

ITINERARIO INTERNAZIONALE E78 S.G.C. GROSSETO – FANO
Tratto Selci Lama (E45) – S. Stefano di Gaifa
Adeguamento a 2 corsie della Galleria della Guinza (lotto 2)
e del tratto Guinza – Mercatello Ovest (lotto 3)
1° stralcio

PROGETTO ESECUTIVO

COD. AN58

PROGETTAZIONE:
RAGGRUPPAMENTO
TEMPORANEO PROGETTISTI

MANDATARIA:



MANDANTI:



sinergo

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI
SPECIALISTICHE:

Ing. Riccardo Formichi – Società Pro Iter Srl
Ordine Ingegneri Provincia di Milano n. 18045

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Massimo Mezzanzanica – Società Pro Iter Srl
Albo Geol. Lombardia n. A762

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Ing. Massimo Mangini – Società Erre.Vi.A Srl
Ordine Ingegneri Provincia di Varese n. 1502

VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO:

Dott. ing. Vincenzo Catone

PROTOCOLLO:

DATA:



03 - GEOLOGIA E GEOTECNICA

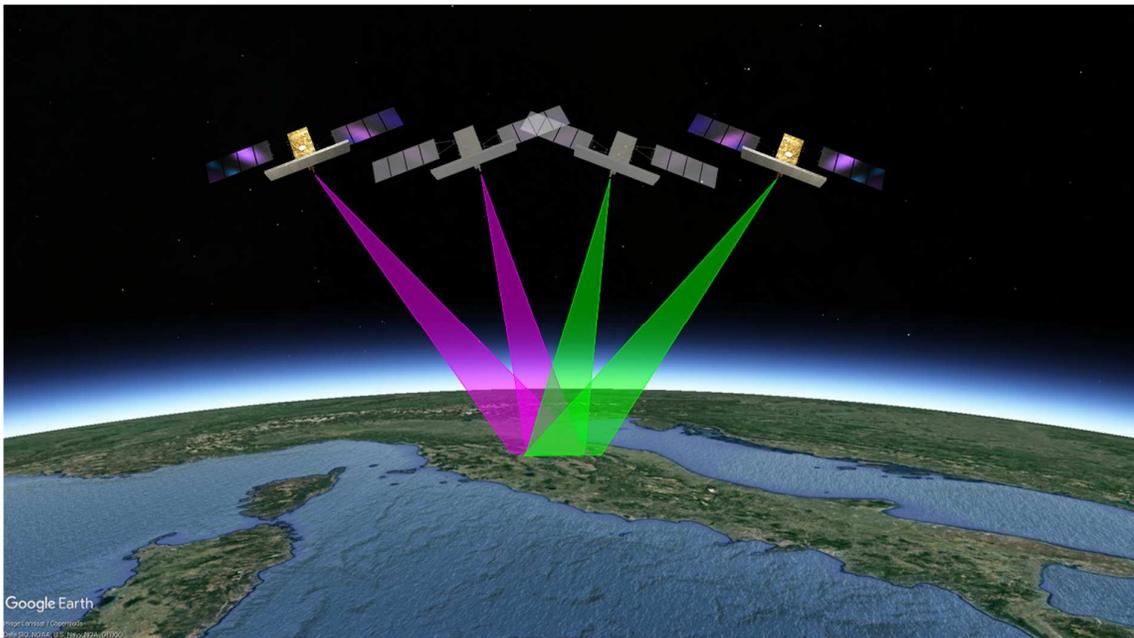
03.01 - GEOLOGIA

Studio delle deformazioni storiche con interferometria SAR satellitare - Relazione tecnica Nhazca

CODICE PROGETTO			NOME FILE		REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.	T00GE01GEORE02A.pdf			
LO702M	E	2101	CODICE ELAB.	T00GE01GEORE02	A	R
D						
C						
B						
A	EMISSIONE		FEBBRAIO 2023	NHAZCA	MEZZANZANICA	FORMICHI
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

**STUDIO DELLE DEFORMAZIONI STORICHE CON
INTERFEROMETRIA SAR SATELLITARE NELL'AMBITO DEL
PROGETTO DEFINITIVO "ITINERARIO INTERNAZIONALE E78
S.G.C. GROSSETO – FANO. TRATTO SELCI LAMA (E45) - S.
STEFANO DI GAIFA. ADEGUAMENTO A 2 CORSIE DELLA
GALLERIA DELLA GUINZA (LOTTO 2°) E DEL TRATTO GUINZA -
MERCATELLO OVEST (LOTTO 3°)"**

RELAZIONE TECNICA



Cliente: ANAS S.p.A.
Rif. contratto: CIG Y0B2C3DF29
N° Prot.: NZ1441-U_171220
Data emissione: 17-12-2020
Redatto da: Dott. S. Scancella, Dott. N. Belcecchi
Revisionato da: Dott.ssa S. Moretto, PhD

INDICE

GLOSSARIO	3
1. INTRODUZIONE ALLE ATTIVITÀ.....	5
2. ATTIVITÀ SVOLTE	7
2.1. Selezione ed acquisizione delle immagini SAR satellitari e dei dati di base.....	7
2.2. Elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare	10
2.3. Post-elaborazione e validazione dei risultati.....	14
2.4. Sopralluoghi tecnici di sito.....	14
2.5. Restituzione dei risultati A-DInSAR	18
3. RISULTATI OTTENUTI	19
3.1 Analisi A-DInSAR relative all'intera area di studio.....	19
3.2 Risultati derivanti dalle attività di post-elaborazione	22
3.2.1 Settore 1	26
3.2.2 Settore 2.....	29
3.2.3 Settore 3.....	29
4. CONCLUSIONI	41
BIBLIOGRAFIA	44
APPENDICE	45
<i>L'Interferometria SAR Satellitare</i>	<i>45</i>
<i>Generalità sui sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar).....</i>	<i>45</i>
<i>Le immagini SAR satellitari.....</i>	<i>47</i>
<i>La costellazione COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI)</i>	<i>49</i>
<i>Principi di base dell'Interferometria SAR differenziale (DInSAR)</i>	<i>49</i>
<i>Analisi con metodologia Advanced DInSAR.....</i>	<i>52</i>

GLOSSARIO

A-DInSAR

Acronimo di “*Advanced Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar*”. Tipologia di tecniche di elaborazione di immagini SAR satellitari che si basano sull'utilizzo di *stack* (cfr. *Stack*) multitemporali.

Geometria orbitale

I satelliti dotati di sensori SAR orbitano attorno alla Terra secondo orbite circa-parallele ai meridiani (quasi-polari). La contemporanea rotazione del pianeta attorno al suo asse, consente ai satelliti di osservare l'intera superficie terrestre. Il satellite, quindi, è in grado di sorvolare una medesima area sia durante l'orbita ascendente (da Sud verso Nord) che discendente (da Nord verso Sud). Poiché la linea di vista del sensore (LOS) è inclinata rispetto alla direzione nadirale, il satellite è in grado di osservare la medesima area da due punti di vista diversi durante l'acquisizione dei dati. La maggior parte dei satelliti utilizza una configurazione *right-looking* (osserva verso destra), perciò, in geometria ascendente le immagini sono acquisite con il fascio *radar* proveniente da Ovest, mentre in geometria discendente vengono acquisite con il sensore che osserva da Est.

