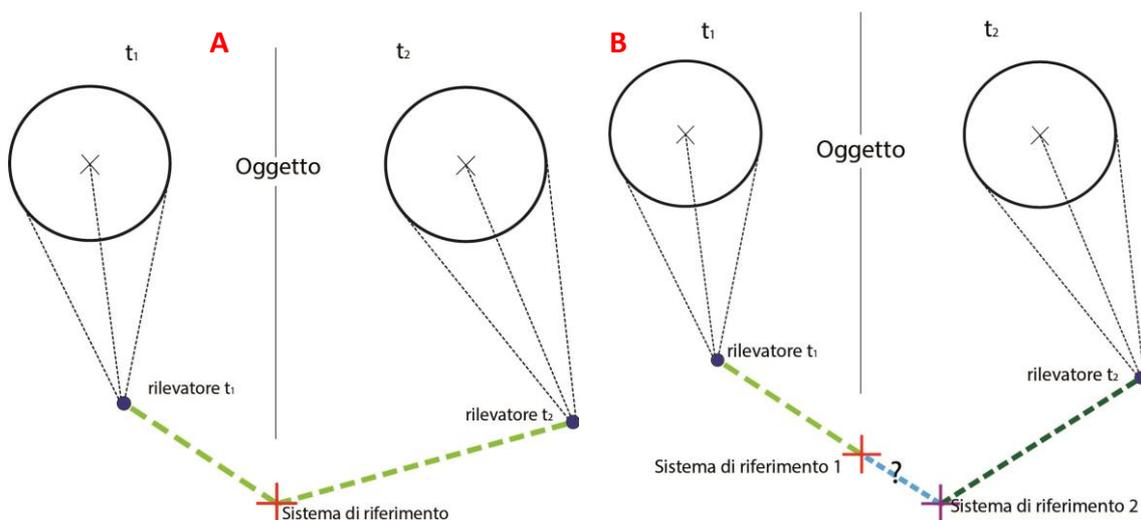


Figura 55. A) Supponendo di eseguire il rilievo di un determinato oggetto in due tempi differenti adoperando uno stesso sistema di riferimento le informazioni geometriche generate saranno sovrapponibili poiché riferite allo stesso sistema. B) Nel caso in cui in tempi diversi si utilizzino differenti sistemi di riferimento, si introduce una incognita che è rappresentata dalla relazione geometrica di rototraslazione che intercorre tra le origini dei due sistemi di riferimento (il punto interrogativo tra la croce rossa e la croce viola). In tal modo si perde la possibilità di effettuare confronti in termini assoluti tra i due rilievi.

È inoltre da precisare che le relazioni spaziali che caratterizzano i diversi sistemi di riferimento sono affette da una certa variabilità nel tempo dovuta ai fenomeni endogeni ed esogeni globali che influiscono su base fisica variando la disposizione delle masse terrestri e di fatto la definizione del datum geodetico: si può affermare che, in generale, qualunque punto del pianeta occupa una certa posizione solo per un istante infinitesimo (Biagi, 2006). I fenomeni responsabili delle variazioni spazio-temporali di un determinato punto geodetico possono essere distinti in fenomeni periodici e fenomeni non periodici: tra i fenomeni periodici si annoverano quelli legati alle maree terrestri e al carico oceanico (Figura 56 A), questi possono essere controllati e corretti grazie a modelli matematici ad hoc; per quanto riguarda invece i fenomeni non periodici primo fra tutti spicca l'effetto di traslazione orizzontale dovuto alle forze geodinamiche globali e locali (Figura 56 B) (che in Italia presenta un entità di spostamento di circa 2-3cm/anno), a cui seguono subsidenza, o fenomeni locali non lineari come deformazioni strutturali o moti franosi lenti la cui modellazione risulta meno speditiva (Biagi, 2006).

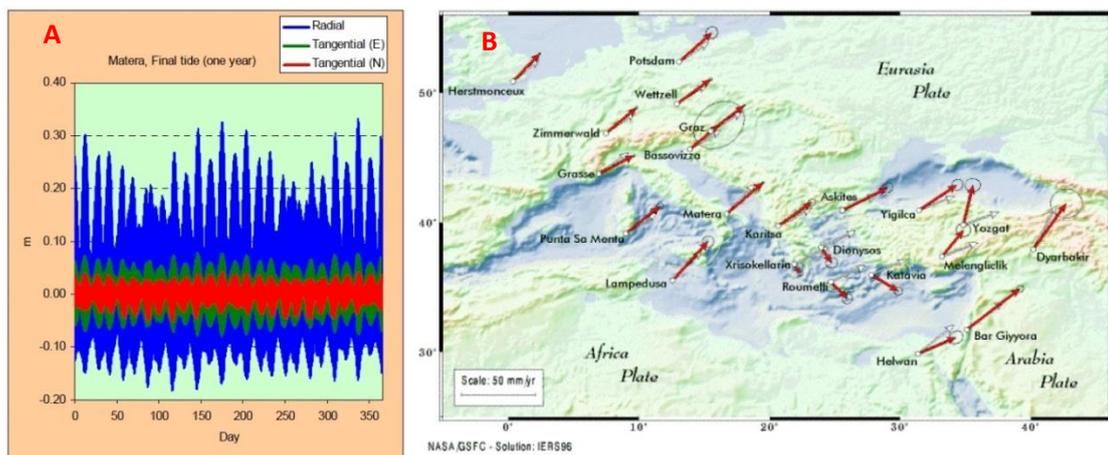


Figura 56. A) Marea terrestre presso la SP del Centro di Geodesia Spaziale di Matera: campionamento ogni ora per un anno. B) Esempio di stima delle velocità geodinamiche e relative direzioni di trasporto (stime NASA) (Biagi, 2006).

La congruenza delle informazioni spaziali è garantita grazie a periodiche correzioni globali e locali di ridefinizione dei sistemi di riferimento. A questo punto emerge la difficoltà pratica insita nel correlare misure effettuate a circa dieci anni di distanza su basi di sistemi di riferimento differenti (Figura 55 B). Sebbene siano note le relazioni di conversione tra coordinate appartenenti a sistemi geodetici diversi, vi è comunque una incertezza media di ordine metrico dovuta ad un effetto di parametri medi globali di conversione tra i diversi sistemi di riferimento, che propongono normalmente i software di caratterizzazione GIS. Ulteriore impedimento alla corretta e rigorosa conversione di coordinate è anche dovuto all'incertezza degli algoritmi stessi che vengono implementati nei vari applicativi utili a tale scopo. Nel caso in esame, il dato LASER risulta essere riferito al sistema cartografico Gauss Boaga (datum Roma40) mentre i corrispettivi dati UAV sono

stati riferiti al sistema cartografico UTM nel datum IGS08 (WGS84). L'effetto di incongruenza è mostrato dall'output di conversione generato dal software proprietario GlobalMapper che produce un errore medio dell'ordine di 50 m nelle coordinate piane X Y (Est, Nord) del tutto non accettabile e imputabile a parametri di conversione medi per tutto il territorio italiano; differente è l'output generato dall'applicativo rilasciato dalla regione Emilia Romagna ConvER2013 il quale basandosi su dati esclusivamente regionali e quindi con parametri definiti nello specifico per l'Emilia Romagna, fornisce un output di conversione con grado di accuratezza dell'ordine metrico e che nonostante renda i dati quantomeno confrontabili qualitativamente non può comunque essere impiegato per un'analisi quantitativa di dettaglio (Figura 57).

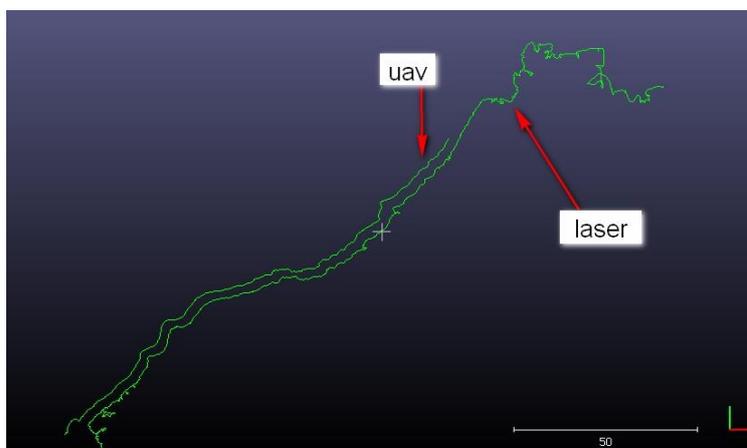


Figura 57. Output di allineamento delle nuvole di punti mediante l'applicativo ConvER2013 in cui è possibile apprezzare lo scostamento metrico che rende impossibile il confronto diretto dei dati rilevati.

Da ciò emerge come in questo caso non sia possibile effettuare un confronto rigoroso assimilabile a un monitoraggio multi-temporale poiché si è persa memoria storica dei parametri di input del dato LASER e dei relativi parametri di trasformazione nel datum considerato. Tuttavia è comunque possibile confrontare le due nuvole dal punto di vista prettamente geometrico, poiché in termini relativi (in un sistema di riferimento locale) esse possono essere sovrapposte mediante processi di roto-traslazione manuali o semi automatici, quindi di fatto è stata forzata la sovrapposizione tra nuvole di punti ignorando del tutto le differenze temporali tra dataset.

A tal fine è stata presa come riferimento la nuvola di punti denominata UAV1 (poiché risulta essere quella più densa ed estesa e garantisce perciò un più accurato computo delle distanze tra i punti), alla quale sono stati allineati gli altri due modelli.

Indipendentemente dai sistemi di riferimento caratteristici dei vari dataset, la fase di analisi geometrico - geomorfologica è stata eseguita in un sistema di coordinate locali in ambiente CloudCompare: le informazioni geografiche tuttavia non vengono perse ma immagazzinate in una apposita matrice di rototraslazione, utile a evitare la gestione di dati troppo distanti dall'origine

del sistema di riferimento utilizzato e quindi difficilmente adattabili. Questa matrice contiene le informazioni necessarie alla corretta ri-proiezione spaziale dell'output al di fuori dell'ambiente di calcolo.

L'allineamento è stato eseguito in step successivi:

- Allineamento manuale che opera una sovrapposizione grossolana delle nuvole di punti l'una sull'altra basandosi sulla selezione da parte dell'utente di un minimo di 4 punti omologhi tra i differenti dataset.
- Allineamento di precisione mediante algoritmo ICP (Iterative Closest Point) che ha lo scopo di giungere a una situazione di best-fitting delle mutue geometrie sovrapposte mediante roto traslazioni iterative volte a minimizzare la distanza tra la nuvola sorgente e quella di riferimento. Tale processo si interrompe nel momento in cui la variazione di posizionamento tra due iterazioni successive raggiunge un valore minimo di soglia.

Il calcolo delle distanze avviene confrontando la distribuzione di riferimento con quella di comparazione alla ricerca del punto che presenti il minimo valore di distanza tra punto comparato e punto di riferimento, questo criterio è denominato "nearest neighbor distance": la distanza così individuata tuttavia potrebbe non corrispondere alla minima possibile calcolata tra due superfici, l'errore generato da questo calcolo per nuvole molto dense è comunque trascurabile (Figura 58).

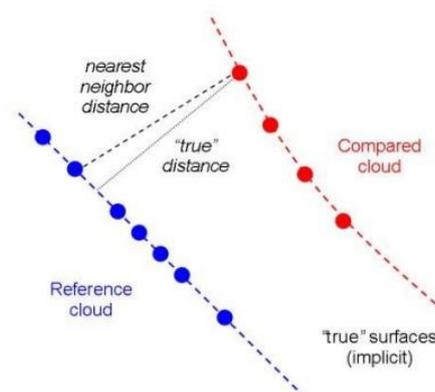


Figura 58. Schematizzazione del metodo di calcolo della distanza tra nuvole.

Dall'analisi delle distanze assolute tra nuvole (Figura 59 A, B), emerge una maggiore sovrapposibilità tra i due dataset fotogrammetrici (Figura 59 A), in cui gli scostamenti maggiori risultano localizzati nettamente nella porzione del margine sud occidentale del rilievo, mentre vi è una diffusa differenza di posizionamento relativo tra i dati LASER e quelli UAV (Figura 59 B). L'ampio margine di sovrapposibilità tra le nuvole UAV, rilevate ed elaborate in maniera autonoma e indipendente l'una dall'altra fornisce un feedback sulla robustezza e affidabilità dell'approccio al

rilievo utilizzato, evidenziandone l'elevata ripetibilità di tipo geometrico. Per quanto riguarda invece le differenze rilevate tra le due metodologie di acquisizione (TLS e CRP), potrebbero essere imputabili a più fattori concomitanti:

- fattori di tipo strumentale legati al metodo di rilievo (diretto per i dati LASER in cui ogni punto è frutto di misura di distanza tra strumento e oggetto, indiretto per i dati UAV in cui le geometrie dei punti sono funzione di calcoli su una matrice di pixel)
- fattori di tipo geomorfologico legati alla naturale evoluzione della parete rocciosa nel tempo, infatti poiché il rilievo LASER risale al 2006 mentre quello UAV è stato effettuato nel 2016 è da considerare come elemento di influenza anche il tempo intercorso tra i due rilievi, che su un sito in così rapida evoluzione morfologica potrebbe aver svolto un ruolo non indifferente.
- La presenza delle reti paramassi che mascherano l'effettiva geometria della parete.

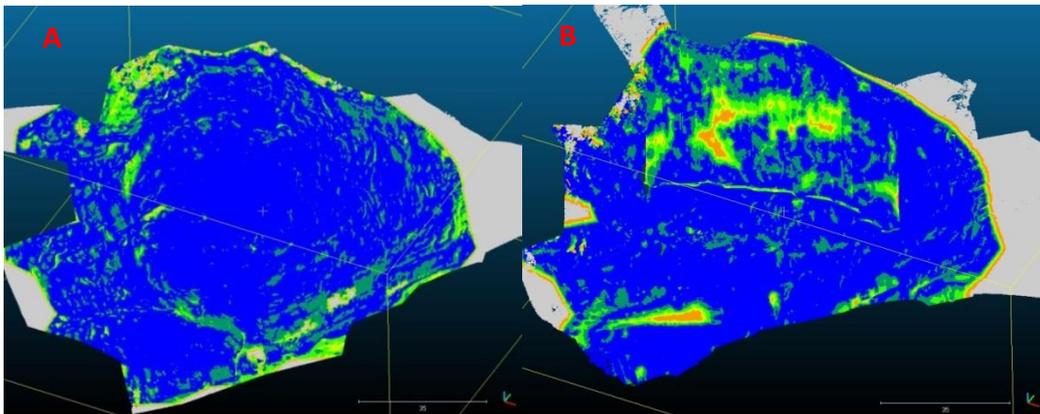


Figura 59. Confronto distanziometrico relativo tra i diversi output: A) UAV1 vs UAV2. B) UAV1 vs LASER.

Il computo delle distanze tra nuvole di punti ne fornisce esclusivamente il valore assoluto, senza dare alcuna informazione sui mutui rapporti geometrici tra punti: in questo genere di calcolo non è possibile determinare quindi se la differenza sia positiva o negativa in quanto nella comparativa non è presente una superficie continua di riferimento che, grazie alla sua orientazione nello spazio definita dalle normali, definisca un livello di zero. Per ovviare a questo problema il software CloudCompare mette a disposizione un apposito tool denominato "Cloud to Mesh distance" che calcola la distanza tra una Mesh di riferimento e nuvola di punti di misura: poiché i tre rilievi sono stati allineati al dato UAV1, su di esso è stata ricalcolata la Mesh che ha svolto la funzione di superficie di riferimento. In questo modo è possibile apprezzare la differenza di polarità tra le zone in cui si registra il massimo scostamento: nel confronto tra nuvola LASER e superficie UAV1 si riconosce un eccesso di volume nella porzione mascherata dalle reti metalliche e una riduzione in corrispondenza della base della parete (Figura 60), ciò si traduce in termini generali, in una

perdita di volume nel tempo da parte della porzione superiore, e un incremento nella parte inferiore. Risulta quindi che, in 10 anni circa si sono verificati crolli nella parte superiore della parete e accumuli di materiale detritico alla base.

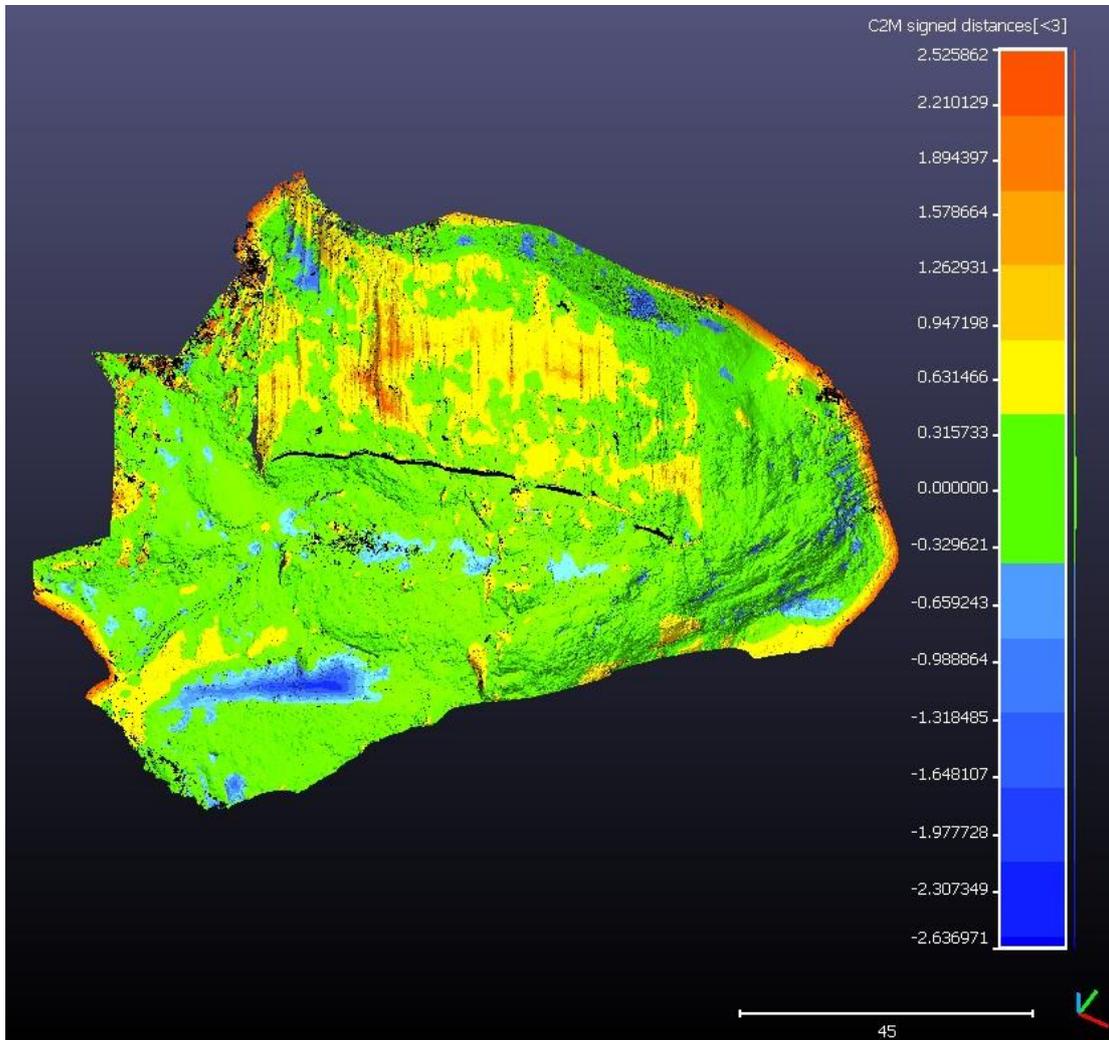


Figura 60. Confronto distanziometrico tra Mesh UAV1 e nuvola di punti LASER. Le classi di variabilità dal verde al rosso indicano una perdita di volume della parete nel tempo intercorso tra rilievo LASER e rilievo UAV (circa 10 anni), mentre le classi di variabilità che vanno dal verde al blu indicano un incremento di volume nel tempo.

Dal punto di vista statistico i dati di scostamento calcolati seguono una distribuzione normale attorno al valore medio di zero, con estremi che raggiungono valori massimi di +2,5 e -2,6 m (Figura 61): il range di tolleranza entro cui i valori di scostamento vengono ritenuti accettabili, è stato impostato a 0,4 m poiché gran parte della distribuzione ricade al di sotto di tale soglia, quindi implicitamente si considera accettabile un errore di allineamento di $\pm 0,4$ m.

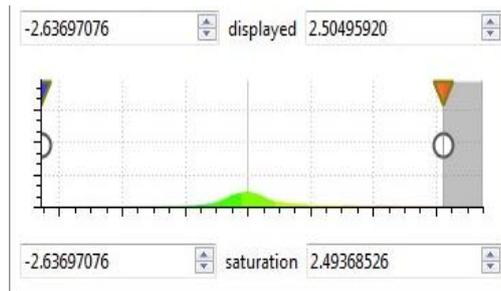


Figura 61. Distribuzione gaussiana delle distanze tra mesh UAV1 e nuvola LASER.

La distribuzione è stata classificata mediante 14 classi di scostamento, sette positive e altrettante negative ad incremento costante pari a 0,4 m.

I valori più alti di scostamento positivi che si registrano nelle porzioni sommitali della parete rocciosa, risultano interessati dagli effetti di disturbo legati alla presenza delle reti in aderenza, che il segnale LASER, dotato di passo fisso e cadenzato, ha registrato: è possibile discriminare tali effetti operando una selezione sullo scalar field designato come attributo della distanza, infatti evidenziando i soli dati con distanze appartenenti alla classe 0 i punti della distribuzione più distanti lasciano il posto ad una porzione molto meno densa di punti le cui distanze risultano essere molto meno elevate (Figura 62) rientrando nel range di tolleranza di $\pm 0,4m$.

