

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J41C09000000005

U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA

ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO
QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA

LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO

GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA

RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M.
MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I B 0 Q 3 A R 6 9 R H G E 0 0 0 5 0 0 3 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	G. Benedetti		S. Rodani		C. Mazzocchi		

M. Comedini

Dott. Geol. Massimo Comedini
Ordine dei Geologi del Lazio
n° 2103

Manuel

File:

n. Elab.:

INDICE

1	INTRODUZIONE	5
2	INTERFEROMETRIA RADAR SATELLITARE: BASI TEORICHE.....	6
2.1	RAINS: RAPID AREAL INSAR SURVEY	6
2.2	RAINS-STANDARD E RAINS-SLOW	7
2.3	MT-SBA: ANALISI INSAR MULTI-TEMPORALE	8
3	BREVE INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DELL'AREA DI INDAGINE.....	9
4	ANALISI INSAR DEL MONTE MARZOLA	12
4.1	DATASET INSAR	12
4.2	RISULTATI ANALISI INSAR.....	13
4.2.1	<i>Risultati analisi RAINS-standard</i>	13
4.2.2	<i>Risultati analisi RAINS-slow</i>	23
4.2.3	<i>Risultati analisi MT-SBA</i>	33
4.3	PRODOTTI FORNITI.....	48
4.3.1	<i>Formato dei risultati e convenzioni di colori</i>	48
4.3.2	<i>Analisi RAINS</i>	48
4.3.3	<i>Analisi MT-SBA</i>	48
5	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	49
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	51

FIGURE

FIGURA 1:	CARTA GEOMORFOLOGICA DELL'AREA DI INDAGINE (TRATTA DALLA CARTA GEOLOGICA DELLA PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO ALLA SCALA 1:10.000 E MODIFICATA).	11
FIGURA 2:	L'AREA DI INTERESSE È COPERTA DA DUE ORBITE SATELLITARI, UNA IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (117, SUBSWATH 2), ED UNA IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (168, SUBSWATH 1).	12
FIGURA 3:	RISULTATO ANALISI RAINS-STANDARD IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) PER L'INTERO VERSANTE DEL MONTE MARZOLA. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	15
FIGURA 4:	RISULTATO ANALISI RAINS-STANDARD IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) PER L'INTERO VERSANTE DEL MONTE MARZOLA. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	16

FIGURA 5: RISULTATO ANALISI RAINS-STANDARD IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 1 E 2. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	17
FIGURA 6: RISULTATO ANALISI RAINS-STANDARD IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 1 E 2. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	18
FIGURA 7: RISULTATO ANALISI RAINS-STANDARD IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 3 E 4. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	19
FIGURA 8: RISULTATO ANALISI RAINS-STANDARD IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 3 E 4. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	20
FIGURA 9: RISULTATO ANALISI RAINS-STANDARD IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 5 E 6. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	21
FIGURA 10: RISULTATO ANALISI RAINS-STANDARD IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 5 E 6. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	22
FIGURA 11: RISULTATO ANALISI RAINS-SLOW IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117). AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	25
FIGURA 12: RISULTATO ANALISI RAINS-SLOW IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117). AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	26
FIGURA 13: RISULTATO ANALISI RAINS-SLOW IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 1 E 2. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	27
FIGURA 14: RISULTATO ANALISI RAINS-SLOW IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 1 E 2. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	28
FIGURA 15: RISULTATO ANALISI RAINS-SLOW IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 3 E 4. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	29
FIGURA 16: RISULTATO ANALISI RAINS-SLOW IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 3 E 4. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	30
FIGURA 17: RISULTATO ANALISI RAINS-SLOW IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 5 E 6. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	31
FIGURA 18: RISULTATO ANALISI RAINS-SLOW IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 5 E 6. AD OGNI PIXEL DELLO STACK È ASSOCIATO UN VALORE DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	32
FIGURA 19: RISULTATI DELL'ANALISI MT-SBA IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117). VALORI MEDI DI VELOCITÀ DI SPOSTAMENTO, LUNGO LA LOS, NELL'INTERO PERIODO DI ANALISI (OTTOBRE 2015 - GENNAIO 2020).	34
FIGURA 20: RISULTATI DELL'ANALISI MT-SBA IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168). VALORI MEDI DI VELOCITÀ DI SPOSTAMENTO, LUNGO LA LOS, NELL'INTERO PERIODO DI ANALISI (MARZO 2016 - FEBBRAIO 2020).	35
FIGURA 21: RISULTATO ANALISI MT-SBA IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 1 E 2. I RISULTATI SONO ESPRESSI IN TERMINI DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	37
FIGURA 22: RISULTATO ANALISI MT-SBA IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 1 E 2. I RISULTATI SONO ESPRESSI IN TERMINI DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	38
FIGURA 23: SERIE STORICHE DI SPOSTAMENTO MEDIO CUMULATO, LUNGO LA LOS, DEI PUNTI COMPRESI NEI POLIGONI INDICATI IN FIGURA 21 E FIGURA 22 PER I DATASET ASCENDENTE (B) E DISCENDENTE (A), RISPETTIVAMENTE. IN FIGURA 23 C SONO RIPORTATE, PER	

CONFRONTO, LE PRECIPITAZIONI PIOVOSE MISURATE PRESSO IL PLUVIOMETRO DI TRENTO-LASTE, CUMULATE SUI 30 GIORNI ANTECEDENTI, E QUELLE NEVOSE RILEVATE SUL MONTE BONDONE.	39
FIGURA 24: RISULTATO ANALISI MT-SBA IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 3 E 4. I RISULTATI SONO ESPRESSI IN TERMINI DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	41
FIGURA 25: RISULTATO ANALISI MT-SBA IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 3 E 4. I RISULTATI SONO ESPRESSI IN TERMINI DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO GIUGNO 2016-FEBBRAIO 2020.	42
FIGURA 26: SERIE STORICHE DI SPOSTAMENTO MEDIO CUMULATO, LUNGO LA LOS, DEI PUNTI COMPRESI NEI POLIGONI INDICATI IN FIGURA 24 E FIGURA 25 PER I DATASET ASCENDENTE (B) E DISCENDENTE (A), RISPETTIVAMENTE. IN FIGURA 26C SONO RIPORTATE, PER CONFRONTO, LE PRECIPITAZIONI PIOVOSE MISURATE PRESSO IL PLUVIOMETRO DI TRENTO-LASTE, CUMULATE SUI 30 GIORNI ANTECEDENTI, E QUELLE NEVOSE RILEVATE SUL MONTE BONDONE.	43
FIGURA 27: RISULTATO ANALISI MT-SBA IN GEOMETRIA DI VOLO ASCENDENTE (ORBITA 117) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 5 E 6. I RISULTATI SONO ESPRESSI IN TERMINI DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO OTTOBRE 2015-GENNAIO 2020.	45
FIGURA 28: RISULTATO ANALISI MT-SBA IN GEOMETRIA DI VOLO DISCENDENTE (ORBITA 168) IN CORRISPONDENZA DELLE UNITÀ MORFOLOGICHE 5 E 6. I RISULTATI SONO ESPRESSI IN TERMINI DI VELOCITÀ MEDIA, LUNGO LA LOS, NEL PERIODO MARZO 2016-FEBBRAIO 2020.	46
FIGURA 29: SERIE STORICHE DI SPOSTAMENTO MEDIO CUMULATO, LUNGO LA LOS, DEI PUNTI COMPRESI NEI POLIGONI INDICATI IN FIGURA 27 E FIGURA 28 PER I DATASET ASCENDENTE (B) E DISCENDENTE (A), RISPETTIVAMENTE. IN FIGURA 29 C SONO RIPORTATE, PER CONFRONTO, LE PRECIPITAZIONI PIOVOSE MISURATE PRESSO IL PLUVIOMETRO DI TRENTO-LASTE, CUMULATE SUI 30 GIORNI ANTECEDENTI, E QUELLE NEVOSE RILEVATE SUL MONTE BONDONE.	47

TABELLE

TABELLA 1: CARATTERISTICHE DELLE DUE TECNICHE DI ANALISI RAINS, RAINS-STANDARD E RAINS-SLOW, IN TERMINI DI BASELINE TEMPORALE (BT) E BASELINE PERPENDICOLARE (BP) DEGLI INTERFEROGRAMMI CONSIDERATI NELL'ANALISI, OLTRE AI RANGES DI VELOCITÀ DI SPOSTAMENTO RILEVABILI.	8
--	---

1 INTRODUZIONE

La presente relazione tecnica riporta l'analisi di interferometria radar satellitare volta alla valutazione gli spostamenti superficiali dell'area del Monte Marzola nell'ambito dello studio geologico per il Progetto di Fattibilità Tecnico Economica del Lotto 3 della linea ferroviaria Verona-Fortezza, Circonvallazione di Trento.

Il versante del Monte Marzola, con estensione approssimativa di 27 kmq, è interessato da un'intensa dinamica di versante, da una complessa storia tettonica e da una geomorfologia fortemente influenzata dall'attività glaciale. In particolare, l'area di analisi è interessata da un esteso fenomeno di DGPV (Deformazione Gravitativa Profonda di Versante) la cui scarpata principale, di lunghezza pari a circa 3 km, emerge chiaramente nella parte alta del versante.

Al fine di rendere più facilmente leggibili ed interpretabili i risultati dell'analisi InSAR nel contesto geologico/geomorfologico dell'area di indagine, il versante del Monte Marzola è stato suddiviso in 6 unità morfologiche numerate in ordine crescente procedendo da Nord a Sud (vedi Figura 1).

Per massimizzare le informazioni di spostamento sull'intero versante, densamente vegetato e scarsamente antropizzato tra il crinale e la quota di 500 m slm circa, l'analisi InSAR ha previsto l'elaborazione dei dati Sentinel, tra giugno 2016 e gennaio 2020, mediante la combinazione di due tecniche di processing tra loro complementari:

- **RAINS (Rapid Areal InSAR Survey)**, tecnica di interferometria tradizionale che consente di ottenere informazioni di deformazione anche in aree debolmente vegetate e non urbanizzate. Offre risultati di spostamento qualitativi, confrontabili esclusivamente in termini di ordine di grandezza con quelli rilevabili dagli strumenti a terra. Generalmente la tecnica RAINS (che nel prosieguo del testo sarà denominata 'standard-RAINS') si basa sull'elaborazione di interferogrammi di breve durata (tra 6 e 24 giorni) e consente di individuare aree soggette a spostamenti di velocità comprese indicativamente tra 30 e 500 mm/anno lungo la Linea di Vista del Satellite (LOS).

In questo lavoro, a titolo sperimentale, l'analisi RAINS è stata condotta anche su interferogrammi che abbracciano intervalli temporali particolarmente ampi. Allo scopo di rilevare deformazioni lente, comprese tra 2 e 10 mm/anno lungo la LOS, al limite di quanto rilevabile anche dalle tecniche di InSAR multi-temporali commercialmente diffuse, è stata condotta un'analisi definita 'slow-RAINS' basata su interferogrammi di lunga durata, compresa indicativamente tra 1 e 2 anni, e base-line perpendicolari estremamente ridotte.

- **MT-SBA**, tecnica di interferometria multi-temporale basata su un approccio di tipo SBAS in grado di ricostruire valori di velocità media lungo la LOS e serie storiche di spostamento cumulato, o incrementale, in corrispondenza dei riflettori stabili costituiti tipicamente da edifici, infrastrutture ed affioramenti rocciosi. I risultati ottenibili mediante la tecnica MT-SBA sono numericamente consistenti e confrontabili con quelli rilevabili dagli strumenti a terra. Questa tecnica si presta ad individuare efficacemente aree soggette a velocità di spostamento comprese tra 5 e 100 mm/anno lungo la LOS.

È importante sottolineare come limiti tecnici della tecnica InSAR non consentano di individuare con precisione:

- deformazioni con tasso di spostamento indicativamente inferiore a 5mm/anno. L'approccio sperimentale RAINS-slow è utilizzato per cercare di superare questo limite;
- fenomeni franosi rapidi come colate di detrito e crolli/ribaltamenti;
- fenomeni franosi di lunghezza (o larghezza) inferiore a 200 m, essendo la risoluzione al suolo della tecnica (utilizzando i dati di Sentinel) pari a 5 m in direzione E-W e a circa 20 m in direzione N-S.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

2 INTERFEROMETRIA RADAR SATELLITARE: BASI TEORICHE

L'interferometria radar satellitare si basa sull'allineamento di due scene SAR, di cui la prima è denominata master e la seconda slave, allo scopo di calcolarne la differenza di fase (vedi ad esempio Massonnet & Feigl, 1998, Rosen et al., 2000 e Bürgmann et al., 2000 per descrizioni dettagliate sulla tecnica). La differenza di fase tra l'immagine master e l'immagine slave costituisce un interferogramma.

Oltre all'effettivo spostamento occorso tra le due acquisizioni, parte della differenza di fase comprende contributi di errore dovuti a disturbi atmosferici, topografici e a problemi residui legati al non corretto calcolo dell'unwrapping (srotolamento della fase).

Con Baseline Temporale (BT) di un interferogramma si intende il numero di giorni intercorsi tra l'acquisizione dell'immagine master e quella dell'immagine slave.

La definizione Baseline Perpendicolare (BP) indica la distanza (in metri) lungo il tubo orbitale da cui sono state acquisite rispettivamente l'immagine master e l'immagine slave. Il valore di BP può essere sia positivo che negativo.

Per fornire il massimo grado di informazione circa l'evoluzione spazio-temporale dei processi deformativi nell'area di indagine, l'analisi InSAR ha previsto la combinazione di due tecniche di processing tra loro complementari:

- RAINS (Rapid Areal InSAR Survey), tecnica di interferometria tradizionale di cui sono stati sviluppati due approcci:
 - RAINS-standard;
 - RAINS-slow e
- MT-SBA, tecnica di analisi di tipo multi-temporale.

È importante utilizzare le tecniche di analisi in modo combinato poichè i risultati dell'analisi RAINS consentono di perimetrare le aree soggette a spostamento anche in assenza di riflettori coerenti (principalmente edifici, infrastrutture ed affioramenti rocciosi) ed i dati di MT-SBA sono più precisi da un punto di vista numerico.

2.1 RAINS: Rapid Areal InSAR Survey

La tecnica di elaborazione Rapid Areal InSAR Survey (RAINS), che si basa su strategie di interferometria tradizionale, è in grado di fornire carte di deformazione quasi continue nello spazio anche in zone debolmente vegetate e scarsamente antropizzate.

Il prodotto principale dell'analisi RAINS è costituito da stack interferometrici che consistono nella sovrapposizione di numerosi interferogrammi pre-selezionati sulla base della loro qualità in termini di coerenza. Prima della formazione degli stack, gli interferogrammi di buona qualità sono filtrati e corretti per la riduzione dei disturbi atmosferici e topografici, ed è applicato l'algoritmo di unwrapping per risolvere il problema del salto di fase quando una deformazione si sviluppa rapidamente ed in uno spazio relativamente ridotto.

La durata di uno stack è variabile tra mesi ed anni a seconda del cinematismo del processo indagato e delle esigenze della Committenza.

La sovrapposizione di numerosi interferogrammi per formare uno stack ha due principali finalità:

- ridurre in modo statistico i termini di errore residuo nei singoli interferogrammi;
- consentire l'individuazione di aree soggette a spostamenti persistenti nel tempo (dove per tempo si intende la durata dello stack).

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

Gli stack sono forniti sotto forma di raster in cui ad ogni pixel corrisponde un valore medio di velocità di spostamento, lungo la LOS o downslope, nel periodo di analisi. Si tratta di valori qualitativi, tipicamente espressi in mm/anno, confrontabili esclusivamente in termini di ordine di grandezza con quelli ottenibili dagli strumenti di monitoraggio a terra. Questo è dovuto al fatto che nel periodo a cui si riferisce un determinato stack, gli interferogrammi di buona qualità selezionati possono non essere continui nel tempo, a differenza di quanto avviene nell'analisi MT-SBA. Ad esempio, in RAINS sono eliminati tutti gli interferogrammi decorrelati per la presenza di neve al suolo, o per la rapida crescita della vegetazione nei mesi primaverili.

Nell'analisi RAINS è richiesta una forte componente interpretativa:

- nella fase di selezione degli interferogrammi sulla base della loro qualità in termini di coerenza;
- nella definizione dei parametri di processing (correzioni e filtri);
- nel distinguere segnali riconducibili a processi deformativi da rumore residuo nel dataset.

2.2 RAINS-standard e RAINS-slow

L'analisi RAINS-standard consente di individuare processi deformativi caratterizzati da velocità di spostamento variabili tra 30 e 500 mm/anno lungo la LOS, mediante il processing di interferogrammi con Baseline Temporali (BT) brevi, comprese tra 6 e 24 giorni, e Baseline Perpendicolari (BP) estese tra -100 e 100 metri (Tabella 1). Interferogrammi con BP maggiori del range definito sono spesso affetti da errori topografici che inquinano la qualità del segnale InSAR.

Essendo l'area di indagine interessata da spostamenti estremamente ridotti, non rilevabili o solo parzialmente rilevabili mediante la tecnica RAINS-standard, è stato sviluppato un secondo approccio di analisi definito RAINS-slow. In RAINS-slow sono selezionati interferogrammi di lunga durata, con BT comprese tra 342 e 384 giorni e tra 708 e 750 giorni e BP molto ridotte, variabili tra -10 e 10 metri (Tabella 1).

Maggiore è la BT dell'interferogramma, minore sarà la qualità in termini di coerenza del segnale InSAR, poiché più aumenta il tempo tra un'acquisizione e quella successiva più varieranno le caratteristiche di riflessività dell'area, ad esempio a causa dello sviluppo della vegetazione, delle variate condizioni atmosferiche, di spostamenti troppo intensi rispetto alla capacità di osservazione della tecnica. Per minimizzare questo problema, è necessario considerare interferogrammi caratterizzati da master (prima acquisizione) e slave (seconda acquisizione) all'interno della stessa stagione.

A BT maggiori si associano BP ridotte per massimizzare, per quanto possibile, la qualità degli interferogrammi in termini di coerenza.

La copertura spaziale dei risultati ottenuti attraverso RAINS-slow è minore di quella risultante dall'analisi RAINS poiché le zone caratterizzate da elevata coerenza in interferogrammi di lunga durata (indicativamente 1-2 anni) sono poco diffuse.

I risultati migliori con la tecnica RAINS si ottengono nei mesi autunno-invernali, quando la vegetazione è più rada. Questo vale in assenza di neve, in quanto la copertura nevosa al suolo rende gli interferogrammi totalmente decorrelati.

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

Tabella 1: Caratteristiche delle due tecniche di analisi RAINS, RAINS-standard e RAINS-slow, in termini di Baseline Temporale (BT) e Baseline Perpendicolare (BP) degli interferogrammi considerati nell'analisi, oltre ai ranges di velocità di spostamento rilevabili.

Tipologia Analisi	BT (giorni)	BP (metri)	Range di velocità (mm/anno) rilevabili lungo la LOS
RAINS-standard	6÷24	-100÷100	$30 \leq v \leq 500$
RAINS-slow	342÷384	-10÷10	$2 \leq v \leq 10$
	708÷750		

2.3 MT-SBA: analisi InSAR multi-temporale

Per quanto riguarda le tecniche di analisi multi-temporale, generalmente si distinguono due famiglie di elaborazione: la prima denominata Persistent Scatterer Interferometry o semplicemente PS-InSAR (vedi ad es. Ferretti et al., 2001; Hooper et al., 2004) e la seconda Small Baseline interferometria (Berardino et al., 2002; Schmidt & Burgmann, 2003; Hooper, 2008). Le due tecniche differiscono nel modo in cui vengono combinati gli interferogrammi, ma entrambe mirano a selezionare pixel caratterizzati da un'elevata qualità del segnale, che rappresentano riflettori stabili sul terreno.

Nel presente lavoro è stata utilizzata una tecnica multi-temporale alla quale ci riferiamo come MT-SBA appartenente alla famiglia di 'Small Baseline Interferometria' i cui dettagli tecnici sono descritti, tra gli altri, in Hooper, 2008. Questa tecnica considera ogni immagine satellitare sia come master che come slave (approccio multi-master). In questo modo, rispetto ad un approccio single-master, è possibile formare un numero molto maggiore di interferogrammi, ridurre sia la BP che la BT degli stessi aumentando la qualità del dato, e quindi risolvere più accuratamente gli errori legati a disturbi atmosferici e topografici. L'approccio SBAS consente inoltre di rilevare trend di spostamento non lineari nel tempo, come nel caso di accelerazioni di un fenomeno franoso a seguito di un evento di precipitazione intenso.

MT-SBA permette di ricostruire con precisione serie storiche di spostamento, cumulato o incrementale, e velocità medie di spostamento, lungo la LOS o downslope, in corrispondenza di riflettori di elevata qualità, principalmente edifici ed infrastrutture. In particolare, è possibile rilevare accuratamente aree soggette a spostamenti di velocità compresa tra 5 e 100 mm/anno.