LOS

Linea di vista del satellite misurata lungo la congiungente sensore-bersaglio a terra (sia esso naturale o artificiale).

RADAR

Acronimo per “*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging”, ovvero individuazione e misurazione di distanze attraverso onde radio. Il termine identifica un sistema basato sull'utilizzo di onde elettromagnetiche per la rilevazione di un oggetto nello spazio e per la misura della loro distanza sfruttando il principio della dispersione verso un'antenna ricevente, della radiazione elettromagnetica inviata da un'antenna trasmittente. Il sistema si basa sulla misura del tempo necessario al segnale a percorrere il tragitto che separa il target dal sensore.

SAR

Acronimo per “*S*ynthetic *A*pertura *R*adar”, ovvero “*Rad*ar ad apertura sintetica”, rappresenta una particolare tipologia di *radar* la cui caratteristica è di sfruttare il moto lungo una traiettoria

predefinita per mezzo di una piattaforma aerea (orbita di un satellite, direzione di volo di un aereo, etc.) o terrestre (vengono frequentemente utilizzati sistemi elettromeccanici con sensori *radar* che si muovono su binari di lunghezza di ordine metrico). Attraverso tale soluzione diventa possibile osservare la stessa area da più angoli di vista, "simulando" quindi, un'antenna di grandi dimensioni al fine di incrementare la risoluzione al suolo.

Stack

Dataset multitemporale di immagini SAR acquisite con le medesime caratteristiche (risoluzione, polarizzazione, geometria orbitale, angolo di incidenza, etc.) su una stessa area in un determinato intervallo di tempo. Rappresenta il dato di base per l'esecuzione di analisi A-DInSAR.

1. INTRODUZIONE ALLE ATTIVITÀ

Facendo seguito all'affidamento dell'incarico avente ad oggetto "Studio delle deformazioni storiche con Interferometria SAR Satellitare nell'ambito del Progetto Definitivo "Itinerario internazionale E78 S.G.C. Grosseto – Fano Selci Lama (E45) - S. Stefano di Gaifa. Adeguamento a 2 corsie della Galleria della Guinza (lotto 2°) e del Tratto Guinza - Mercatello Ovest (lotto 3°)" (CIG: Y0B2C3DF29), NHAZCA S.r.l. ha eseguito un'analisi storica con tecniche A-DInSAR (Advanced Differential SAR Interferometry) e DInSAR (Differential SAR Interferometry) su dati COSMO-SkyMed (Agenzia Spaziale Italiana) d'archivio per la stima di eventuali spostamenti subiti dal terreno e dalle strutture ricadenti all'interno di un'area di 10 km² (Figura 1). Le analisi sono state condotte su un dataset in doppia geometria orbitale (ascendente e discendente) acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed nel periodo compreso tra Maggio 2011 e Ottobre 2020.

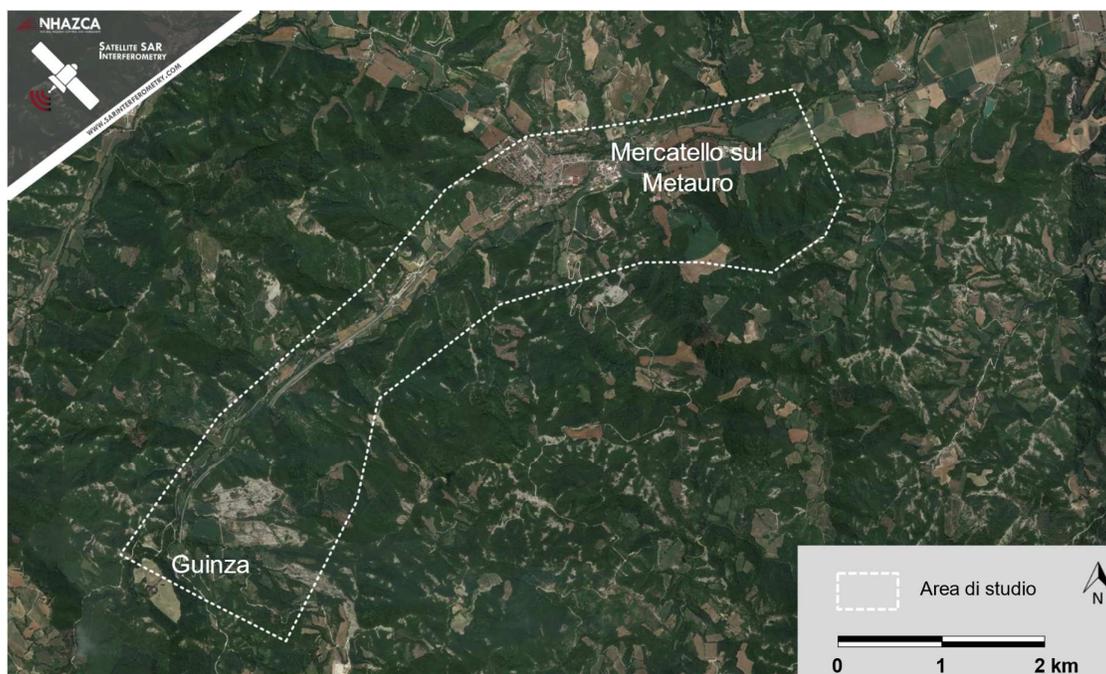


Figura 1: Ubicazione dell'area di studio (poligono bianco tratteggiato), comprensiva del tratto stradale compreso tra Guinza e Mercatello sul Metauro (PU).

L'obiettivo dell'attività è stato quello di fornire informazioni sul comportamento deformativo storico per la caratterizzazione qualitativa e quantitativa di eventuali processi deformativi e di instabilità preesistenti in considerazione il contesto geologico e geomorfologico dell'area.

Si riporta, di seguito, una descrizione delle attività svolte e dei risultati ottenuti.

La restituzione e la trasmissione dei risultati dell'analisi A-DInSAR è fornita anche mediante accesso al portale web **NHAZCA InSAR Visualization Tool** attraverso accessi con utenze riservate (<http://visualizationtool.sarinterferometry.com/>).

Per una adeguata comprensione della tecnica utilizzata si rimanda all'Appendice riportata nella parte finale del presente documento.

2. ATTIVITÀ SVOLTE

Vengono descritte di seguito le principali attività svolte per le analisi A-DInSAR con dati COSMO-SkyMed (per il periodo 2011-2020). Più in dettaglio, si riportano di seguito le principali attività:

- selezione e acquisizione delle immagini SAR satellitari e dei dati di base (par. 2.1);
- elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare (par.2.2);
- post-elaborazione e validazione dei risultati (par. 2.3);
- sopralluoghi tecnici di sito (par. 2.4);
- restituzione dei risultati (par. 2.5).