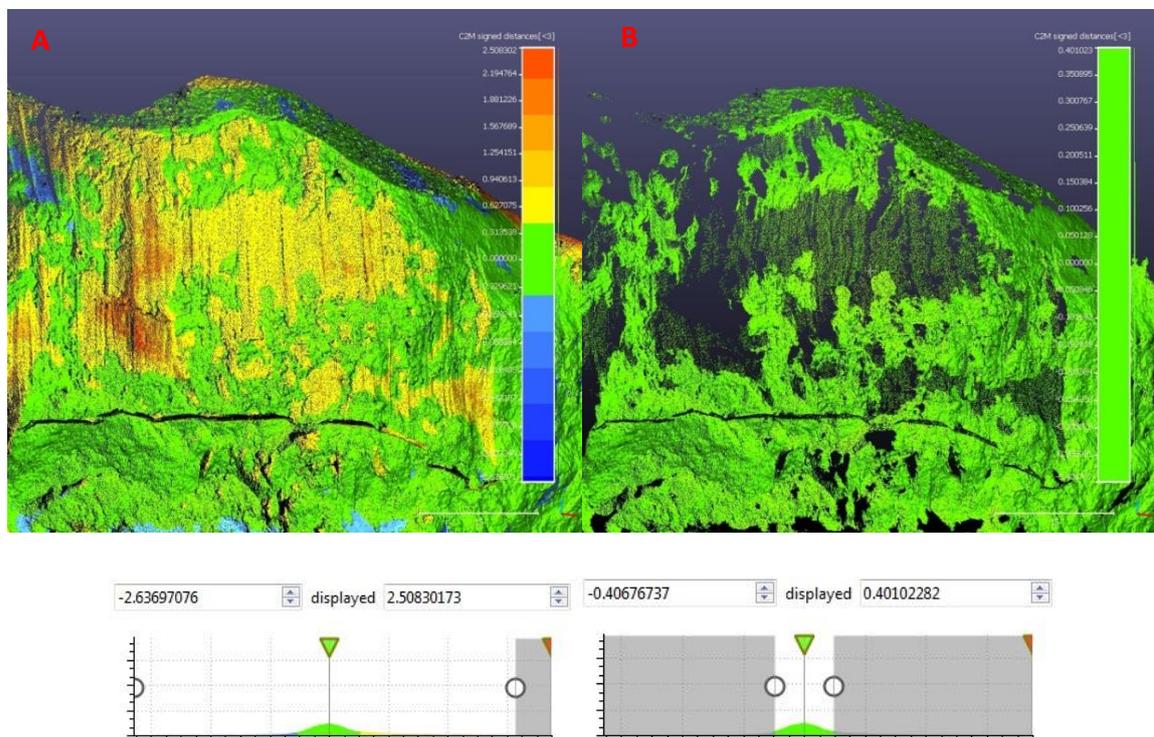


Figura 62. Output delle distanze Point to Mesh prima (A) e dopo (B) la selezione dell'intervallo di tolleranza di ± 0.4 m entro cui si ritiene accettabile lo scostamento tra dataset. Emerge come la rete in aderenza mascheri marcatamente la parete sottostante, che tuttavia mostra segni effettivi di crollo nelle porzioni in cui vi è totale assenza di punti anche in seguito alla selezione.

Da ciò emerge che nonostante vi sia una larga componente di rumore generata dalla presenza delle reti, è comunque evidente una zona della parete in cui vi è un effettivo cambio di morfologia dovuto alle dinamiche di crollo avvenute nei 10 anni di distanza tra i due rilievi. Tale cambiamento morfologico è apprezzabile anche dall'analisi dei valori radiometrici RGB dei due modelli (Figura 63). È stato dunque possibile calcolare il volume di tale porzione di parete rocciosa in eccesso al fine di stimare l'entità dei crolli avvenuti nel tempo: esso risulta essere di circa 116 m³.



Figura 63. Confronto morfologico in scala di valori radiometrici RGB tra output LASER e UAV, della porzione di parete rocciosa in cui è stato individuato uno dei probabili crolli.

Altro elemento rilevante è senza dubbio la variazione morfologica alla base della parete rocciosa in cui è possibile osservare un notevole incremento areale del deposito: infatti nel rilievo LASER del 2006 (eseguito immediatamente dopo la fine dei lavori di ri-profilatura del versante) si notano chiaramente le tracce del percorso di manovra dei mezzi di movimento terra utilizzati nelle fasi di demolizione, esse sono osservabili sia tramite lo scalar field della distanza tra nuvola e mesh (Figura 64 A) che mediante il campo RGB (Figura 64 B, C): tali tracce sono del tutto assenti nei rilievi UAV in cui questa porzione di versante presenta una morfologia caratterizzata dalla presenza di una coltre di detrito che ha evidentemente cancellato le tracce precedenti.

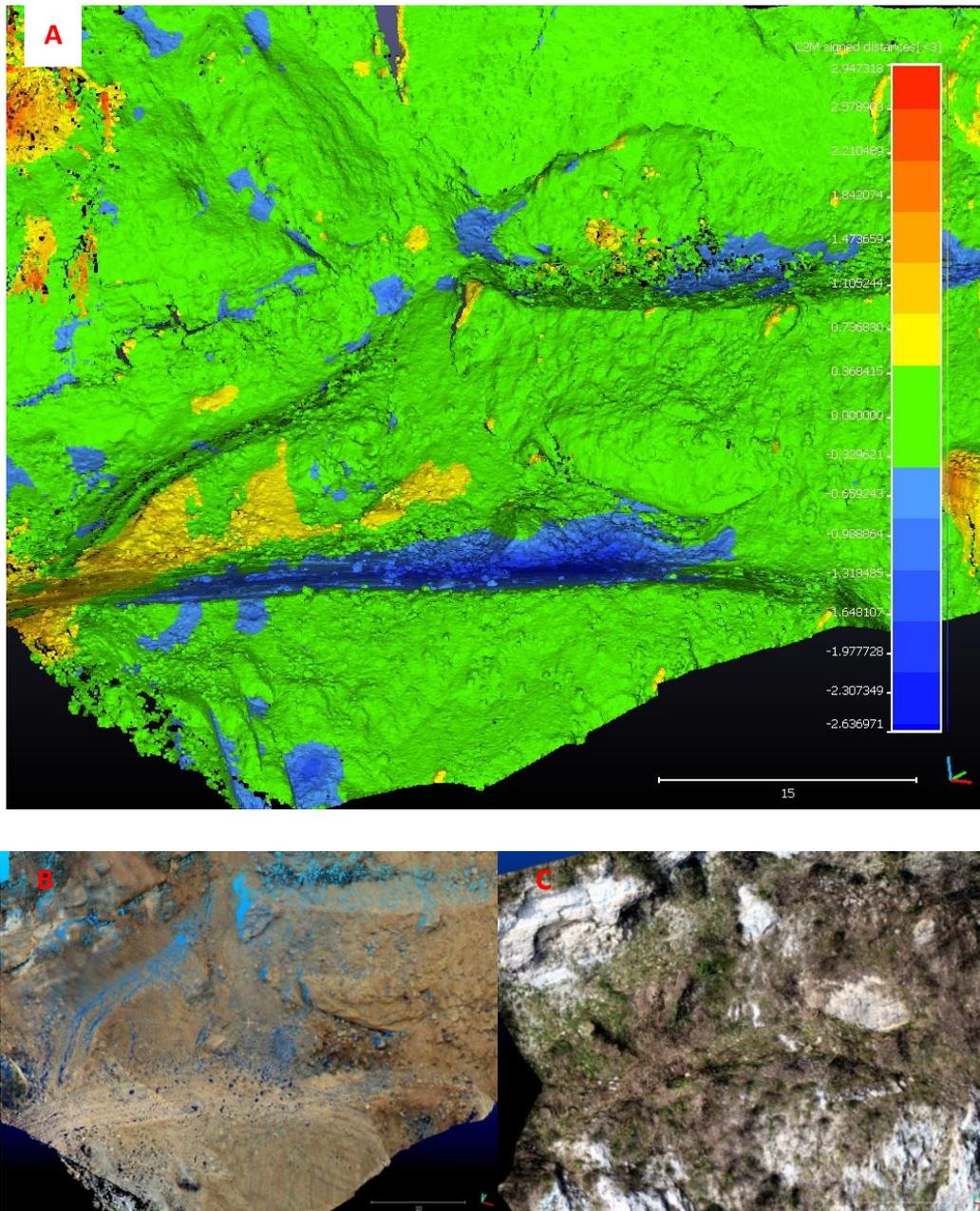


Figura 64. Deposito alla base della parete evidenziato sia mediante Scalar field (A) dalle porzioni di colore blu, che dal corrispondente segnale RGB (B e C), rappresentante rispettivamente il rilievo LASER e UAV.

Il volume in eccesso depositato alla base della parete rocciosa risulta essere pari a 290 m^3 . Sono inoltre stati individuate altre porzioni di parete rocciosa che definiscono corpi di accumulo e di crollo di entità inferiore (Figura 65), di questi è stato successivamente calcolato il volume che cumulativamente si aggira attorno ai 146 m^3 complessivi di materiale crollato contro i circa 358 m^3 di deposito. Tali valori non risultano in linea con i fattori di correlazione volumetrica pre e post crollo proposti da Church nel 1981, che suggerisce un fattore di dilatazione volumetrica (noto come Swell factor) del 67% calcolato su fronti rocciosi scavati meccanicamente: infatti il fattore di dilatazione volumetrica riscontrato nell'area di studio risulta essere circa del 145%. Ciò può essere dovuto a due fattori principali probabilmente concomitanti nel determinare il risultato ottenuto:

la sottostima dei volumi crollati dovuta al fatto che sono stati tralasciati nel computo i volumi inferiori a 4m^3 (poiché molto più sensibili all'errore dovuto al range di variabilità imposto inizialmente di $0,4\text{m}$), e la sovrastima dei volumi di deposito dovuta alla presenza di vegetazione tra i blocchi. Queste osservazioni fanno ipotizzare che il fronte roccioso analizzato presenti una attività evolutiva superiore a quella stimata.

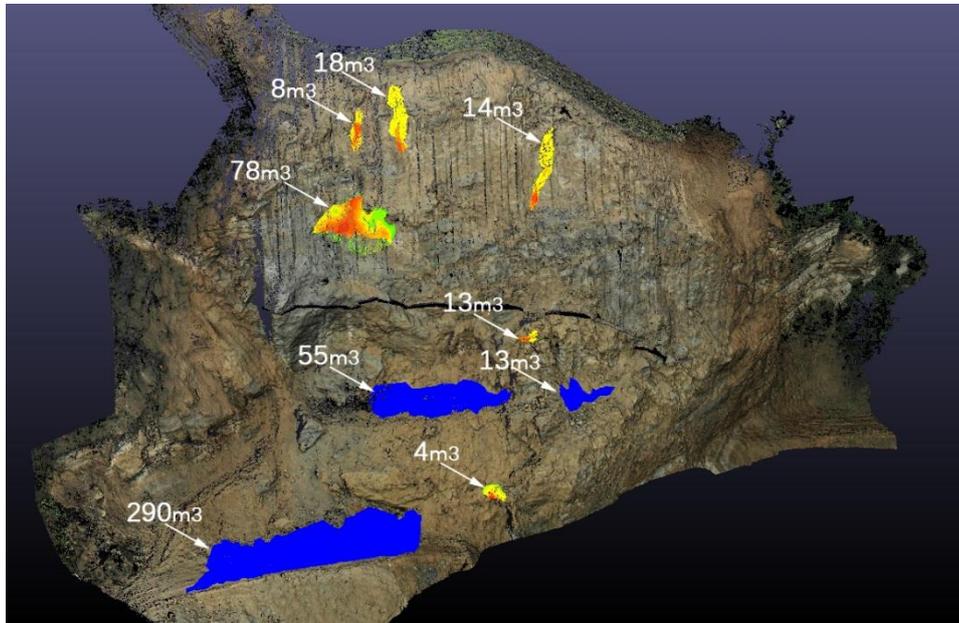


Figura 65. Porzioni di parete interessate dai fenomeni di crollo (in rosso) e relativi depositi (in blu) con i relativi ingombri volumetrici.

Degna di nota risulta essere la resa della parte terminale delle reti in aderenza che, pur essendo presenti sia durante la fase di rilievo nel 2006 che attualmente, sono state individuate solo nel rilievo laser, facendo registrare delle differenze costanti lungo tutto lo stendimento delle stesse (Figura 66).

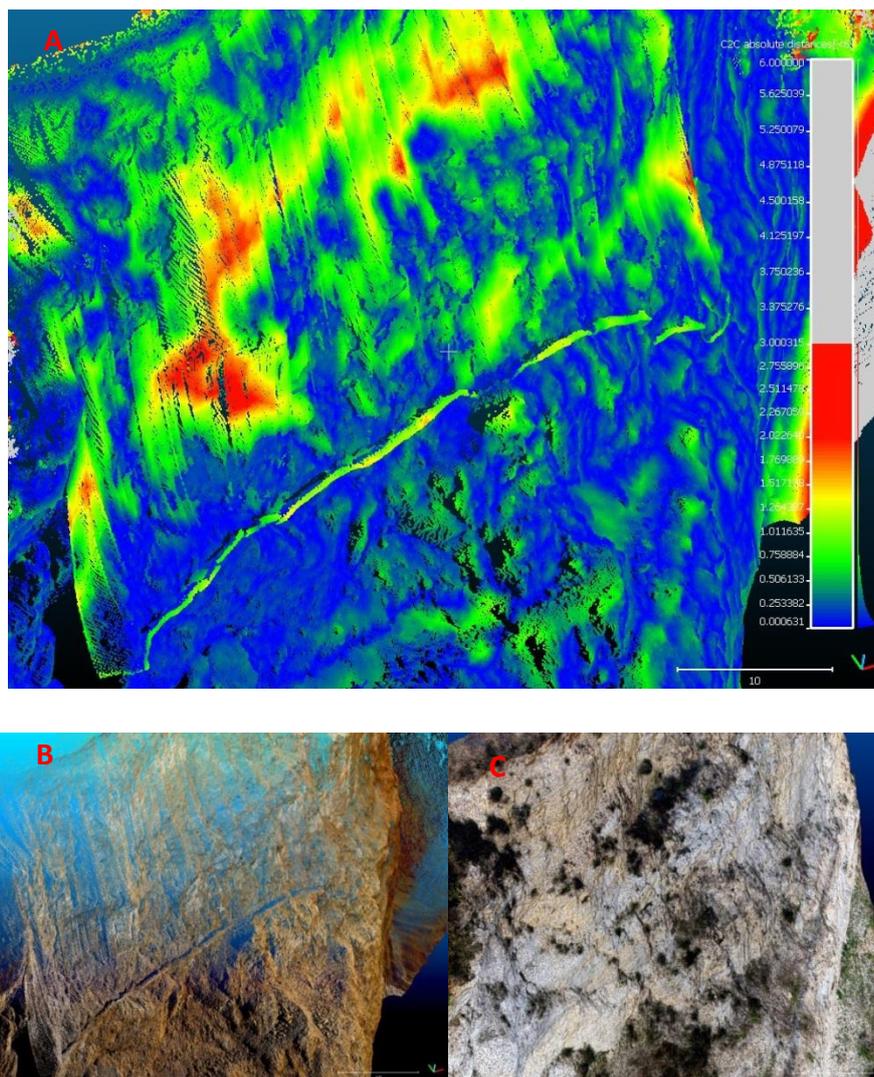


Figura 66. Particolare della parte terminale della rete in aderenza che sporge fuori dalla parete, essa viene individuata solo nel rilievo LASER sia in falsi colori che in RGB (A e B), mentre è assente nel rilievo UAV (C).

Allo stesso modo viene indicato come volume in eccesso l'ingombro generato da un arbusto che è cresciuto all'interno di una frattura beante in prossimità del ciglio di scarpata successivamente alle operazioni di disaggio: questo elemento seppur di scarsa utilità pratica risulta essere un esempio altamente esplicativo della potenza e versatilità del metodo utilizzato.

4.4 Orientazione dei piani di discontinuità

È stato effettuato un confronto di tipo quantitativo mediante la comparazione dei dati strutturali estraibili con le differenti tecniche di rilievo quali rilievo geomeccanico classico e rilievo digitale da nuvola di punti appartenente al dataset UAV1.

4.4.1 Rilievo geomeccanico manuale

Il rilievo geomeccanico tradizionale viene eseguito lungo una o più scanlines in accordo con le linee guida suggerite dalla International Society for Rock Mechanics (IRSM, 1978), in cui per ogni discontinuità che intersechi una data linea di scansione sono riportate posizione, orientazione, spaziatura, apertura, riempimento, persistenza e altri parametri come rugosità e resistenza a compressione uniassiale, al fine di individuare le famiglie di discontinuità che caratterizzano l'ammasso e le loro proprietà meccaniche. Tuttavia a causa della notevole estensione dell'area e della pericolosità delle calate da parte dei geologi rocciatori, nonché a causa della complessità morfologica dell'area, è stato deciso di adottare il metodo definito face sampling o metodo soggettivo. Nel metodo Face sampling ad una fase preliminare di rilievo, nella quale gli obiettivi primari sono quelli di individuare il numero di famiglie, le orientazioni medie, ed il peso relativo di ogni famiglia, segue una fase sistematica di rilievo in affioramento nella quale vengono registrati orientazione, persistenza, rugosità, apertura e riempimento di un numero rappresentativo di discontinuità: la valutazione di importanza sulle singole discontinuità viene effettuata in base alla sua persistenza.

I parametri registrati in campagna sono di seguito descritti facendo riferimento alle "Raccomandazioni ISRM sulle metodologie per la descrizione quantitativa delle discontinuità nelle masse rocciose".

- Orientazione: posizione della discontinuità nello spazio, è descritta dalla direzione di immersione e dalla inclinazione rispetto all'orizzontale della linea di massima pendenza del piano di discontinuità.
- Spaziatura: distanza tra le discontinuità adiacenti misurata ortogonalmente rispetto alle discontinuità stesse. In genere si parla di spaziatura media o modale di un sistema di discontinuità.
- Persistenza: lunghezza della traccia della discontinuità osservata in affioramento, fornisce una stima dell'estensione areale e della profondità di penetrazione di una discontinuità, queste possono infatti terminare in roccia massiccia o contro altre discontinuità, presentando così un valore ridotto di persistenza.
- Scabrezza: rugosità delle superfici esposte di una discontinuità, e ondulazione a grande scala rispetto all'andamento medio delle discontinuità. Tale parametro contribuisce a incrementare la resistenza al taglio.
- Resistenza delle pareti: resistenza a compressione equivalente dei lembi affacciati di una discontinuità. Influisce in maniera rilevante sulla resistenza al taglio dell'ammasso se le superfici sono a contatto, può essere stimata con il martello di Schmidt.

- Apertura: distanza tra i lembi esposti di una discontinuità.
- Riempimento: materiale che separa le pareti adiacenti di una discontinuità.
- Consistenza: grado di consistenza del materiale alterato che costituisce le pareti di una discontinuità.

Il rilievo adoperato come metro di paragone si riferisce a una porzione limitata (denominata Fronte D), di un più esteso lavoro di caratterizzazione geomeccanica delle gole di Scascoli effettuato in seguito ai fenomeni di crollo avvenuti nel 2002: dunque la morfologia esistente all'epoca di tale rilievo non era ancora stata modificata dall'enorme crollo avvenuto nel 2005. Inoltre il Fronte D denominato "Mammellone 1" è stato rilevato grazie ad apposite calate in roccia da parte dei geologi Doglioni e Giacchetti a causa dell'inaccessibilità sia da valle per la presenza del torrente che da monte per la presenza di innumerevoli masse potenzialmente instabili (Figura 67).

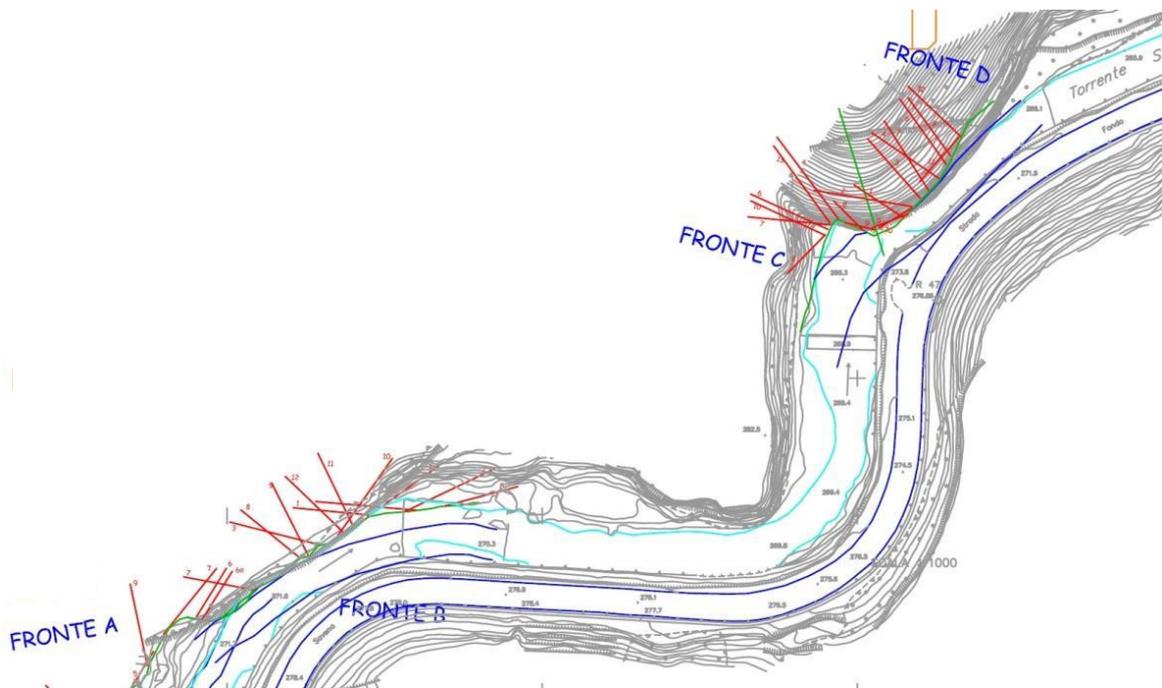


Figura 67. Planimetria generale delle gole di scascoli e tracce delle discontinuità rilevate (ENSER 2003, inedito).