I risultati dell'analisi MT-SBA richiedono una minore componente interpretativa rispetto a quanto visto per l'analisi RAINS poiché si riferiscono a riflettori stabili e chiaramente identificabili, la numerosità di interferogrammi utilizzati nell'analisi MT-SBA è maggiore, e ci si riferisce ad un periodo continuo nel tempo.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

3 BREVE INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO DELL'AREA DI INDAGINE

Il versante del Monte Marzola presenta un'estensione di circa 27 kmq, ed è caratterizzato da una storia tettonica complessa, oltre che da una morfologia di superficie fortemente influenzata dall'attività glaciale e da un'intensa dinamica di versante. Per facilitare la comprensione dei risultati dell'analisi InSAR e della loro interpretazione nel contesto geologico e geomorfologico dell'area di indagine, il versante del Monte Marzola è stato suddiviso in 6 'Unità Morfologiche' procedendo da N verso S (Figura 1). Tale distinzione è stata effettuata sia sulla base delle informazioni cartografiche disponibili (vedasi relazione geologica e suoi allegati; doc. IB0Q3AR69RGGE0001001A) che in relazione alla morfologia rilevabile dal modello digitale del terreno.

Il Monte Marzola è interessato da un esteso fenomeno di DGPV la cui scarpata principale, che si sviluppa per circa 3 km di lunghezza, emerge chiaramente dall'analisi delle foto aree disponibili (in particolare Google Earth) così come numerosi trench cartografati in Figura 1, la DGPV principale interessa le Unità Morfologiche 2,3,4 e, parzialmente, 5.

Tutte le informazioni cartografiche rappresentate in Figura 1, e descritte nei paragrafi successivi, derivano dalla Carta Geologico-Geomorfologica allegata al progetto di fattibilità tecnico ed economica del Lotto 3 'Circonvallazione di Trento' dell'asse ferroviario Monaco-Verona (IB0Q3AR69G4GE0001001A; IB0Q3AR69G4GE0003001A).

Si segnala che i depositi di frana cartografati non sono interferenti con le gallerie in progetto.

Unità Morfologica 1

Tra le quote di 1000 e 650 m slm circa è cartografato un deposito di frana quiescente che interessa le località Brusadi e Piatte. A quote inferiori, in corrispondenza della località Borino, sono rappresentati depositi alluvionali. Più a valle, dalle località Santè, Pantè e Graffiano fino a Mesiano sul fondovalle Fersina, quindi con intersezione con il tracciato della galleria, sono indicati dei depositi glaciali.

Unità Morfologica 2

Nella parte alta del versante sono presenti depositi di frana quiescente e depositi di versante di limitata estensione spaziale. A valle di Busa delle Piatte, a quote inferiori a 800 m slm circa, sono cartografati depositi di frana quiescente di estensione maggiore, tra cui quello che interessa l'abitato di Casotti di Povo (0.4 kmq) oltre ad un deposito di frana stabilizzata. L'Unità Morfologica 2 è interessata dal processo di DGPV, come si può vedere dai numerosi trench cartografati.

Unità Morfologica 3

Questa Unità Morfologica è dominata dalla presenza di un deposito di frana attiva che si sviluppa a valle di Doss dei Corvi-Crozzi Rossi per una lunghezza complessiva di circa 2.5 km tra le quote di 1350 e 490 m slm comprendendo Pra Marquat e la Val Grande. Nella parte bassa del versante, oltre a depositi alluvionali, sono cartografati depositi di frana stabilizzata. L'Unità Morfologica 3 è interessata dal processo di DGPV, come si può vedere dai numerosi trench.

Unità Morfologica 4

In corrispondenza dell'Unità Morfologica 4 è cartografato un deposito di frana attiva che si sviluppa tra le quote di 1350 e 1220 m slm, per una larghezza di circa 2 km, interessando Crozzi dell'Altar. Tra le quote di 1200 e 700 m slm circa, si susseguono una serie di depositi di versante e depositi glaciali. Più a valle, è cartografato un esteso deposito di frana stabilizzato, di larghezza pari all'intera Unità Morfologica, che interessa il Piano dei Bindesi. Anche l'Unità Morfologica 4 è interessata dal processo di DGPV, come si può vedere dai numerosi trench.

Unità Morfologica 5

Nella parte alta dell'Unità Morfologica 5, che è coinvolta dal fenomeno di DGPV principale, sono cartografati vari corpi di frana, alcuni dei quali stabilizzati ed altri quiescenti, come quello a NE di Crozzi d'Agola e quello a SE di Maso Panizza. A valle della S.S. 349 della D'Assa, alla quota di circa 400 m slm, è cartografato un esteso deposito di frana stabilizzata (pari a circa 1.5 kmq) che interseca planimetricamente il tracciato della galleria.

Unità Morfologica 6

L'Unità Morfologica 6 è interessata da estesi depositi di frana stabilizzata soprattutto a quote comprese tra 800 e 350 m slm di quota, tra cui la frana della Val Sorda. Sono inoltre cartografati vari depositi glaciali e depositi legati a conoidi alluvionali e debris flow, di cui uno interseca planimetricamente il tracciato della galleria.

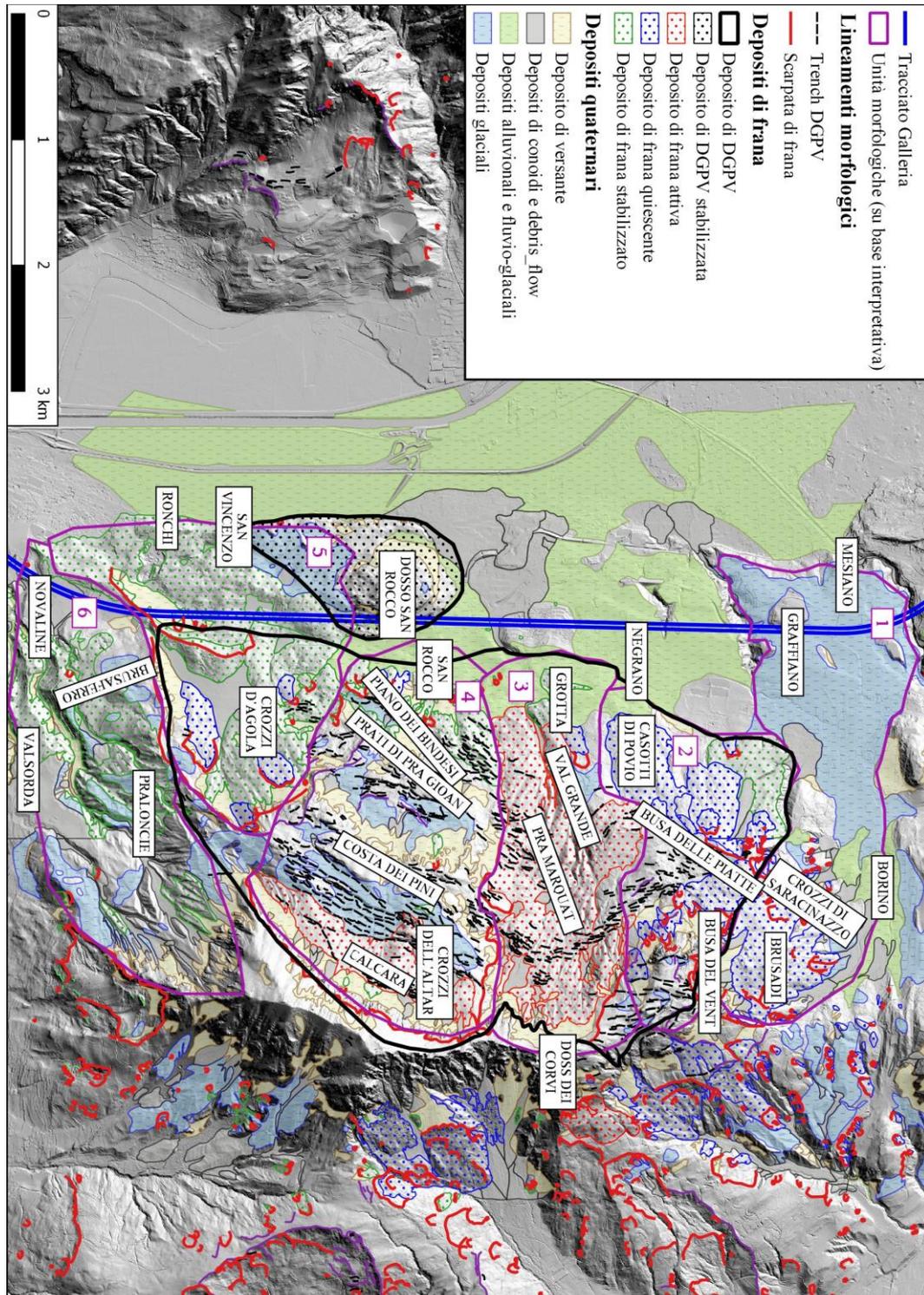


Figura 1: Carta Geomorfologica dell'area di indagine (tratta dalla Carta Geologica della Provincia autonoma di Trento alla scala 1:10.000 e modificata).

4 ANALISI INSAR DEL MONTE MARZOLA

4.1 Dataset InSAR

L'analisi InSAR ha previsto il processing dei dati derivati dal Sistema Satellitare Sentinel per il periodo compreso tra giugno 2016 e febbraio 2020. Le acquisizioni prima di giugno '16 risultano piuttosto irregolari.

L'area di interesse è coperta da un dataset in geometria di volo ascendente (orbita 117, subswath 2) e da uno in geometria di volo discendente (orbita 168, subswath 1), come si può vedere in Figura 2.

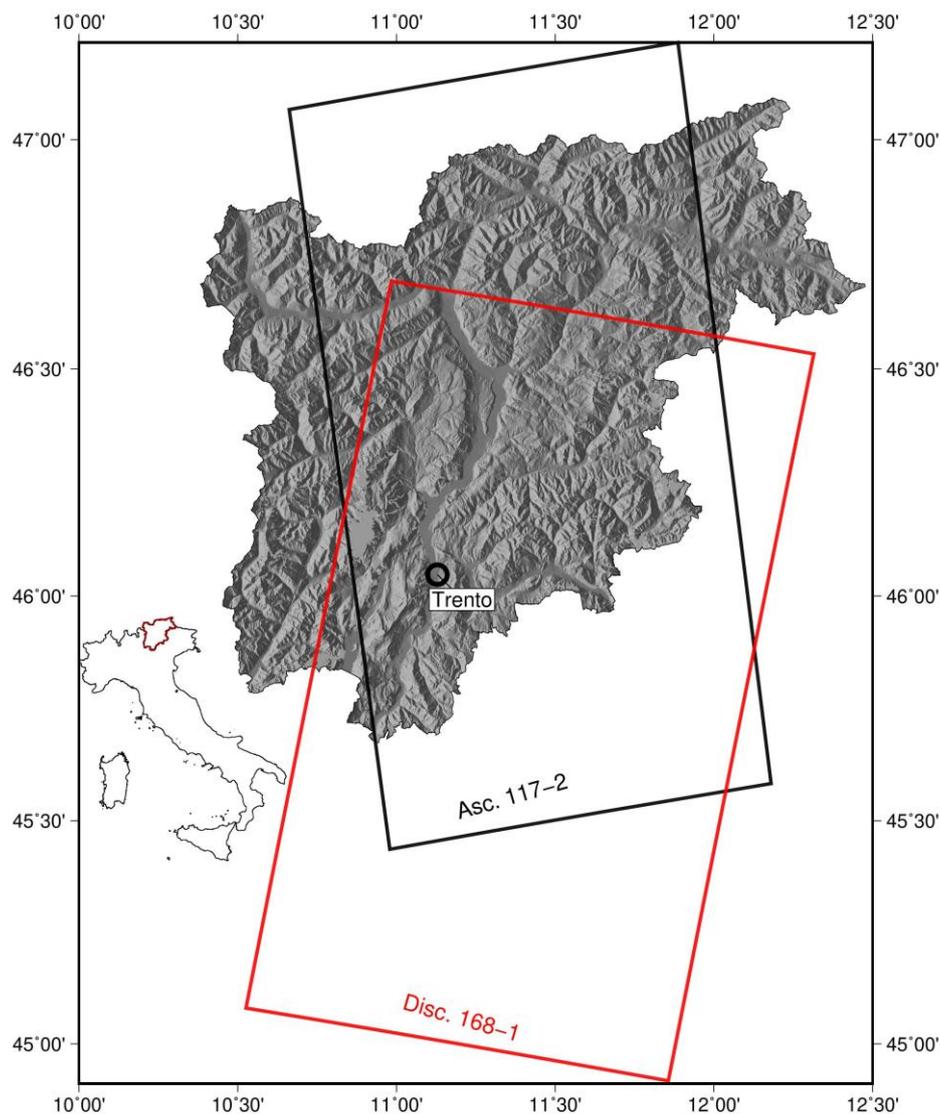


Figura 2: L'area di interesse è coperta da due orbite satellitari, una in geometria di volo ascendente (117, subswath 2), ed una in geometria di volo discendente (168, subswath 1).

Per quanto riguarda l'analisi RAINS-standard, sono stati formati interferogrammi con Baseline Temporale (BT) compresa tra 6 e 24 giorni e Baseline Perpendicolare (BP) variabile tra -100 e 100 m, per un

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

totale di circa 650 interferogrammi per il dataset ascendente (orbita 117) e circa 1000 per il dataset discendente (orbita 168). A seguito dell'analisi dei singoli interferogrammi sulla base della loro qualità in termini di coerenza, ne sono stati selezionati circa 100 per entrambi i dataset.

Per ciò che concerne l'analisi RAINS-slow, sono stati creati interferogrammi con BT compresa tra 342 e 384 giorni e tra 708 e 750 giorni e con BP variabile tra -10 e 10 giorni. Circa 70 interferogrammi di buona qualità sono stati selezionati sia in geometria di volo ascendente che discendente.

Per l'analisi MT-SBA sono stati formati interferogrammi con durata fino a 90 giorni. Nel dettaglio, sono stati formati 454 interferogrammi in geometria di volo ascendente e 469 in discendente. La selezione degli interferogrammi in questo caso è meno restrittiva ed è effettuata sulla base di un valore soglia di rumore considerato accettabile.

Dopo vari test, l'area di riferimento è stata selezionata nella zona industriale ad Ovest di Villazzano.

4.2 Risultati analisi InSAR

In questa sezione sono illustrati i risultati ottenuti mediante le tecniche InSAR RAINS- standard, RAINS-slow e MT-SBA.

Per ognuna di queste tecniche, ad un'immagine riassuntiva dei risultati ottenuti sull'intero versante del Monte Marzola, per dataset ascendente e discendente, seguiranno zoom per gruppi di Unità Morfologiche:

- Unità Morfologiche 1 e 2;
- Unità Morfologiche 3 e 4;
- Unità Morfologiche 5 e 6.

Dato che l'area di interesse espone ad Ovest, spostamenti diretti lungo la massima pendenza del versante, o comunque caratterizzati da una componente orizzontale dominante, dovrebbero risultare:

- in avvicinamento (colori freddi e valori negativi) in geometria di volo ascendente;
- in allontanamento (colori caldi e valori positivi) in geometria di volo discendente.

Aree soggette a cedimenti risulteranno come allontanamento (colori caldi e valori positivi) sia in geometria di volo ascendente che discendente.

Tipicamente, in versanti esposti ad Ovest il dataset rilevato in geometria di volo discendente offre risultati maggiormente attendibili. In un ambiente alpino come quello in esame, in cui le pendenze sono a tratti elevate ed alcuni processi deformativi coinvolgono anche blocchi di grandi dimensioni soggetti a spostamenti diretti lungo il versante, oppure con componente prevalente verticale, la situazione è maggiormente complessa. La presenza di vegetazione, specie se fitta e di alto fusto, complica l'analisi introducendo una fonte di rumore residuo difficilmente risolvibile.

4.2.1 Risultati analisi RAINS-standard

L'analisi RAINS-standard consente di rilevare aree soggette a deformazioni caratterizzate da velocità di spostamento tipicamente comprese tra 30 e 500 mm/anno lungo la LOS. Valori di velocità di spostamento, lungo la LOS, inferiori a 30 mm/anno sono difficilmente distinguibili dal rumore residuo legato ad errori atmosferici e topografici non risolvibili mediante l'applicazione di filtri e correzioni ad hoc.

Geometria di volo ascendente

In Figura 3 è rappresentato lo stack interferometrico complessivo ottenuto mediante la tecnica RAINS-standard in geometria di volo ascendente (orbita 117). Aree soggette a deformazioni con velocità di spostamento $>$ di 30 mm/anno, lungo la LOS, risulterebbero in colore blu/violaceo (avvicinamento).

Tali valori non sono mai stati rilevati in corrispondenza del tracciato della galleria. Sono stati registrati esclusivamente in zone di limitata estensione lungo il versante del Monte Marzola principalmente in corrispondenza di alcuni depositi glaciali o di trench riconducibili alla DGPV principale. Alcuni esempi sono nella parte alta dell'Unità Morfologica 2, nella parte centrale dell'Unità Morfologica 4 (Figura 7), al limite tra le Unità Morfologiche 4 e 5 (Figura 9) in corrispondenza di un deposito di frana stabilizzato (Figura 1), e nella parte alta dell'Unità Morfologica 6 (Figura 9).

Geometria di volo discendente

In Figura 4 è rappresentato lo stack interferometrico complessivo ottenuto mediante la tecnica RAINS-standard in geometria di volo discendente (orbita 168). Aree soggette a deformazioni con velocità di spostamento $>$ di 30 mm/anno, lungo la LOS, dovrebbero risultare in colore rosso (allontanamento). L'area soggetta a spostamenti maggiori, seppure si tratti di valori di velocità ridotti, si trova in corrispondenza di depositi glaciali e di trench connessi alla DGPV principale nell'Unità Morfologica 4 (Figura 8).

Un segnale in allontanamento lungo la LOS con velocità di poco superiori a 30 mm/anno è stato rilevato a NE di Gabbiolo (Unità Morfologica 2) in corrispondenza di un deposito di frana stabilizzato (Figura 1).

Un ulteriore segnale in allontanamento con velocità $>$ 30 mm/anno lungo la LOS è stato rilevato nell'Unità Morfologica 6 (Figura 10) in corrispondenza di un versante acclive con esposizione a S-SO. Seppure nella Carta Geomorfologica della Provincia Autonoma di Trento (Figura 1) non siano indicati depositi quaternari, l'analisi del modello digitale del terreno mostra la presenza di alcuni blocchi che potrebbero essere stati soggetti a fenomeni gravitativi.

Lungo il tracciato della galleria non sono state rilevate aree soggette a deformazione con velocità maggiore di 30 mm/anno lungo la LOS.

Nella parte bassa del versante, come in corrispondenza degli abitati di San Rocco e Grotta, sono visibili delle aree soggette ad un debole allontanamento lungo la LOS. Si tratta di valori inferiori a 30 mm/anno e di conseguenza è difficile scindere l'effettivo spostamento da fonti di errore residuale (legati ad atmosfera e topografia).