2.1. Selezione ed acquisizione delle immagini SAR satellitari e dei dati di base

La scelta delle immagini SAR satellitari è stata guidata dall'esigenza di garantire un'adeguata copertura temporale di dati storici d'archivio e una quantità di immagini (*stack*) sufficiente per la tipologia di studio richiesta. Nello specifico, al fine di caratterizzare al meglio eventuali processi deformativi nell'area di indagine, sono stati selezionati due *stack* (Figura 3), uno composto di immagini SAR acquisite in geometria orbitale ascendente e uno in geometria orbitale discendente. L'osservazione in doppia geometria consente di ottimizzare la copertura dell'area di interesse e la stima degli spostamenti attraverso la misura degli stessi da punti di vista differenti, come mostrato in Figura 2.

Per il presente studio, sono state utilizzate in totale **277 immagini SAR** (Figura 4, Figura 5 e Figura 6) provenienti dagli archivi dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) così distribuite:

- **128 immagini** in formato *Single Look Complex* (SLC) acquisite in geometria orbitale ascendente ad opera dei satelliti **COSMO-SkyMed** dal **9 Maggio 2011 al 24 Ottobre 2020** (Figura 4 e Figura 5);
- **149 immagini** in formato *Single Look Complex* (SLC) acquisite in geometria orbitale discendente ad opera dei satelliti **COSMO-SkyMed** dal **5 Marzo 2012 al 21 Ottobre 2020** (Figura 4 e Figura 6).

Un dato ausiliario utile all'esecuzione delle analisi interferometriche è rappresentato dal modello digitale di elevazione del terreno (*Digital Elevation Model - DEM*) che fornisce le informazioni di base relative alle quote dell'area di indagine e consente la geocodifica dei risultati. Per il presente lavoro, è stato utilizzato il DEM TINITALY/01 (Tarquini et al., 2007) con 10 m di risoluzione spaziale.

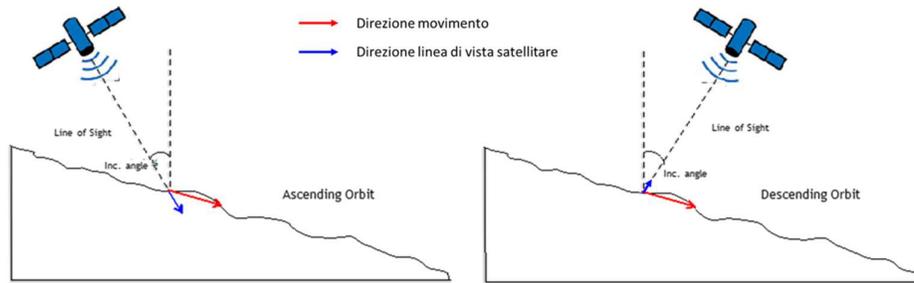


Figura 2: Rappresentazione schematica dell'interazione tra la linea di vista satellitare (LOS) e la topografia locale per un versante con esposizione a Est. In rosso il movimento reale, in blu lo stesso proiettato lungo la LOS satellitare in funzione della geometria orbitale ascendente (sinistra) e discendente (destra).

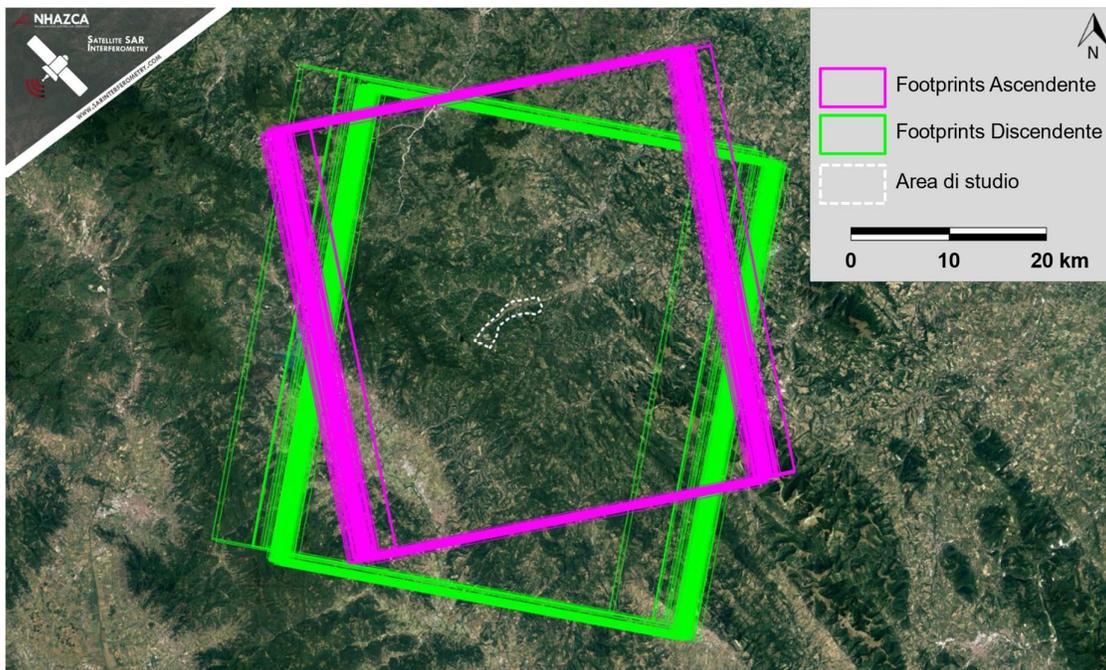


Figura 3: footprint delle immagini SAR satellitari utilizzate, in geometria orbitale ascendente e discendente, con ubicazione dell'area di studio.

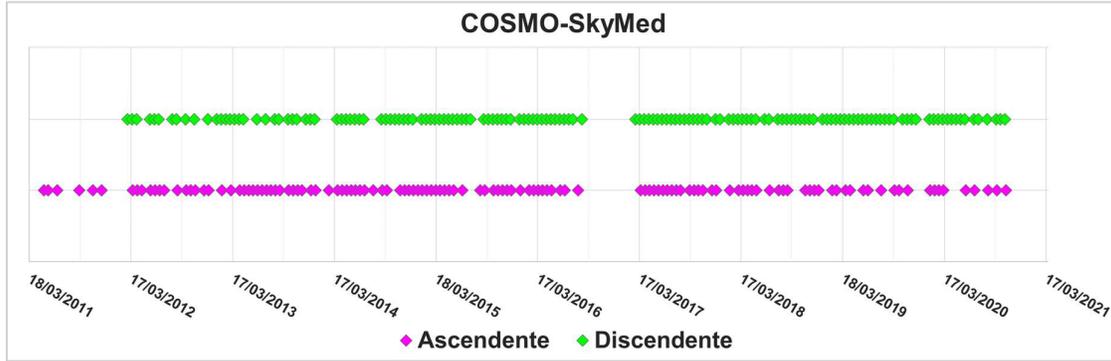


Figura 4: distribuzione temporale delle immagini SAR satellitari utilizzate.