Il risultato del rilievo geomeccanico lungo il Fronte D consiste nell'insieme di 12 macrogiunti caratterizzati come segue in Tabella 5:

	Discontinuità	Orientazione		Tipo discont.	Persistenza (m)
		Dip (°)	Dipdirection (°)		
Tracce di discontinuità	1	85	200	jn	20
	2	85	175	jn	15
	3	65	215	fl	60
	4	60	030	jn	20
	5	85	220	fl	65
	6	65	040	fl	65
	7	68	045	fl	45
	8	55	140	jn	10
	9	50	145	jn	30
	10	60	135	jn	8
	11	70	120	jn	15
	12	65	210	jn	10

Tabella 5. Discontinuità rilevate sul fronte D mediante rilievo soggettivo.

In affioramento tali discontinuità apparivano marcatamente ondulate, alterate e con aperture più che centimetriche.

4.4.2 Rilievo digitale delle giaciture

Il rilievo delle giaciture è stato anche eseguito direttamente sulle nuvole di punti utilizzando il software open source CloudCompare: tramite tale applicativo sono stati analizzati gli attributi delle nuvole di punti in oggetto, e più specificatamente i valori delle normali associate ai singoli punti.

La normale di un punto è definita come il vettore perpendicolare al piano tangente per quel punto. Essa è una grandezza vettoriale che determina l'orientamento di una qualsiasi entità geometrica quale punto o superficie nello spazio: di fondamentale importanza risulta nella ricostruzione di superfici tridimensionali per la determinazione della superficie interna ed esterna di un oggetto, o per l'interazione di un oggetto con una sorgente luminosa, in definitiva tale vettore definisce l'orientazione delle entità geometriche a cui appartiene nello spazio (Figura 68).

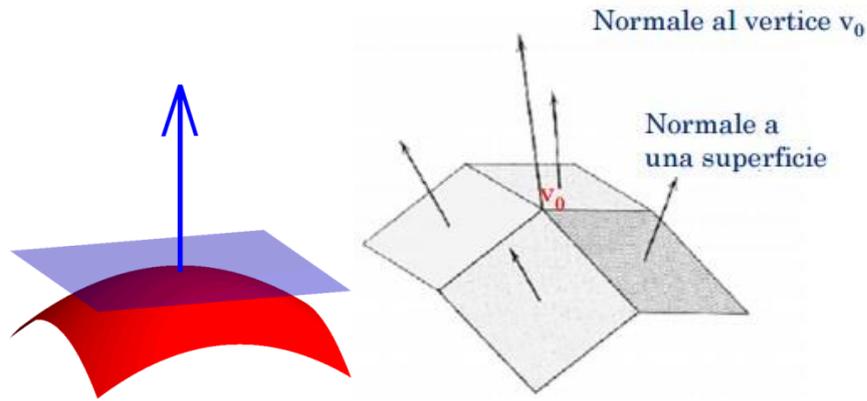


Figura 68. Schematizzazione di normali a superfici curve e piane.

Anche le normali sono definite da una terna di coordinate spaziali spesso associate ai punti assieme ai riferimenti colore o agli altri attributi di una nuvola di punti: andando quindi ad analizzare questo dato è possibile individuare porzioni di spazio (rappresentato da singole entità puntiformi) con orientazione simile. Parametrizzando tale valore, tramite una scala cromatica sarà quindi possibile individuare graficamente le aree contigue a giacitura comune, che successivamente individueranno un piano. È possibile effettuare tale computo attribuendo alla nuvola di punti in esame un nuovo campo scalare (scalar field), ovvero un nuovo attributo calcolato associando al valore della normale di ogni singolo punto il valore di giacitura (Dip / Dip Direction) espresso mediante una scala di colore graduata numericamente con range da 0 a 360.

Il risultato di questo procedimento è dato da un nuovo attributo dei punti che varia a seconda dell'orientazione degli stessi: sarà quindi possibile estrarre una serie di piani di interpolazione dalla distribuzione di punti ad egual giacitura (Figura 69).

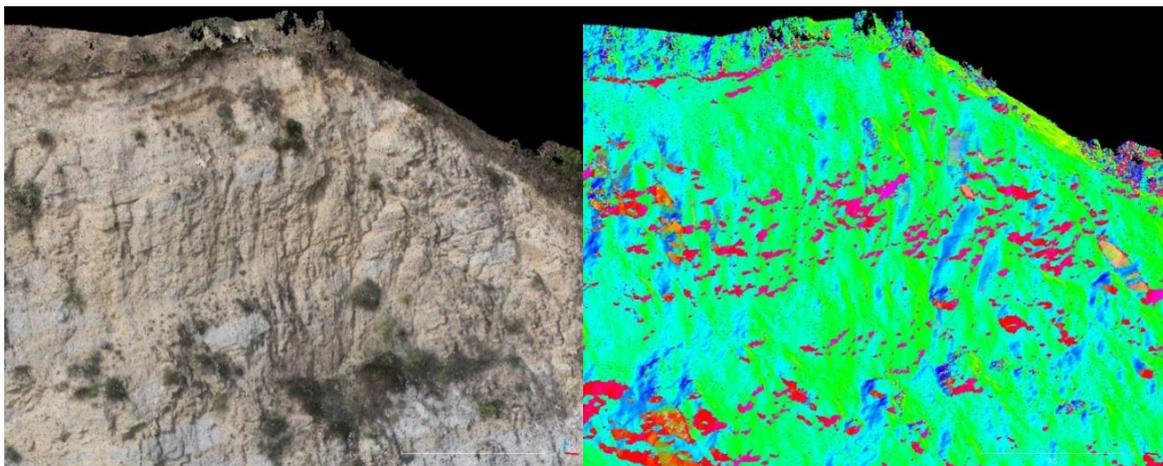
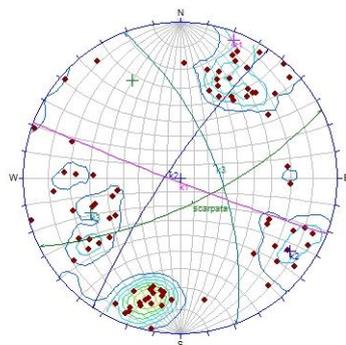


Figura 69. Rappresentazione della nuvola di punti mediante valori radiometrici RGB a sinistra, e tramite scalar field della dip direction a destra.

In sostanza, così facendo ogni punto viene assimilato a una piccola superficie di cui si conosce la giacitura poiché parametrizzata in precedenza. Selezionando tutti i punti a giacitura simile entro un certo range di variabilità, lungo quelli che sono i lineamenti geologici di interesse, è possibile interpolare il piano che meglio si adatta alla distribuzione di punti individuata. I piani così individuati dai parametri medi di direzione di immersione e inclinazione vengono rappresentati mediante proiezione stereografica. Alla luce di quanto affermato pocanzi, il metodo messo a punto e utilizzato in questo lavoro di tesi può essere definito di tipo semi automatico con controllo e validazione manuale, in quanto ad una fase prettamente computazionale di riconoscimento, calcolo e conversione delle normali in dato geologico, vi è alla base un processo di selezione manuale delle entità da modellare dettata dall'esperienza dell'operatore che conserva un controllo diretto sul dataset di risultati in uscita. La discretizzazione in famiglie di discontinuità è stata operata per mezzo di una selezione dei poli dei piani mediante finestre entro le quali è stato mediato il valore di dip/dip direction: essendo le giaciture in oggetto tutte ad alto angolo di inclinazione si è tenuto conto della possibile variazione di polarità delle discontinuità dovuta al caratteristico andamento ondulato. Di conseguenza le finestre entro cui sono stati mediati i parametri delle discontinuità abbracciano porzioni opposte dello stereonet.

4.4.2.1 Dataset UAV1

Sono state effettuate circa 80 misure di discontinuità lungo tutta l'estensione della parete in esame, di queste nessuna risulta essere una superficie di strato, mentre sono distinguibili nettamente almeno 3 famiglie di discontinuità illustrate nel diagramma stereografico di Figura 70 e riassunte in Tabella 6.



famiglia di discontinuità	Dip(°)	Dip direction(°)
k1	87°	201°
k2	80°	304°
k3	63°	69°

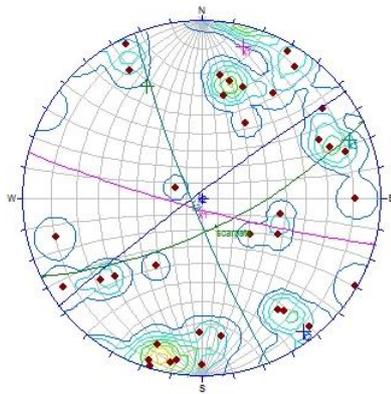
Figura 70. Stereoplot del rilievo digitale UAV1, e orientazione media delle famiglie individuate.

Tabella 6. Famiglie di discontinuità UAV1.

I dati ivi rappresentati sono proiettati su emisfero inferiore con proiezione equi-angolare: delle tre famiglie di discontinuità quella denominata k1 è caratterizzata da una ampia variabilità di inclinazione dovuta probabilmente alla marcata ondulazione del set.

4.4.2.2 Dataset UAV2

Sono state effettuate circa 35 misure di discontinuità dalle quali si evince la presenza di tre sistemi di discontinuità illustrati nel seguente diagramma stereografico (Figura 71) e riassunti in Tabella 7.



famiglia di discontinuità	Dip(°)	Dip direction(°)
k1	83°	195°
k2	86°	323°
k3	83°	248°

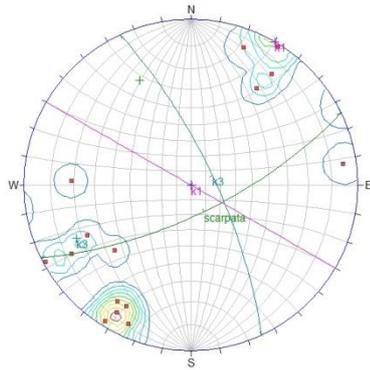
Figura 71. Stereoplot del rilievo digitale UAV1, e orientazione delle famiglie individuate.

Tabella 7. Famiglie di discontinuità UAV2.

Dalla distribuzione dei dati si può osservare come questi siano molto più dispersi rispetto a quelli del dataset precedente, inoltre stando a tale distribuzione la famiglia di discontinuità denominata k3 viene ubicata nella porzione opposta di stereonet rispetto all'omologa famiglia riscontrata nel dataset UAV1, probabilmente a causa della variabilità angolare precedentemente illustrata, che caratterizza i diversi sistemi di discontinuità.

4.4.2.3 Dataset LASER

Pur non essendo possibile indagare la totalità della superficie rappresentata dal rilievo a causa dell'effetto di disturbo generato dalla presenza delle reti paramassi in aderenza, è stato comunque effettuato il rilievo digitale dei piani di discontinuità nelle porzioni non mascherate dalle reti, ovvero nella zona inferiore della parete: in tale area sono state raccolte 15 misure (Figura 72) che individuano due famiglie di discontinuità indicate in Tabella 8.



famiglia di discontinuità	Dip(°)	Dip direction(°)
k1	90°	210°
k2	-	-
k3	74°	65°

Figura 72. Stereoplot del rilievo digitale LASER, e orientazione delle famiglie individuate.

Tabella 8. Famiglie di discontinuità LASER.

Dalle misure effettuate emerge la presenza di due sistemi di discontinuità di cui quello denominato k1 mostra il tipico effetto di inversione di polarità.

4.4.2.4 Confronto dei dataset

Confrontando i risultati ottenuti dai diversi rilievi si può notare come, seppur con un certo range di variabilità, vi sia una discreta sovrapposibilità dei dati (Figura 73):

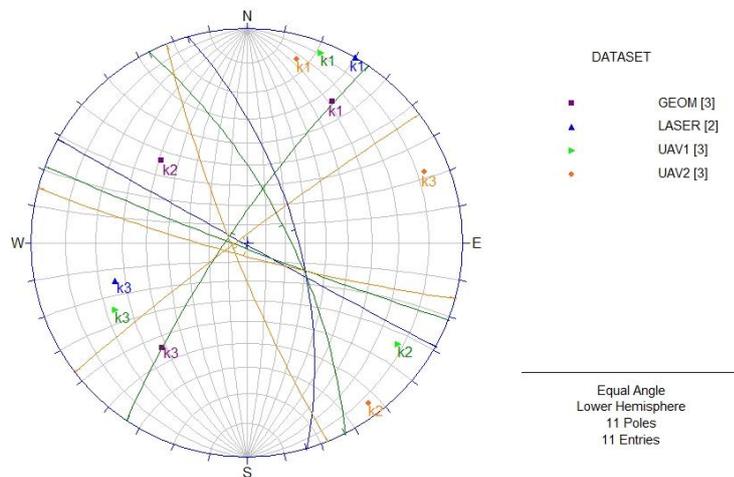


Figura 73. Sovrapposizione delle discontinuità appartenenti ai 3 rilievi presi in analisi.

Dal grafico si può notare come i dati relativi alla famiglia k1 si dispongano in un intorno molto ristretto con variabilità inferiore ai 20° di azimuth. Per quanto riguarda la famiglia denominata k3, vi è lo stesso tipo di convergenza per i modelli LASER e UAV1, mentre i dati relativi alla famiglia di giunti k2 risultano più dispersi e meno correlabili con i corrispondenti geomeccanici.

Di seguito in Figura 74 è illustrata una panoramica delle giaciture rilevate in affioramento con entrambi i metodi: è chiaro come mentre nel rilievo soggettivo sia stata data massima importanza ai macro-giunti in quello digitale non vi sia differenza tra i tipi di superfici misurate.

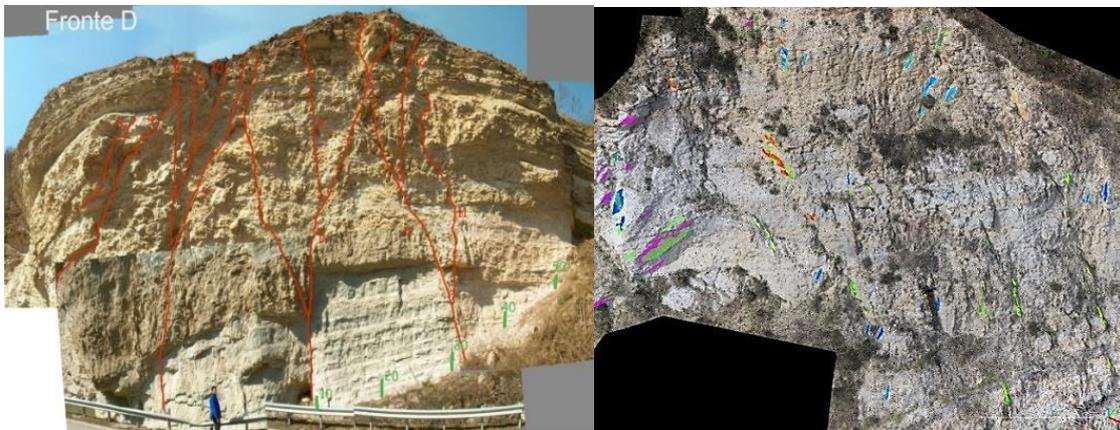


Figura 74. Tracce delle giaciture misurate con entrambi i metodi: soggettivo a sinistra e digitale a destra.

4.5 Volume degli oggetti

Al fine di determinare la massa potenzialmente coinvolta in un possibile evento di crollo, sono stati estrapolati i volumi delle porzioni aggettanti isolate dell'ammasso roccioso: tali volumi si riferiscono a quelle porzioni di parete che da osservazioni effettuate sia in campagna che sui modelli digitali risultano essere isolate da almeno una discontinuità riconoscibile e caratterizzata da una significativa apertura. L'individuazione di tali discontinuità è stata effettuata manualmente specificando l'assetto dei piani di svincolo. Il successivo calcolo del volume delle porzioni di nuvola di punti così individuate è stato condotto mediante il tool di analisi del volume messo a disposizione dal software Cloudcompare, che si basa su un algoritmo di calcolo definito 2.5D, poiché a differenza degli algoritmi che sfruttano le superfici chiuse tridimensionali (Mesh) per estrarne il volume mediante una serie di integrazioni, tale metodo viene applicato direttamente sul dato grezzo (la nuvola di punti) ed utilizza un approccio matriciale bidimensionale. Il calcolo di volume 2.5D viene effettuato mediante operazioni di rasterizzazione e gridding della nuvola di punti tridimensionale:

- Rasterizzazione: in questa fase a seconda della direzione di proiezione definita dall'utente i punti caratterizzati da tre coordinate (X Y Z), sono trasformati in un oggetto bidimensionale che conserverà solo due delle tre coordinate spaziali succitate mentre la terza viene registrata come attributo del punto bidimensionale. In questo modo di fatto si ottiene la proiezione su un piano bidimensionale di un dato tridimensionale, cioè un raster, allo stesso modo della creazione di un comune DEM raster (Figura 75 A).

- Gridding: il dato bidimensionale ottenuto presenterà una risoluzione funzione della quantità di punti della nuvola, tuttavia non sempre tale distribuzione risulta sufficiente ad ottenere continuità nel dato di output a causa della discretizzazione intrinseca del dato di input. Per evitare porzioni vuote nella matrice bidimensionale di output è possibile specificare la risoluzione della griglia su cui tale matrice verrà creata. Tale operazione consiste nell'assimilare celle contigue in un'unica cella di dimensioni maggiori e con attributi mediati tra le celle accorpate, ovvero un resampling (Figura 75 B).

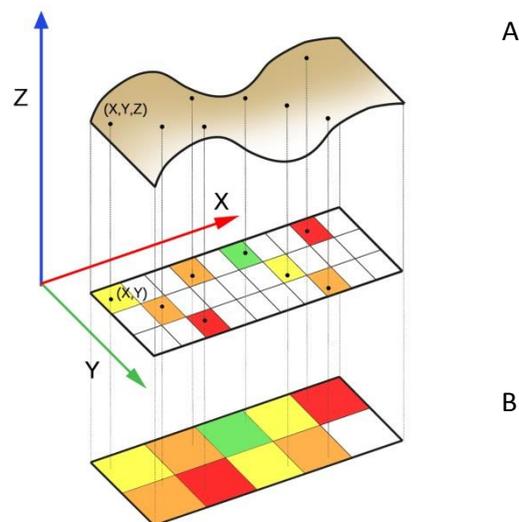


Figura 75. Schema del processo di rasterizzazione in cui la terna di coordinate (X,Y,Z) di ogni punto nello spazio viene trasformata in una coppia (X,Y) su un piano. B) Schematizzazione del processo di resampling in cui si passa da un modello a risoluzione maggiore (ma affetto da un elevato numero di celle prive di informazione) a un modello che sebbene presenti una risoluzione inferiore è caratterizzato da una maggiore continuità del dato.

Il risultato fornito dai processi elencati consiste quindi in una matrice bidimensionale di pixel che contengono informazioni di elevazione rispetto a una direzione: se si dispone di due matrici sovrapponibili e rappresentanti rispettivamente il tetto e la base dell'oggetto di cui è ignoto il volume, questo è definito dalla somma dei volumi dei parallelepipedi ottenuti dal prodotto dell'area di base della cella elementare per la differenza di altezza tra i due raster di input.

I volumi sono quindi stati determinati grazie all'intersezione della superficie topografica con una serie di piani appositamente orientati in maniera concorde ai sistemi di discontinuità precedentemente individuati: nella fase di calcolo a tali piani è stata assegnata la funzione di superficie inferiore su cui operare la differenza di quote lungo una determinata direzione di proiezione. Poiché tale differenza può essere eseguita solo lungo le direzioni dei tre assi principali, le porzioni di ammasso idealmente instabile individuate sono state orientate in modo tale da essere perpendicolari all'asse X.

L'analisi è quindi stata condotta sulle porzioni di ammasso aggettanti di maggiori dimensioni (Figura 76) individuando 6 porzioni di volume compreso tra i 2 e i 90 m³ le cui variazioni all'interno dei rispettivi dataset sono illustrate in Tabella 9.

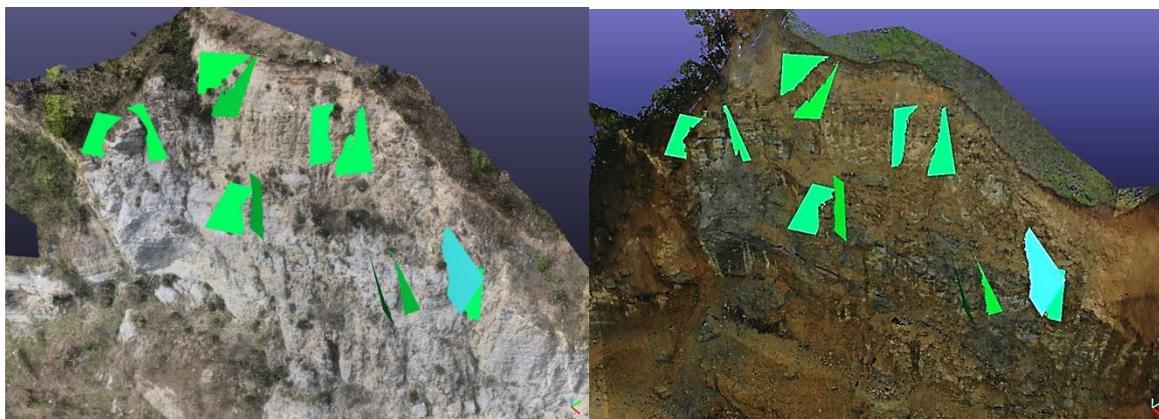


Figura 76. Panoramica degli aggetti individuati dai rispettivi piani nei diversi modelli UAV a sinistra, LASER a destra.

mezzo	Vol 1 m ³	Vol 2 m ³	Vol 3 m ³	Vol 4 m ³	Vol 5 m ³	Vol 6 m ³
UAV1	89.5	2.2	19.7	2.7	61	4
UAV2	85.4	2.7	20.3	2.3	59.4	4.5
LASER	119.7	7.5	25..2	5.7	70.4	3.73

Tabella 9. Misure di volume effettuate sugli aggetti precedentemente individuati.

Si può notare come differenze sostanziali esistano tra i volumi calcolati nel modello LASER rispetto a quelli da UAV che, pur mostrando piccole variazioni e scostamenti, restituiscono valori piuttosto simili tra loro: in questo confronto emerge a pieno il ruolo di interferenza che la rete paramassi svolge nel rilievo laser: infatti mentre i primi 5 volumi sono stati calcolati sull'intera nuvola senza filtraggio alcuno, il volume numero 6, è stato calcolato operando precedentemente un filtraggio dei punti atto a rimuovere quelli che non corrispondono alla superficie rocciosa, da ciò si può notare come il volume di tale porzione di nuvola risulti molto più confrontabile con i risultati UAV rispetto a quelli dello stesso dataset non sottoposti a filtraggio.