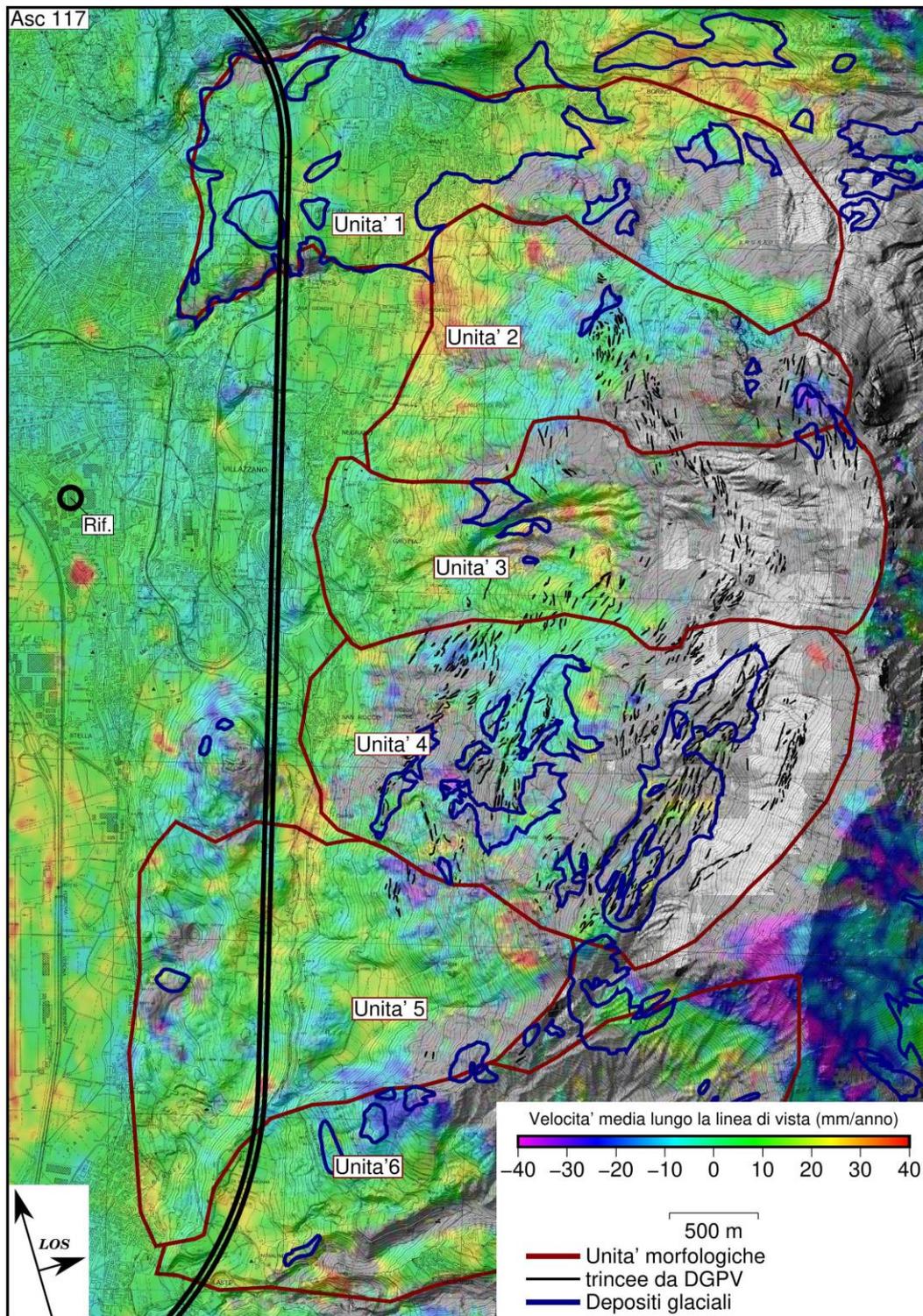


Figura 3: Risultato analisi RAINs-standard in geometria di volo ascendente (orbita 117) per l'intero versante del Monte Marzola. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

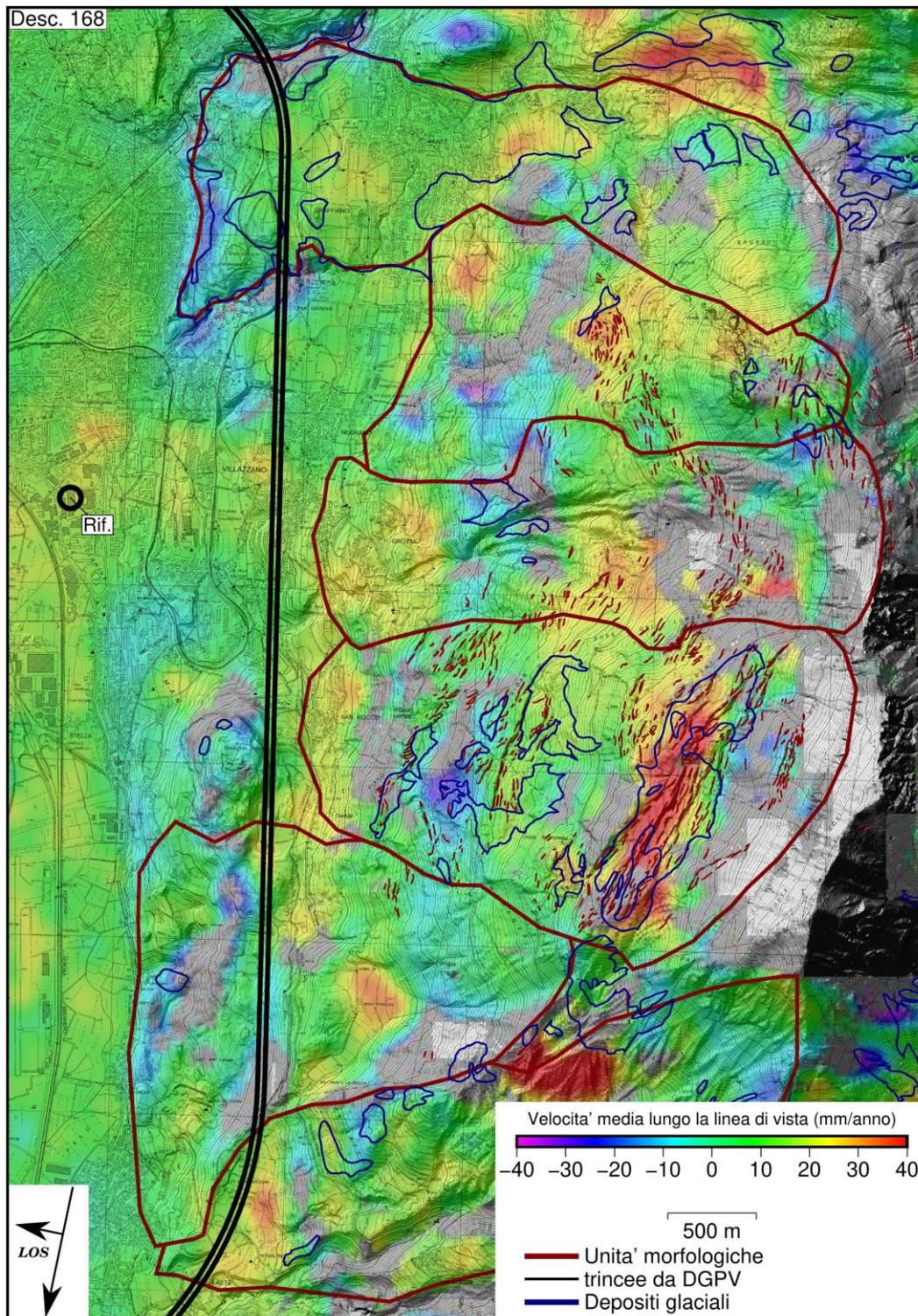


Figura 4: Risultato analisi RAINs-standard in geometria di volo discendente (orbita 168) per l'intero versante del Monte Marzola. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

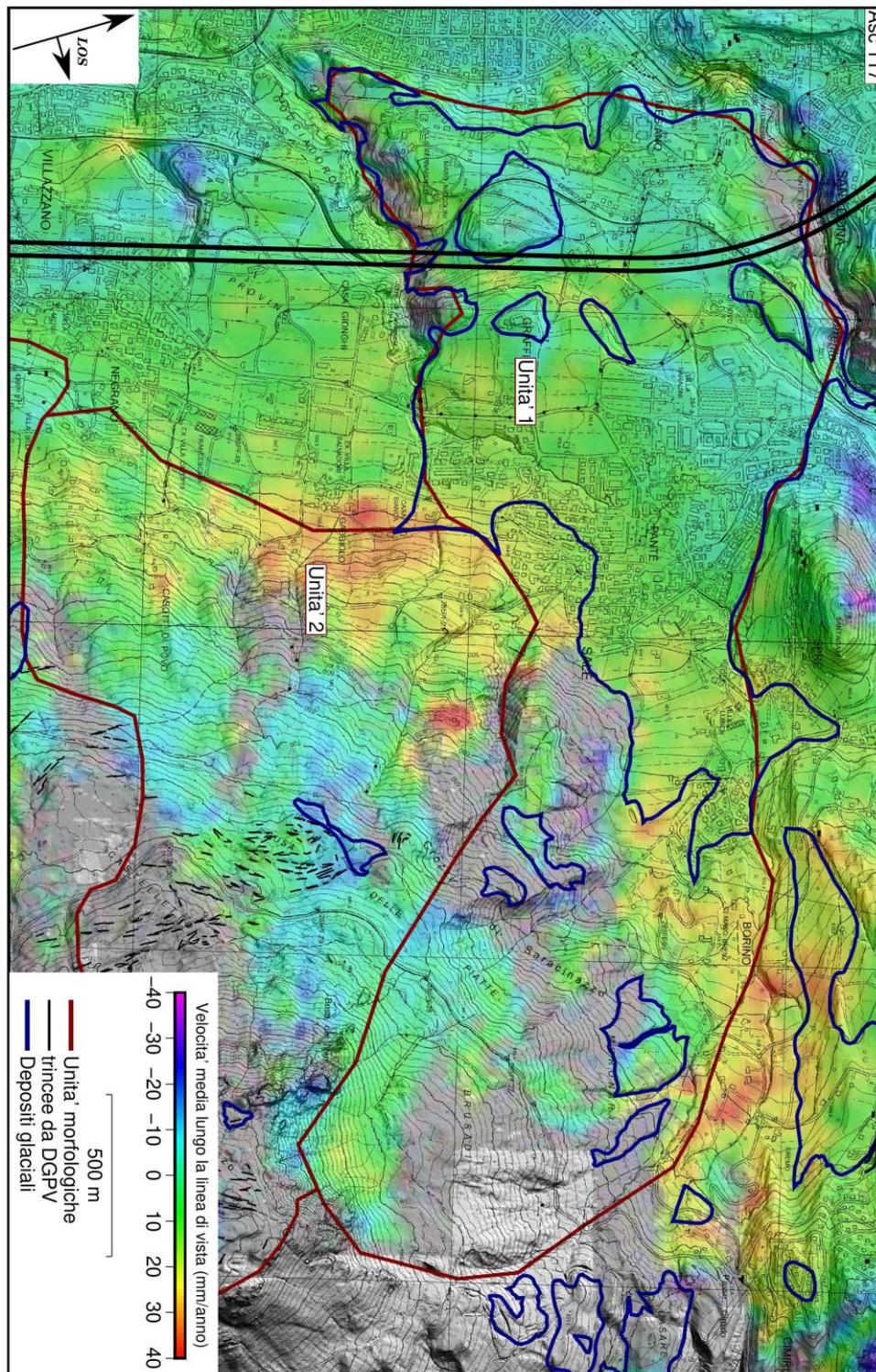


Figura 5: Risultato analisi RAINs-standard in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 1 e 2. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

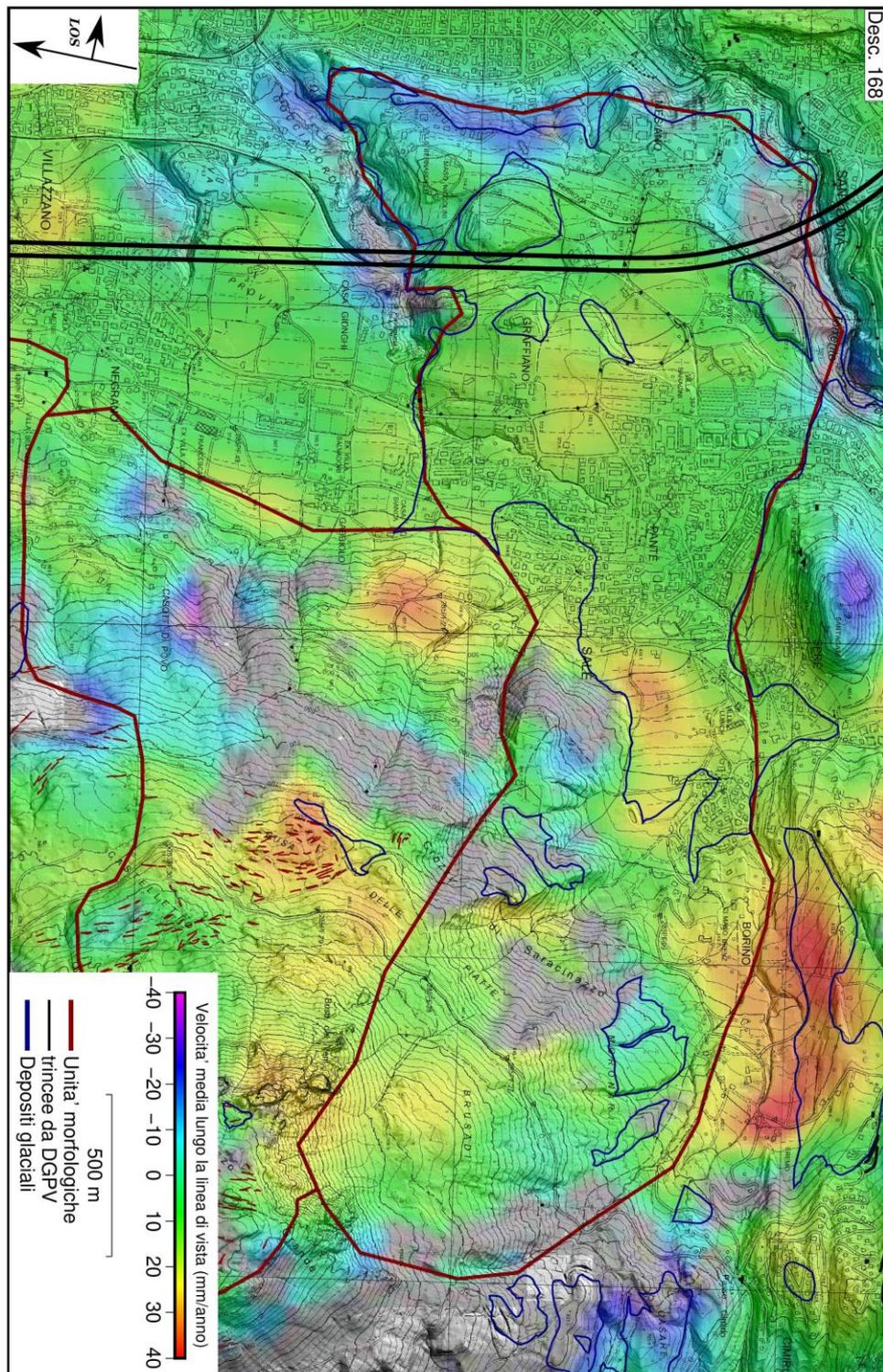


Figura 6: Risultato analisi RAINs-standard in geometria di volo discendente (orbita 168) in corrispondenza delle Unità Morfologica 1 e 2. Ad ogni pixel dello stack è associato un calore di velocità, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

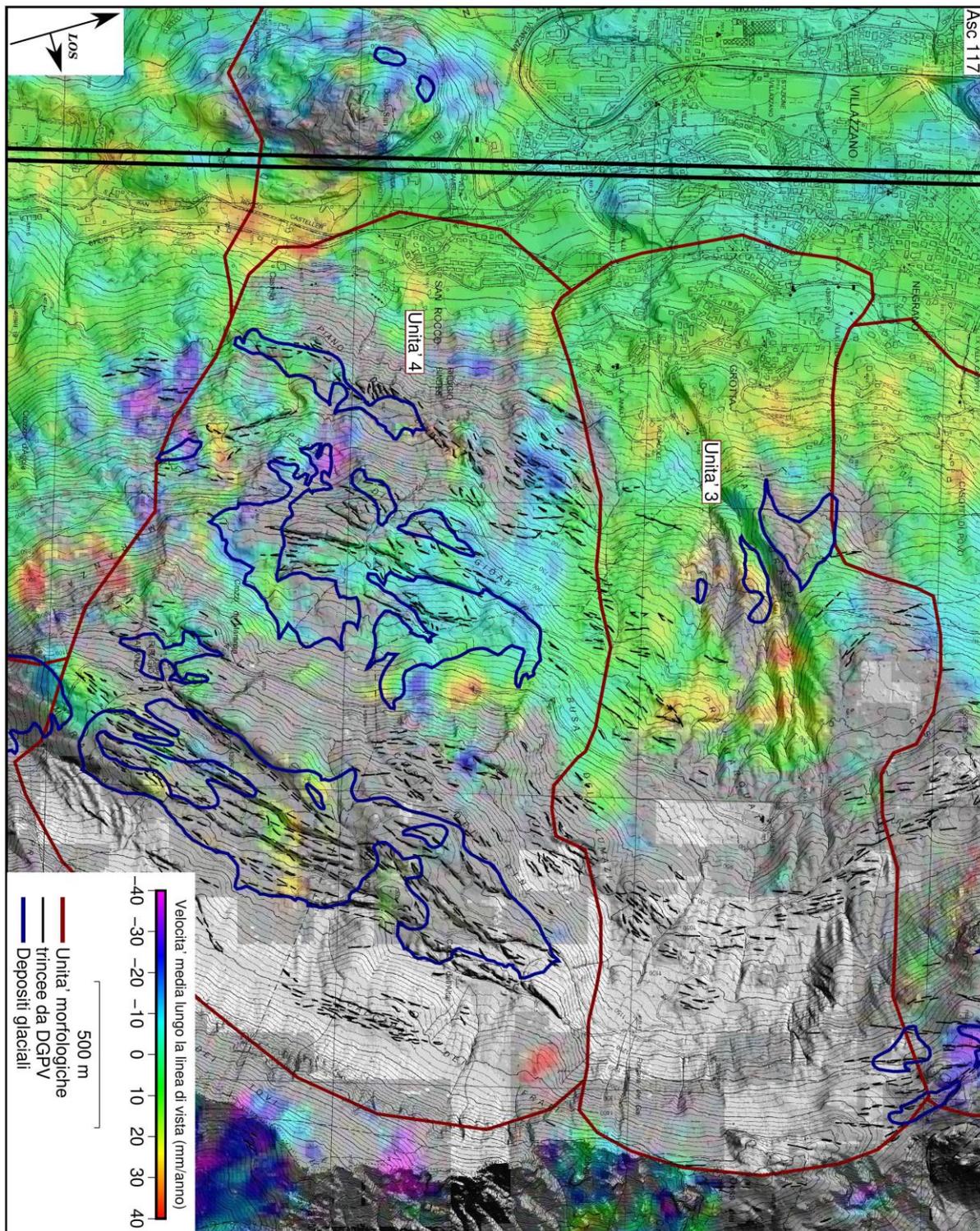


Figura 7: Risultato analisi RAINs-standard in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 3 e 4. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016- febbraio 2020.