COSMO-SkyMed Ascendente											
1	09/05/2011	31	03/09/2013	61	20/05/2015	91	30/09/2017	121	11/02/2020		
2	25/05/2011	32	05/10/2013	62	21/06/2015	92	16/10/2017	122	27/02/2020		
3	26/06/2011	33	21/10/2013	63	24/08/2015	93	01/11/2017	123	14/03/2020		
4	14/09/2011	34	06/11/2013	64	09/09/2015	94	03/12/2017	124	02/06/2020		
5	01/11/2011	35	22/11/2013	65	11/10/2015	95	19/12/2017	125	04/07/2020		
6	03/12/2011	36	24/12/2013	66	27/10/2015	96	05/02/2018	126	21/08/2020		
7	24/03/2012	37	09/01/2014	67	12/11/2015	97	09/03/2018	127	22/09/2020		
8	09/04/2012	38	26/02/2014	68	28/11/2015	98	25/03/2018	128	24/10/2020		
9	25/04/2012	39	30/03/2014	69	14/12/2015	99	10/04/2018				
10	27/05/2012	40	15/04/2014	70	15/01/2016	100	26/04/2018				
11	12/06/2012	41	01/05/2014	71	16/02/2016	101	12/05/2018				
12	28/06/2012	42	17/05/2014	72	03/03/2016	102	29/06/2018				
13	14/07/2012	43	02/06/2014	73	19/03/2016	103	31/07/2018				
14	31/08/2012	44	18/06/2014	74	04/04/2016	104	16/08/2018				
15	02/10/2012	45	04/07/2014	75	20/04/2016	105	01/09/2018				
16	18/10/2012	46	05/08/2014	76	06/05/2016	106	04/11/2018				
17	03/11/2012	47	06/09/2014	77	07/06/2016	107	20/11/2018				
18	05/12/2012	48	22/09/2014	78	23/06/2016	108	06/12/2018				
19	21/12/2012	49	09/11/2014	79	10/08/2016	109	22/12/2018				
20	07/02/2013	50	25/11/2014	80	22/03/2017	110	08/02/2019				
21	11/03/2013	51	11/12/2014	81	07/04/2017	111	24/02/2019				
22	12/04/2013	52	27/12/2014	82	23/04/2017	112	28/03/2019				
23	28/04/2013	53	12/01/2015	83	09/05/2017	113	13/04/2019				
24	14/05/2013	54	28/01/2015	84	25/05/2017	114	31/05/2019				
25	30/05/2013	55	13/02/2015	85	10/06/2017	115	16/06/2019				
26	15/06/2013	56	01/03/2015	86	26/06/2017	116	03/08/2019				
27	01/07/2013	57	17/03/2015	87	12/07/2017	117	20/09/2019				
28	17/07/2013	58	02/04/2015	88	28/07/2017	118	06/10/2019				
29	02/08/2013	59	18/04/2015	89	13/08/2017	119	07/11/2019				
30	18/08/2013	60	04/05/2015	90	14/09/2017	120	26/01/2020				

Figura 5: calendario delle acquisizioni delle immagini SAR COSMO-SkyMed utilizzate (geometria orbitale ascendente).

COSMO-SkyMed Discendente									
1	05/03/2012	31	28/04/2014	61	25/11/2015	91	13/10/2017	121	26/04/2019
2	21/03/2012	32	14/05/2014	62	11/12/2015	92	29/10/2017	122	12/05/2019
3	06/04/2012	33	30/05/2014	63	12/01/2016	93	14/11/2017	123	28/05/2019
4	24/05/2012	34	15/06/2014	64	28/01/2016	94	16/12/2017	124	13/06/2019
5	09/06/2012	35	01/07/2014	65	13/02/2016	95	01/01/2018	125	29/06/2019
6	25/06/2012	36	03/09/2014	66	29/02/2016	96	02/02/2018	126	15/07/2019
7	12/08/2012	37	19/09/2014	67	16/03/2016	97	18/02/2018	127	31/07/2019
8	28/08/2012	38	05/10/2014	68	01/04/2016	98	06/03/2018	128	16/08/2019
9	29/09/2012	39	21/10/2014	69	17/04/2016	99	22/03/2018	129	01/09/2019
10	31/10/2012	40	06/11/2014	70	03/05/2016	100	07/04/2018	130	17/09/2019
11	18/12/2012	41	22/11/2014	71	19/05/2016	101	23/04/2018	131	19/10/2019
12	19/01/2013	42	08/12/2014	72	04/06/2016	102	09/05/2018	132	04/11/2019
13	04/02/2013	43	24/12/2014	73	20/06/2016	103	10/06/2018	133	20/11/2019
14	20/02/2013	44	25/01/2015	74	06/07/2016	104	26/06/2018	134	06/12/2019
15	08/03/2013	45	10/02/2015	75	22/07/2016	105	28/07/2018	135	23/01/2020
16	24/03/2013	46	26/02/2015	76	23/08/2016	106	13/08/2018	136	08/02/2020
17	09/04/2013	47	14/03/2015	77	03/03/2017	107	29/08/2018	137	24/02/2020
18	25/04/2013	48	30/03/2015	78	19/03/2017	108	14/09/2018	138	11/03/2020
19	12/06/2013	49	15/04/2015	79	04/04/2017	109	30/09/2018	139	27/03/2020
20	14/07/2013	50	01/05/2015	80	20/04/2017	110	16/10/2018	140	12/04/2020
21	15/08/2013	51	17/05/2015	81	06/05/2017	111	01/11/2018	141	28/04/2020
22	31/08/2013	52	02/06/2015	82	22/05/2017	112	17/11/2018	142	14/05/2020
23	02/10/2013	53	18/06/2015	83	07/06/2017	113	03/12/2018	143	30/05/2020
24	18/10/2013	54	04/07/2015	84	23/06/2017	114	04/01/2019	144	01/07/2020
25	03/11/2013	55	20/07/2015	85	09/07/2017	115	20/01/2019	145	17/07/2020
26	05/12/2013	56	06/09/2015	86	25/07/2017	116	05/02/2019	146	18/08/2020
27	21/12/2013	57	22/09/2015	87	10/08/2017	117	21/02/2019	147	19/09/2020
28	06/01/2014	58	08/10/2015	88	26/08/2017	118	09/03/2019	148	05/10/2020
29	27/03/2014	59	24/10/2015	89	11/09/2017	119	25/03/2019	149	21/10/2020
30	12/04/2014	60	09/11/2015	90	27/09/2017	120	10/04/2019		

Figura 6: calendario delle acquisizioni delle immagini SAR COSMO-SkyMed utilizzate (geometria orbitale discendente).

2.2. Elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare

I due *stack* di immagini COSMO-SkyMed sono stati analizzati separatamente attraverso un *workflow* che prevede l'elaborazione mediante metodologie A-DInSAR e DInSAR mediante procedure proprietarie a cui si aggiungono attività di validazione e post-elaborazione dei risultati.

Tale analisi consente l'individuazione di eventuali fenomeni di deformazione estesi e, in funzione della risoluzione delle immagini SAR utilizzate, l'individuazione di oggetti a terra coinvolti in processi deformativi localizzati. Inoltre, grazie alla capacità di ottenere serie temporali di spostamento con accuratezza millimetrica, è possibile estrarre informazioni sull'evoluzione temporale dei processi deformativi.