Le giaciture dei piani che isolano le porzioni aggettanti risultano compatibili con quelle individuate nel rilievo digitale delle discontinuità, seppur con un certo margine di differenza legato sia a fattori naturali come l'effetto di disgregazione lungo fratture beanti, sia all'indeterminatezza dovuta al criterio soggettivo con cui queste sono state definite.

4.6 Cinematismi di instabilità

I dati geomeccanici raccolti nei differenti rilievi consentono di effettuare una stima di tipo geometrico sulle possibilità concrete che si verifichi un fenomeno di rottura e di stabilirne il cinematismo di distacco: le dinamiche analizzate sono state successivamente oggetto di confronto tra i modelli in analisi.

L'analisi cinematica esamina quali modalità di rottura in un ammasso roccioso risultano ammissibili rispetto alla giacitura del pendio esistente partendo da informazioni di input quali: giacitura delle discontinuità, giacitura media del versante e angolo di attrito sulle pareti delle discontinuità.

I cinematismi possibili sono stati analizzati secondo il test di Markland (1972) e di Matheson capaci di individuare quelle discontinuità che potenzialmente possono portare a rotture planari, a cuneo o ribaltamenti (Charles, 1951): tutte le elaborazioni sono state eseguite tramite il codice di calcolo Dips 4.0 (Rocscience Inc.), per la gestione statistica e la rappresentazione delle discontinuità di ammassi rocciosi.

Blocchi potenzialmente instabili per scivolamento planare si formano nel caso in cui i giunti che li individuano abbiano una direzione che non differisca più di 20° da quella del pendio e immergano con angoli meno inclinati di quest'ultimo: tali condizioni si rendono necessarie poiché con differenze di direzione tra giunto e pendio maggiore di 20° si verificherebbe un aumento sostanziale della porzione di roccia intatta ad una estremità del blocco che avrebbe così sufficiente resistenza a rottura (Willie & Mah, 1974).

In rappresentazione stereografica è possibile proiettare i poli dei piani così definiti, in modo tale che essi ricadano in un area di potenziale instabilità, che prende il nome di Dalight envelope definito come il luogo dei poli i cui dip vector dei piani corrispondenti giacciono esattamente sul piano del pendio naturale (rocscience support) (Figura 77).

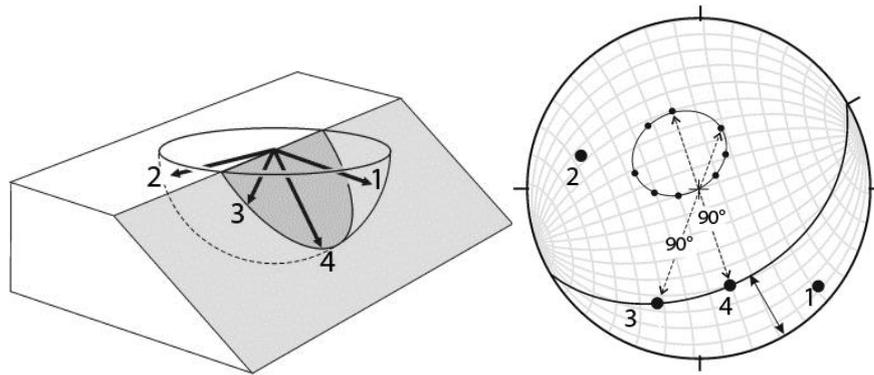


Figura 77. Direzioni di possibili discontinuità (1, 2 3 e 4) in relazione alla giacitura di un affioramento roccioso: la direzione 1 immerge fuori dal piano individuato e ricade nel Daylight envelope, la direzione 2 immerge nell'ammasso roccioso, quindi non rientra nel daylight envelope, mentre le direzioni 3 e 4 sono casi limite poiché le normali ai piani che essi individuano giacciono sul bordo del daylight envelope (Lisle, R. J. 2004).

Lo scivolamento a cuneo presenta le stesse caratteristiche cinematiche e costitutive di quello planare, con la differenza che essendo presenti contemporaneamente due superfici di scivolamento il daylight envelope risulta meno restrittivo: esso, in questo caso, è il luogo di tutti i poli rappresentanti le linee di intersezione la cui direzione di immersione giace sul piano del pendio naturale (Willie and Mah, 1974) (Figura 78 B).

Affinché si inneschino meccanismi di rottura per ribaltamento, la differenza di direzione di immersione dei piani rispetto al pendio deve essere inferiore ai 10° : in questo caso l'involuppo dei poli si trova diametralmente opposto a quello definito dai cinematicismi per scivolamento (Figura 78 B).

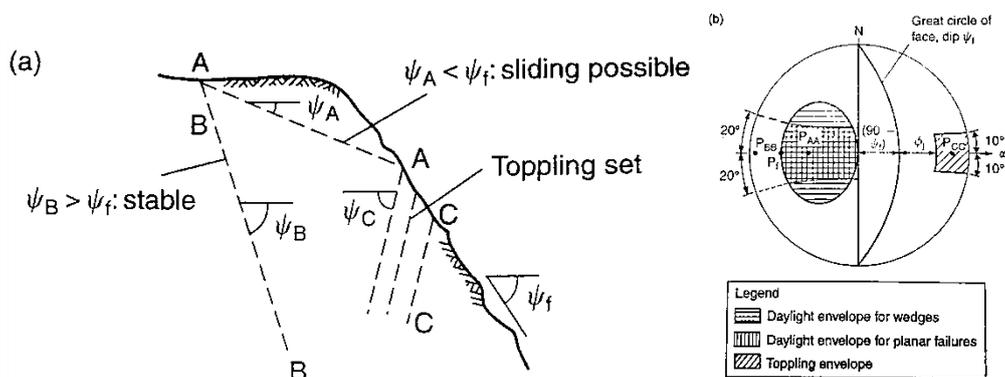


Figura 78. A) Assetto schematico delle possibili discontinuità su un versante. B) Daylight envelope dei tre modelli cinematici descritti (Willie & Mah, 1974).

Le aree critiche individuate dai daylight envelope non costituiscono l'effettiva zona di variabilità entro cui sono compromesse le condizioni di stabilità delle porzioni di ammasso individuate dai piani, in quanto contribuiscono alla stabilità di queste ultime anche i parametri di resistenza al taglio quali coesione e angolo di attrito. Tuttavia, al fine di fornire una stima di tali condizioni di stabilità sulla base dei dati stereografici acquisiti, è necessario assumere che la resistenza al taglio

sia dovuta unicamente alla componente attrittiva, trascurando il contributo della coesione (Willie & Mah, 1974). Se si considera un blocco a riposo su di un piano inclinato con angolo d'attrito ϕ , e unica forza agente quella di gravità, la condizione di equilibrio risulterà verificata se la componente normale della forza agente sarà compresa all'interno del cono di attrito dovuto all'angolo ϕ . Poiché il polo rappresentativo del piano è orientato parallelamente alla componente normale della forza agente, vi sarà una condizione di stabilità, tuttavia nel momento in cui la direzione del polo fuoriesce dal cono di attrito (ovvero aumenta la pendenza) la forza agente risulterà maggiore di quella resistente e vi sarà cinematiso (Figura 79 A). Analogamente al caso tridimensionale illustrato in figura è possibile definire sulla proiezione stereografica il cono di attrito, che agisce da elemento stabilizzante impedendo il cinematiso dei piani i cui poli ricadono nell'area da esso descritta (Figura 79 B).

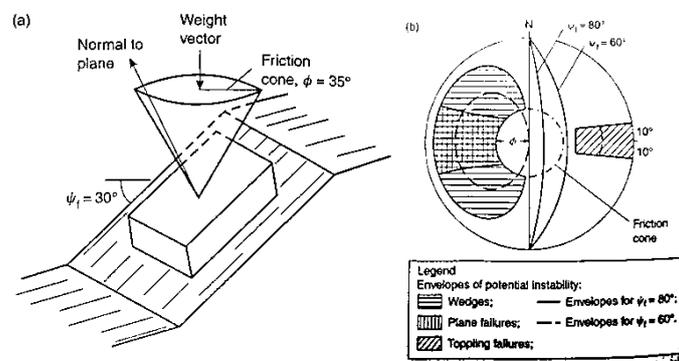


Figura 79. A) Cono di frizione in relazione ad un blocco a riposo su un piano inclinato ($\phi > \psi$). B) Proiezione stereografica del cono di frizione sovrapposto al Daylight envelope (Willie & Mah, 1974).

4.6.1 Scivolamento planare

Per rotture da scivolamento planare è stato effettuato il test di Matheson utilizzando una proiezione stereografica equi-angolare, sulla quale sono stati proiettati i poli relativi a ciascun set di discontinuità individuato e la ciclografica rappresentante la giacitura media del versante; l'area critica è rappresentata da un campo delimitato lateralmente da due linee radiali di $\pm 20^\circ$ rispetto all'immersione del versante e da due archi di cerchio: quello esterno rappresenta il daylight envelope, mentre quello interno rappresenta il cono d'attrito dell'ammasso roccioso. Quest'ultimo è stato parametrizzato mediante la scelta di un angolo di attrito ϕ pari a 30° derivante dai dati bibliografici relativi al rilievo geomeccanico eseguito nel 2003 (ENSER 2004, inedito). Si noti come il cono di attrito sia ubicato al centro della proiezione poiché misurato a partire dal centro dello stereonet.

Di seguito, in Figura 80 sono illustrati i risultati ottenuti al variare dei dati di input:

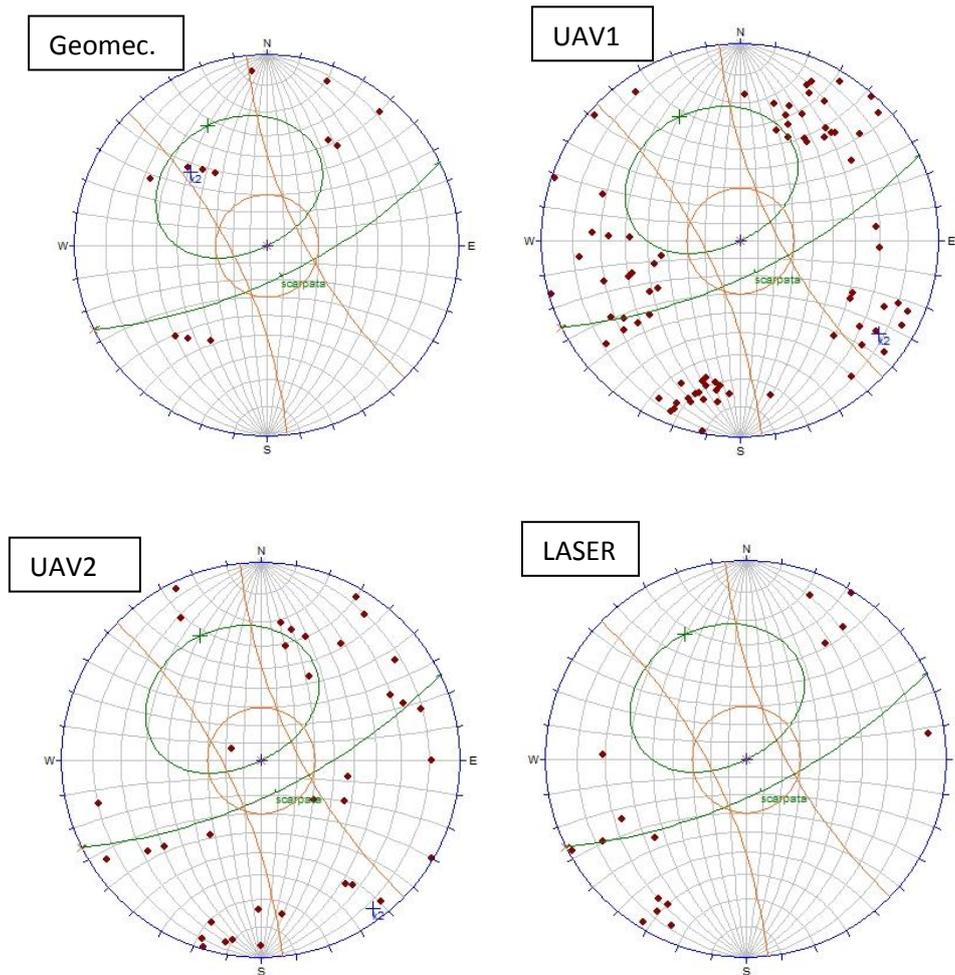


Figura 80. Diagrammi stereografici delle analisi cinematiche per scivolamento planare, in blu è rappresentato, ove presente, il polo medio della famiglia K2.

Dai risultati di questo test si può notare come, sebbene in tutti i modelli (tranne in quello LASER) sia individuata la famiglia K2, questa genera potenziali scivolamenti planari esclusivamente nel modello geomeccanico classico, in cui i poli del set denominato K2 giacciono perfettamente nell'area critica per scivolamento (Figura 80 Geomec.). Questo risultato può essere in parte dovuto all'effetto di inversione di polarità che mostrano i set di misure nei diversi modelli: infatti essendo le giaciture dei piani tutte ad alto angolo non è improbabile che a causa di locali morfologie ondulate, tipiche dell'affioramento in analisi, una stessa giacitura possa trovarsi ad un estremo piuttosto che all'altro dello stereonet.

4.6.2 Scivolamento di cunei

È stato effettuato il test di Markland utilizzando una proiezione di tipo equi-angolare: oltre alla ciclografica rappresentativa del pendio sono stati proiettati anche i poli e i rispettivi piani dei valori medi di ogni set di discontinuità identificato. Successivamente alla creazione del daylight envelope è stato creato il cono di attrito utilizzando un ϕ riferito ai dati geomeccanici di

bibliografia ($\phi = 30^\circ$), per questo genere di test il cono di attrito viene disegnato a partire dal perimetro dello stereonet. In Figura 81 sono illustrati i risultati.

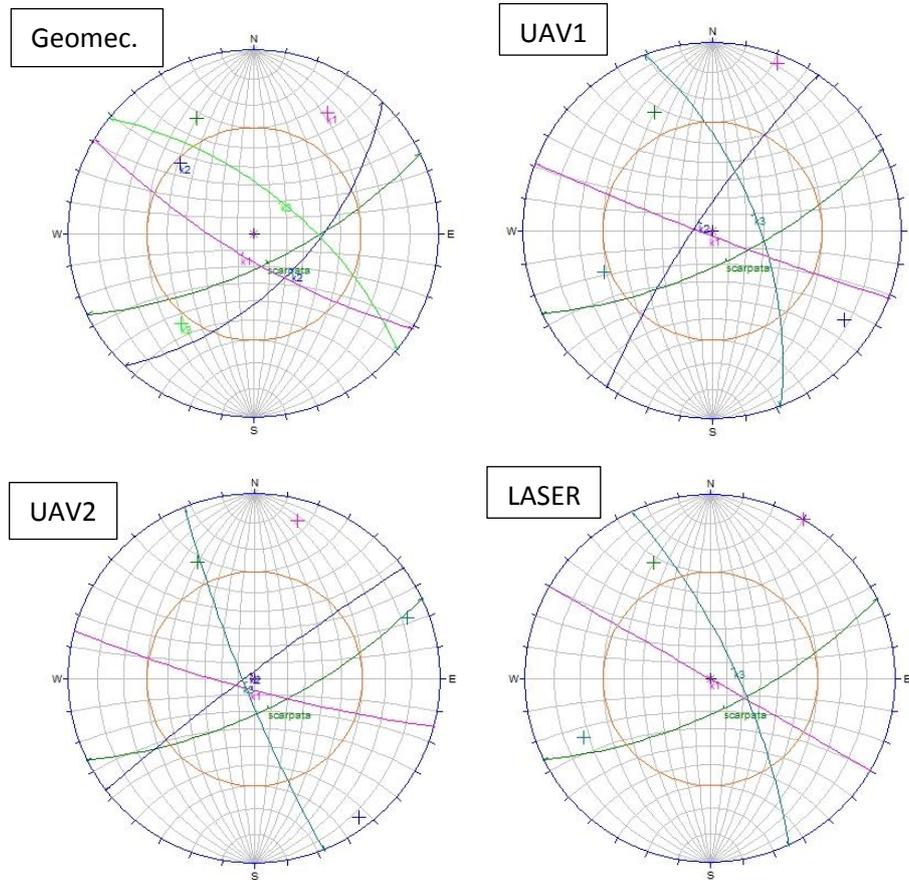


Figura 81. Diagrammi stereografici delle analisi cinematiche per scivolamento a cuneo.

Vengono ritenuti accettabili come meccanismi di scivolamento a cuneo quelli individuati dall'intersezione di due famiglie di discontinuità che ricadono nell'area compresa tra il piano rappresentativo del pendio e la traccia del cono d'attrito. Si può notare che, eccetto il dataset UAV2, gli altri modelli geomeccanici individuano almeno un meccanismo di crollo: i modelli LASER e UAV1 individuano l'intersezione tra i piani rappresentativi delle famiglie K1 e K3, mentre il modello geomeccanico classico individua due meccanismi di scivolamento relativi rispettivamente alle intersezioni tra i piani K1 e K2, e K2 e K3. Il modello UAV2 pur individuando tutte le famiglie di discontinuità, a causa dell'eccessiva dispersione dei dati che ha determinato l'inversione di polarità dei valori medi delle singole famiglie non genera alcun meccanismo di instabilità.

4.6.3 Ribaltamento

Il test di Matheson è stato utilizzato anche per verificare potenziali fenomeni di instabilità legati al ribaltamento di blocchi di roccia isolati da discontinuità ad andamento subverticale, aventi direzione parallela al tratto di pendio considerato; il fenomeno è consentito dalla presenza di una

scarpata ad elevata acclività. L'area critica in questo caso è delimitata lateralmente da due linee radiali di $\pm 10^\circ$ rispetto all'immersione del versante e da due archi di cerchio di cui quello interno è rappresentato da un piano avente direzione coincidente con quella del pendio, e inclinazione data dalla differenza tra inclinazione del pendio e angolo di attrito, mentre il cerchio esterno coincide con il perimetro della proiezione stereografica. L'area critica è posizionata nello stesso settore d'immersione del pendio (Figura 82).

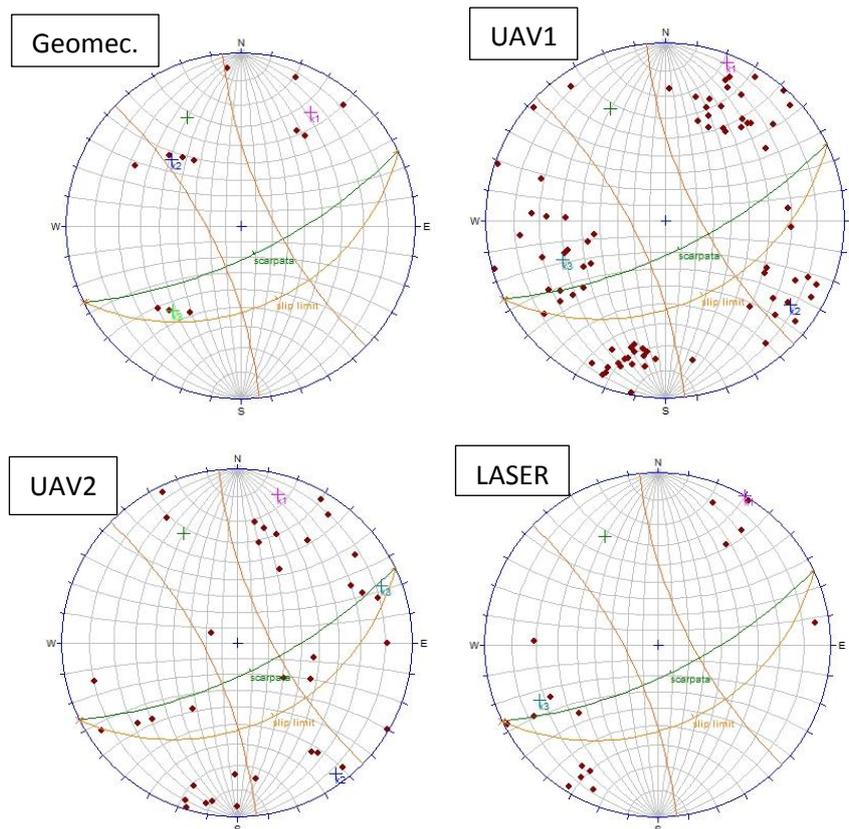


Figura 82. Diagrammi stereografici delle analisi cinematiche per ribaltamento

Si può notare come diano risultati positivi al test solo i modelli UAV nei quali è stata individuata la famiglia K2; sebbene essa venga individuata anche nel modello geomeccanico classico, a causa della inversione di polarità, i piani ivi descritti non generano instabilità per ribaltamento ma per scivolamento planare (cosa che invece non è contemplata dai modelli UAV).

Una considerazione generale che si rende necessaria al fine di comprendere l'effettiva valenza di questo genere di analisi, riguarda la natura e le modalità di rilievo che hanno portato ad avere risultati in parte differenti: infatti mentre il rilievo geomeccanico soggettivo ha lo scopo di mettere in evidenza le criticità presenti in affioramento, trascurando quelle giaciture che invece pur essendo presenti non rivestono una importanza fondamentale ai fini della stabilità globale del versante, il rilievo digitale effettuato sui dataset in analisi presenta connotati più sistematici e

statistici, in cui tutte le discontinuità individuabili hanno lo stesso peso, e quindi vengono riportate come tali.