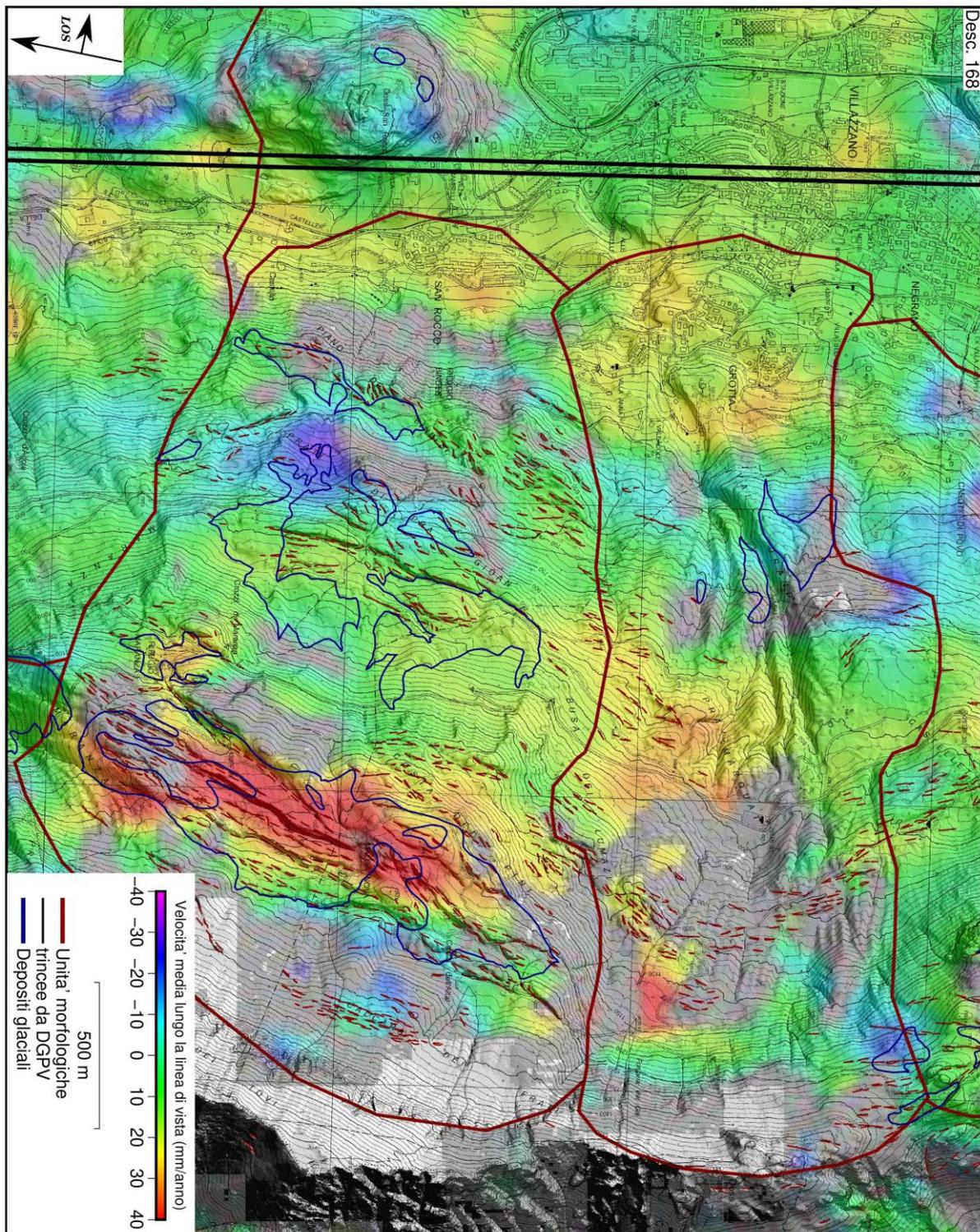


Figura 8: Risultato analisi RAINs-standard in geometria di volo discendente (orbita 168) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 3 e 4. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

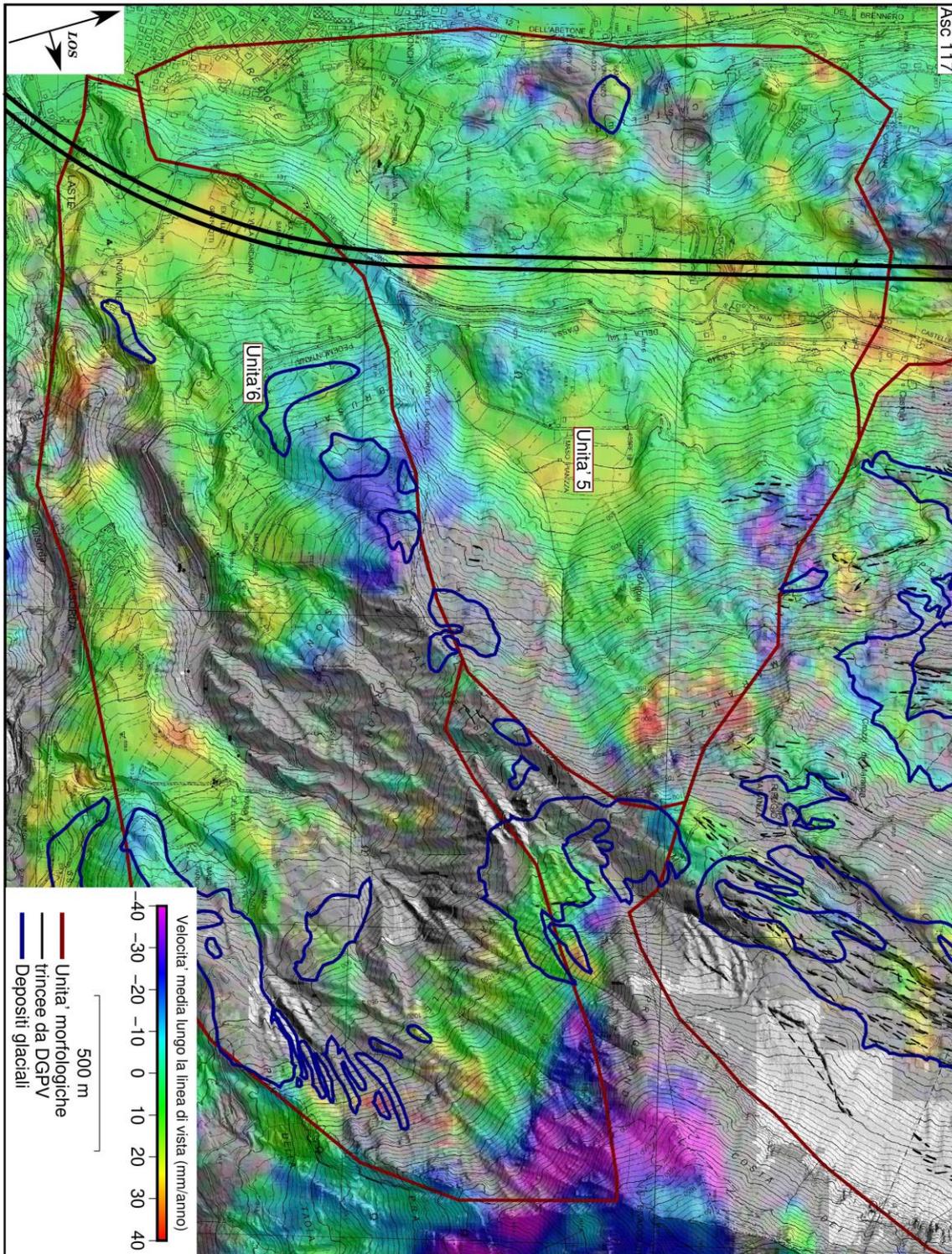


Figura 9: Risultato analisi RAINs-standard in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 5 e 6. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

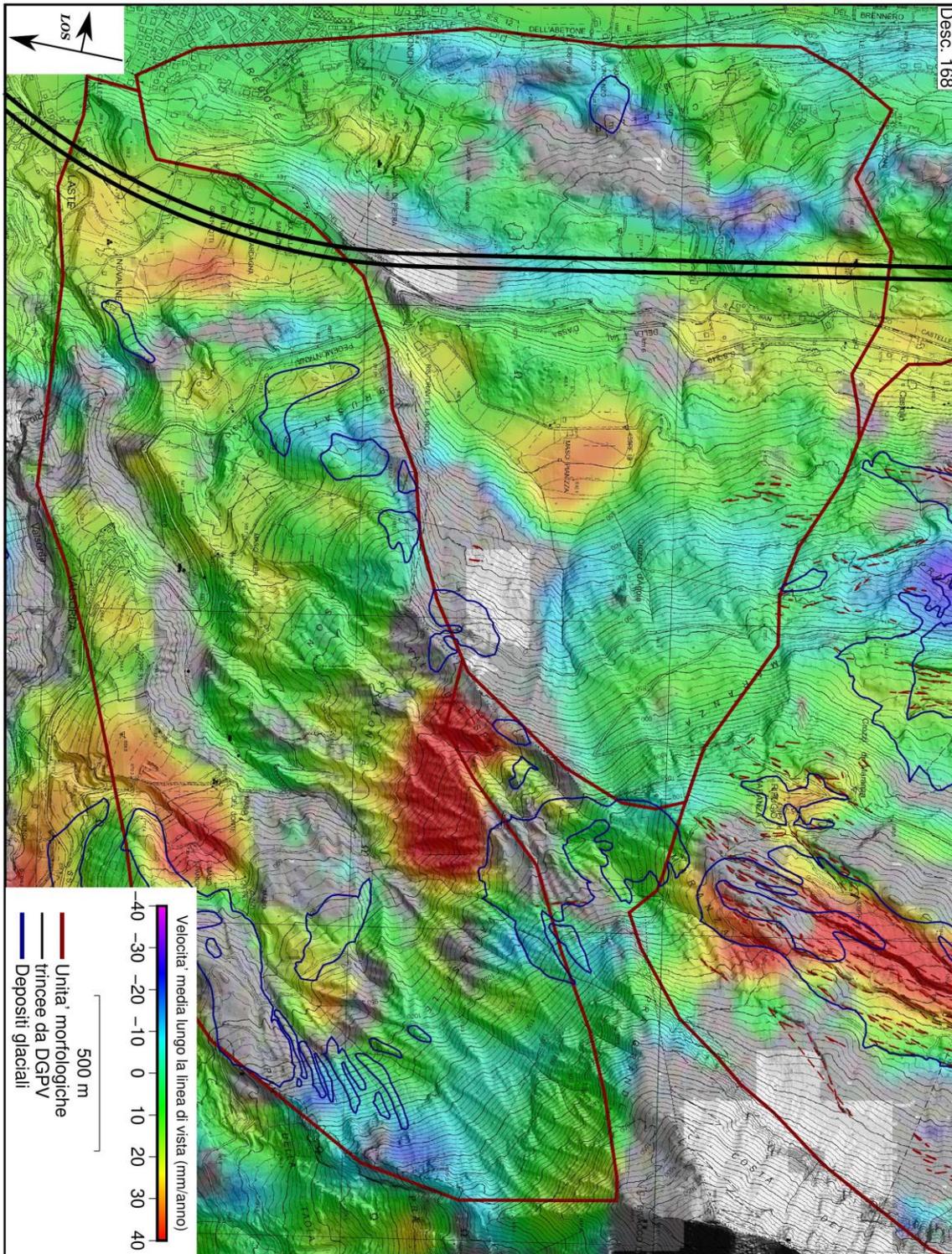


Figura 10: Risultato analisi RAINs-standard in geometria di volo discendente (orbita 168) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 5 e 6. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

4.2.2 Risultati analisi RAINS-slow

La tecnica di processing RAINS-slow rappresenta un'evoluzione di RAINS-standard. Quest'ultima tipologia di analisi, infatti, ha evidenziato come il versante del Monte Marzola non sia interessato da spostamenti con velocità comprese tra 30 e 40 mm/anno lungo la LOS se non in aree di limitata estensione distanti dal tracciato della galleria (Figura 3 e Figura 4).

RAINS-slow nasce dall'esigenza di individuare aree in deformazione caratterizzate da velocità di spostamento molto ridotto, compreso tra 2 e 10 mm/anno lungo la LOS.

Questo è possibile considerando esclusivamente gli interferogrammi di durata (Baseline Temporale, BT) all'incirca di un anno o due anni e Baseline Perpendicolare (BP) ridotta (vedi Paragrafo 2.1). Maggiore è la Baseline Temporale (BT) considerata, minore è la velocità di spostamento potenzialmente rilevabile. A BT grandi sono tipicamente associate Baseline Perpendicolari (BP) piccole allo scopo di ridurre al massimo l'effetto della decorrelazione.

Gli stack ottenuti mediante RAINS-slow (Figura 11 e Figura 12) presentano una copertura spaziale inferiore rispetto ai risultati forniti dalla tecnica RAINS-standard, soprattutto per quanto concerne il dataset ascendente (Figura 3). Questo è dovuto al fatto che, lungo il versante, sono poche le zone caratterizzate da buona qualità in termini di coerenza quando gli interferogrammi hanno durata approssimativa di 1 o 2 anni.

Geometria di volo ascendente

In Figura 11 è riportato lo stack ottenuto in geometria di volo ascendente (117) attraverso la tecnica RAINS-slow, per il periodo compreso tra giugno 2016 e febbraio 2020.

Come si può notare, la parte bassa dell'Unità Morfologica 3, a quote inferiori di 500 m slm circa in corrispondenza della quale sono cartografati depositi di frana attiva e stabilizzata (Figura 1), oltre a depositi alluvionali, risulta interessata da un lieve avvicinamento lungo la LOS con velocità di spostamento comprese tra 4 e 7 mm/anno (vedi anche Figura 15).

Ad eccezione di questa zona e di parte dell'Unità Morfologica 1, l'area di analisi risulta priva di dati a causa della selezione restrittiva del dataset per la ridotta coerenza degli interferogrammi di lunga durata (Figura 13, Figura 17).

Geometria di volo discendente

In Figura 12 è riportato lo stack ottenuto in geometria di volo discendente (168) attraverso la tecnica RAINS-slow per il periodo compreso tra giugno 2016 e febbraio 2020.

La parte bassa dell'Unità Morfologica 3 risulta in questo caso in leggero allontanamento lungo la LOS, con velocità comprese tra 4 e 7 mm/anno (Figura 16) in analogia a quanto visto per il dataset ascendente (Figura 11, Figura 15). L'estensione di quest'area è maggiore in geometria di volo discendente, coinvolgendo una porzione dell'Unità Morfologica 2 in corrispondenza del deposito di frana quiescente di Casotti di Povo (Figura 14).

Altre aree soggette a debole allontanamento lungo la LOS risultano quella in prossimità di Busa del Vent, al limite tra le Unità Morfologiche 1 e 2, nella parte alta del versante (Figura 14), ed in corrispondenza dei trench legati alla DPGV nell'Unità Morfologica 4, nella stessa zona rilevata attraverso RAINS-standard (Figura 16, Figura 8).



ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA

**ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO
QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA**

LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO

RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA
RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati
Sentinel 2016-20)

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IB0Q	3A	R69RH	GE 00 05 001	A	24 di 51

Inoltre, valori minori di velocità di spostamento, compresi tra 2 e 4 mm/anno lungo la LOS, sono stati rilevati in corrispondenza di una limitata porzione del deposito di frana stabilizzata, che si estende dai Crozzi d'Agola sino a Cava Ronchi, all'interno dell'Unità Morfologica 5 (Figura 1, Figura 18).

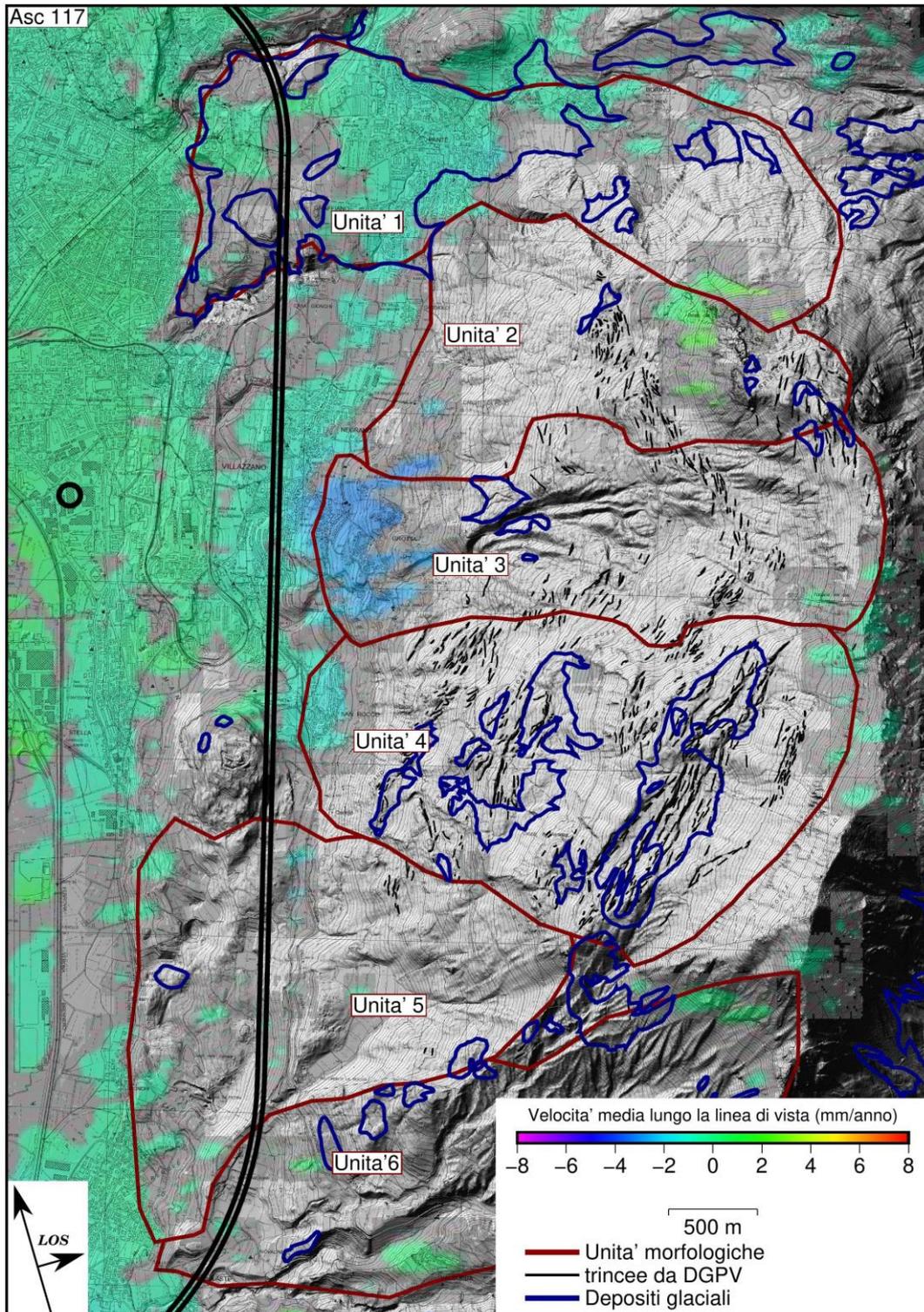


Figura 11: Risultato analisi RAINS-slow in geometria di volo ascendente (orbita 117). Adogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

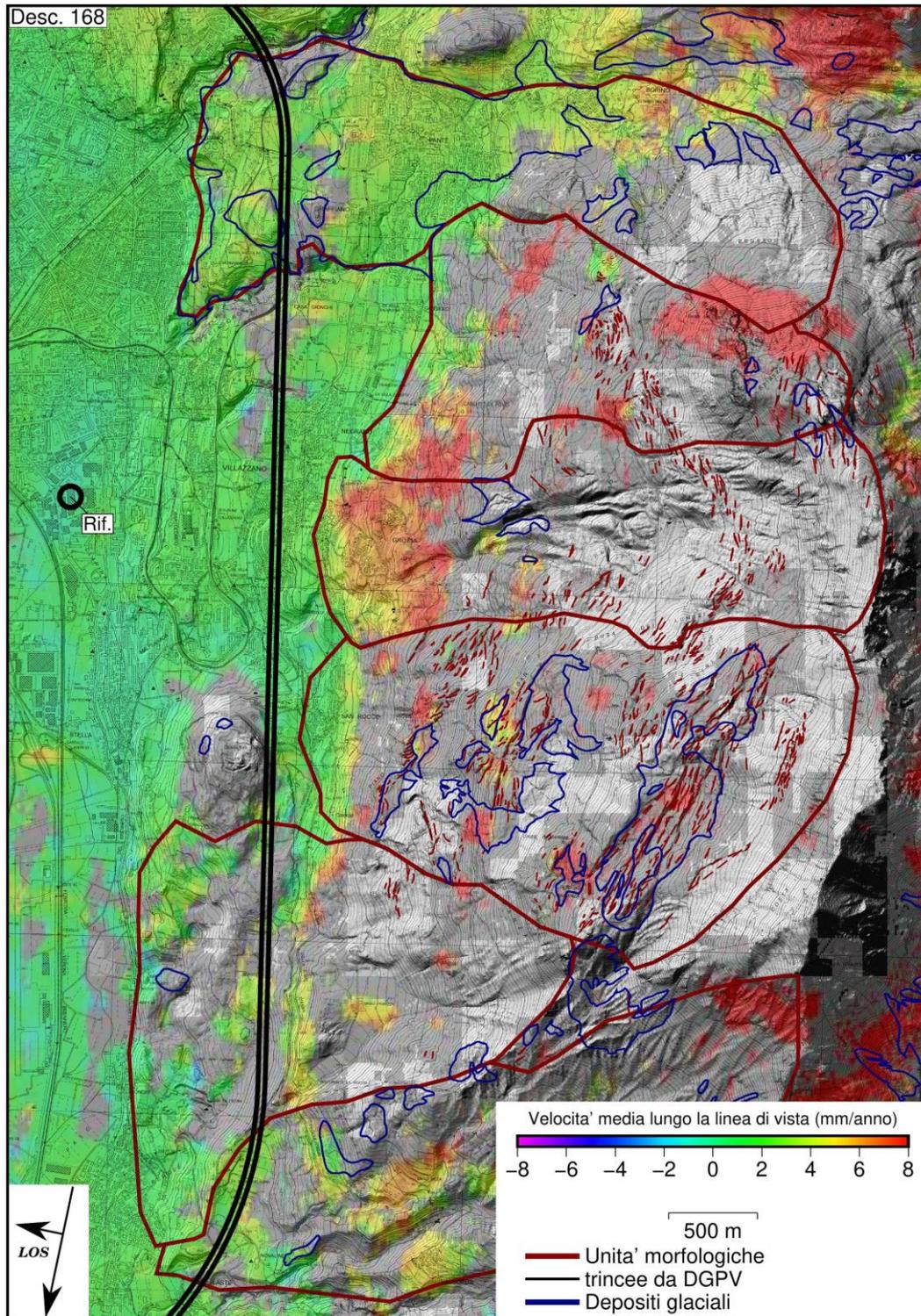


Figura 12: Risultato analisi RAINs-slow in geometria di volo ascendente (orbita 117). Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