Le analisi per ciascun *dataset* sono state eseguite alla scala dell'intera area di indagine (Figura 1), attraverso l'identificazione di un punto di riferimento esterno al tracciato di interesse. Al fine di ottimizzare l'affidabilità dei risultati, tale punto di riferimento, è stato comunque localizzato

all'interno dell'area di studio (localizzazione approssimativa: lat. 43.647°; lon. 12,338° per la geometria orbitale ascendente e lat. 43.645°; lon. 12.335° per la discendente).

Per ogni *dataset* è stata selezionata un'immagine *master* a cui riferire le altre immagini del *dataset* per il calcolo delle differenze di fase. Il primo stadio nell'analisi *A-DInSAR* è stata la selezione dei **MPC (MP Candidates)**, ovvero l'identificazione dei punti idonei ad essere analizzati. Per questo scopo viene analizzata la **mappa della riflettività** (Figura 7 e Figura 8), ottenuta come media non coerente delle ampiezze delle immagini *radar*. Essa rappresenta, quindi, la riflettività media dei *pixel* delle immagini nel tempo. Oggetti molto riflettenti e ben visibili dal satellite come edifici, rocce esposte, etc. presentano valori più alti di riflettività (più "bianchi") rispetto ad aree vegetate, specchi d'acqua etc. (più scure).

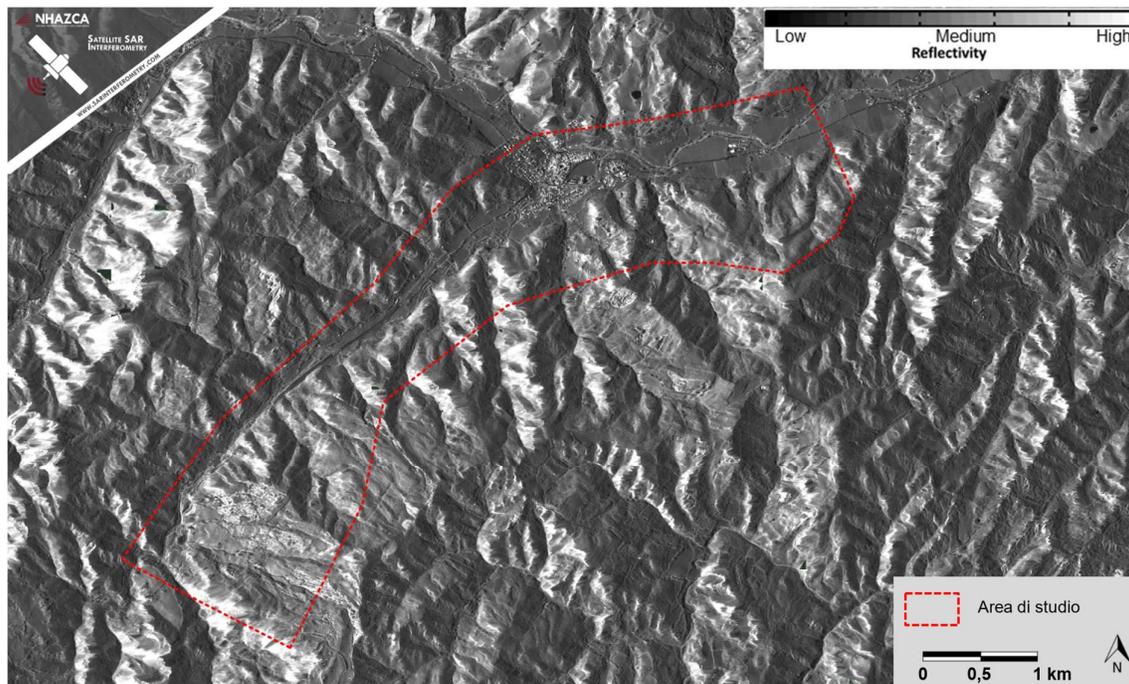


Figura 7: mappa di riflettività della zona di interesse per il *dataset* COSMO-SkyMed ascendente. A ogni *pixel* SAR rilevato a terra viene assegnato un tono di grigio con valore crescente dal nero al bianco, corrispondente al livello di riflettività del *pixel* stesso.

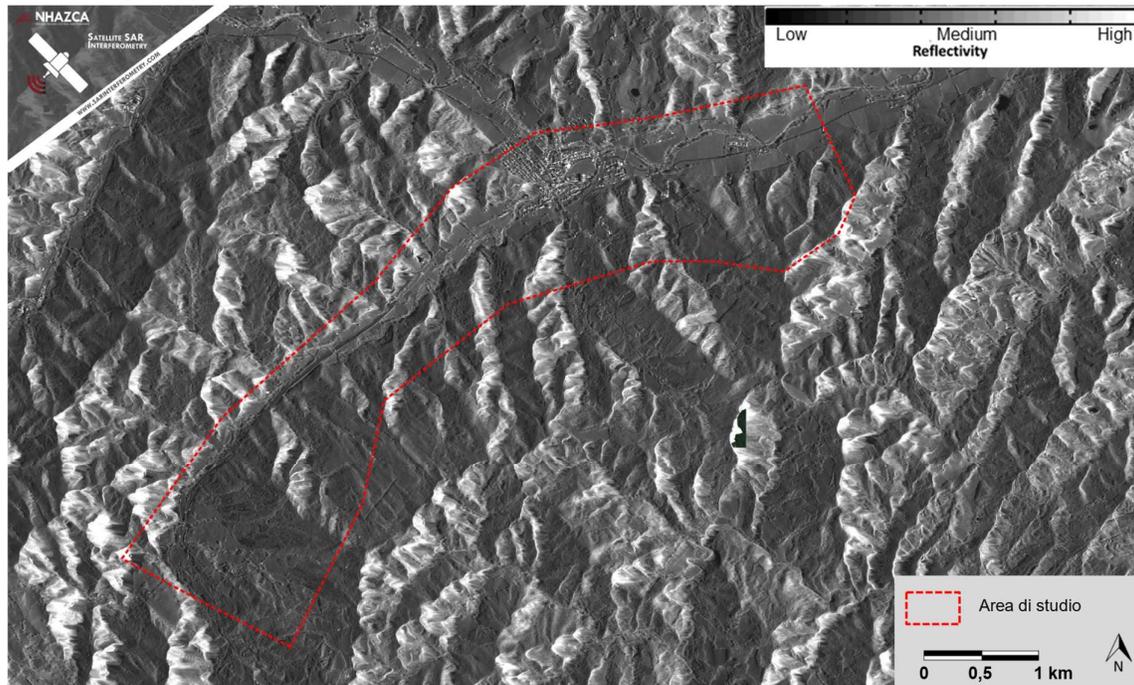


Figura 8: mappa di riflettività della zona di interesse per il *dataset* COSMO-SkyMed discendente. A ogni *pixel* SAR rilevato a terra viene assegnato un tono di grigio con valore crescente dal nero al bianco corrispondente al livello di riflettività del *pixel* stesso.