4.7 Modellazione numerica dei fenomeni di crollo

4.7.1 Teoria dei crolli

Viene definito crollo un distacco di suolo o roccia da un versante ripido che inizia con uno scorrimento di taglio e che discende principalmente in aria con moto di caduta libera in seguito a rimbalzo e rotolamento (Cruden e Varnes, 1996). Un'altra definizione deriva da Erisman e Abele, 2001 in cui gli autori hanno cercato di definire i limiti fisici entro i quali si parla di crollo o meno focalizzando il discriminante sull'accelerazione della massa in movimento: se tale accelerazione è confrontabile con quella di un corpo in caduta libera il movimento è classificabile come crollo se invece tale accelerazione risulta essere considerevolmente inferiore il fenomeno di instabilità è classificato come scorrimento. È stato scelto come soglia discriminante il valore del rapporto tra l'accelerazione del corpo in esame (a) e l'accelerazione di un grave in caduta libera (g): quando questo rapporto assume valori inferiori a 0,6 (traducibili in pendenze inferiori a circa 60°) il moto è dominato da dinamiche di scorrimento, mentre lì dove vi siano pendenze superiori a tale soglia le dinamiche dei fenomeni possono essere classificate come crollo poiché non vi è più una componente attrittiva che influenza il moto dei corpi in caduta (Figura 83). Un crollo di roccia si manifesta con un improvviso distacco di volumi rocciosi, variabili nei casi più comuni da 1 a 100.000 metri cubi, che abbandonano la sede originaria ed iniziano un movimento di discesa lungo il versante, dando origine al moto contemporaneo di n elementi litoidi caratterizzati da forma massa e velocità individuali, che durante il verificarsi dell'evento sono soggetti a variazioni reciproche.

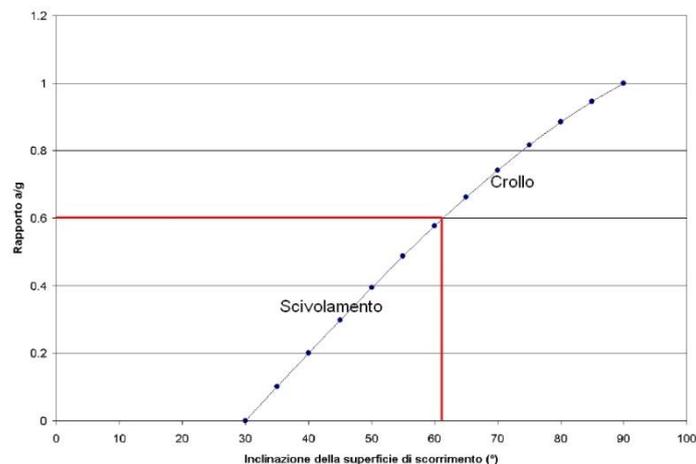


Figura 83. Diagramma indicante la soglia oltre la quale il moto di caduta passa da scivolamento a crollo vero e proprio.

Un crollo può avvenire nel momento in cui le resistenze dei ponti di roccia sono inferiori alle forze su di essi applicate, e cioè quando si ha l'annullamento della coesione lungo i piani che fungono da ponti di roccia dell'ammasso (Figura 84). Le superfici di rottura derivano dall'orientazione reciproca dei vari sistemi di discontinuità primaria e secondaria: in sezione un tipico evento di crollo è riconoscibile grazie alla presenza di una superficie principale di distacco posteriore variamente inclinata che può dare luogo a una serie di cinematismi variabili in funzione dell'assetto delle suddette superfici di distacco.

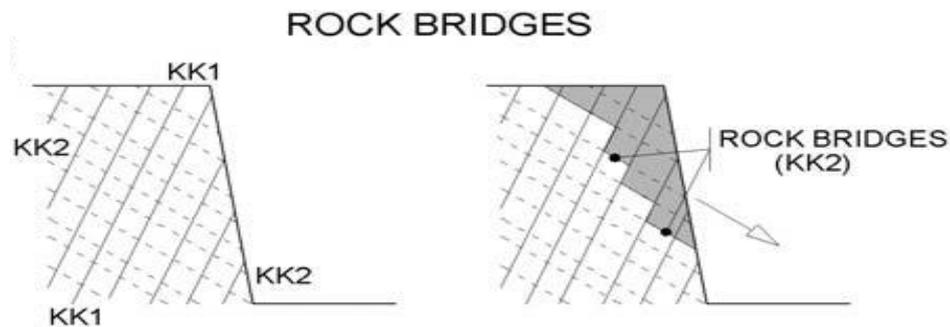


Figura 84. Influenza delle famiglie di giunti (KK1, KK2 e KK3) sulle superfici di rottura e sulla posizione dei ponti di roccia nel caso di un versante potenzialmente instabile (Paronuzzi P., Serafini W. 2005).

Il distacco dei blocchi da un versante è fortemente influenzato dalle condizioni strutturali dell'ammasso (famiglie di discontinuità, persistenza, spaziatura), dalla geometria (giacitura e orientazione delle discontinuità rispetto al versante), dalle caratteristiche meccaniche (resistenza a taglio delle discontinuità, riempimento, resistenza a trazione di eventuali ponti di roccia) e da eventuali sollecitazioni esterne (presenza di acqua in pressione nelle discontinuità, sismi, ecc.) (Broili, 1974).

Altri fattori scatenanti non meno importanti sono quelli climatici legati ai cicli di gelo disgelo, all'alterazione chimico-fisica e meccanica prodotta dagli apparati radicali delle piante e all'azione di scalzamento al piede ad opera di corsi d'acqua.

È possibile distinguere per questo tipo di fenomeni tre aree, variabilmente sovrapponibili, in cui sono attivi processi differenti:

- zona sorgente, in cui avviene il distacco vero e proprio dei blocchi, è solitamente caratterizzata da pendenze non inferiori ai 70°, ad estensione variabile in base alla natura del fenomeno che si distingue in crollo in massa e crollo puntuale: nel primo caso la morfologia della zona sorgente apparirà cuneiforme con espansione verso il basso mentre nel caso di crolli puntuali le morfologie tipiche risultano essere quelle planari o irregolari.
- zona di trasporto in cui i blocchi si muovono con diversi stili di moto quali rotolamento, rimbalzo, caduta libera, o scivolamento, fino all'arresto. Non è raro che lungo questa zona si possano definire ulteriori zone di innesco e alimentazione del fenomeno dovuto agli

impatti multipli tra blocchi e bedrock; spesso tali zone sono distinguibili per l'elevato grado di denudazione del pendio dovuta al periodico verificarsi di questo genere di eventi che produce quindi un vero e proprio corridoio di transito.

- zona di arresto e deposito, in cui si ha la messa in posto del materiale in erosione, caratterizzata da pendenze inferiori e distanze di arresto che sono funzione della topografia, degli ostacoli e della natura del materiale affiorante, non è rara la presenza di un vero e proprio conoide di accumulo.

A seconda dei volumi coinvolti Whalley (1984) ha proposto una classificazione dei fenomeni:

Whalley (1984)		
Volume (m ³)	Nome	Descrizione
<10	debris fall	insieme di piccoli blocchi
10-100	boulder fall	pochi grandi blocchi
100-10 ⁴	blockfall	un unico grande blocco che si può fratturare durante il moto
10 ⁴ -10 ⁶	cliff fall	insieme di blocchi grandi e piccoli
>10 ⁶	Bergsturz	fenomeno catastrofico tipo crollo-colata in roccia

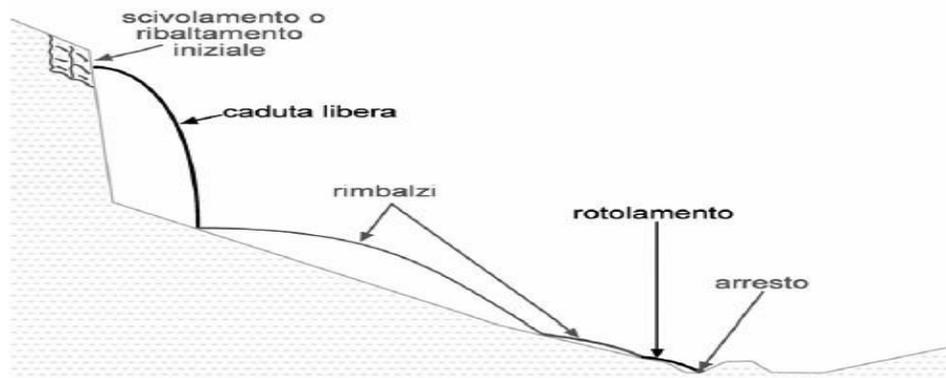


Figura 85. Possibili moti di propagazione di un blocco soggetto a crollo (Del Maschio et al. 2007).

Per quanto riguarda la dinamica del moto complessiva che un blocco descrive durante un evento di caduta, essa è il risultato della combinazione di quattro modalità di propagazione legate essenzialmente alla morfologia del versante che risultano spesso combinate fra loro e funzione della pendenza del versante stesso (Figura 85):

- Scivolamento, è limitato alle fasi iniziali di un crollo e controlla la velocità iniziale dei blocchi, (parametrizzata mediante la formulazione di Giani, 1992). In questo moto vi è una elevata componente attrittiva che limita la velocità di uscita dei blocchi e ha luogo su corte distanze variabili da alcuni decimetri a qualche metro.
- Rotolamento, con pendenze inferiori ai 45° (Figura 86 A) il blocco è quasi sempre a contatto con la superficie topografica e si muove per mezzo di piccoli rimbalzi sugli spigoli. Questo moto è di fatto il più conservativo dal punto di vista energetico in quanto i blocchi

disperdono pochissima energia cinetica durante il moto in modo tale da raggiungere aree anche molto lontane dalla zona di distacco (Erismann, 1986).

- Rimbалzo (Figura 86 A), con tale moto i blocchi impattano il piano campagna dissipando circa il 75% di energia durante il primo impatto, il che può comportare anche la fratturazione della roccia in funzione della sua resistenza (Broili, 1974), ciò si ripercuote sulle componenti normale e tangenziale della velocità dei blocchi che subiscono una riduzione commisurata alla dissipazione di energia. L'impatto al suolo è il momento più critico dell'evento in quanto vengono introdotti nel sistema una serie di fattori difficilmente prevedibili che hanno come risultato ultimo il possibile cambiamento di traiettoria dei blocchi.
- Caduta libera, moto governato essenzialmente dalla gravità si manifesta con pendenze superiori ai 76° (Figura 86 A), risulta dalla composizione di due differenti movimenti quali rotazione e traslazione ed è la componente di moto più frequente di questo fenomeno. I blocchi descrivono traiettorie paraboliche in cui l'energia potenziale è direttamente trasformata in energia cinetica, assumendo che non vi siano interazioni tra i diversi blocchi. Il moto di caduta libera termina con la dissipazione dell'energia cinetica al suolo per deformazione dello stesso e fratturazione del blocco in caduta, l'impatto induce importanti fenomeni di scoppio e di disgregazione dei volumi rocciosi che provocano da un lato la generale riduzione degli elementi in frana, e dall'altro la proiezione di schegge a notevoli distanze.

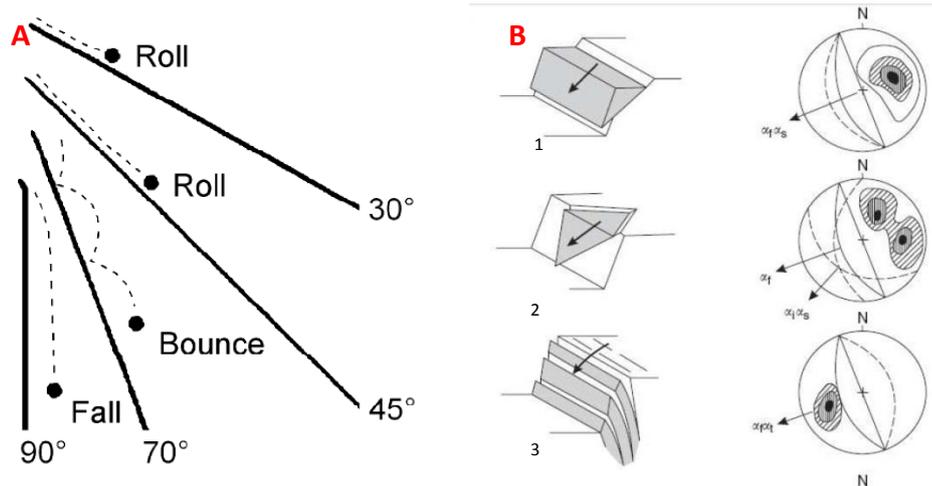


Figura 86. A) Tipologie di moto dei blocchi durante la discesa lungo un pendio in funzione della pendenza dello stesso. B) Meccanismi di rottura delle pareti rocciose (Willie & Mah, 2005).

L'innesco di un crollo in roccia avviene mediante scorrimento lungo quelle superfici coincidenti completamente o in parte con le discontinuità strutturali preesistenti. Sebbene questo tipo di cinematismo possa dirsi limitato alla sola componente iniziale del moto, se ne distinguono almeno tre tipologie (Figura 86 B):

- Scivolamento planare (Figura 86 B - 1), in cui il movimento avviene per scivolamento senza rotazione su un'unica superficie di discontinuità planare immergente a franapoggio meno inclinata del pendio e orientata parallelamente al versante (Hoek & Bray, 1981). Condizione necessaria affinché si verifichi il movimento è il superamento dell'angolo di attrito della superficie planare di scorrimento su cui i blocchi si muovono, inoltre sistemi secondari di discontinuità possono influire sulla estensione laterale del volume in movimento agendo da elementi di svincolo.
- Scivolamento a cuneo (Figura 86 B - 2), caratterizzato da una superficie di scivolamento formata dall'intersezione di due piani di discontinuità, la cui linea di intersezione presenta una immersione a franapoggio
- Ribaltamento (Figura 86 B - 3), è caratterizzato da un moto principalmente rotazionale, favorito da sistemi di discontinuità principali ad alto angolo e ridotta spaziatura, tendenzialmente orientati parallelamente al versante (Goodman & Bray 1976). La rotazione avviene lungo piani di discontinuità basali preesistenti o di neoformazione ben definiti, mentre una residua componente traslativa si esplica tra blocchi adiacenti nel momento del distacco. Questo tipo di movimento può essere caratterizzato da una prima fase di lenta e progressiva evoluzione verso il parossismo che è invece rapido e improvviso.

Il fenomeno dei crolli in roccia pur essendo un problema fisico relativamente semplice e conosciuto, risulta essere difficilmente prevedibile in termini assoluti: le traiettorie dei singoli blocchi sono infatti determinate da una serie di grandezze variabili lateralmente con continuità come la topografia, il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, l'ubicazione dell'area di distacco, le proprietà meccaniche dell'ammasso, e da una serie di grandezze che per loro natura risultano indeterminabili in maniera esatta come ad esempio la presenza di micro-asperità sulla superficie di impatto la forma e dimensioni del blocco che a loro volta influenzano in maniera determinante i parametri relativi all'energia dissipata durante il moto. Per sopperire a tale indeterminazione viene scelto un approccio statistico allo studio di tali fenomeni, la cui modellazione si basa sull'analisi dei moti balistici precedentemente descritti, in base alla risposta (restituzione energetica) delle superfici impattate.

4.7.2 Modellazione numerica dei fenomeni di crollo

I metodi di analisi più diffusi per prevedere il moto di caduta di un blocco si basano principalmente su modelli di tipo empirico e cinematico. I modelli empirici considerano la dissipazione di energia proporzionale alla lunghezza del percorso. Tali modelli, detti anche “zenitali”, delimitano, secondo specifici angoli di attrito equivalente verticali ed orizzontali, l’area entro la quale si dovrebbe arrestare la totalità dei blocchi. Questi metodi, basati sull’analisi di crolli storici, risultano di facile applicabilità e sono indicati per una prima stima del massimo avanzamento dei massi in funzione della topografia del versante (Piacentini, 2005).

I modelli cinematici sono invece fisicamente basati e analizzano il fenomeno mediante le sue equazioni del moto secondo criteri probabilistici atti a minimizzare i fattori di variabilità che intrinsecamente caratterizzano un versante roccioso. Tali equazioni (specificamente adatte a descrivere ciascuno stile di moto precedentemente illustrato) mettono in relazione i parametri di input, oggetto di ricerca preliminare durante la creazione di un modello, con i risultati di output di interesse quali distanze raggiunte, traiettorie dei blocchi, energia cinetica, velocità, altezza dei rimbalzi.

I fattori che più di tutti giocano un ruolo fondamentale in questo tipo di analisi risultano essere quelli che esprimono la risposta all’impatto da parte di un blocco sul versante, definiti coefficienti di restituzione: tali parametri descrivono quantitativamente la dissipazione di energia cinetica posseduta dai blocchi che impattano un versante. Si distinguono due coefficienti di restituzione, normale e tangenziale che influiscono rispettivamente sulla componente normale e tangenziale della velocità del blocco successivamente all’urto (Figura 87):

$$R_n = V_{bn} / V_{an}$$

$$R_t = V_{bt} / V_{at}$$

R_n = Coefficiente di restituzione normale

R_t = Coefficiente di restituzione tangenziale

V_{an} = Componente normale della velocità prima dell’urto (V_a)

V_{bn} = Componente normale della velocità dopo l’urto (V_b)

V_{at} = Componente tangenziale della velocità prima dell’urto (V_a)

V_{bt} = Componente tangenziale della velocità dopo l’urto (V_b)

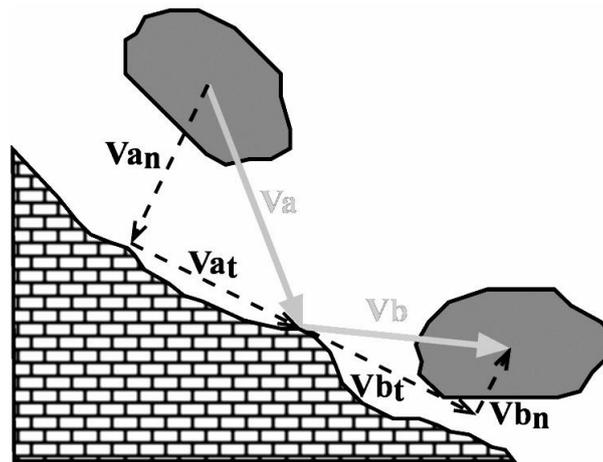


Figura 87. Rapporto tra le velocità prima e dopo l'urto (Del Maschio et al. 2007).

Mentre i coefficienti di restituzione descrivono il moto del corpo prima e dopo l'urto, il parametro che ne descrive il moto, e la relativa dissipazione di energia cinetica durante le fasi di rotolamento e scivolamento è definito appunto coefficiente di roto-scivolamento ed espresso sotto forma di angolo di attrito.

4.7.3 Strumenti per la modellazione

Lo studio delle meccaniche evolutive relative alla propagazione dei fenomeni di crollo è stato svolto mediante modellazione numerica sia bidimensionale che tridimensionale: a tal fine è stato utilizzato un approccio previsionale di tipo statistico, mediante l'integrazione dei due codici di calcolo Rotomap (Scioldo, 1991) e Rocfall (Rocscience inc, Canada). I dati di input forniti dai diversi sistemi di rilevamento si presentano estremamente variegati nelle loro estensioni e formati, perciò è stato necessario uniformarli e renderli omogenei prima di procedere alla fase di modellazione vera e propria. A tale scopo sono stati prodotti 3 DEM di risoluzione 1m: tale scelta è stata operata in funzione delle capacità di calcolo dei codici di modellazione, in modo da non rendere le analisi estremamente onerose dal punto di vista computazionale e introdurre elementi di incertezza legati alla eccessiva variabilità del dato spaziale: infatti lo scopo dei processi di modellazione rimane comunque quello di semplificare, seppur con criteri ben precisi, quello che può essere un fenomeno fisico reale.

4.7.4 Rocfall (analisi dei crolli in 2D)

Questo software commerciale utilizza un approccio statistico bidimensionale all'analisi dei fenomeni di caduta massi analizzando il fenomeno sia dal punto di vista geometrico, determinando le traiettorie dei singoli blocchi, sia dal punto di vista cinematico, calcolandone l'energia cinetica, al fine di una corretta modellazione delle infrastrutture di protezione.

Il motore di calcolo è definito di tipo Lumped Mass, ed è basato sui seguenti assunti teorici:

- Ogni blocco è modellato come una particella circolare infinitesima, di massa nota.
- La massa rimane costante durante la simulazione, quindi non è modellata la rottura.
- La massa non è utilizzata al fine di calcolare la traiettoria delle particelle, ma solo nel calcolo dell'energia cinetica.
- non vi sono interazioni tra le particelle durante il moto, quindi ogni particella si comporta come se fosse l'unica attiva durante la simulazione.
- Nella modellazione non è tenuta in considerazione la resistenza di attrito dell'aria.
- Il pendio è modellato come un gruppo continuo di segmenti rettilinei.

Il calcolo delle traiettorie è effettuato classificando il moto dei blocchi lungo il versante in differenti fasi a cui corrispondono specifici algoritmi di modellazione:

- Particle algorithm, grazie al quale è possibile definire i parametri con cui verranno caratterizzati i blocchi e le condizioni iniziali del modello.
- Projectile algorithm, con cui viene calcolato il percorso dei blocchi quando svolgono un moto parabolico in aria, rimbalzando sul terreno. Questo algoritmo in pratica trova l'intersezione tra la parabola, descritta dal blocco, e il segmento che rappresenta il pendio. Ad ogni intersezione del moto parabolico con il terreno, il processo ricomincia finché la particella non raggiunge una soglia minima di velocità tale da considerarsi ferma.
- Sliding algorithm, che descrive il comportamento del blocco una volta che esso incontra la superficie e scorre su di essa, tale parte del moto è funzione di due angoli, l'angolo di attrito del materiale di cui è composto il pendio (ϕ) e l'inclinazione dello stesso (θ): se $\theta = \phi$ la velocità di uscita sarà la stessa di quella in ingresso, se $\theta > \phi$ la velocità di uscita sarà maggiore di quella in entrata, se $\theta < \phi$ la velocità di uscita sarà minore di quella in entrata.

La simulazione termina quando la particella raggiunge una velocità limite, definita dall'utente, oltre la quale essa viene considerata ferma.

I valori di input necessari a definire il modello possono essere caratterizzati da un range di variabilità definito da un valore medio e una deviazione standard, e campionati per gli effettivi calcoli di modellazione, secondo il criterio statistico Montecarlo. È inoltre possibile simulare la presenza di micro-asperità sul profilo facendo variare entro un range stabilito il valore di pendenza.