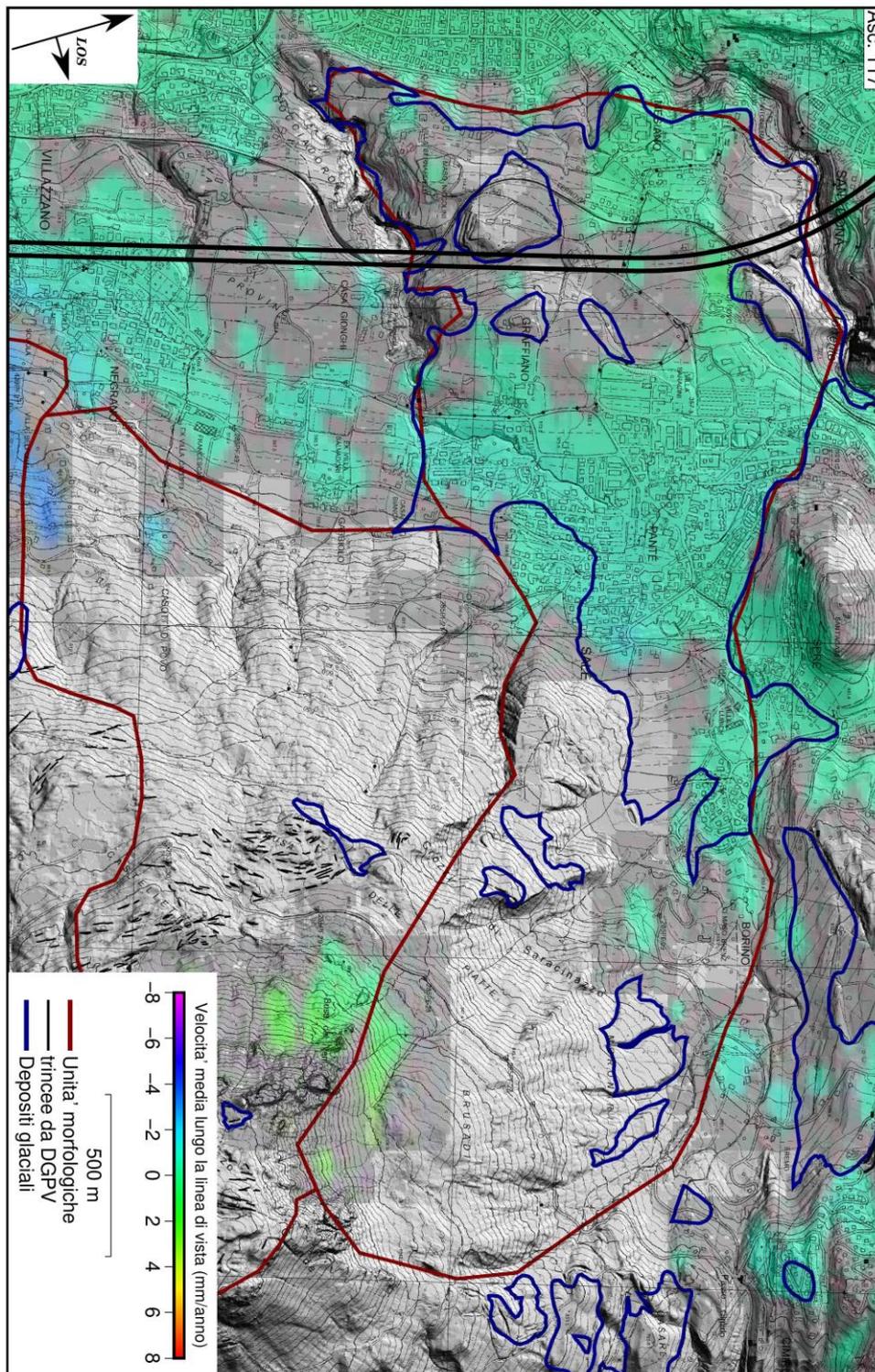


Figura 13: Risultato analisi RAINs-slow in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 1 e 2. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

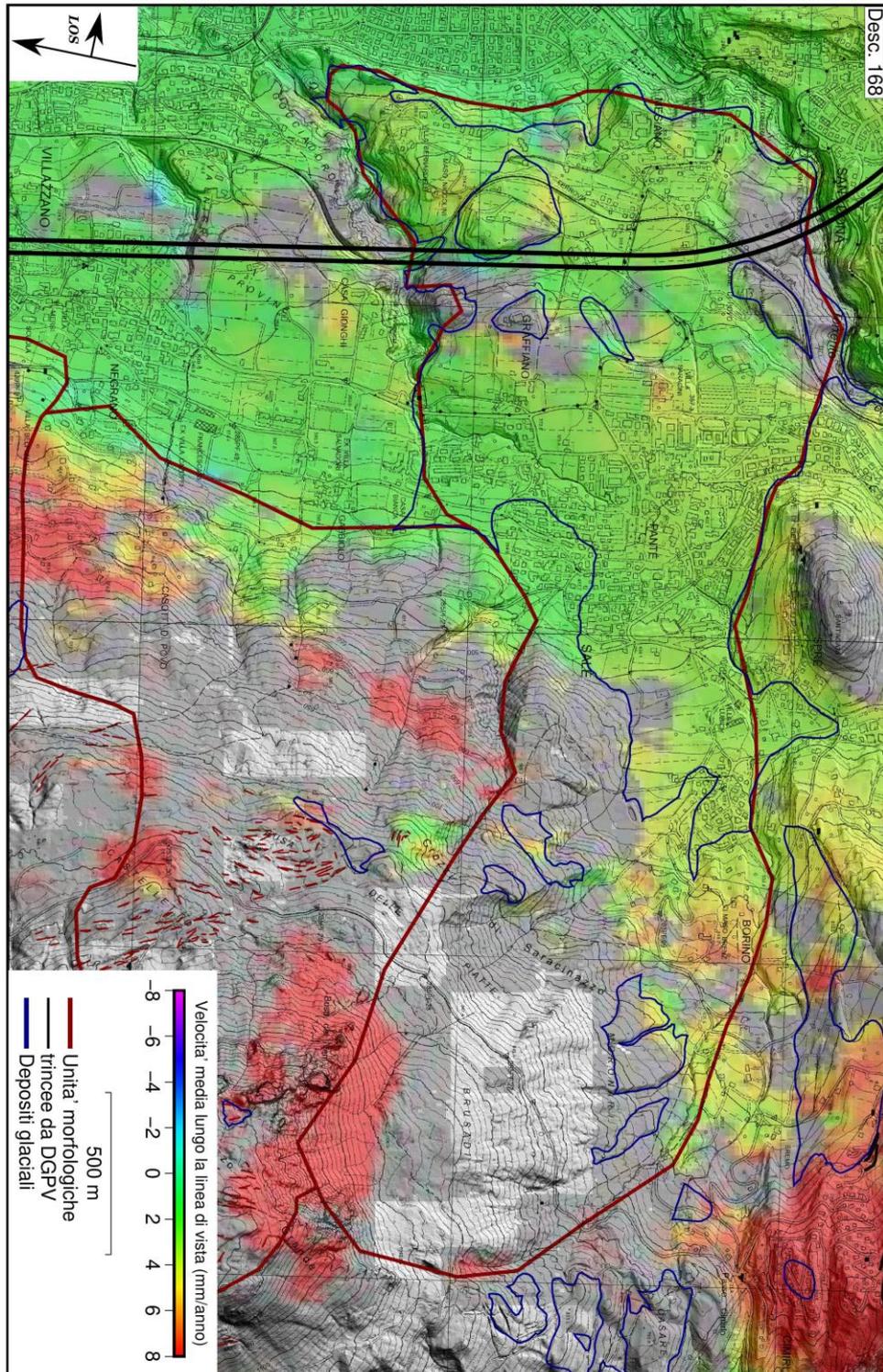


Figura 14: Risultato analisi RAINs-slow in geometria di volo discendente (orbita 168) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 1 e 2. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

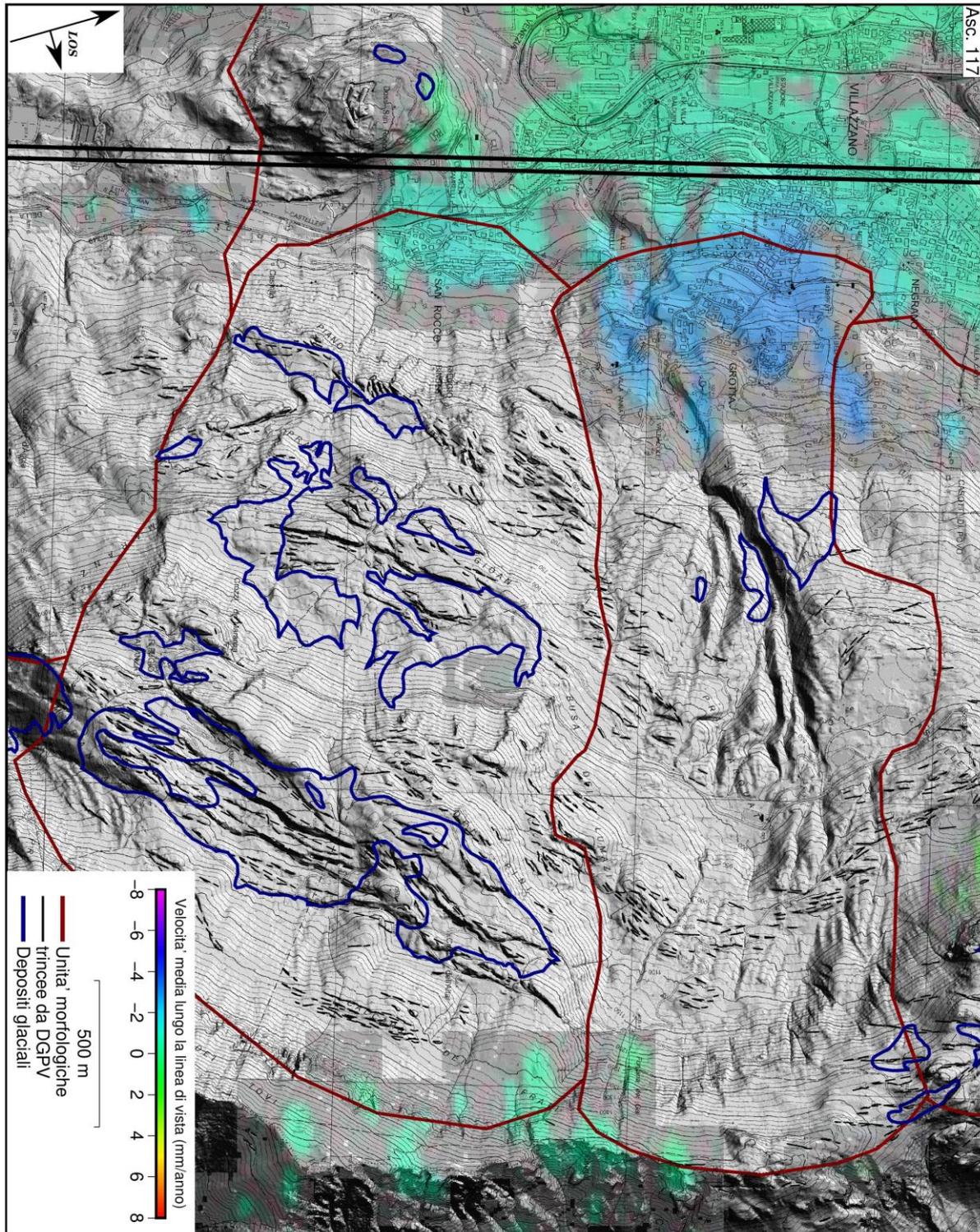


Figura 15: Risultato analisi RAINs-slow in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 3 e 4. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

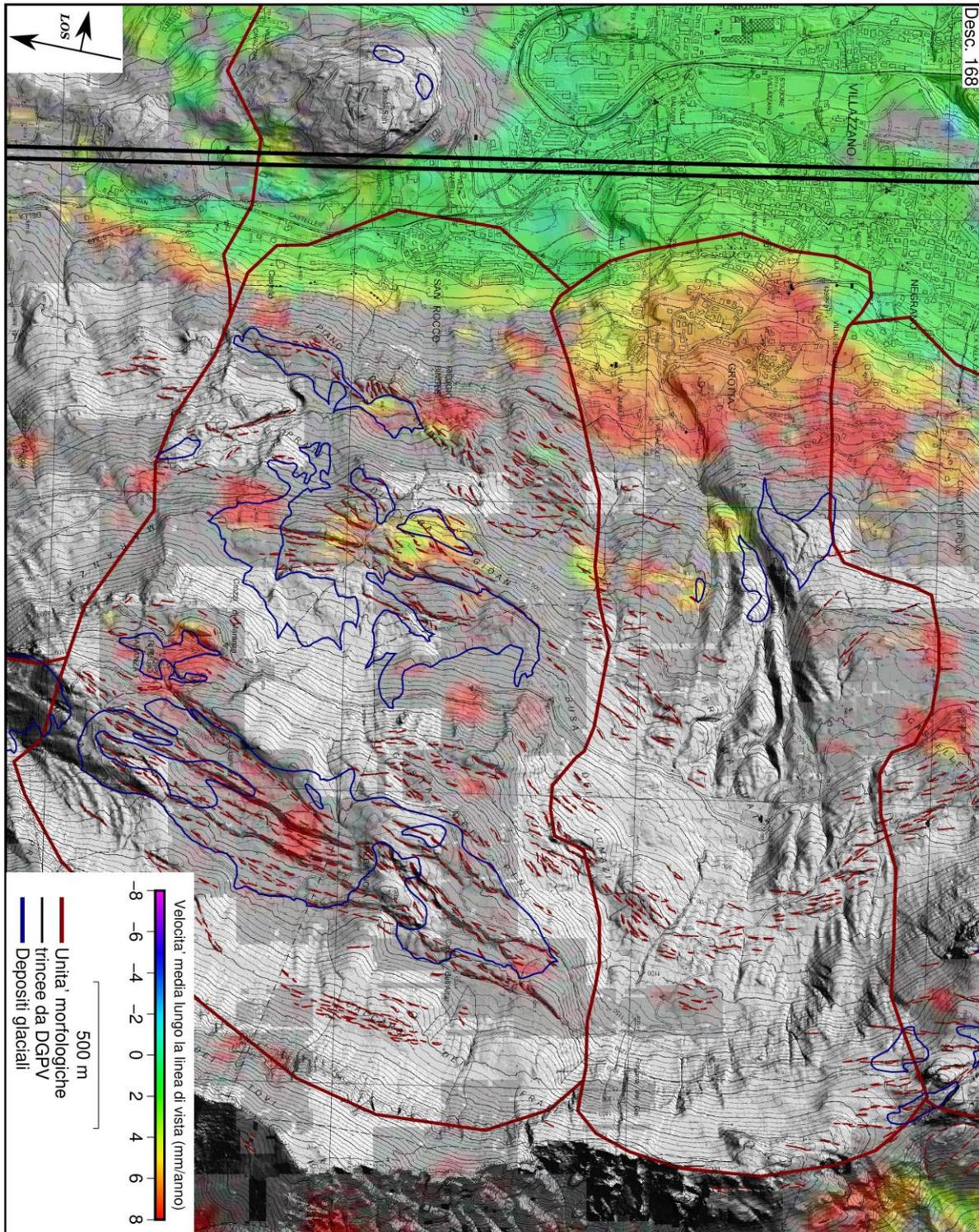


Figura 16: Risultato analisi RAINs-slow in geometria di volo discendente (orbita 168) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 3 e 4. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

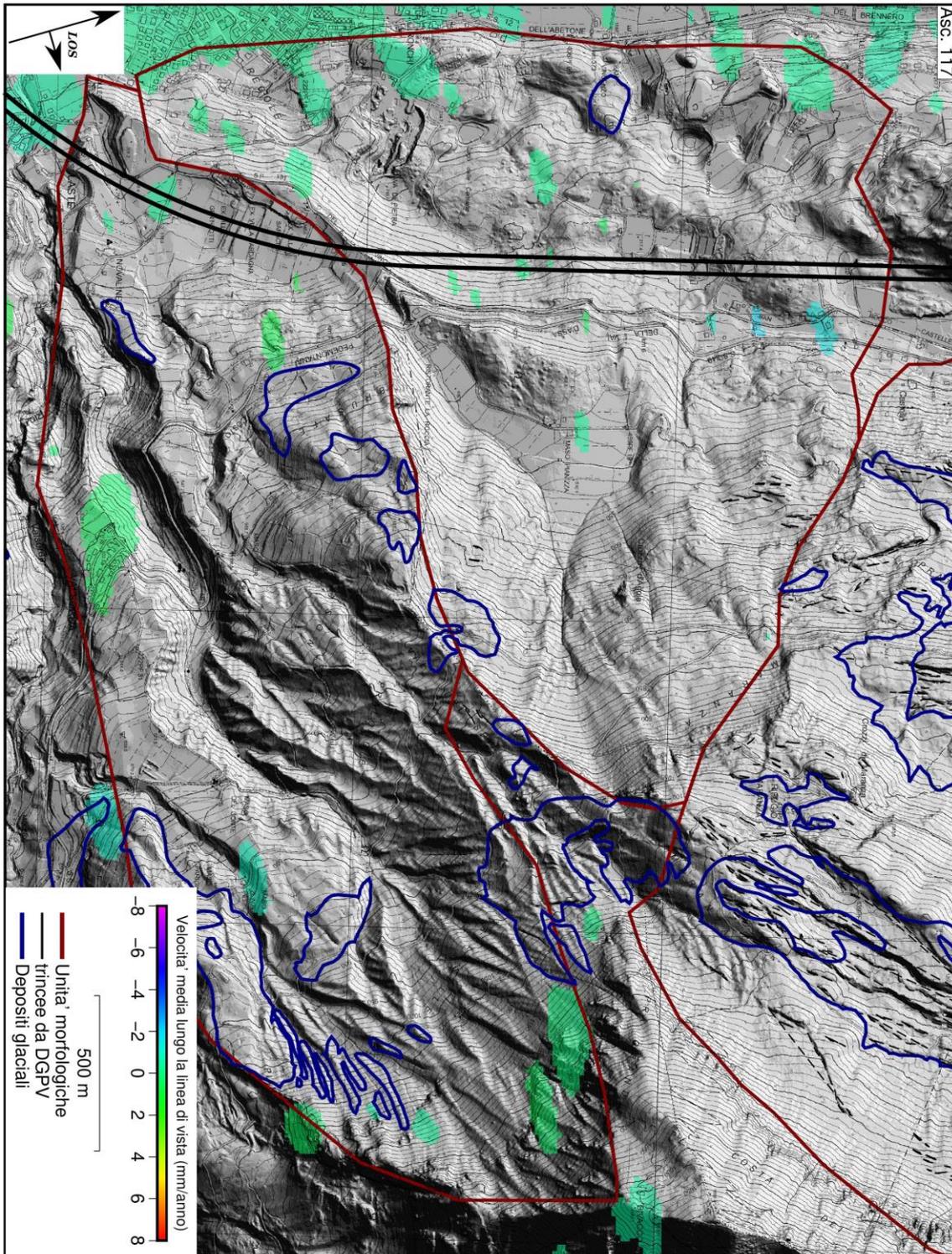


Figura 17: Risultato analisi RAINs-slow in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 5 e 6. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

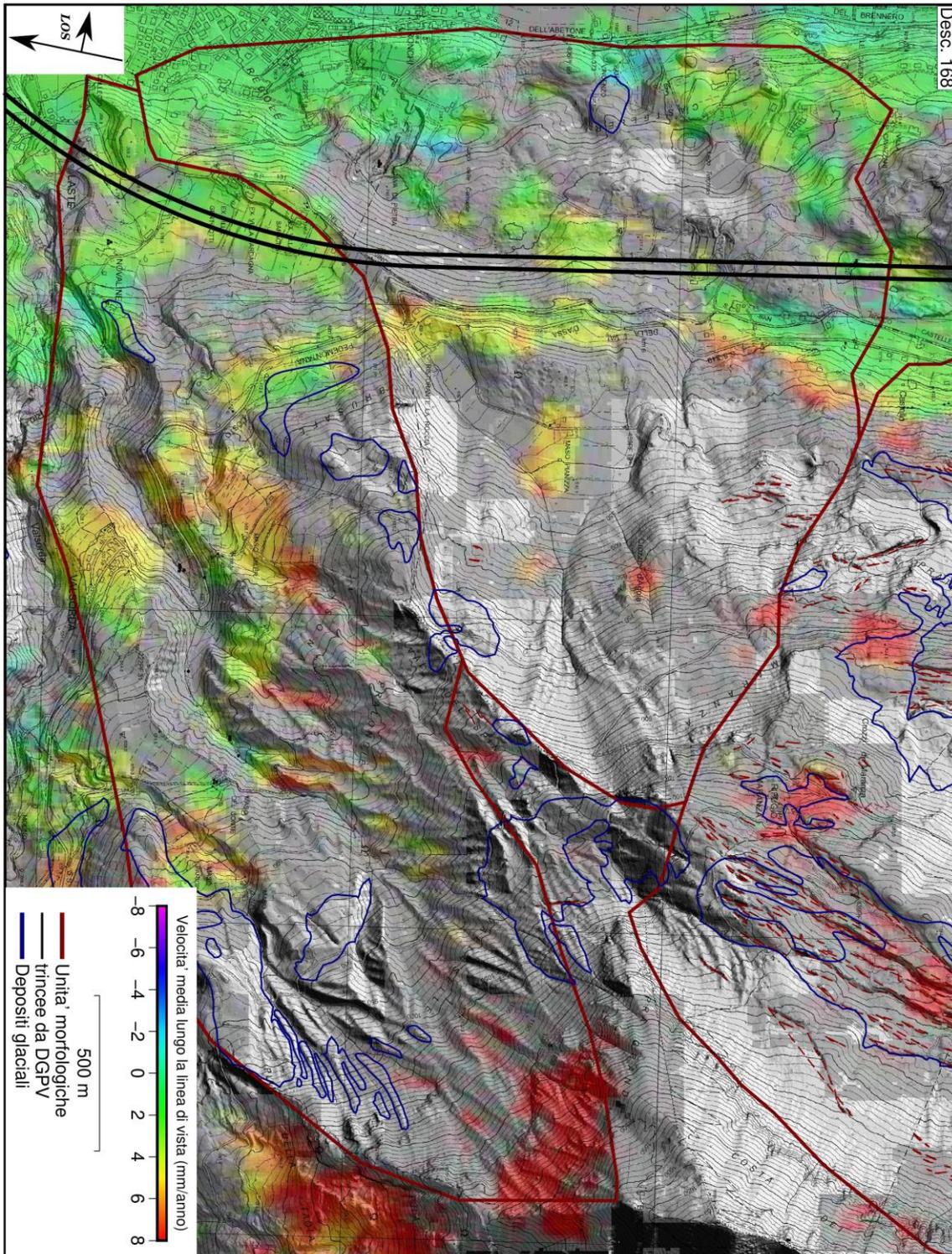


Figura 18: Risultato analisi RAINs-slow in geometria di volo discendente (orbita 168) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 5 e 6. Ad ogni pixel dello stack è associato un valore di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

4.2.3 Risultati analisi MT-SBA

L'analisi MT-SBA è tipicamente utilizzata per indagare processi deformativi caratterizzati da velocità di spostamento comprese tra 5 e 100 mm/anno lungo la LOS.