I **MPC** sono stati selezionati sull'area di indagine con una distribuzione il più omogenea possibile e valutando un'opportuna soglia del valore di **Amplitude Stability Index**, ovvero dell'indice di stabilità della riflettività nel tempo e di **Spatial Coherence** (Figura 9 e Figura 10), ovvero la coerenza media degli interferogrammi opportunamente generati.

Uno dei requisiti essenziali per l'esecuzione di un'analisi A-DInSAR è, infatti, rappresentato dalla stabilità nel tempo del segnale elettromagnetico relativo ai punti da sottoporre all'analisi stessa (cfr. *Appendice*).

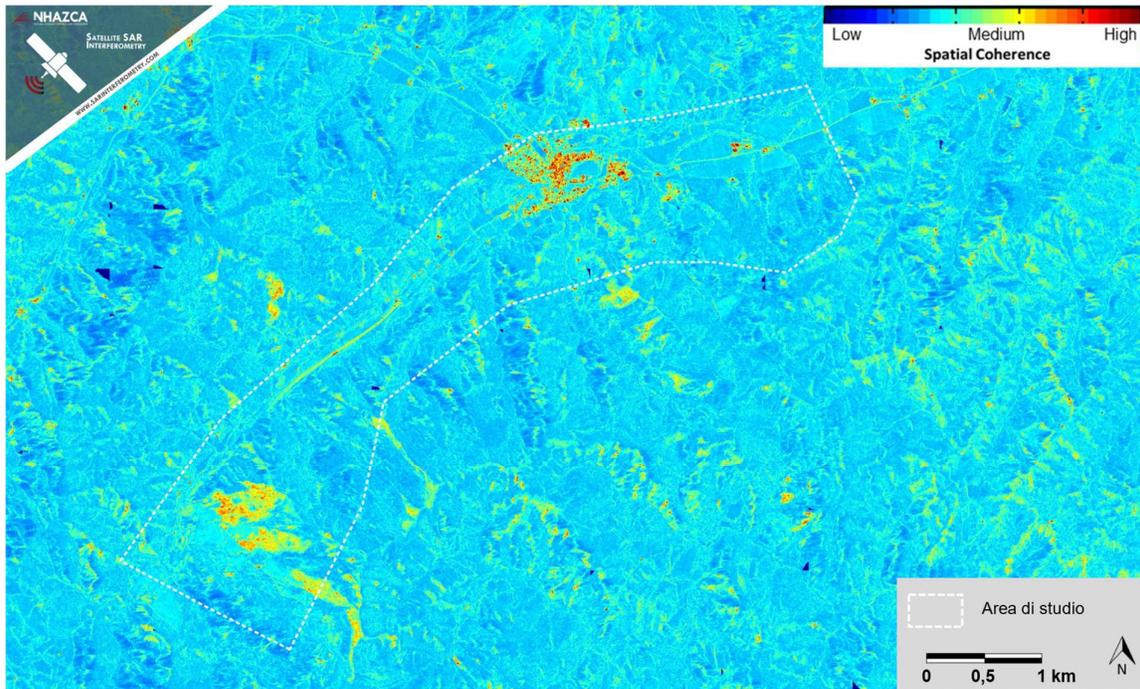


Figura 9: mappa di Spatial Coherence della zona di interesse per il *dataset* COSMO-SkyMed ascendente.

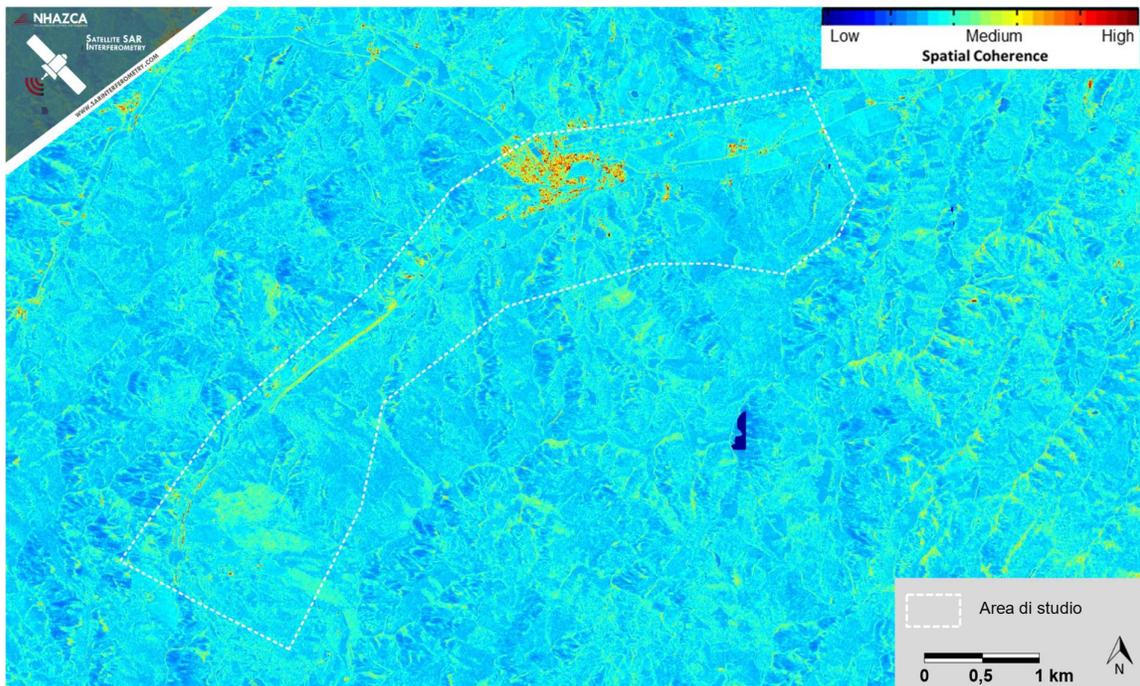


Figura 10: mappa di Spatial Coherence della zona di interesse per il *dataset* COSMO-SkyMed discendente.

Una volta analizzati i dati di base relativi al segnale radar e identificati i MPC, grazie all'algoritmo impiegato nelle analisi è stato possibile stimare la componente di fase legata al disturbo atmosferico (*Atmospheric Phase Screen, APS*) per ciascuna delle immagini costituenti il *dataset*.

Proprio grazie all'eliminazione del contributo delle APS dalla fase interferometrica, è stato possibile stimare i valori dei *trend* di spostamento (in mm/anno), per tutti i punti di interesse, sempre in relazione al *reference point* scelto.

Infine, con l'obiettivo di individuare ulteriori eventuali indizi di deformazione superficiale nelle aree di studio, sono state condotte delle analisi utilizzando la tradizionale tecnica interferometrica differenziale DInSAR (*Differential SAR Interferometry*). Tale tecnica è basata sull'analisi delle variazioni del valore di fase (tra $-\pi$ e $+\pi$) tra due distinte acquisizioni in modo tale da rilevare eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione di carattere intermittente/impulsivo.