Parametri di input:

- Geometria del pendio
- Coefficienti di restituzione normale e tangenziale R_n ed R_t espressi dalle seguenti relazioni
 $R_n = V_{n1}/V_{n2}$ $R_t = V_{t1}/V_{t2}$
 V_{n1} = velocità normale prima dell'impatto V_{t1} = velocità tangenziale prima dell'impatto
 V_{n2} = velocità normale dopo l'impatto V_{t2} = velocità tangenziale dopo l'impatto
- Angolo di attrito (θ)
- Massa del blocco M
- Velocità iniziale $V_0 = \sqrt{2gL(\sin\alpha - \tan\theta\cos\alpha)}$ (Giani 1992)
 L =Lunghezza del tratto di scivolamento del blocco
 α = inclinazione del pendio di scivolamento
 θ = Angolo di attrito
 g = Accelerazione di gravità
- Geometria della zona di distacco, assimilabile a un singolo punto (point seeder) oppure a una fascia di caduta (seeder line) entro la quale casualmente vengono generati i punti di rilascio dei blocchi.

I dati di output consistono in una serie di parametri che caratterizzano il moto dei singoli blocchi campionati lungo la traiettoria in maniera discreta, con frequenza variabile a seconda delle esigenze di risoluzione dell'utente: la presentazione di questi avviene sotto forma di distribuzioni di frequenza, o mediante l'interrogazione puntuale sul modello con appositi data collector che possono essere inseriti in qualsiasi sezione del modello.

I parametri di output forniti riguardano informazioni relative alla distribuzione dei punti di arrivo dei blocchi, altezza dei rimbalzi, energia cinetica, e velocità, e possono essere esposti in funzione della distanza o in funzione della frequenza.

4.7.5 Coefficienti di restituzione

Al fine di definire i parametri di input, è stata effettuata una ricerca bibliografica, che ha trovato riscontro per i coefficienti relativi alla porzione basale della parete rocciosa descrivibile come

coltre di detrito. Tali risultati appartengono alla calibrazione in back analysis svolta dall'Università di Firenze nell'ambito dell' "Incarico per ex art. 17 legge n. 109/94 per attività di supporto tecnico al R.U.P. per "Rilievi geologici e geologico-tecnici nell'area delle Gole di Scascoli (Comune di Loiano e Monzuno, Bologna)" relativa al crollo, di entità relativamente meno importante (circa 25 m³), avvenuto nell'Agosto del 2003 nell'area denominata Torretta in cui il distacco si è manifestato da un'altezza di circa 60 metri e ha prodotto un deposito ai piedi del versante. Stando a tale documento: "La traiettoria e il punto di arresto della porzione di ammasso roccioso crollata sono verificati per i seguenti parametri: Rn=0.2; Rt=0.5; Phi=30°; v0=1 m/s" (relazione finale UNIFI - Rapporto finale Università degli studi di Firenze - Incarico per ex art. 17 legge n. 109/94 per attività di supporto tecnico al R.U.P. per "Rilievi geologici e geologico-tecnici nell'area delle Gole di Scascoli Comune di Loiano e Monzuno, Bologna). Per quanto riguarda i parametri da assegnare alle pareti in roccia della Formazione di Pantano, affioranti lungo le gole, si è fatto riferimento ai dati di bibliografia forniti dallo sviluppatore del software (Rocscience inc, Canada). In Tabella 10 riportata di seguito sono espressi i coefficienti di restituzione utilizzati:

	Rn	Dev. standard	Rt	Dev. Standard	Angolo di attrito (°)	Dev. standard
clean hard bedrock	0.53	0.04	0.99	0.04	30°	2°
coltre di detrito vegetato	0.2	0	0.5	0.04	30°	2°
torrente	0.01	0	0.01	0	90°	0°
asfalto	0.4	0.04	0.9	0.4	30°	2°

Tabella 10. Coefficienti di restituzione.

4.7.6 Calibrazione e analisi

I profili utilizzati sono stati estratti direttamente dalle rispettive nuvole di punti (Figura 88) e ricampionati manualmente con passo variabile al fine di garantire la massima aderenza al profilo reale e contemporaneamente snellire le fasi di calcolo che, iterate per un gran numero di lanci e di sezioni avrebbero aumentato esponenzialmente i tempi di calcolo.

Sono stati eseguiti per tutti i profili 1000 lanci dalla porzione sommitale della parete rocciosa (per una estensione totale della linea di lancio sulla sezione in oggetto costante di circa 5 m) poiché la parte più alta del modello è quella che genera la massima energia potenziale.

Al fine di rendere più aderente alla realtà la superficie topografica modellata è stato fatto variare il coefficiente di rugosità dei singoli segmenti rappresentativi del pendio.

Data la morfologia particolarmente aggettante della maggior parte delle zone di distacco, la velocità iniziale, calcolata secondo Giani (1992), è stata mantenuta tendenzialmente bassa ipotizzando che i blocchi al momento del distacco non percorrano mai più di 1 metro di scivolamento su piani ad inclinazione non superiore ai 40°: quindi essendo

$$V_0 = \sqrt{2gL(\sin\alpha - \tan\theta\cos\alpha)}$$

$$0 < L < 1, \alpha < 40^\circ, \theta = 30^\circ$$

Il parametro di velocità iniziale risulta compreso tra 0 e 2 m/s: è stata quindi impostata costante la velocità iniziale più elevata al fine di ottenere una soluzione più cautelativa.

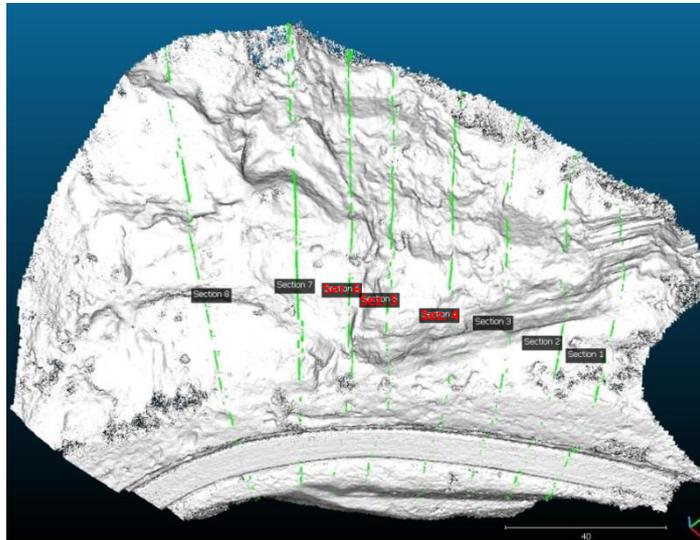


Figura 88. Panoramica generale delle sezioni indagate per l'analisi di caduta massi 2D in cui è evidenziato in rosso l'intervallo entro cui la modellazione numerica riporta la presenza di blocchi sulla sede stradale.

Dalla modellazione è emerso che si delineano profili critici, (ovvero quelli in cui sono presenti blocchi sulla sede stradale o nelle zone ad essa limitrofe), in tutti e tre i modelli: questi individuano una zona particolarmente esposta alle dinamiche di versante che si estende dalla sez. 4 alla sez. 6 (Figura 88) coincidente, non a caso, con la porzione più aggettante e ravvicinata alla sede stradale di tutto l'ammasso in oggetto.

Al fine di indagare con maggiore accuratezza tale porzione particolarmente critica, sono state tracciate tre ulteriori sezioni trasversali e oblique rispetto alla direzione di massima pendenza, con l'intento di simulare una certa variazione direzionale delle traiettorie. I risultati della successiva fase di modellazione numerica sono stati confrontati rispetto ai seguenti parametri: punti di arresto (endpoint), altezza, energia cinetica.

4.7.7 Endpoint

Sono state sovrapposte su grafici a dispersione le frequenze dei punti di arrivo dei blocchi per ciascuna delle sezioni critiche tracciate: la popolazione di dati analizzata risulta essere composta da 1000 valori per ogni simulazione. La parametrizzazione del pendio è stata resa possibile dalla sovrapposizione diretta delle tracce delle sezioni e l'ortofoto (Figura 89 A).

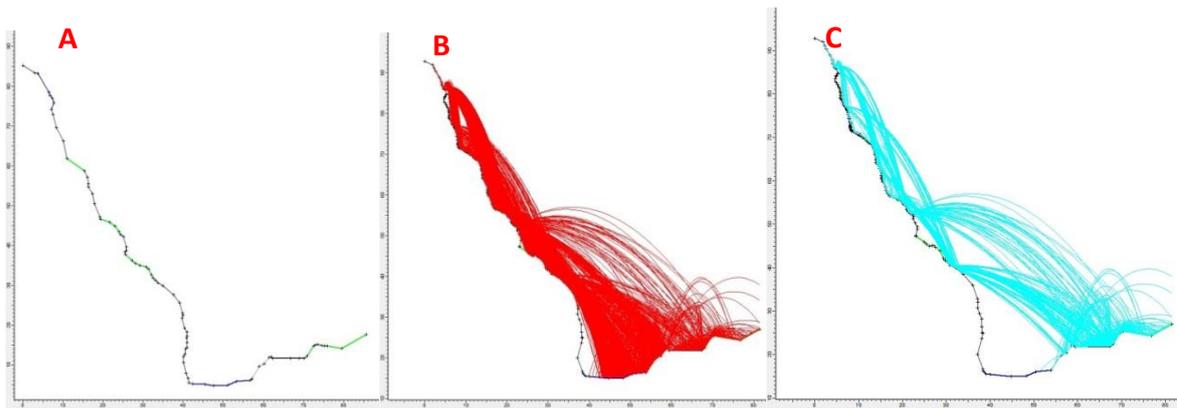


Figura 89. A) Sez. 5 (dataset UAV2) parametrizzata secondo i dati di bibliografia rinvenuti. B) Esito totale della modellazione in cui sono mostrate tutte le traiettorie dei blocchi. C) Traiettorie critiche per le quali i blocchi raggiungono la sede stradale, queste si concentrano in due gruppi accomunati da rimbalzi su porzioni di versante inclinato a circa 40°.

Si può notare come le traiettorie critiche si verificano a causa di impatti lungo porzioni di versante nettamente localizzate e inclinate a circa 40° (Figura 89 C), tale orientazione risulta particolarmente favorevole per quanto riguarda la restituzione energetica orizzontale dei blocchi, che quindi a parità di coefficiente di restituzione massimizzeranno il loro spostamento longitudinale, rendendo particolarmente sfavorevoli le condizioni di sicurezza per il tratto stradale.

Confrontando i dati relativi alla distribuzione spaziale dei blocchi lungo i profili dei tre modelli nella zona compresa tra le sezioni 4 e 6, si può notare come questi siano in larga parte sovrapponibili (Figura 90):

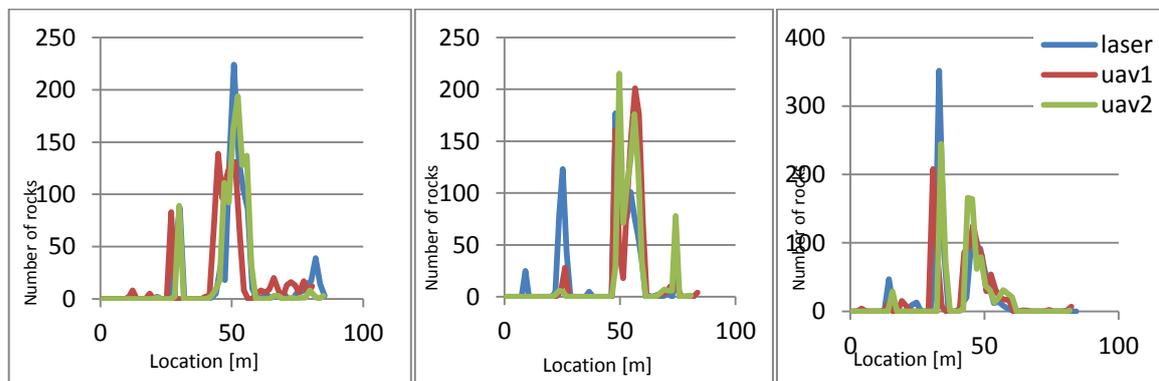


Figura 90. Distribuzione di frequenza degli endpoints relativi alle simulazioni effettuate sulle sezioni tracciate nell'intervallo critico compreso tra sez. 4 e sez. 6.

4.7.8 Energia

Al fine di valutare le proprietà energetiche dei blocchi coinvolti nella modellazione è stato necessario determinare la massa dei blocchi. Considerazioni di questo tipo sono state rese possibili grazie alle informazioni raccolte sia da bibliografia (ENSER 2003, inedito) riguardanti il peso di volume delle formazioni interessate dal crollo, sia dai dati di campagna per quanto

riguarda il volume roccioso unitario: per questo parametro si è scelto di basare l'analisi sulle evidenze morfologiche emerse in seguito alla fase di rilevamento dei blocchi lungo la scarpata accessibile.

4.7.8.1 *Volume roccioso unitario e massa dei blocchi*

Il volume roccioso unitario è definito come il volume lapideo di minime dimensioni macroscopicamente integro delimitato da superfici di discontinuità naturali primarie o secondarie, quali rispettivamente giunti di strato o di fratturazione. Questo parametro è indissolubilmente legato allo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso e di conseguenza al grado di spaziatura dei suoi sistemi di discontinuità: per spaziatura si intende la distanza misurata lungo una data direzione tra due giunti successivi appartenenti alla stessa famiglia. A seconda della spaziatura e dell'orientazione delle varie famiglie di discontinuità possono svilupparsi pattern differenti di fratturazione (Figura 91) e di conseguenza differenti forme e volumi dei blocchi da essi derivati (Palmstron, 2005).

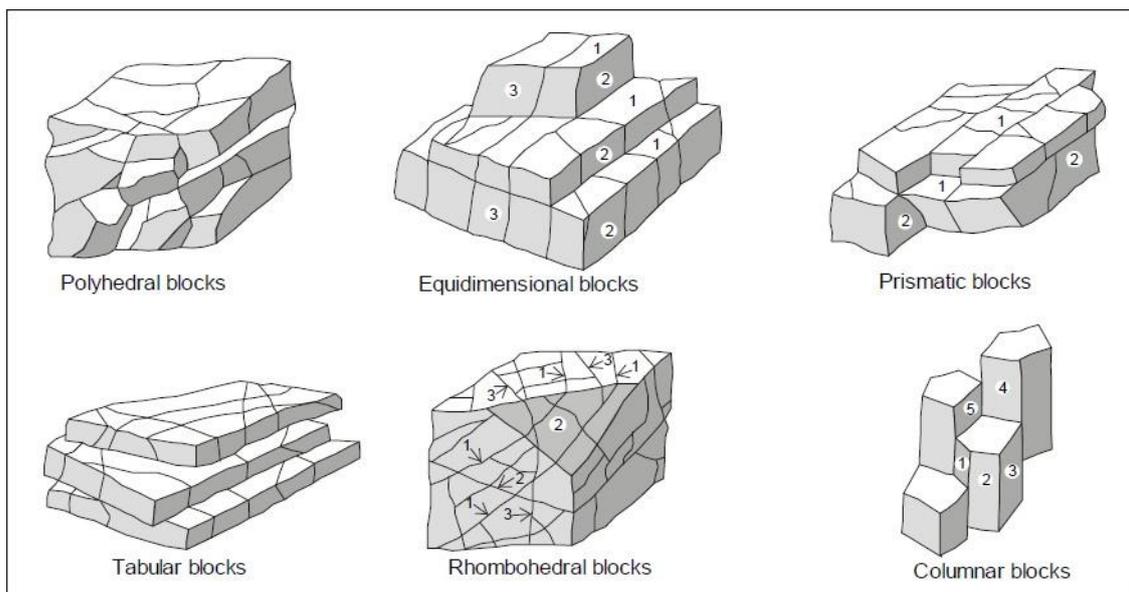


Figura 91. Esempi di possibili geometrie di fratturazione e formazione di blocchi unitari di roccia (Palmstron, 2005).

La dimensione dei blocchi può essere stimata mediante differenti criteri di misura tra cui:

- Stima del J_v (volumetric joint count) e relative correlazione con VRU

L'indice J_v è descritto come la densità di giunti per metro cubo di roccia, e può essere calcolato mediante la seguente relazione che lo identifica come la somma del numero di giunti per metro di ogni famiglia di discontinuità

$$J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3$$

Dove S_1 S_2 S_3 sono le spaziature delle tre famiglie principali, nel caso in cui queste siano orientate a circa 90° l'una rispetto all'altra è possibile mettere in correlazione tale indice con il volume roccioso unitario mediante la seguente relazione

$$VRU = \beta \cdot J_v^{-3}$$

Dove β è detto fattore di forma del blocco

- Stima delle dimensioni dei blocchi in situ .

Dal rilevamento in campagna delle dimensioni principali dei blocchi rinvenuti al piede della scarpata

- Stima del VRU dalla spaziatura S_1 , S_2 , S_3 delle principali famiglie di discontinuità secondo la relazione proposta da Palmstrom (Palmstrom)

$$V_b = (S_1 \cdot S_2 \cdot S_3) / (\sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma)$$

Dove α β γ risultano essere gli angoli compresi tra i piani delle differenti discontinuità

- Stima dell'RQD (Rock Quality Designation) e relativa correlazione con J_v

L'RQD è un indice di classificazione geomeccanica atto a identificare qualitativamente un ammasso roccioso in funzione della percentuale di campione recuperato in seguito ad ogni manovra di carotaggio.

Sebbene non vi siano forti correlazioni tra RQD e J_v , Palmstrom (1982) propone questa relazione

$$RQD = 115 - 3.3 J_v.$$

In data 21/04/2016 è stato eseguito un rilievo morfometrico speditivo alla base della parete al fine di individuare o per lo meno descrivere l'ordine di grandezza medio del volume roccioso unitario: stando ai volumi individuati in campagna si attesta che la massa ad essi correlata raggiunge valori massimi dell'ordine di 75 -100 kg (Figura 92) prendendo in considerazione il peso di volume totale delle unità litologiche appartenenti alla Formazione di Pantano ($\gamma = 21.6 \text{ kN/m}^3$) (ENSER 2003, inedito).



Figura 92. Dimensioni medie dei blocchi rilevati in campagna.

Tali valori devono comunque essere filtrati da una attenta valutazione critica che tenga conto della soggettività intrinseca del rilievo, del fatto che i volumi rilevati appartengono a blocchi che hanno subito urti in seguito ai quali possono essersi ridotti notevolmente di dimensione, al fatto che il rilievo fotografico è stato operato solo sui blocchi freschi non alterati né coperti da vegetazione ed escludendo quindi tutta la casistica precedente ai fenomeni più recenti, i quali risultano falsati dalle opere di protezione poste in atto successivamente agli eventi di cui sopra. Consci di questo grado di incertezza è stato assegnato un range di variabilità al parametro descrittore della massa come deviazione standard. Inoltre l'intento di queste determinazioni non è rivolto al reale dimensionamento energetico delle infrastrutture, bensì ad un confronto quantitativo dei livelli energetici raggiungibili nelle tre differenti modellazioni.

4.7.8.2 *Confronto energetico*

Sono stati analizzati i valori di energia cinetica totale lungo una serie di verticali comuni a tutte le sezioni dei tre modelli, i risultati sono stati successivamente plottati su grafici a dispersione al fine di confrontarne la distribuzione di frequenza. Le verticali sono state scelte considerando tre situazioni diverse: blocchi in uscita dalla fase di rotolamento campionati nei pressi della parete $x=36\text{m}$, blocchi in fase di volo campionati nel centro del vallo $x=45\text{m}$, blocchi in prossimità della sede stradale $x=59\text{m}$. Di seguito vengono riportati alcuni esempi significativi di tale comparazione.

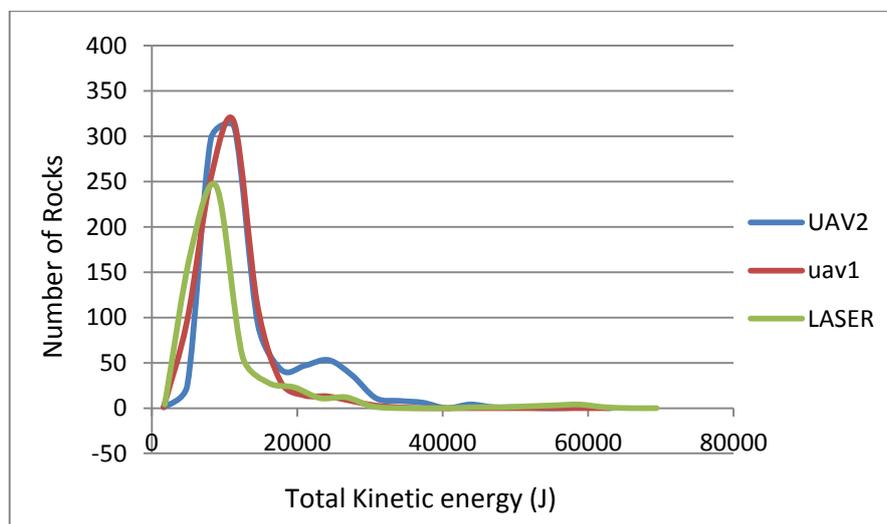


Figura 93. Distribuzione di frequenza dell'energia lungo il data collector posto in Sez.5 nei pressi della rottura di pendio $x=36\text{m}$.

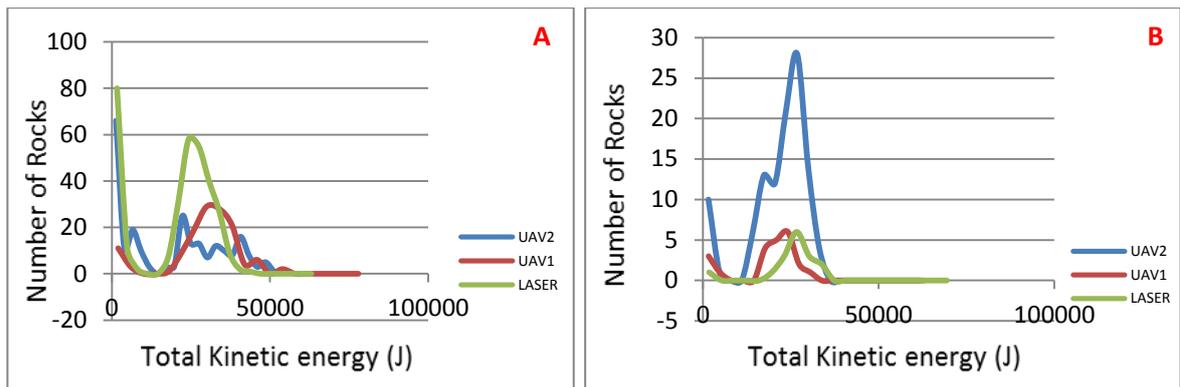


Figura 94. A) Distribuzione di frequenza dell'energia calcolata lungo il data collector in corrispondenza della sede stradale in sez. 5. B) Distribuzione di frequenza dell'energia calcolata lungo il data collector in corrispondenza della sede stradale in sez. 6.