In Figura 19 sono rappresentati i risultati ottenuti in geometria di volo ascendente (orbita 117), dove per ogni riflettore stabile, la scala di colore rappresenta il valore medio di velocità di spostamento nel periodo di analisi (giugno 2016-febbraio 2020).

Come si può osservare in Figura 19 e nello zoom in Figura 24 anche dall'analisi MT-SBA risulta un debole avvicinamento lungo la LOS nella parte bassa dell'Unità Morfologica 3, con velocità di spostamento compatibili con quanto rilevato dall'analisi RAINS-slow (477 mm/anno, Figura 11, Figura 15).

Risulta inoltre soggetta ad un debole avvicinamento lungo la LOS (velocità comprese tra 4 e 7 mm/anno, quindi ridotte) la parte bassa dell'Unità Morfologica 4, fino al Dosso di San Rocco (Figura 24). Anche in geometria di volo discendente (Figura 20, Figura 22) è rilevato un debole segnale in avvicinamento nell'area compresa tra Villa Zambelli, a Nord, e Villa Pedrotti a Sud. RAINS-slow (orbita ascendente) rileva velocità di spostamento molto minori, comprese mediamente tra 1 e 2 mm/anno (Figura 15), mentre nel corrispondente dataset discendente non vengono rilevati spostamenti significativi (Figura 25). Allo stesso modo, i risultati di RAINS-standard nel dataset ascendente indicano una sostanziale stabilità (Figura 3), mentre nel dataset discendente è rilevato un segnale in allontanamento lungo la LOS (Figura 4).

Non trovando conferma nei risultati dell'analisi RAINS, i valori di velocità di spostamento rilevati mediante l'analisi MT-SBA a valle dell'abitato di San Rocco, compresi tra 4 e 7 mm/anno, potrebbero essere quindi connessi a errori residui legati a disturbi atmosferici localizzati sul fondovalle o a distorsioni geometriche del segnale in quanto proprio in quella zona l'esposizione varia passando da O a N-NO.

Un'ulteriore area interessata da avvicinamento lungo la LOS è rappresentata da una limitata porzione del deposito di frana stabilizzata, che si estende dai i Crozzi d'Agola sino a Cava Ronchi, all'interno dell'Unità Morfologica 5 (Figura 1, Figura 27). La velocità media di spostamento in avvicinamento risulta pari a circa 10 mm/anno, con valori massimi di 20 mm/anno. In questa zona non sono disponibili risultati per l'analisi RAINS-slow in geometria di volo ascendente.

In Figura 20 sono rappresentati i risultati ottenuti in geometria di volo discendente (orbita 168), dove per ogni riflettore coerente individuato viene espresso il valore medio di velocità di spostamento nel periodo di analisi (giugno 2016-febbraio 2020).

È stato rilevato un chiaro segnale di spostamento in corrispondenza dei depositi glaciali e di versante, e dei trench riconducibili alla DGPV nell'Unità Morfologica 4 (Figura 25), con estensione alle Unità Morfologiche 3 e 5. Si tratta della zona di poco a valle rispetto a quella rilevata mediante l'analisi RAINS-standard (Figura 4). I valori di velocità in allontanamento in questa zona arrivano a 20 mm/anno lungo la linea di vista del satellite. In geometria di volo ascendente (Figura 19, Figura 24), in quest'area è stato rilevato un numero inferiore di riflettori stabili ma sono presenti segnali di spostamento in avvicinamento lungo la LOS ad indicare un possibile movimento diretto lungo il versante.

Nei paragrafi successivi sono descritte le serie storiche di spostamento cumulato più significative per le differenti Unità Morfologiche rappresentate (Figura 23, Figura 26 e Figura 29).

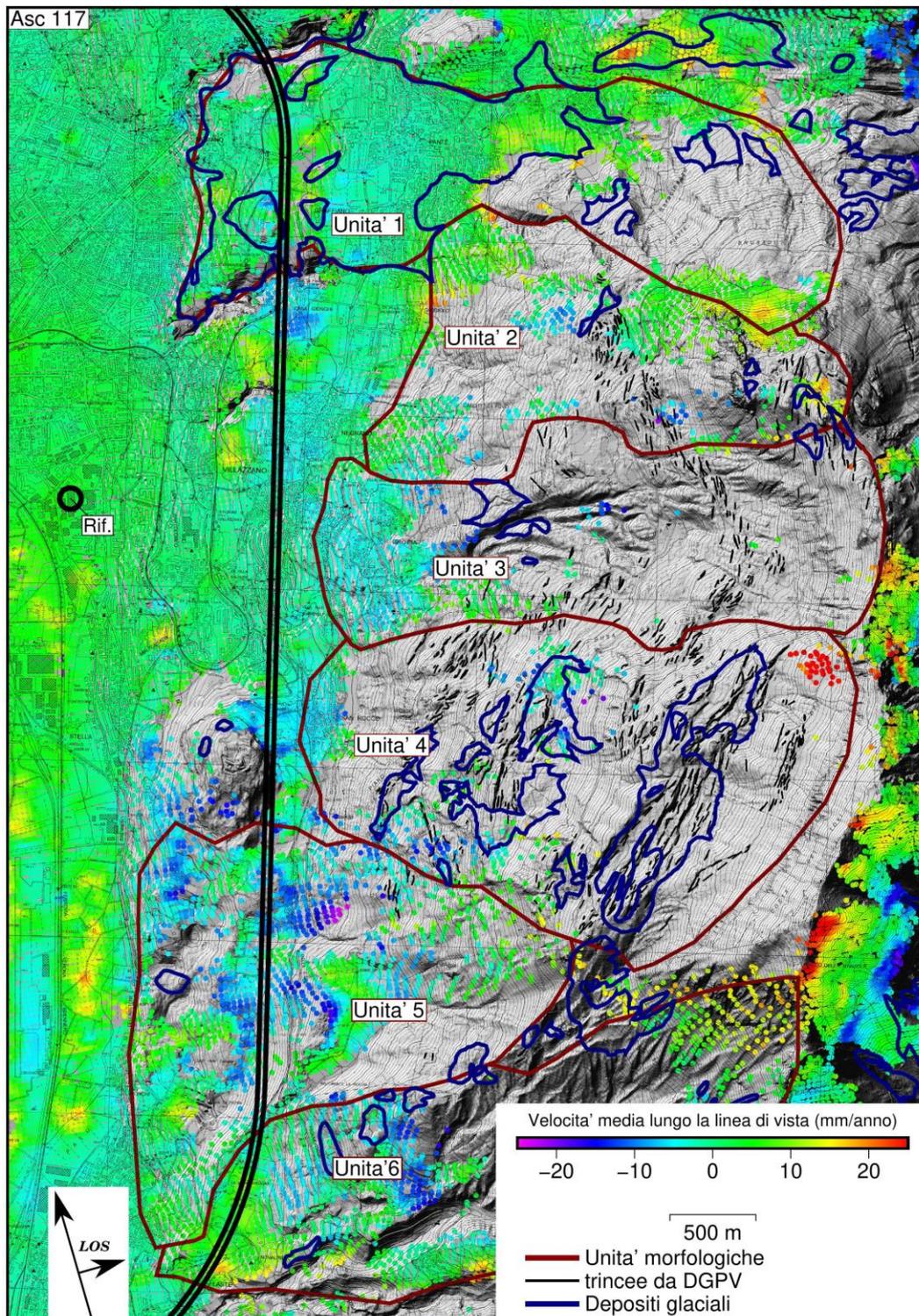


Figura 19: Risultati dell'analisi MT-SBA in geometria di volo ascendente (orbita 117). Valori medi di velocità di spostamento, lungo la LOS, nell'intero periodo di analisi (ottobre 2015 - gennaio 2020).

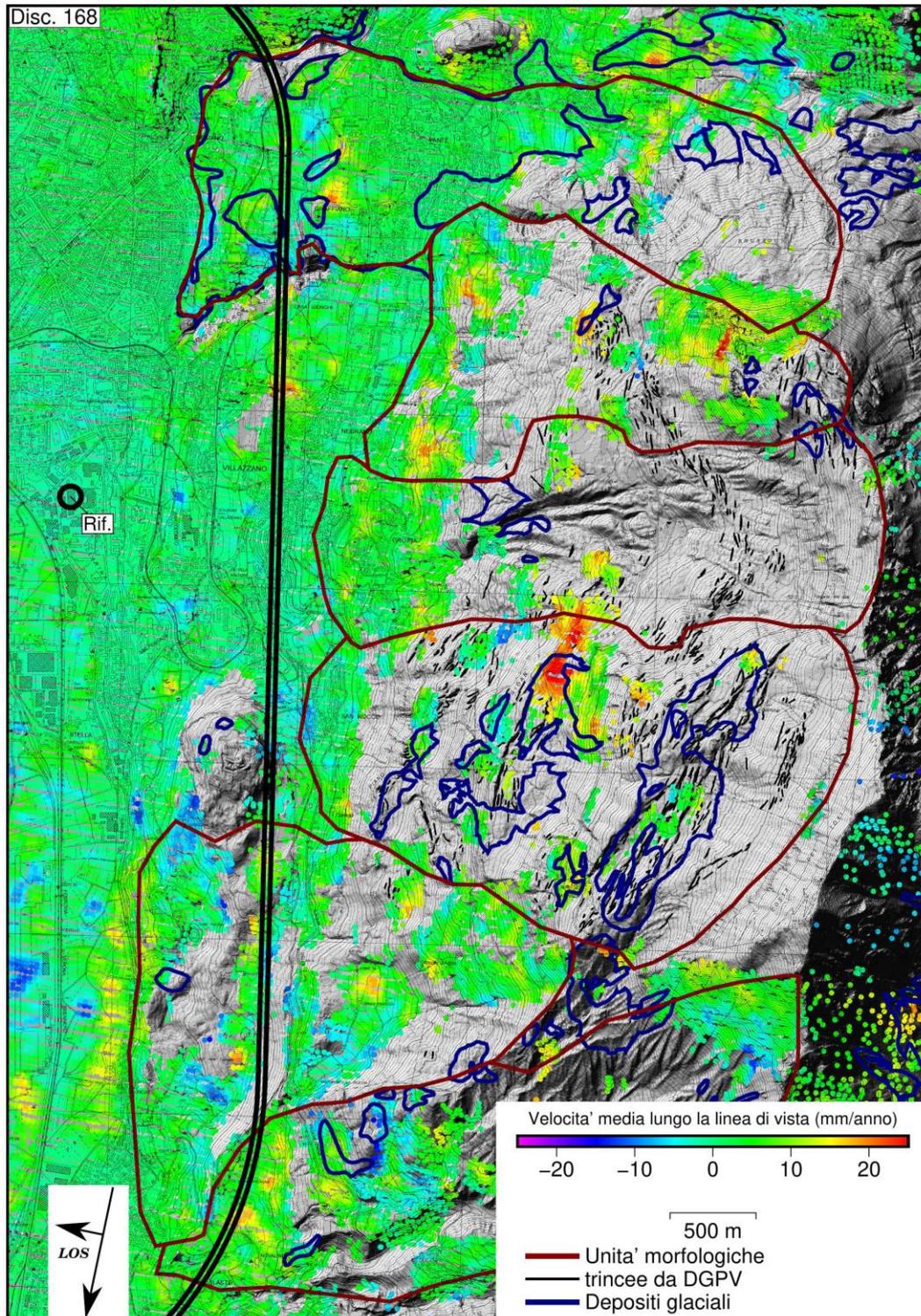


Figura 20: Risultati dell'analisi MT-SBA in geometria di volo discendente (orbita 168). Valori medi di velocità di spostamento, lungo la LOS, nell'intero periodo di analisi (marzo 2016 - febbraio 2020).

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

Unità Morfologiche 1 e 2

I risultati sono complessivamente riassunti nelle Figura 21 e Figura 22 con le mappe dei riflettori stabili individuati ai quali viene associata una scala di colore rappresentativa della velocità media per l'intero periodo di osservazione. In Figura 23 sono riportate le serie storiche di spostamento cumulato (mm) più significative per le Unità Morfologiche 1 e 2. I dati plottati sono i valori medi, per ogni time-step di analisi, di velocità dei riflettori stabili nei rettangoli indicati nelle Figura 21 e Figura 22.

Unità Morfologica 1: viene descritto l'andamento degli spostamenti nel tempo di una piccola area a S di Graffiano (Figura 21), in corrispondenza della quale sono cartografati depositi glaciali (Figura 1). In geometria di volo discendente (Figura 23 a), è stato rilevato uno spostamento cumulato in allontanamento lungo la LOS pari a circa 30 mm. Si può notare un apparente trend stagionale con accelerazioni, seppur modeste, tra aprile ed ottobre. Questo trend non sembra essere influenzato dai singoli eventi di precipitazione (Figura 23 c).

Anche in RAINS-slow (Figura 14) è rilevato un debole segnale in allontanamento lungo la LOS in corrispondenza della stessa zona, con velocità inferiore (circa 5 mm/anno lungo la LOS).

In geometria di volo ascendente (Figura 23 a) non sono rilevati spostamenti significativi.

Unità Morfologica 2: le serie storiche sono state rilevate in corrispondenza di un deposito di frana quiescente (Figura 1), per il quale gli stack ottenuti mediante la tecnica RAINS-slow (Figura 13 e Figura 14) non offrono copertura.

In geometria di volo discendente (Figura 23 a) MT-SBA rileva uno spostamento complessivo nel periodo giugno 2016-febbraio 2020 pari a circa 55 mm lungo la LOS. A differenza del caso precedente, sembra esserci una relazione con le precipitazioni, in quanto si possono notare accelerazioni a seguito delle intense precipitazioni occorse a fine 2018 e a fine 2019 (Figura 23 c). I dati rilevati in geometria di volo ascendente (Figura 23 b) non sono di facile interpretazione in quanto mostrano un susseguirsi di fasi in allontanamento ed in avvicinamento per valori di spostamento comunque molto ridotti, di poco superiori alla soglia di capacità di acquisizione della tecnica. Nel complesso, in geometria di volo ascendente è rilevato un trend in avvicinamento lungo la LOS per uno spostamento cumulato di 20 mm circa.

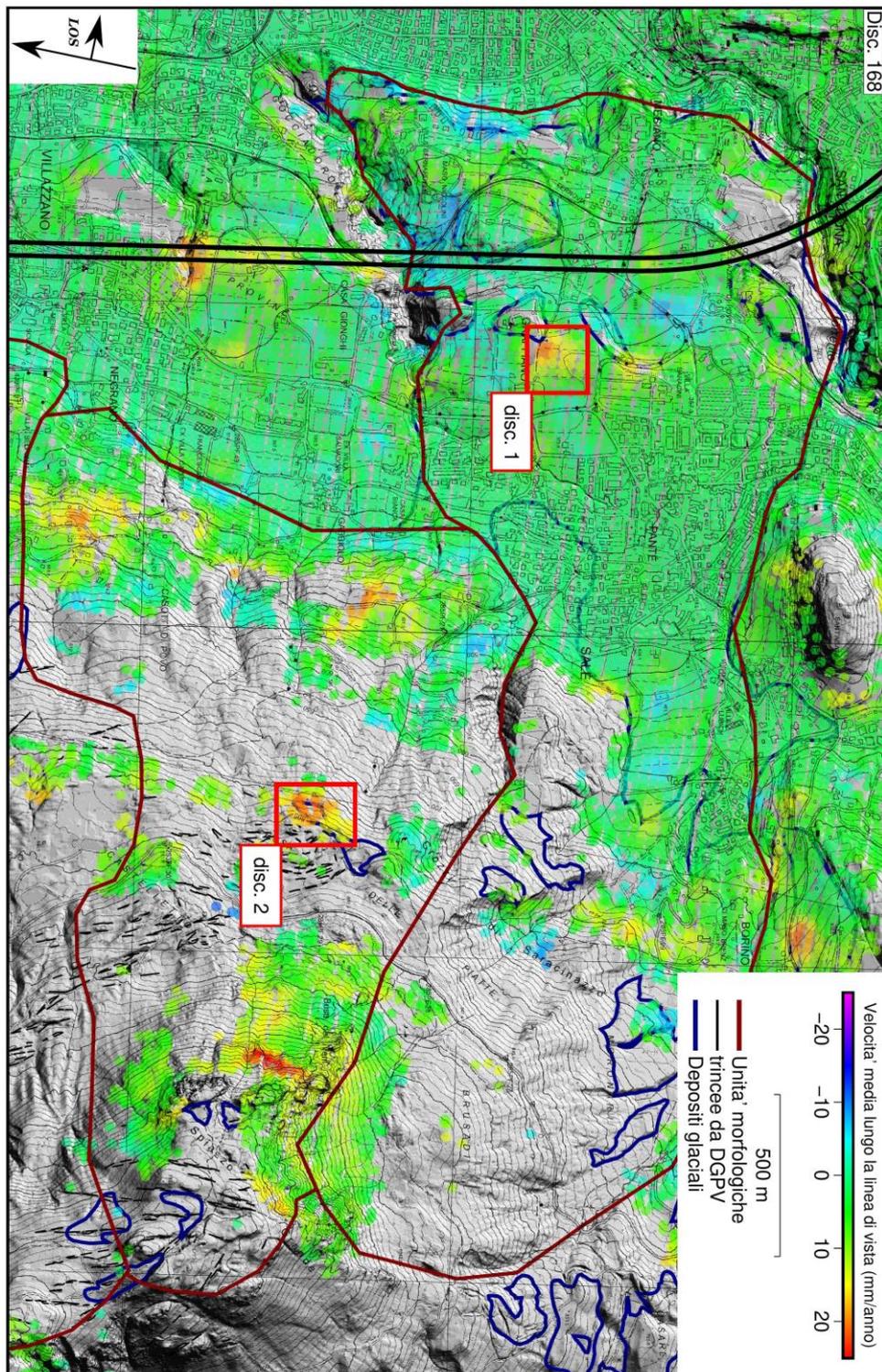


Figura 22: Risultato analisi MT-SBA in geometria di volo discendente (orbita 168) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 1 e 2. I risultati sono espressi in termini di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