2.3. Post-elaborazione e validazione dei risultati

Partendo dai risultati dell'analisi sopra descritta, è stato eseguito un processo di validazione, post-elaborazione e interpretazione del dato. In particolare, sono state applicate routine di validazione semiautomatica basate su algoritmi statistici e strumenti software proprietari di NHAZCA S.r.l., consentendo un controllo multi-parametrico punto a punto di tutti i punti di misura disponibili al fine di analizzare i comportamenti deformativi spaziali e temporali e di identificare e rimuovere gli *outliers*. La validazione è stata effettuata sulla base di alcuni parametri rilevanti quali la coerenza temporale, l'indice di stabilità in ampiezza, la velocità stimata, gli andamenti deformativi e le quote stimate. Le procedure di validazione hanno permesso di ottenere **circa 26.000 punti di misura (MP)** affidabili in tutta l'area di indagine **per la geometria orbitale ascendente e circa 25.000 MP affidabili per la geometria orbitale discendente**.

La post-elaborazione, effettuata attraverso algoritmi proprietari, ha permesso di estrarre le informazioni più utili in termini di spostamenti, aree coinvolte e anomalie locali per l'efficace comprensione e caratterizzazione dei fenomeni osservati.

2.4. Sopralluoghi tecnici di sito

Al fine di contestualizzare i risultati dell'analisi A-DInSAR nel quadro geomorfologico di sito e integrare le informazioni così ottenute nell'analisi dei processi deformativi presenti nell'area di

studio, sono stati svolti due sopralluoghi tecnici, prima dell'avvio delle analisi InSAR e prima dell'ultimazione del lavoro, rispettivamente in data 18/09/2020 e 15/12/2020, mirati a supportare la validazione dei dati A-DInSAR (Figura 11).

Questa attività integrativa è stata impostata sulla base delle informazioni desunte dalla letteratura, incluse alcune delle principali banche-dati relative ai processi deformativi del territorio. In particolare, sono stati consultati i seguenti prodotti:

- Foglio CARG n.278 "Pieve Santo Stefano" (1:50.000), ISPRA;
- Progetto IFFI (Figura 12), Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (APAT, 2007);
- Cartografia PAI vigente (AdB Distrettuale App. Centrale, agg. 2020);
- Carta Geomorfologica fornita dalla Committenza (Figura 13).

Le informazioni riguardo i processi deformativi ottenute dall'analisi A-DInSAR satellitare sono state verificate soprattutto per quanto concerne la distribuzione spaziale e le direzioni prevalenti di movimento in virtù della tipologia di processi attivi.

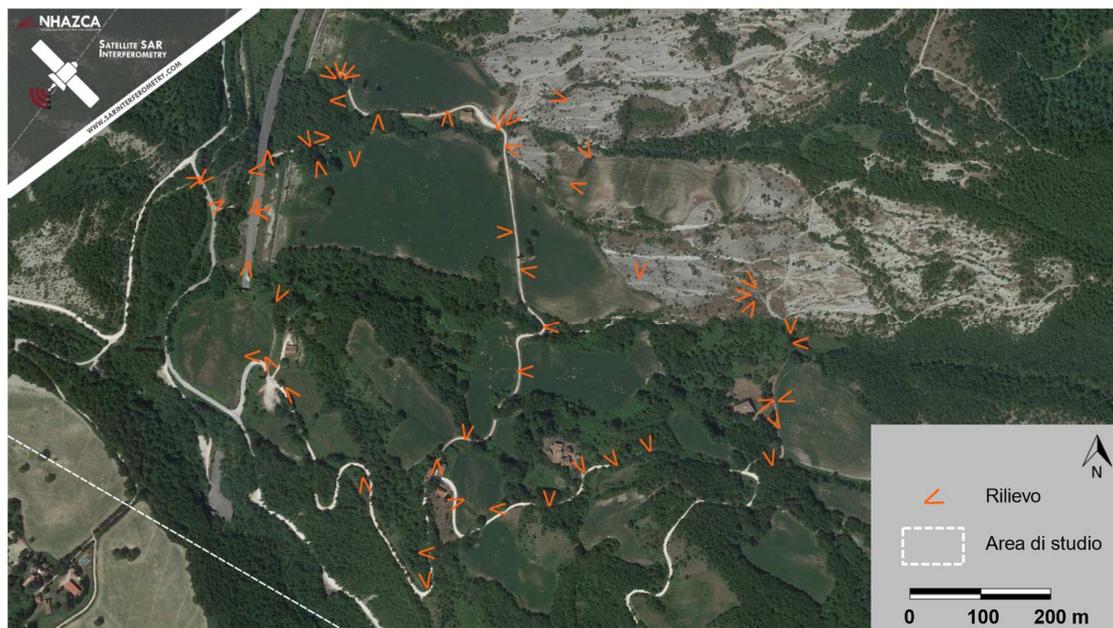


Figura 11: Veduta aerea dell'area maggiormente attenzionata durante i sopralluoghi tecnici di sito; le "V" in arancione sono posizionate in corrispondenza delle aree interessate da rilievi di terreno e report fotografici, la bisettrice delle stesse individua la linea di vista della macchina fotografica.

Catalogo frane - IFFI (Geoportale Nazionale)

- Crollo/ribaltamento
- Scivolamento rotazionale
- Espansione
- Colamento lento
- Colamento rapido
- Sprofondamento
- Complesso
- n.d.
- DGPV
- Aree soggette a crolli/ribaltamenti
- Aree soggette a sprofondamenti
- Aree soggette a frane superficiali