Dall'analisi delle distribuzioni emerge come seppur vi sia una certa sovrapposibilità dei dati a livello generale (Figura 93), si nota una dispersione sia di frequenza che di intensità dell'output, soprattutto lungo i data collector posti in prossimità della sede stradale (Figura 94): si può notare infatti come nella sez. 5 (Figura 94 A) l'output LASER presenti una distribuzione più ristretta dei valori energetici di picco. Un potenziale fattore di controllo legato alla topografia può essere invece osservato in merito alla distribuzione mostrata in sez. 6 del data collector in prossimità della sede stradale (Figura 94 B): il picco più alto in termini di frequenza è raggiunto dal dataset UAV2, in tal modo la distribuzione assunta dai dati di tale dataset appare notevolmente differente rispetto alle altre due. La causa di ciò va ricercata nelle traiettorie dei blocchi, infatti la presenza di oggetti e asperità lungo la sezione LASER e UAV1 impedisce il rimbalzo di molti di questi (Figura 95): i rimbalzi critici avvengono in una finestra più ridotta, diminuendo perciò di numero.

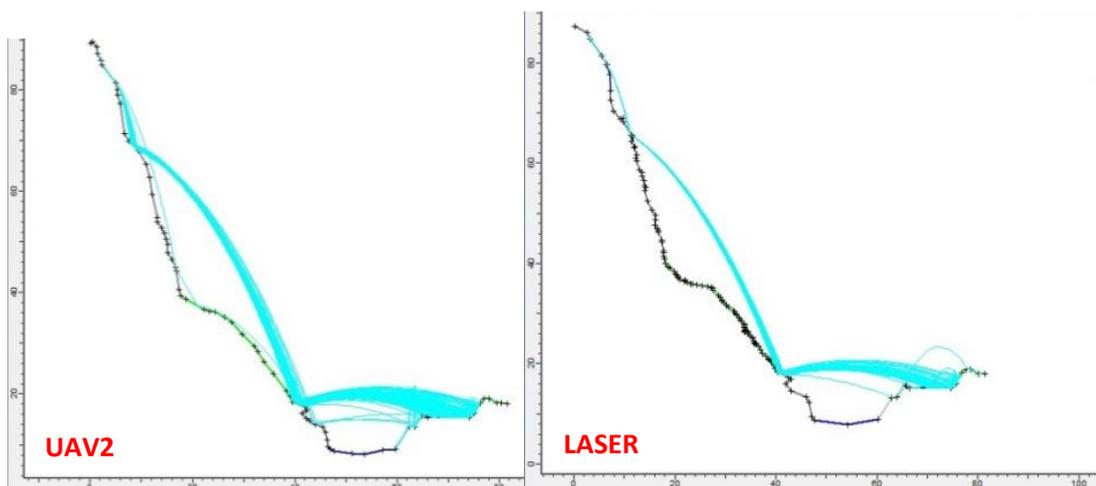


Figura 95. Confronto tra le traiettorie modellate lungo la sez. 6: nel modello UAV2 in numero di traiettorie critiche evidenziate è maggiore rispetto al corrispettivo evidenziato nel modello LASER.

4.7.9 Confronto delle altezze

Confronti cumulativi sono stati effettuati sull'altezza massima di rimbalzo lungo i tre profili analizzati: la scelta di operare un confronto cumulativo deriva dalla necessità di ottenere dati riassuntivi che caratterizzino tutto il profilo e non solo le sezioni critiche di esso.

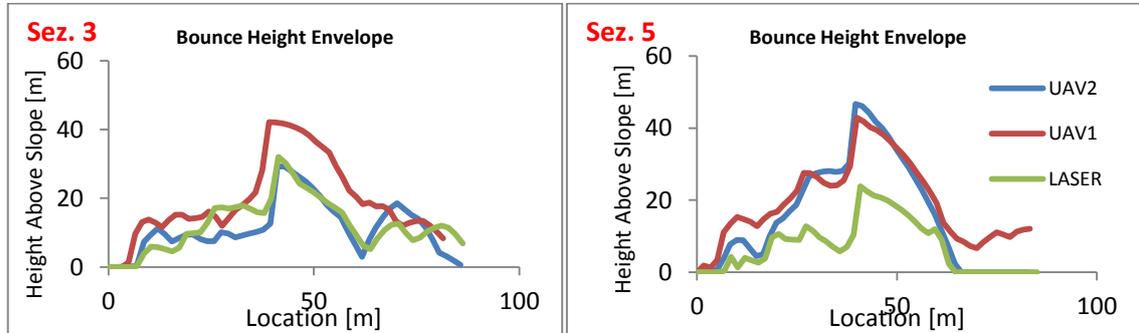


Figura 96. A) Andamento cumulativo delle altezze di rimbalzo dei blocchi in sez.3 B) Andamento cumulativo delle altezze di rimbalzo dei blocchi in sez.5

Si può notare come l'andamento delle curve raffiguranti l'altezza massima raggiunta alle progressive metriche sia fondamentalmente lo stesso per i tre modelli (Figura 96 A), tuttavia talvolta emergono delle sostanziali differenze di ordine di grandezza tra le curve (Figura 96 B): esemplificativa è sicuramente la differenza in ordine percentuale del 50% tra il modello LASER e i modelli UAV nella sez.5, ciò sembra essere dovuto a differenze prettamente topografiche infatti in figura (Figura 97) si può notare come la diversa modellazione del gradino morfologico vegetato presente in tutti i modelli porti ad una differente propagazione dei blocchi impattanti tale asperità. I modelli UAV in questo caso forniscono un output poco realistico poiché i rimbalzi (di tipo elastico) sul gradino morfologico non tengono conto della reale resistenza e del comportamento anelastico fragile del setto di roccia modellato: questo verosimilmente, in seguito a un impatto, modificherebbe la sua forma attenuando di molto i parametri cinematici restituiti al blocco in uscita che quindi proseguirebbe il moto con traiettorie più simili a quelle modellate dall'output LASER.

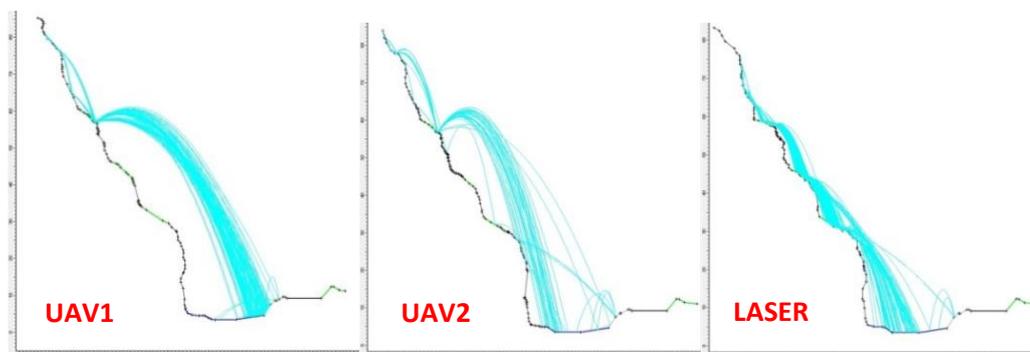


Figura 97. Sez. 5, confronto delle traiettorie al variare della topografia: gli impatti dei blocchi sul primo gradino vegetato mostrano come sia diversa la risposta alla topografia nei tre modelli.

4.7.10 Passo di campionamento

In seguito alle analisi di distribuzione degli endpoint in funzione della distanza si è notato che i risultati emersi sono dipendenti anche dal passo di campionamento utilizzato per descrivere la superficie topografica: le analisi condotte utilizzavano una superficie campionata manualmente a passo variabile in modo tale da fornire un giusto equilibrio tra semplificazione delle geometrie da un lato, e attinenza alla realtà dall'altro. Tuttavia tale metodo di campionamento è affetto da un problema di oggettività legato alla sensibilità dell'operatore, che introduce un certo grado di indeterminazione, e soprattutto di non ripetibilità dei confronti sulle medesime sezioni. Al fine di standardizzare la fase di campionamento e individuare le criticità che gli output di questo processo presentano, sono stati effettuati confronti di modellazione su di una sezione ricampionata sia con metodo manuale, sia a passo costante di 0.5 m e 1 m, nonché a piena risoluzione. La sezione utilizzata a tal fine è la sez.5 del modello LASER, tale scelta deriva dal fatto che il modello in questione presenta i massimi valori di rugosità e quindi variabilità locale della superficie. Dagli output di modellazione si evince che la base dati a piena risoluzione mostra un comportamento differente rispetto alle sezioni ricampionate (Figura 98): vi è infatti la tendenza di questo set di dati a fornire traiettorie più pronunciate con arrivi marcatamente spostati verso la sede stradale; per quanto riguarda invece gli arrivi modellati dai dataset ricampionati essi risultano abbastanza sovrapponibili con una lieve tendenza di quelli riferiti al modello "0.5 m" a spostarsi verso la sede stradale.

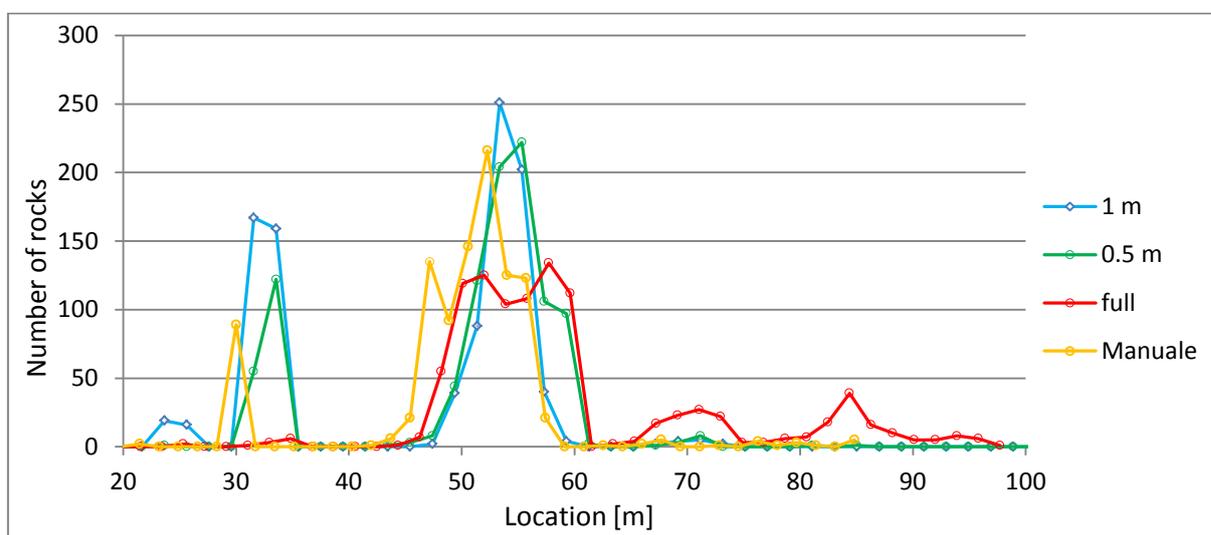


Figura 98. Grafico a dispersione delle frequenze di arrivo dei blocchi e relative progressive metriche: si può notare come la distribuzione a piena risoluzione tenda a rappresentare arrivi più consistenti oltre il vallo paramassi rispetto alle altre tre distribuzioni.

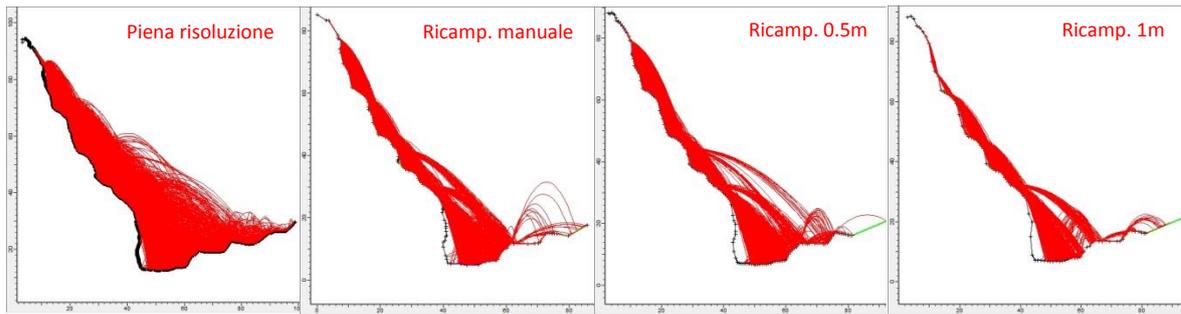


Figura 99. Diversi output grafici di modellazione riferiti rispettivamente a: modello a piena risoluzione, ricampionamento manuale, ricampionamento 0.5 m, ricampionamento 1 m.

Sebbene il modello più cautelativo risulti quello a piena risoluzione, le traiettorie di questo appaiono anche le meno probabili (Figura 99), perciò si rende necessaria una fase di ricampionamento a monte delle analisi: più complesso è stabilire a priori il passo di ricampionamento da adottare senza ricadere in una sottostima dei fenomeni di crollo. Le sezioni forniscono informazioni sul DSM e non sul DEM, si corre il rischio di modellare come asperità del bedrock anche porzioni instabili o effimere come blocchi appoggiati o arbusti, in questo caso quella che nel modello è vista come una asperità che causa una elevata dispersione di blocchi nello spazio, nella realtà potrebbe comportarsi come un punto di smorzamento del moto falsando totalmente l'analisi. Le possibili soluzioni sono il campionamento manuale che tuttavia soffre di soggettività e tende ad arrotondare la superficie, e quello automatico a passo fisso che dovrebbe essere calibrato almeno in base alla dimensione degli ostacoli presenti sul bedrock e del volume del blocco unitario.

4.7.11 Rotomap (analisi dei crolli in 3D)

Rotomap è un programma nato per l'analisi dei pendii in cui possono verificarsi problemi di distacco in quota e successivo rotolamento a valle di blocchi di roccia, nonché per la progettazione delle opere di protezione. Partendo dal presupposto che le leggi che regolano il rapporto tra i parametri geomorfologici ed i percorsi dei blocchi non sono lineari ma caotiche e non convergenti, e che variazioni anche molto piccole nelle condizioni iniziali provocano grandi e imprevedibili variazioni nelle condizioni finali, la soluzione adottata dal programma per lo studio di un problema così complesso consiste nell'uso di un approccio di tipo statistico che consente di determinare le aree di probabilità di arresto dei blocchi e la distribuzione delle energie cinetiche (manuale Rotomap).

Allo stesso modo di Rocfall anche Rotomap utilizza un motore di calcolo di tipo "lumped mass" che rende le operazioni computazionali da eseguire su tutta la griglia molto più snelle e rapide rispetto ad algoritmi che impongono la forma ai blocchi: in questo modo si predilige ancora una volta l'aspetto statistico legato a una maggiore ridondanza di dati piuttosto che quello deterministico legato all'introduzione di variabili difficilmente parametrizzabili.

Indipendentemente dal rilievo geomeccanico di dettaglio il codice di calcolo in questione fornisce modelli di propagazione dei blocchi a partire dall'introduzione dei seguenti parametri:

- Coefficiente di restituzione normale, definito come rapporto tra la componente normale della velocità prima e dopo l'impatto.
- Coefficiente di restituzione tangenziale, definito come rapporto tra la componente tangenziale della velocità prima e dopo l'impatto.
- coefficiente di attrito di roto-scivolamento, coefficiente che parametrizza la perdita di energia dovuta all'impatto dopo ogni salto.
- angolo limite, è l'angolo che definisce la condizione fisica per la quale si passa da moto di roto-scivolamento a moto aereo.

Di particolare importanza risulta la fase di creazione del modello numerico del pendio, il quale viene calcolato a partire da una serie arbitraria di coordinate (X,Y,Z), che vengono successivamente trasformate in una griglia a passo regolare: tale griglia è data da un insieme di celle quadrate a pendenza costante di cui è necessario specificare i parametri fisici utilizzati dal modello.

Poiché le singole celle costituiscono la superficie su cui puntualmente avverranno i rimbalzi dei blocchi di cui si vuole modellare la caduta, è necessario dimensionarle opportunamente in fase preliminare, in modo tale che esse risultino di dimensioni abbastanza grandi rispetto alle dimensioni medie dei blocchi e allo stesso tempo di ridotte dimensioni rispetto all'estensione totale del modello onde evitare una eccessiva perdita di risoluzione.

I metodi di interpolazione e creazione della griglia utilizzati dal software sono : Media pesata, Kriging, Superficie polinomiale limite.

Definita la superficie su cui far avvenire il rotolamento dei blocchi è necessario delimitare quale porzione di essa debba essere resa attiva e quindi costituire l'effettiva area di analisi: ciò è dovuto al fatto che la griglia generata dal programma di default è di forma quadrata, tuttavia non sempre il DEM di partenza inscritto in essa presenta una forma regolare.

Anche la definizione dei punti di rilascio dei blocchi segue un criterio strettamente statistico, poiché avviene non in maniera puntuale bensì attraverso delle linee spezzate a coordinate note, di cui l'utente può variare la spaziatura tra punti di rilascio, la variazione angolare massima della traiettoria iniziale e le condizioni di velocità minima e massima: di fatto questo approccio equivale a una vera e propria definizione cartografica delle nicchie di distacco. La velocità acquisita dal blocco in caduta è data dalla seguente relazione

$$V = C_s \cdot \sqrt{2gh}$$

G= accelerazione gravitazionale.

H= differenza di quota tra punto di distacco e area di arrivo del blocco.

C_s= coefficiente di smorzamento che tiene conto di rotolamenti e urti locali lungo la nicchia stessa.

La condizione di arresto è definita da una soglia di velocità al di sotto della quale il blocco è ritenuto fermo.

I dati di output che è possibile ottenere in seguito ad un numero statisticamente significativo di simulazioni di rotolamento consistono in: distribuzione delle curve di isofrequenza dei punti di arrivo, percorsi planimetrici dei blocchi, sezioni verticali delle traiettorie.

4.7.11.1 Fase operativa – costruzione del modello

La prima fase necessaria all'implementazione del modello nel codice di Rotomap è stata la creazione della griglia di calcolo: in questo caso il dato di input per i tre dataset è costituito dal modello digitale del terreno, che in ambiente GIS è stato ri-campionato a 1m, ed esportato sotto forma di dato tabellare i cui campi sono costituiti dalle coordinate X Y Z delle singole celle. I dati così ottenuti sono stati immessi nel sistema di calcolo deputato alla creazione della superficie di modellazione: l'estensione Isomap. In seguito al confronto degli output forniti dai tre metodi di interpolazione è stato scelto quello generato per mezzo del metodo della Superficie polinomiale limite, poiché più di tutti si adattava alla topografia esistente.

Successivamente alla fase di creazione della griglia, e delle relative isoipse, è stata effettuata la parametrizzazione delle celle attive del modello in base alla natura del terreno affiorante in

superficie individuabile per mezzo di ortofoto: sono quindi stati definiti 4 materiali con differenti coefficienti di restituzione classificati in Tabella 11.

	Rn	Rt	Coef. Attrito
bedrock	0.35	0.8	0.3
copertura detritica vegetata	0.2	0.4	0.66
torrente	0.01	0.01	2
asfalto	0.4	0.8	0.3

Tabella 11. Classi di terreno parametrizzate per la successiva analisi traiettografica 3D.

Di seguito (Figura 100) sono illustrate le porzioni di topografia rese attive per ogni modello e le relative aree a coefficienti di rimbalzo omogenei. Sia i parametri di restituzione che i parametri di calcolo intrinseci all'analisi sono state mantenute costanti per tutte le prove al fine di rendere confrontabili gli output ottenuti.

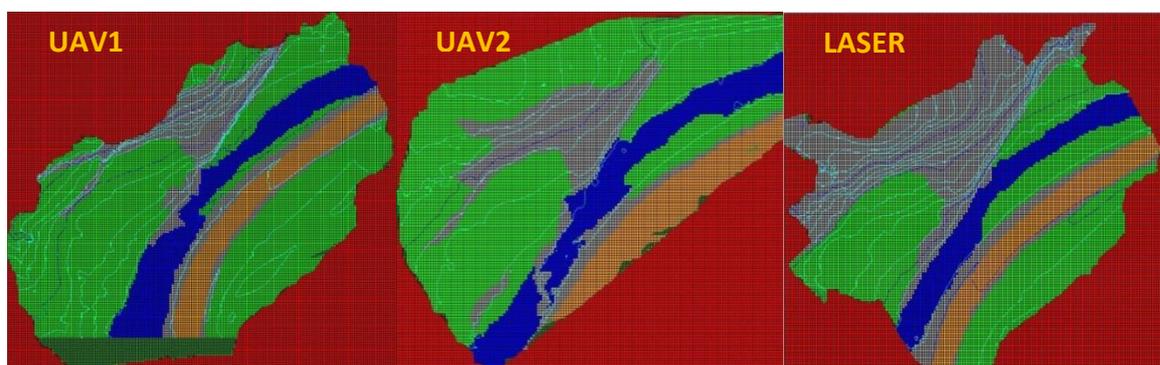


Figura 100. Griglia di calcolo estratta dai DSM dei tre modelli, rispettivamente UAV1, UAV2, LASER: le celle rosse pur facendo parte del grigliato sono state disattivate poiché contengono informazioni calcolate dal software solo in base agli algoritmi di interpolazione.

Ad una prima classificazione speditiva dei materiali affioranti, effettuata essenzialmente grazie ai parametri di bibliografia, è seguita una fase di analisi a ritroso resa possibile grazie al rilevamento da ortofoto della ubicazione dei blocchi sul pendio. Al fine di tarare il modello sono state definite tre seed-line di cui una coincidente con il ciglio della scarpata, e le altre due poste ad una altezza intermedia, mentre la velocità iniziale è stata fatta variare in un intervallo compreso tra 0.5 e 2 m/s. Parametro determinante per la calibrazione si è rivelato l'angolo limite poiché allo stesso modo dei coefficienti di restituzione, una sua piccola variazione determina un cambiamento profondo nel dato di output, in quanto tale parametro discrimina se il moto dei blocchi tra un urto e il successivo avviene per rotolamento (con attrito radente) o per rimbalzo (attrito viscoso).