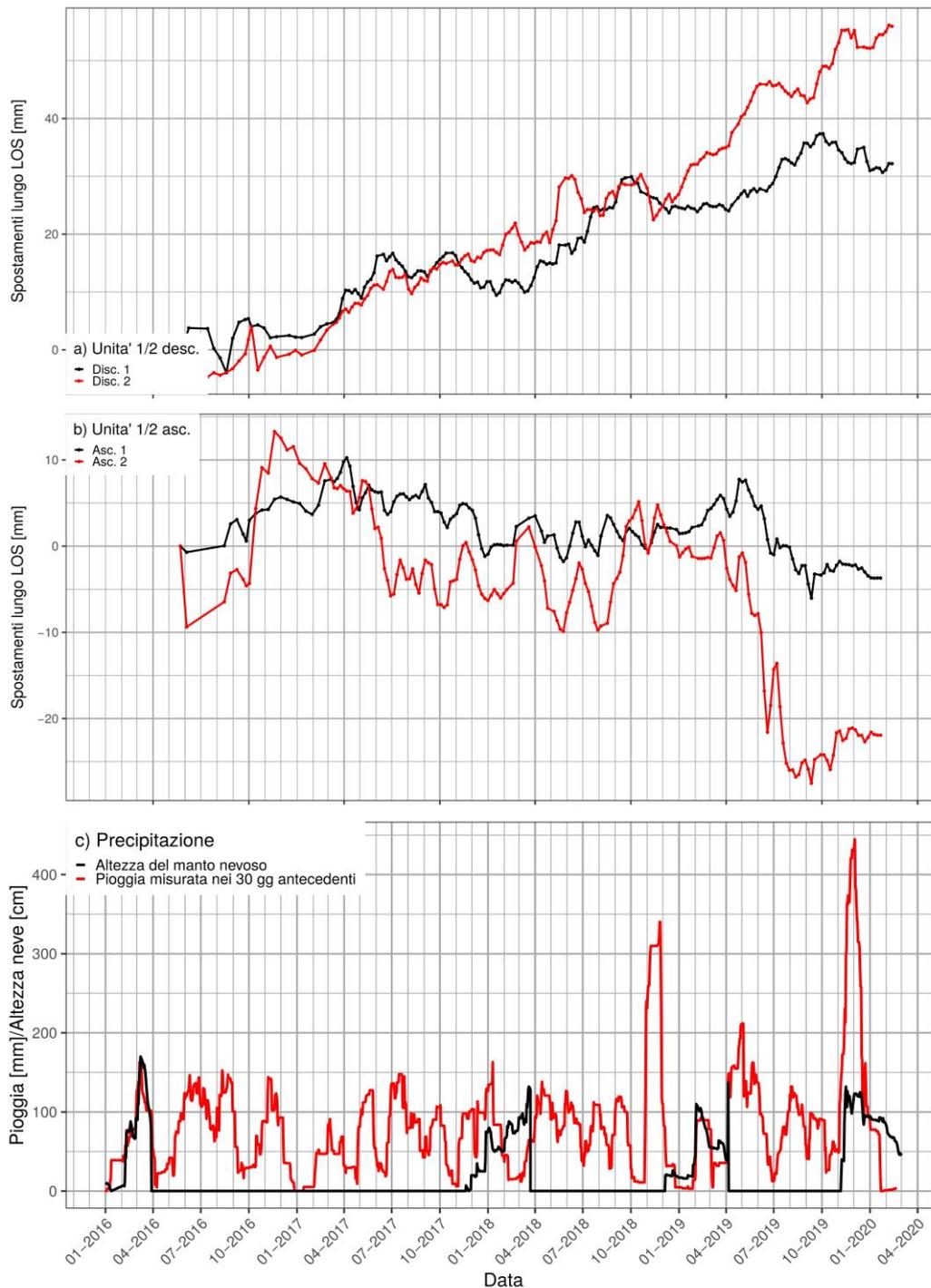


Figura 23: Serie storiche di spostamento medio cumulato, lungo la LOS, dei punti compresi nei poligoni indicati in Figura 21 e Figura 22 per i dataset ascendente (b) e discendente (a), rispettivamente. In Figura 23 c sono riportate, per confronto, le precipitazioni piovose misurate presso il pluviometro di Trento-Laste, cumulate sui 30 giorni antecedenti, e quelle nevose rilevate sul Monte Bondone.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

Unità Morfologiche 3 e 4

I risultati sono complessivamente riassunti in Figura 24 e Figura 25 con le mappe dei riflettori stabili individuati dall'analisi MT-SBA. Ai punti è associata una scala di colore rappresentativa della velocità media per l'intero periodo di osservazione.

In Figura 26 sono riportate le serie storiche di spostamento cumulato (mm) lungo la LOS più significative per le Unità Morfologiche 3 e 4. I dati di spostamento cumulato corrispondono ai valori medi, per ogni time-step di analisi, dei riflettori stabili contenuti nel rispettivo rettangolo in Figura 24 e Figura 25.

Unità Morfologica 3: vengono illustrati gli spostamenti di un'area a NO di Grotta, in corrispondenza del deposito di frana stabilizzato (Figura 1, Figura 24, Figura 25).

In questa zona, l'analisi RAINS-slow mostra segnali in debole avvicinamento in geometria di volo ascendente (Figura 15), ed in allontanamento in geometria di volo discendente (Figura 16).

I risultati dell'analisi MT-SBA indicano uno spostamento cumulato in allontanamento per il dataset discendente ed in avvicinamento per quello ascendente, in entrambi i casi pari a circa 20 mm lungo la LOS (rispettivamente Figura 26 b e Figura 26 a). I valori di spostamento sono quindi compatibili con quelli rilevati da RAINS-slow.

Unità Morfologica 4.

La **Serie 4a** (Figura 24 e Figura 25) è stata rilevata in corrispondenza del versante meridionale del Dosso di San Rocco. L'esposizione del versante verso S ed una marcata acclività rappresentano due condizioni sfavorevoli per l'analisi InSAR.

Gli spostamenti rilevati in geometria di volo discendente non sono significativi (Figura 26 a). Si può notare un leggero trend in avvicinamento, ma si tratta di valori estremamente bassi, al di sotto della capacità di analisi della tecnica.

In geometria di volo ascendente (Figura 26 b) si rileva uno spostamento cumulato pari a circa 40 mm lungo la LOS. Non si notano un chiaro trend stagionale ed una correlazione con le precipitazioni. In corrispondenza di questa zona, la Carta Geologica della Provincia Autonoma di Trento non riporta depositi quaternari di alcun tipo (Figura 1).

La **Serie 4b** è stata rilevata in corrispondenza di depositi glaciali (Figura 1).

In geometria di volo discendente (Figura 26 a) lo spostamento cumulato lungo la LOS raggiunge i 60 mm in allontanamento, con un'importante accelerazione tra aprile e giugno 2018. Nello stesso periodo si rileva un'accelerazione di segno contrario, quindi in avvicinamento lungo la LOS, anche nel dataset ascendente (Figura 26 b). Anche in questo caso, però, i risultati ottenuti in geometria di volo ascendente sono di più complessa interpretazione. Da sottolineare è come i pixel non siano stati selezionati esattamente nella stessa posizione per le due geometrie di volo (Figura 24 e Figura 25).

Gli stack ottenuti da RAINS-slow in geometria di volo ascendente (Figura 15) e discendente (Figura 16) non mostrano copertura in questa zona.

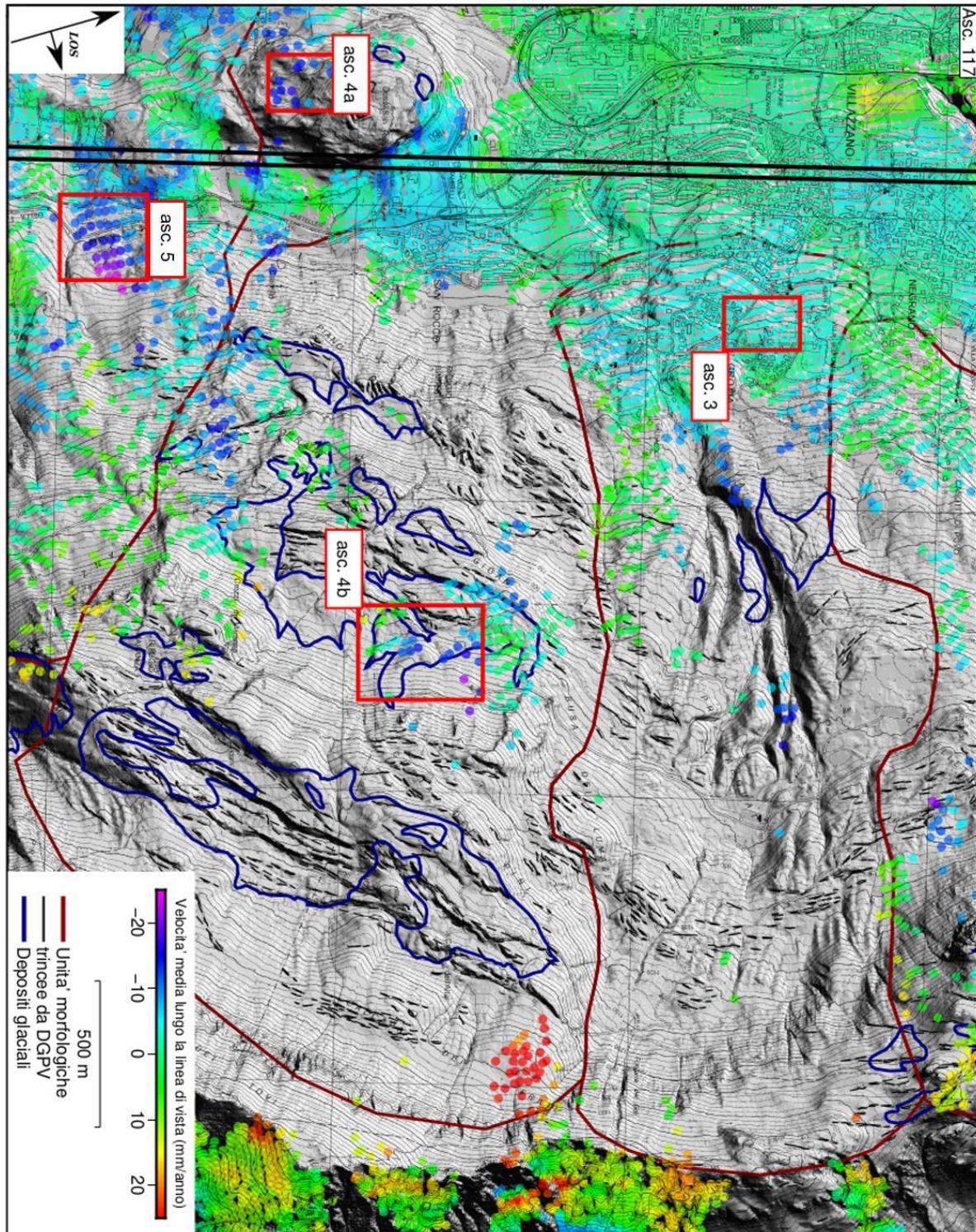


Figura 24: Risultato analisi MT-SBA in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 3 e 4. I risultati sono espressi in termini di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

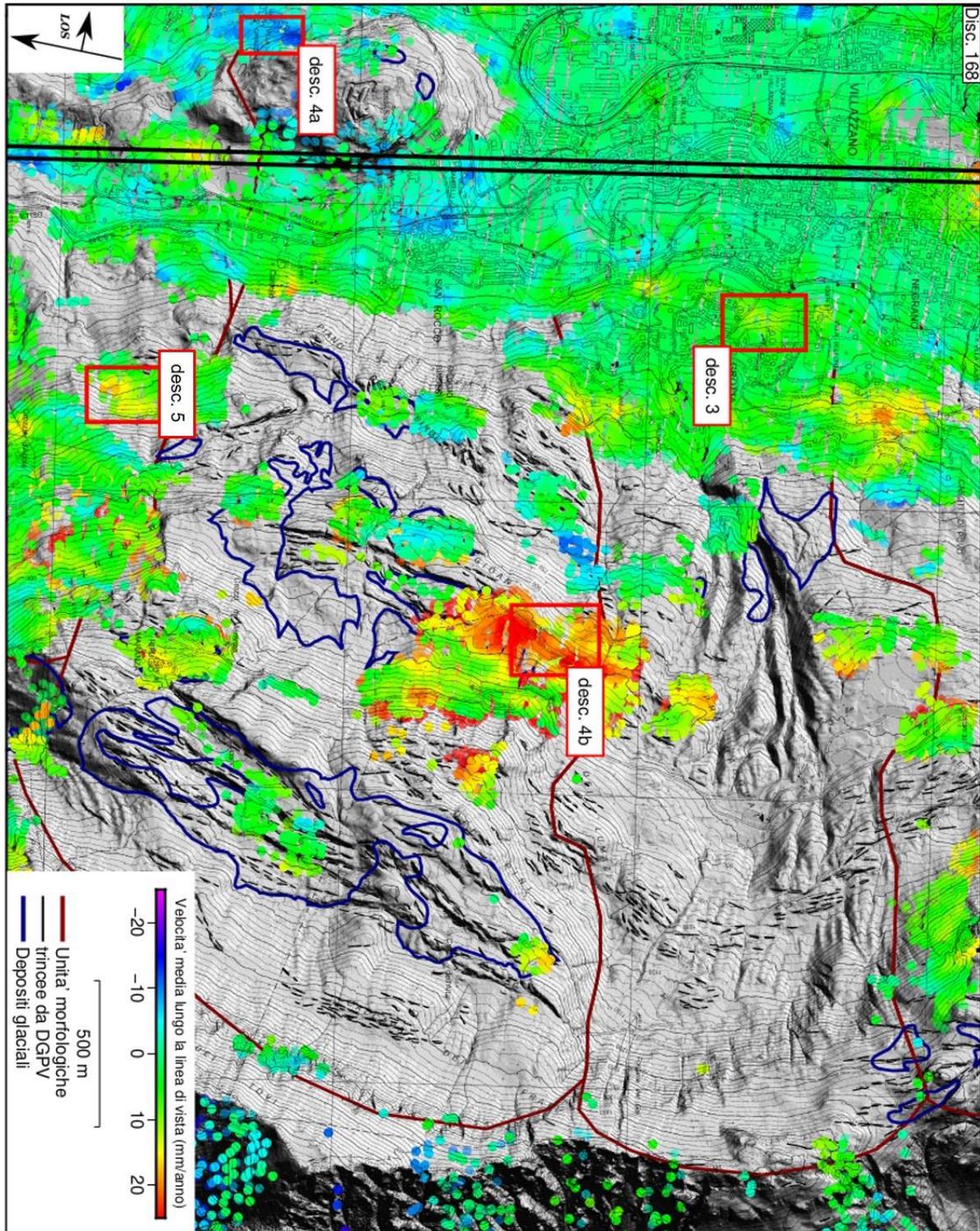


Figura 25: Risultato analisi MT-SBA in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 3 e 4. I risultati sono espressi in termini di velocità media, lungo la LOS, nel periodo giugno 2016-febbraio 2020.

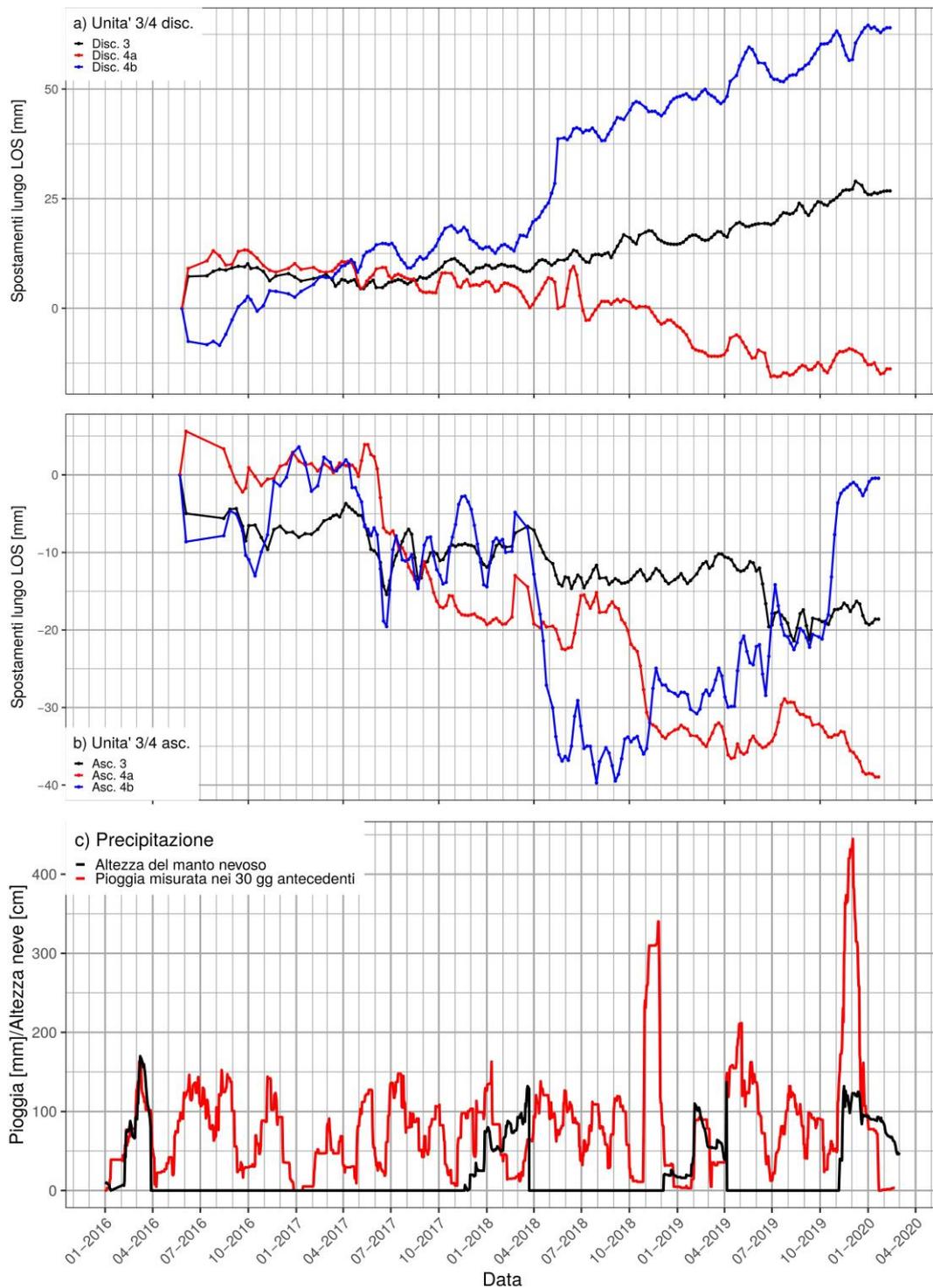


Figura 26: Serie storiche di spostamento medio cumulato, lungo la LOS, dei punti compresi nei poligoni indicati in Figura 24 e Figura 25 per i dataset ascendente (b) e discendente (a), rispettivamente. In Figura 26c sono riportate, per confronto, le precipitazioni piovose misurate presso il pluviometro di Trento-Laste, cumulate sui 30 giorni antecedenti, e quelle nevose rilevate sul Monte Bondone.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

Unità Morfologiche 5 e 6

I risultati sono complessivamente riassunti in Figura 27 e Figura 28 con le mappe dei riflettori stabili individuati dall'analisi MT-SBA. Ai punti è associata una scala di colore rappresentativa della velocità media per l'intero periodo di osservazione.

In Figura 29 sono riportate le serie storiche di spostamento cumulato (mm) lungo la LOS più significative per le Unità Morfologiche 5 e 6. I dati di spostamento cumulato corrispondono al valore medio di tutti i riflettori contenuti nei rettangoli indicati in Figura 27 e Figura 28.

Unità Morfologica 5: la serie storica di spostamento cumulato è stata rilevata in corrispondenza di un deposito di frana stabilizzato (Figura 1).

Le due serie storiche ricostruite rispettivamente per geometria di volo ascendente (Figura 29 b) e discendente (Figura 29 a) non sono direttamente confrontabili tra loro poichè si riferiscono a riflettori stabili ubicati in posizioni leggermente differenti, come si può vedere in Figura 27 e Figura 28.

In geometria di volo discendente (Figura 29 a) è rilevato uno spostamento cumulato, lungo la LOS, pari a 30 mm. Sono osservabili due fasi di accelerazione: una tra aprile e giugno 2017, l'altra tra aprile ed agosto 2019, senza un'apparente correlazione con il regime pluviometrico (Figura 29 c).

In geometria di volo ascendente (Figura 29 b) è stato rilevato uno spostamento cumulato lungo la LOS pari a 75 mm (20 mm/anno approssimativamente). Anche in questo caso non è chiara una relazione con le precipitazioni.

Sulla base delle evidenze morfologiche rilevabili sul modello digitale del terreno, il rettangolo asc. 5 in geometria di volo ascendente (Figura 27) potrebbe trovarsi su un deposito di frana di dimensioni minori rispetto a quanto cartografato in Figura 1, e la serie desc. 5 (Figura 28) potrebbe essere stata rilevata di poco a monte rispetto a questo deposito.

Unità Morfologica 6: la serie storica di spostamento cumulato è stata rilevata in corrispondenza di un deposito di conoide alluvionale/debris flow che interseca il tracciato della galleria (Figura 1).

In geometria di volo discendente (Figura 29 a), è stato rilevato uno spostamento cumulato pari a 30 mm (<10 mm/anno) in allontanamento lungo la LOS con un trend piuttosto lineare con una breve e debole accelerazione nel luglio 2019.

Nel dataset ascendente (Figura 29 b) è stato rilevato un debole allontanamento lungo la LOS per uno spostamento cumulato di circa 20 mm. Si tratta di valori molto bassi che possono indicare una zona soggetta ad un debole cedimento.

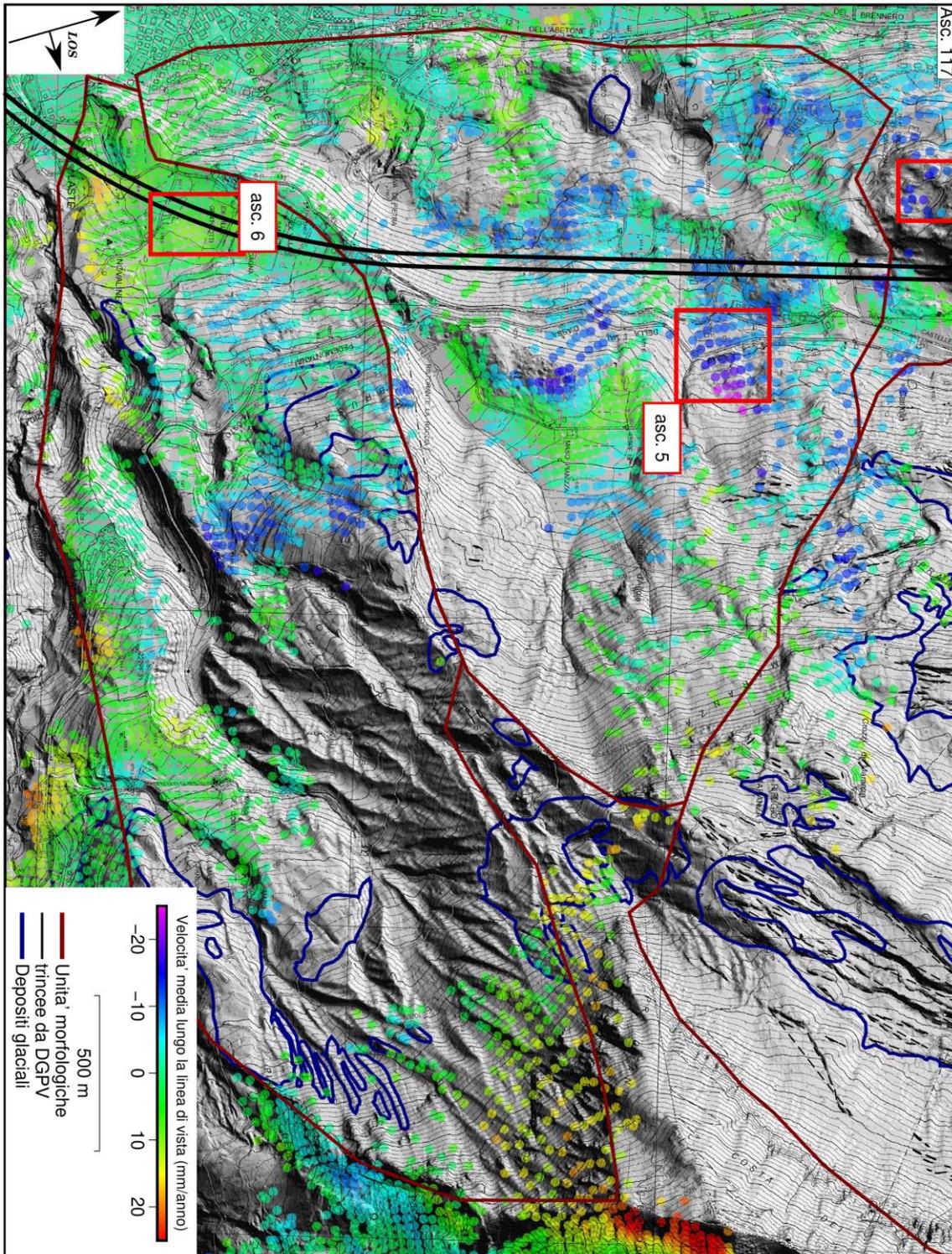


Figura 27: Risultato analisi MT-SBA in geometria di volo ascendente (orbita 117) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 5 e 6. I risultati sono espressi in termini di velocità media, lungo la LOS, nel periodo ottobre 2015-gennaio 2020.

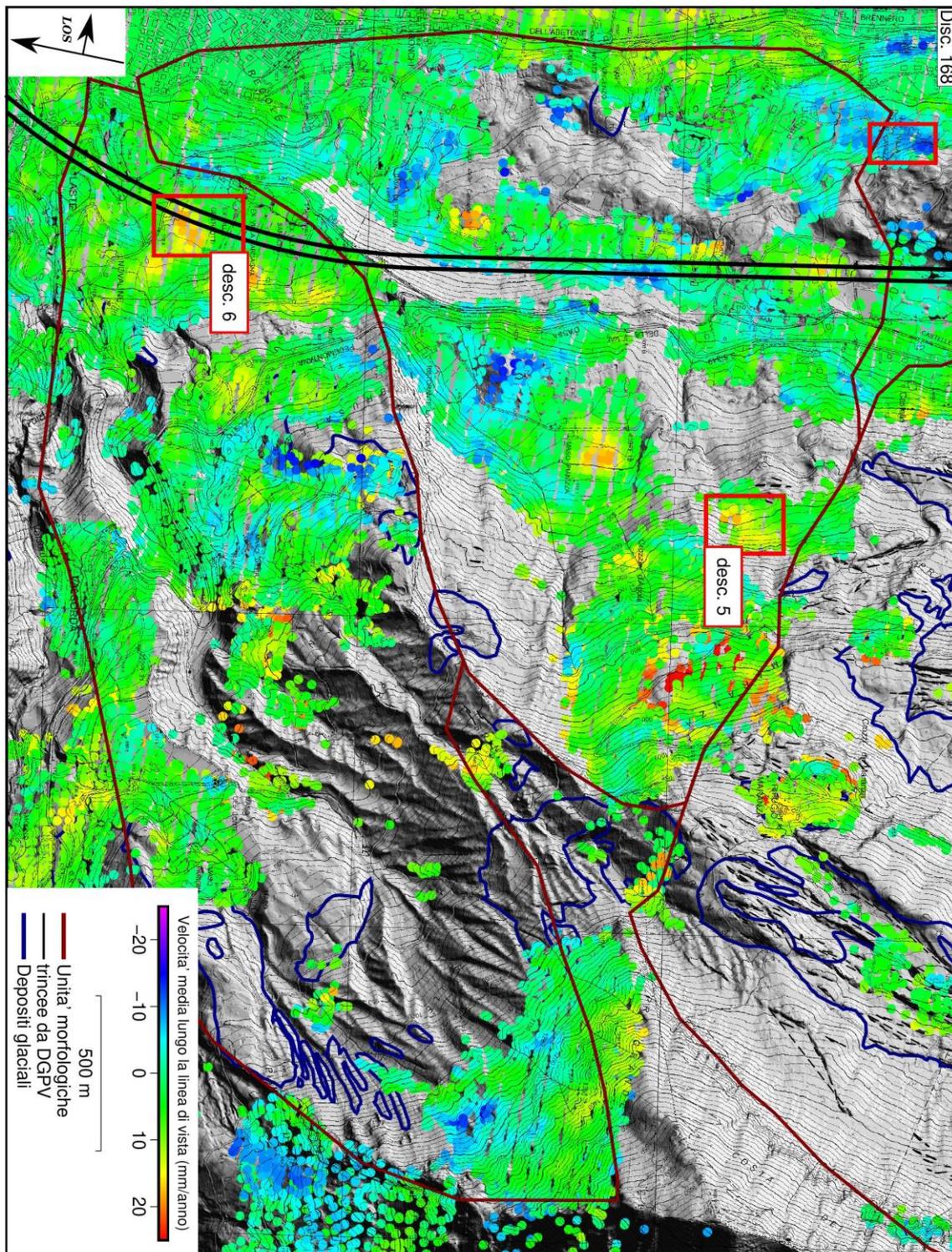


Figura 28: Risultato analisi MT-SBA in geometria di volo discendente (orbita 168) in corrispondenza delle Unità Morfologiche 5 e 6. I risultati sono espressi in termini di velocità media, lungo la LOS, nel periodo marzo 2016-febbraio 2020.

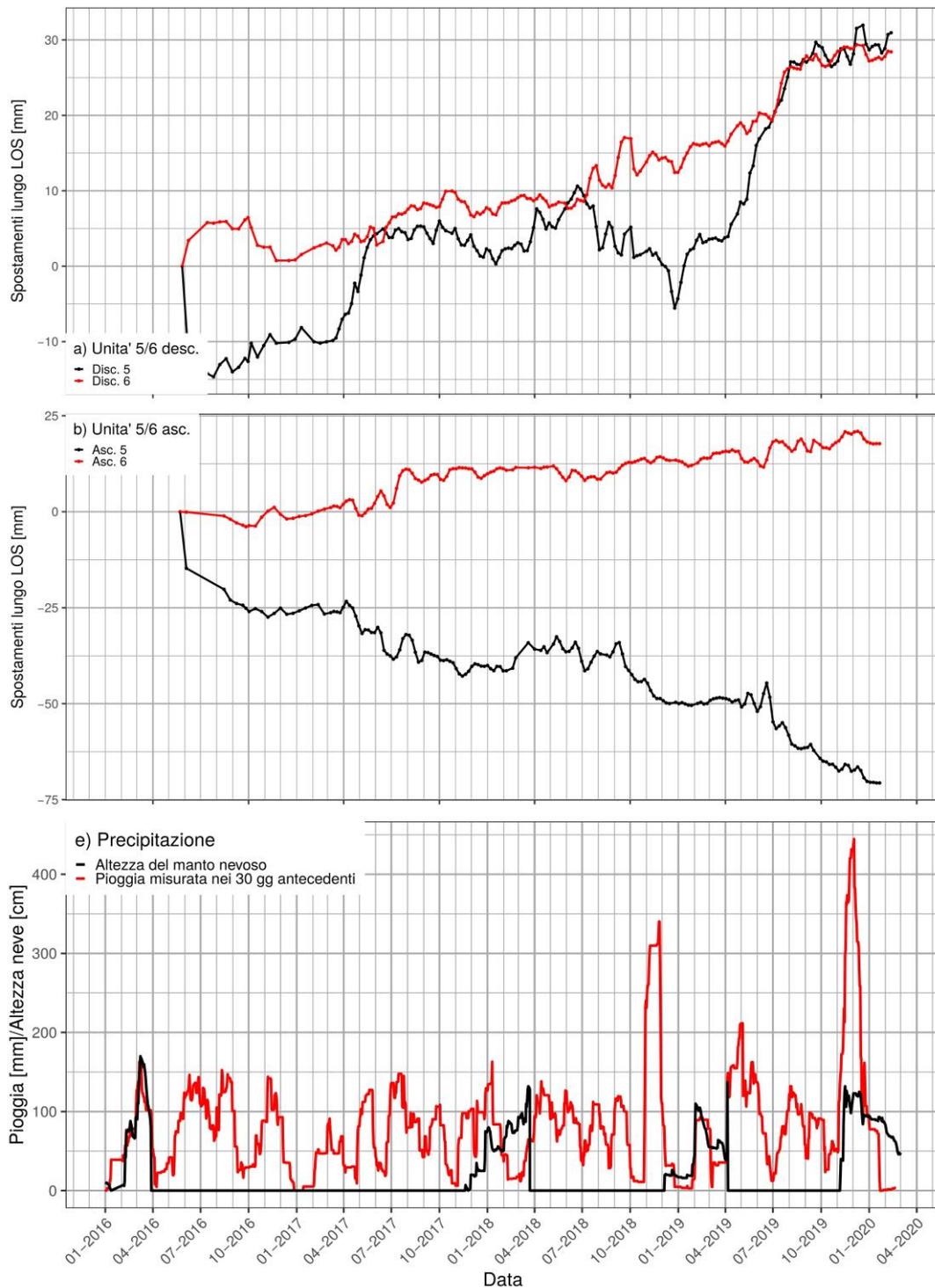


Figura 29: Serie storiche di spostamento medio cumulato, lungo la LOS, dei punti compresi nei poligoni indicati in Figura 27 e Figura 28 per i dataset ascendente (b) e discendente (a), rispettivamente. In Figura 29 c sono riportate, per confronto, le precipitazioni piovose misurate presso il pluviometro di Trento-Laste, cumulate sui 30 giorni antecedenti, e quelle nevose rilevate sul Monte Bondone.

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

4.3 Prodotti forniti

4.3.1 Formato dei risultati e convenzioni di colori

La corretta visualizzazione dei risultati richiede la scelta di una scala di colore idonea. A nostro avviso, è buona norma utilizzare una scala con molti colori, come ad esempio una scala ad arcobaleno, in cui con colori verdi sono rappresentate aree stabili o con spostamenti poco significativi, e con

- **colori freddi** valori negativi che evidenziano una riduzione della distanza tra satellite ed 'oggetto' monitorato, cioè un avvicinamento lungo la linea di vista del satellite;
- **colori caldi** valori positivi che indicano un aumento della distanza tra satellite ed 'oggetto' monitorato, e quindi un allontanamento di questo lungo la linea vista del satellite.

4.3.2 Analisi RAINS

I risultati ottenuti dall'analisi RAINS sono restituiti in formato GeoTIFF georeferenziato in WGS84, in cui ad ogni pixel corrisponde un valore di velocità media (mm/anno) lungo la linea di vista del satellite. In particolare:

Analisi RAINS-standard

- Stack per il periodo giugno 2016-febbraio 2020 in geometria di volo ascendente (Figura 3):asc_full.tiff;
- Stack per il periodo giugno 2016-febbraio 2020 in geometria di volo discendente (Figura 4):desc_full.tiff.

Analisi RAINS-slow

- Stack per il periodo giugno 2016-febbraio 2020 in geometria di volo ascendente (Figura 11):asc_long.tiff;
- Stack per il periodo giugno 2016-febbraio 2020 in geometria di volo discendente (Figura 12):desc_long.tiff.

4.3.3 Analisi MT-SBA

I risultati ottenuti dall'analisi multi-temporale sono invece restituiti in files .shp che contengono per ogni elemento riflettente coerente individuato longitudine, latitudine, la velocità media, la coerenza media, due campi per l'errore topografico (stimati con due metodologie diverse) e, successivamente, le serie temporali (deformazioni cumulate lungo la linea di vista del satellite).

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

5 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Al fine di ottenere un quadro quanto più possibile completo circa l'evoluzione spazio-temporale degli spostamenti sul versante del Monte Marzola, i dati satellitari Sentinel, tra giugno 2016 e febbraio 2020, sono stati processati mediante la combinazione di due tecniche differenti caratterizzate da elementi di complementarità:

- RAINS (Rapid Areal InSAR Survey), tecnica di interferometria tradizionale che consente di ottenere mappe di deformazione quasi continue nello spazio anche in zone scarsamente antropizzate e debolmente vegetate, seppur con valori di velocità media (mm/anno) lungo la LOS qualitativi;
- MT-SBA, tecnica di interferometria multi-temporale che permette di ricostruire serie storiche di spostamento cumulato (mm) lungo la LOS numericamente consistenti in corrispondenza di riflettori stabili (edifici, infrastrutture, affioramenti rocciosi).

Per facilitare la lettura e l'interpretazione dei risultati dell'analisi InSAR nel contesto geologico e geomorfologico dell'area, il versante del Monte Marzola è stato suddiviso in 6 Unità Morfologiche, con numerazione crescente da N a S.

Con la tecnica RAINS, denominata nel testo RAINS-standard, è possibile rilevare aree soggette a deformazioni caratterizzate da velocità di spostamento >30 mm/anno lungo la LOS. I risultati ottenuti con questa tecnica mostrano come:

- lungo il tracciato della galleria non sono state rilevate zone soggette a velocità di spostamento > 30 mm/anno lungo la LOS.
- Più in generale, lungo il versante del Monte Marzola sono stati rilevati segnali di spostamento di velocità comunque ridotta, compresa tra 30 e 40 mm/anno, in poche zone di estensione limitata, tipicamente in corrispondenza di depositi glaciali e di trench legati alla DGPV. Il segnale più evidente, rilevato in geometria di volo discendente, è stato rilevato in corrispondenza dell'Unità Morfologica 4 (Figura 4).

Allo scopo di indagare processi deformativi caratterizzati da velocità di spostamento estremamente lente (comprese tra 2 e 10 mm/anno lungo la LOS, difficilmente rilevabili anche attraverso la tecnica MT-SBA), è stato utilizzato un approccio innovativo, di carattere sperimentale, denominato RAINS-slow. I prodotti forniti sono sempre stack interferometrici, ma formati dalla sovrapposizione di interferogrammi di lunga durata (indicativamente 1-2 anni).

Nonostante la scarsa copertura areale derivante dalla rarità di aree che mantengono caratteristiche di elevata coerenza in tempi così lunghi, i risultati dell'analisi RAINS-slow hanno permesso di osservare che:

- l'area nella parte bassa dell'Unità Morfologica 3, in corrispondenza della quale oltre a depositi alluvionali sono cartografati depositi di frana stabilizzata ed il piede del deposito di frana attiva, è soggetta ad uno spostamento con prevalente componente orizzontale. Si tratta di velocità di spostamento estremamente ridotte (comprese tra 4 e 7 mm/anno lungo la LOS) rilevate sia come avvicinamento in geometria di volo ascendente (Figura 15) che come allontanamento nel dataset discendente (Figura 16). Questi valori sono confermati anche dall'analisi MT-SBA. Le serie storiche di spostamento cumulato indicano uno spostamento in allontanamento per il dataset discendente (Figura 26 a), ed in avvicinamento per il dataset ascendente (Figura 26 b) pari a circa 20 mm lungo la LOS.
- Lo stack ottenuto in geometria di volo discendente (Figura 12), che presenta copertura maggiore dell'ascendente (Figura 11), indica aree soggette a spostamento anche in corrispondenza di Busa del

Vent, nella parte alta del versante al limite tra l'Unità Morfologica 1 e 2 (Figura 14) e dei trench legati alla DPGV nell'Unità Morfologica 4 (Figura 16). Si tratta in entrambi i casi di velocità di spostamento estremamente ridotte, pari al massimo ad 8 mm/anno lungo la LOS.

Anche i risultati dell'analisi MT-SBA mostrano velocità di spostamento ridotte, pari al massimo a 20 mm/anno lungo la LOS. Attraverso l'analisi MT-SBA è stato possibile:

- confermare l'area soggetta a debole spostamento nella parte bassa dell'Unità Morfologica 3, ed ottenere le relative serie temporali di spostamento;
- confermare segnali di attività in corrispondenza dei depositi glaciali e trench legati alla DGPV nell'Unità Morfologica 4, soprattutto nel dataset discendente (Figura 25, Figura 26 a) ed ottenere le relative serie temporali di spostamento;
- individuare un'area nell'Unità Morfologica 5, in corrispondenza della quale non sono disponibili dati RAINS-slow. Si tratta una zona sita su di un deposito di frana cartografato come stabilizzato (Figura 27, Figura 28, Figura 1). La serie storica rilevata dal dataset ascendente mostra uno spostamento cumulato di poco inferiore a 75 mm in avvicinamento lungo la LOS (Figura 29 a). In geometria di volo discendente, lo spostamento cumulato in allontanamento lungo la LOS è pari a circa 30 mm. Questa apparente discrepanza è legata alla differente distribuzione dei riflettori nei due dataset, che sono differentemente ubicati e non direttamente confrontabili (Figura 27, Figura 28).

	ASSE FERROVIARIO MONACO - VERONA ACCESSO SUD ALLA GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FORTEZZA - VERONA LOTTO 3A: CIRCONVALLAZIONE DI TRENTO					
	RAPPORTO SULL'ANALISI INTERFEROMETRICA RADAR SATELLITARE DEL M. MARZOLA (dati Sentinel 2016-20)	COMMESSA IB0Q	LOTTO 3A	CODIFICA R69RH	DOCUMENTO GE 00 05 001	REV. A

6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari & E. Sansosti (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. – *Ieee Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 40 (11), pp. 2375–2383; New York.

Bürgmann, R., P. A. Rosen & E. J. Fielding (2000): Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. – *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28 (), pp. 169–209;

Ferretti, A., C. Prati & F. Rocca (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. – *Ieee Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, 39 (1), pp. 8–20; New York.

Hooper, A., H. Zebker, P. Segall & B. Kampes (2004): A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. – *Geophysical Research Letters*, 31 (23), p. L23611; Washington DC.

Hooper, A. (2008): A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. – *Geophysical Research Letters*, 35 (16), p. L16302; Washington DC.

Massonnet, D. & K. L. Feigl (1998): Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. – *Reviews of Geophysics*, 36 (4), pp. 441–500;

Rosen, P. A., S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez & R. M. Goldstein (2000): Synthetic aperture radar interferometry - Invited paper. – *Proceedings of the Ieee*, 88 (3), pp. 333–382; New York.

Schmidt, D. A. & R. Burgmann (2003): Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. – *J. Geophys. Res.* 108 (B9), pp. 1–13; International.