Una volta tarati i parametri sulla base topografica relativa al rilievo effettuato tramite UAV1, sono state implementate le griglie relative ai dataset UAV2 e LASER al fine di confrontarne gli output: tutti i modelli sono stati caratterizzati dagli stessi parametri di costruzione griglia, e geomeccanici,

al fine di mantenere costanti le condizioni al contorno e rendere apprezzabili le variazioni dovute in massima parte alla morfologia del versante.

4.7.11.2 Endpoint

Confrontando i dati relativi alle posizioni di arresto emerge come i tre modelli risultino abbastanza congruenti tra loro: si nota infatti che in tutti i casi la distribuzione dei blocchi ricalca la zona morfologica in cui vi è rottura di pendio e copertura detritica vegetata, inoltre il vallo paramassi svolge in maniera appropriata la sua funzione dato che la quasi totalità dei blocchi risultano distribuiti in seno al torrente, mentre solo un numero limitato di essi oltrepassa il vallo giungendo sulla sede stradale, esclusivamente in corrispondenza della porzione più aggettante della parete.

Di seguito, in Figura 101, è mostrata la sovrapposizione dei tre output di modellazione su relativa ortofoto.

Sono stati confrontati i dati relativi agli arrivi dei blocchi sul pendio, sebbene l'estensione dei dati topografici di partenza non sia esattamente la stessa, a causa delle diverse metodiche di acquisizione, si è fatta l'assunzione che i percorsi dei blocchi che sconfinano le celle attive del modello si fermino sul bordo dello stesso.

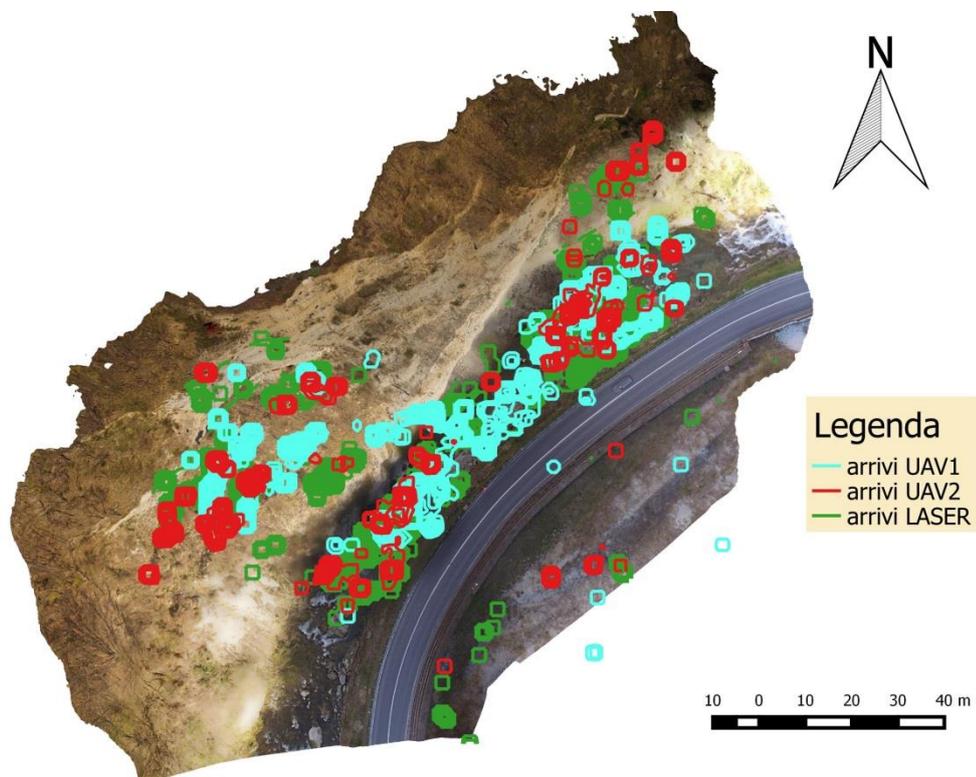


Figura 101. Distribuzione planimetrica dei blocchi appartenenti ai tre modelli.

Analizzando i percorsi dei blocchi si può notare come nel caso del modello LASER essi siano caratterizzati da condizioni di rotolamento molto più marcate e frequenti nella porzione sommitale della parete rocciosa rispetto alle condizioni di caduta libera che caratterizzano i percorsi dei modelli UAV nei medesimi settori di parete: tale comportamento può essere attribuito effettivamente a differenze di modellazione della superficie topografica, evidenze di ciò sono osservabili dall'analisi delle griglie impiegate nella successiva fase di rotolamento massi. Come è possibile osservare in Figura 102 le curve di livello dei modelli UAV risultano, soprattutto nella porzione superiore, più ravvicinate tra loro rispetto alle stesse del modello LASER.

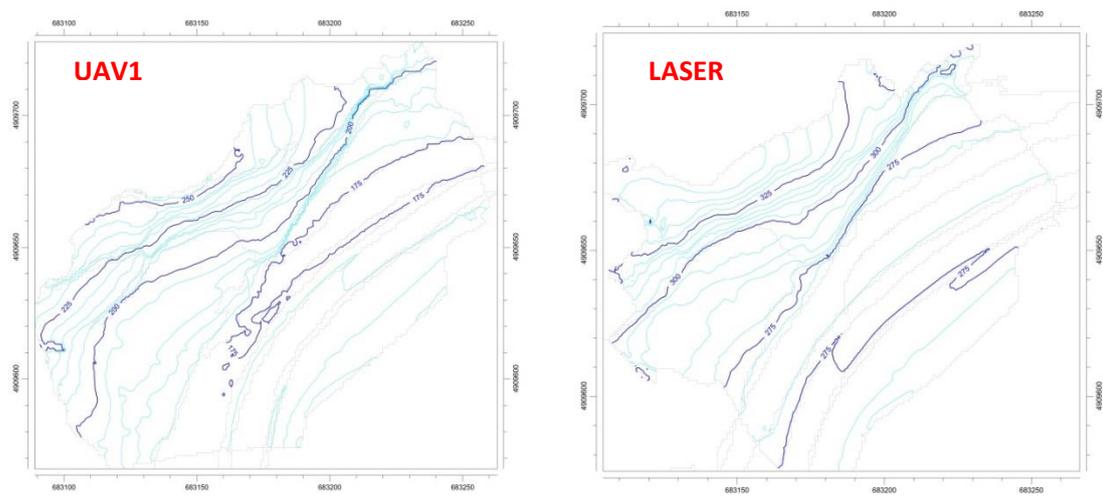


Figura 102. Grigliato altimetrico di calcolo estratto da Rotomap per i modelli UAV1 e LASER: si nota la diversa modellazione della porzione superiore della parete rocciosa, che nel modello UAV1 è data da isolinee più ravvicinate mentre nel modello LASER presenta isolinee più larghe nella medesima porzione.

5 Conclusioni

Le analisi svolte sulla parete rocciosa dell'ex Mammellone 1 delle gole di Scascoli (Loiano, BO) hanno permesso di effettuare una serie di confronti tra i diversi dati di input a disposizione, al fine di individuare le differenze e i relativi pregi tra le diverse metodologie di acquisizione. I tre dataset analizzati provengono da acquisizione fotogrammetrica con UAV 2016 (2 dataset) e da acquisizione laser scanner (UNIFI, 2006).

Dai risultati ottenuti emerge che:

- dalle variazioni di indice di asperità e pendenza, nonché dal confronto volumetrico delle porzioni di ammasso in aggetto, si può notare come il modello LASER e quelli UAV mostrino delle sostanziali differenze soprattutto nella porzione mascherata dalle reti paramassi: queste sono infatti ritenute la causa principale della divergenza tra i due modelli, a cui si aggiunge la naturale tendenza evolutiva del versante. Gli effetti di tali differenze si ripercuotono sugli output di modellazione numerica.
- Il confronto tra le nuvole di punti relativo alle distanze tra punti omologhi, sebbene non abbia permesso un'analisi multitemporale rigorosa dovuta alla non interoperabilità tra gli output generati in due differenti sistemi di riferimento geodetico, ha comunque permesso di indagare l'evoluzione morfologica del sito di studio mostrando e confermando le evidenze di eventi di crollo che si sono esplicitati nell'arco di 10 anni tra il 2006 ed il 2016. Tali fenomeni hanno coinvolto volumi complessivi pari a circa 170 m^3 verificatisi successivamente al crollo 2005. Le masse mancanti in parete risultano essere depositate al piede con volumi sciolti pari a 360 m^3 . La differenza è maggiore rispetto al dato bibliografico di riferimento (Swell factor) ed è riconducibile anche alla presenza di vegetazione nel deposito che viene computata come un volume effettivo.
- Dai confronti distanziometrici tra point cloud emerge come il disturbo generato dalla rete paramassi in aderenza nel dataset LASER possa essere filtrato e si possa mettere in evidenza il solo dato topografico reale che, per la quasi totale estensione dell'affioramento, rientra pienamente nel range di tolleranza di $\pm 0.4 \text{ m}$ entro cui i dati dei rispettivi dataset sono ritenuti sovrapponibili e confrontabili.
- È stato possibile mettere a punto un metodo semiautomatico di individuazione e analisi digitale delle giaciture a validazione manuale, in cui alla componente computazionale di riconoscimento delle caratteristiche di interesse (in questo caso rappresentate da serie di piani orientati) e successiva trasposizione in chiave geologica mediante parametrizzazione

- dell'output, è stato anteposto un processo di selezione manuale da parte dell'operatore dei dati ritenuti rappresentativi e coerenti gli uni agli altri.
- Dal confronto degli output digitali con quelli prodotti dal rilievo geomeccanico classico, emerge una buona coerenza generale dei risultati: delle tre famiglie di discontinuità individuate pressoché in tutti i modelli, quelle denominate K1 e K3 risultano sovrapponibili con una deviazione media inferiore ai 20° di azimuth, mentre la famiglia K2 risulta essere caratterizzata da una maggiore dispersione del dato, probabilmente dovuta alla caratteristica morfologia ondulata che i tre set di discontinuità succitati mostrano in affioramento. In questo confronto è necessario tenere conto del differente approccio metodologico alla problematica posta in essere dal rilevamento geomeccanico delle discontinuità: da un lato questo è stato affrontato in maniera soggettiva al fine di individuare quegli elementi strutturali critici per la stabilità globale del versante, dall'altro invece è stato affrontato secondo un criterio oggettivo e statistico volto a raccogliere un campione più completo e rappresentativo possibile della realtà indagata.
 - Mentre il rilievo geomeccanico classico ha individuato 2 meccanismi cinematici di scivolamento a cuneo e uno di scivolamento planare, le discontinuità individuate dai rilievi UAV danno luogo a cinematismi di ribaltamento e scivolamento a cuneo: da ciò emerge che sebbene il rilievo geomeccanico soggettivo offra una panoramica generale delle dinamiche di rottura del versante, il rilievo statistico digitale individua un cinematismo altrimenti ignorato.
 - Gli output di modellazione numerica bidimensionale e tridimensionale risultano coerenti tra loro per quanto riguarda gli endpoint, a dimostrazione che le variazioni morfologiche di dettaglio che si apprezzano nelle analisi di asperità e pendenza influiscano marginalmente solo sulla modellazione della dinamica dei percorsi dei blocchi sulla superficie 3D e non sui punti di arrivo.
 - Ai fini della modellazione numerica il rilievo fotogrammetrico UAV2, effettuato con un mezzo amatoriale, risulta ampiamente confrontabile con il corrispettivo UAV1 rilevato con mezzi professionali; non può dirsi lo stesso riguardo l'analisi digitale statistica delle giaciture che invece risulta essere più rappresentativa e completa se effettuata sul modello UAV1 in quanto questo presenta una densità di punti più che doppia rispetto al modello UAV2; è così spiegata la differente capacità di individuazione delle superfici a parità di metodologia di rilevamento.
 - L'ampio margine di sovrapposibilità tra le nuvole UAV (rilevate ed elaborate in maniera autonoma e indipendente l'una dall'altra) fornisce un feedback sulla robustezza e

affidabilità dell'approccio al rilievo utilizzato, evidenziandone l'elevata ripetibilità di tipo geometrico e quindi possibili applicazioni ai fini di monitoraggio geologico.

- Gli output derivanti dall'utilizzo di software opensource per la modellazione 3D come CloudCompare sono del tutto paragonabili e probabilmente di più facile gestione rispetto agli omologhi prodotti di software proprietari come ColTop, Polyworks, ecc...

6 Bibliografia

Abbate E. & Sagri M., 1970 - *The eugeosynclinal sequences*. G. Sestini (Ed.), Development of the Northern Appenines. Sedim. Geol., 4, 251-340.

Agisoft LLC, 2014 - *Agisoft Photoscan Pro*. St. Petersburg, Russia.

Amorosi A. 1990 – *Analisi di facies e stratigrafia sequenziale della Formazione di Bismantova ad est del Fiume Panaro (“placca” di Zocca-Montese, Appennino modenese)*. Giornale di Geologia, 52, 159-177.

Benini A., De Nardo M.T, Severi P., 2009 - *Note illustrative della Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000, Foglio 238, Castel S. Pietro Terme*. Servizio Geologico D’Italia. Regione Emilia-Romagna. S. EL. CA. s.r.l., Firenze: pp. 89, 43.

Bernardini F., Mittleman J., Rushmeir H., Silva C., Taubin G., 1999 *The Ball Pivoting algorithm for surface reconstruction algorithm*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1999, vol. V, 4, pp. 349-359.

Berti M.; Corsini A.; Daehne A., 2013 - *Comparative analysis of surface roughness algorithms for the identification of active landslides*. Geomorphology, 182, pp. 1 - 18

Biagi L., 2009. *I fondamenti del GPS*. Geomatics Workbooks Vol. 8 ISSN: 1591 – 092X.

Biasion A., Borgogno Mondino E., Bornaz L., Giulio Tonolo F., Lingua A., Rinaudo F., 2003 - *Utilizzo delle tecniche della geomatica per la modellazione del territorio*. Contratto di ricerca sull’utilizzo della geomatica per il monitoraggio dei movimenti gravitativi presenti sul territorio valdostano, nell’ambito del programma interreg III A.

Broili, L., 1974 - *Caratteristiche tecniche della massa rocciosa e suo comportamento meccanico nei problemi geostatici*. CNR-Laboratorio di Geologia Applicata, Padova, pp 189.

Cannarozzo R., Cucchiari L., Meschieri W., 2012 - *Misure, rilievo, progetto per Costruzioni, ambiente e territorio*. Quarta edizione.

Caprioli M., 2000 – *Geomatica*. Seconda edizione.

Church, H. K., 1981 - *Excavation Handbook*. McGraw-Hill, New-York, N. Y., pp 1024.

Coggan J. S., Wetherelt A., Gwynn X. P., Flynn Z., 2007 - *Comparison of hand-mapping with remote data capture systems for effective rock mass characterisation*. Proceedings of 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics - The Second Half Century of Rock Mechanics, 1: 201-205.

Cremonini G. & Ricci Lucchi F., 1982 - *Guida alla geologia del margine appenninico-padano*. Soc.Geol.It., Guide Regionali, 248 pp.

Cruden D. M. & Varnes D. J., 1996 - *Landslide Types and Processes*. A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, Spec. Rep. 247, 3, D. C. 36-75.

Del Maschio L., Gozza G., Piacentini D., Pizziolo M., Soldati M., 2007 - *Previsione delle traiettorie di blocchi mobilizzati da frane di crollo: applicazione e confronto di modelli.* Giornale di Geologia Applicata 7 (2007) 33-44.

Doneus M., Verhoeven G., Fera M., Briese Ch., Kucera M. & Neubauer W., 2011 - *From deposit to point cloud - A study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations.* Geoinformatics FCE CTU Journal, vol. VI, 2011, pp. 81-88

Duncan C. Wyllie, Christopher W. Mah, 1974 - *Rock Slope Engineering.*

Elter P., 1960 - *I lineamenti tettonici dell'Appennino a NW delle Apuane.* Boll. Soc. Geol. It., 60, 273-312.

Erismann, T. H., 1986 - *Flowing, rolling, bouncing, sliding: Synopsis of basic mechanisms.* Acta Mech., 64, 101-110.

Erismann, T.H., Abele, G., 2001 - *Dynamics of Rockslides and Rockfalls.* Springer-Verlag, Berlin, p. 316.

Ferro S., 2003 – Tesi di Laurea Magistrale, inedito.

Fischler M. A., Bolles R. C., 1981 - *Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography.* Communications of the ACM, 1981, vol. XXIV, 6, pp. 381-395.

Gambassi L. 2006 – *Modellazione numerica agli Elementi Distinti della frana in roccia di Scascoli (Valle del Savena, Bologna).* Tesi di laurea Magistrale, Università di Bologna (inedito).

Geo&Soft, 2004 - *Rotomap, Manuale d'uso.* www.geo&soft.it

Giani G. P., 1992 - *Rock Slope Stability Analysis.* A.A. Balkema.

Goodman, R.E. and Bray, J.E. 1976 - *Toppling of rock slopes: Proceedings of speciality conference on rock engineering for foundations and slopes.* Colorado, Vol. 02, pp. 201 – 243.

Gottardi G., Marchi G., Landuzzi A., Benedetti G. 2004 - *Sui complessi fenomeni di instabilità presso le Gole di Scascoli Appennino settentrionale, Bologna.* 10°Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004, Riva/Trento, Italia. 2(V): 25-36.

Hoek E. & Bray J.W. 1981 - *Rock Slope Engineering.* Institute of Mining & Metallurgy. London.

ISRM. 1978 - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. Vol. 15 No. 6 pp 319 – 368.

James MR, Robson S. 2012 - *Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application.* Journal of Geophysical Research 117: F03017.

Kazhdan M., Bolitho M., Hoppe H., 2006 - *Poisson surface reconstruction.* Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing, Cagliari, 2006, pp. 61-70.

Kliche, Charles A., 1951 - Rock Slope Stability.

Landuzzi A., Bernagozzi G. 1996 - *Geologia e geomorfologia della frana di Scascoli (Appennino Settentrionale, Bologna, Italia)*. V Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Cagliari.

Lisle, R. J. 2004 - *Calculation of the daylight envelope for plane failure of rock slopes*. Geotechnique 54, No. 4, 279–280.

Marchi G., Giacchetti G., Benedetti G., Landuzzi A., 2013 - *The Scascoli Case Study: Design and Safety Measures for a Landslide Area*. Landslide Science and Practice, Berlin - Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, 6, pp. 199 – 206.

Moons T., Van Gool L., and Vergauwen M. 2009. *3D reconstruction from multiple images*. Journal of Foundations and Trends in Computer Graphics and Computer Vision, vol. IV, 4, 2010, pp. 287-398.

Panini F., Bettelli G., Pizzolo M., 2002 - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 237, Sasso Marconi*. Servizio Geologico D'Italia. Regione Emilia-Romagna. S. EL. CA. s.r.l., Firenze: pp. 13.

Papani G., Tellini C., Torelli L., Vernia L., Iaccarino S., 1987 – *Nuovi dati stratigrafici e strutturali sulla formazione di bismantova nella "sinclinale Vetto-carpineti" (Appennino reggiano-parmense)*. Mem. Soc.Geol.It., 39, 245-275.

Papani G., De Nardo M. T., Bettelli G., Rio D., Tellini C., Vernia L. 2004 - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 218, Castelnovo Né Monti*. Servizio Geologico D'Italia. Regione Emilia-Romagna. S. EL. CA. s.r.l., Firenze: pp. 63.

Paronuzzi P., Serafini W. 2005 - *The influence of rock bridges in block fall processes*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 1.

Piacentini D., 2005 - *Studio preliminare per l'analisi della stabilità di pareti rocciose: un esempio di applicazione nelle Dolomiti Occidentali (Provincia di Bolzano, Italia)*. HydroGeo 0, 50-55.

Ricci Lucchi F., Colella A., Ori G.G., Ogliani F. & Colalongo M.L., 1981 - *Pliocene fan deltas of the Intra-Appenninic Basin, Bologna*. IAS 2nd Reg.Meeting, Bologna, Excursion Guidebook, 89-138.

Ricci Lucchi F., 1985 - *Marnoso-arenacea turbidite system, Italy*. In: *Submarine fans & related turbidite systems*. A.H.Bouma et al Eds., Springer, 209-216.

Ricci Lucchi F., 1986 - *Oligocene to Recent foreland basins Northern Apennines*. I.A.S., Special Public. No.8, Blackwell, 105-139.

Riley Shawn J., Stephen D. DeGloria, Elliot R., 1999 - *A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity*. Intermountain Journal of Sciences 5(1-4) pp. 23-27

Scioldo G. 1991 - *Rotomap: analisi statistica del rotolamento dei massi*. Ass. Min. Subalpina: Atti Convegno "La meccanica delle rocce a piccola profondità", Torino, 81-84

Seitz S. M., Curless B., Diebel J., Scharstein D. & Szeliski R., 2006 - *A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms*. Proceedings of 2006 IEEE Conference of Computer vision and pattern recognition, New York, 2006, vol. I, pp. 519-528.

Shepard, M.K., Campbell, B.A., Bulmer, M.H., Farr, T.G., Gaddis, L.R., Plaut, J.J., 2001 - *The roughness of natural terrain: a planetary and remote sensing perspective*. Journal of Geophysical Research 106, 777–795.

Snavely K.N., 2008 - *Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections*. Tesi di Dottorato.

Stevens W. D., 1998. *Rocfall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls*. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto

Szelisky R., 2010 - *Computer Vision*, Londra

Treves, B., 1984 - *Orogenic belts as accretionary prisms: the example of the Northern Apennines*. Ofioliti, 9 (3), 577–618.

Verhoeven G., 2011 - *Taking Computer Vision aloft - Archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan*. Archaeological Prospection, vol. XVIII, 1, 2011, pp. 67-73

Westoby M. J., Bransington J., Glasser N. F., Hambrey M. J., Reynolds J. M., 2012 – *“Structure from Motion” photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications*. Geomorphology, 179, pp. 300-314.

Whalley, W. B., 1984 - *Rockfalls. Slope Instability*. D. Brunnsden and D.B. Prior (eds.), Wiley, London, pp.217 – 256.