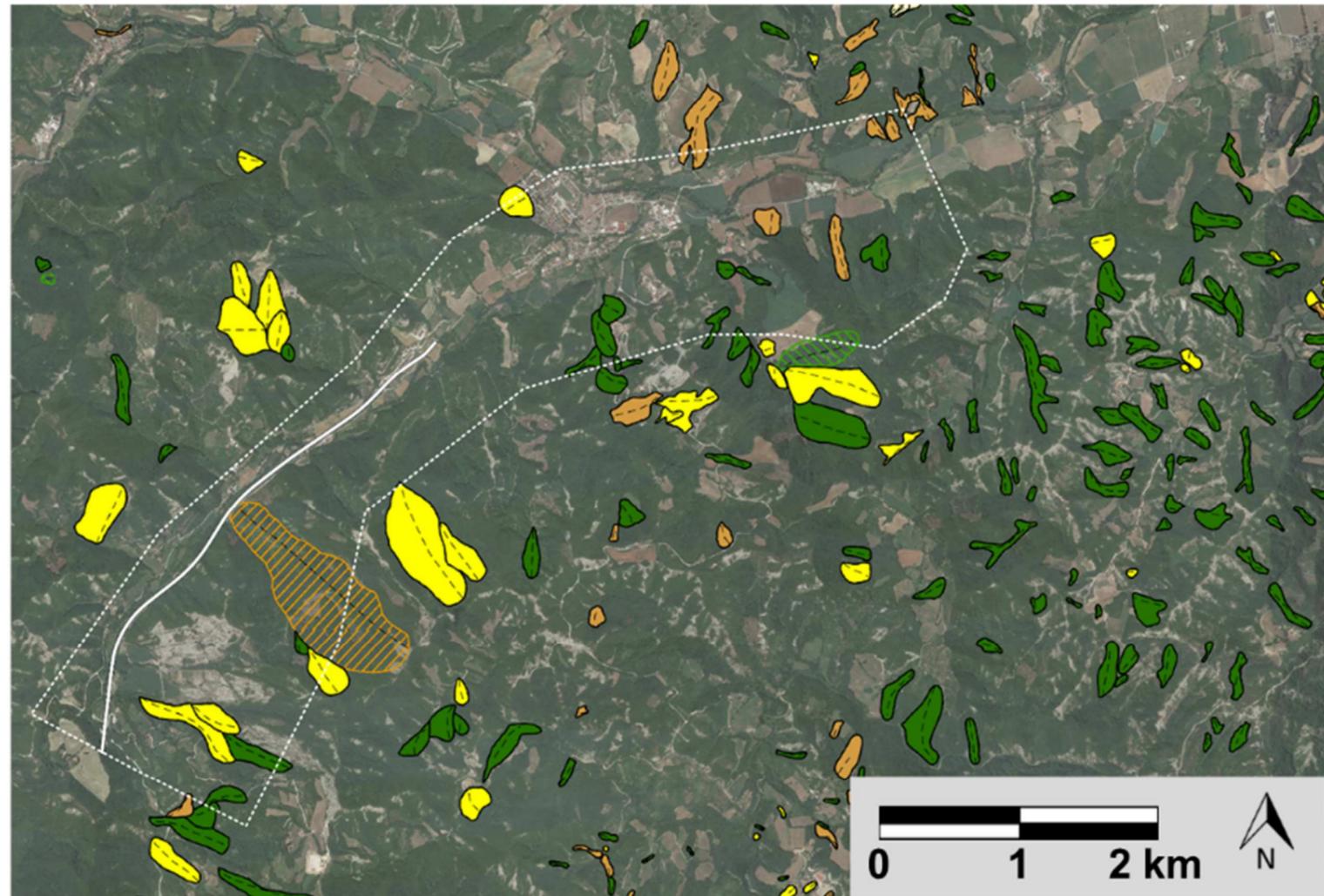


Figura 12: stralcio dal Progetto IFFI, Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (APAT, 2007).

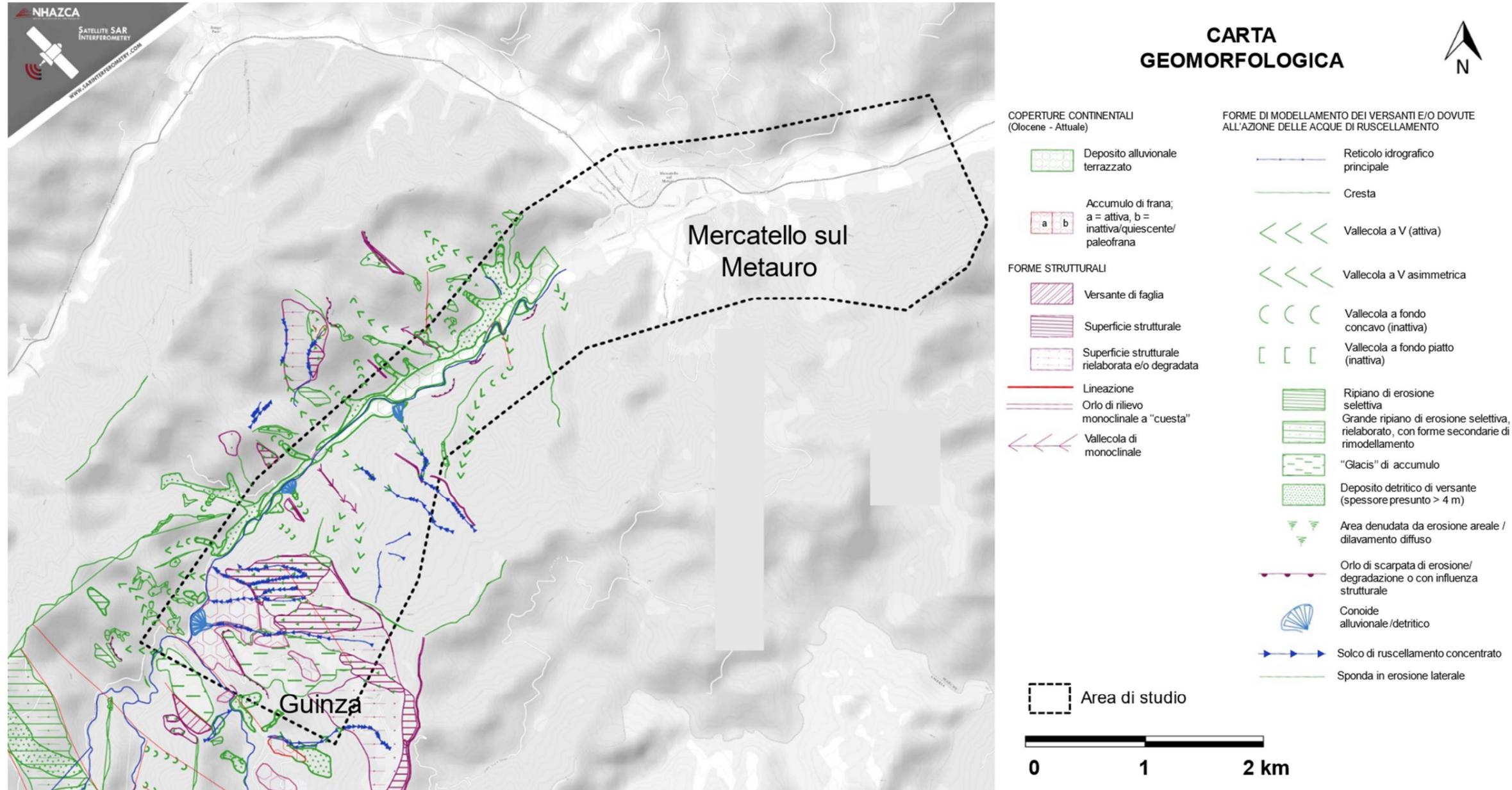


Figura 13: Stralcio della carta geomorfologica fornita dalla Committenza.

2.5. Restituzione dei risultati A-DInSAR

I risultati delle analisi sono di seguito restituiti attraverso mappe su basi ortofotografiche che mostrano le informazioni di spostamento. È stata adottata una scala di colori, espressa in mm/anno che rappresenta la velocità media di spostamento lungo la LOS con valori in allontanamento al sensore (colori dal giallo al rosso) e avvicinamento al sensore (colori dall'azzurro al blu); il colore verde indica aree con tassi di spostamento sui punti di misura non apprezzabile o non significativo. L'errore strumentale è stimato in circa ± 1 mm/anno.

3. RISULTATI OTTENUTI

3.1 Analisi A-DInSAR relative all'intera area di studio

I risultati ottenuti dall'analisi A-DInSAR sono riportati in Figura 14 e Figura 15 attraverso mappe che mostrano le velocità medie annue dei punti di misura (MP).

L'indagine eseguita ha consentito di ottenere una buona distribuzione spaziale dei MP lungo l'intera area di studio e in particolare sul tracciato stradale di interesse, sia in geometria ascendente che discendente, così da consentire un'osservazione ridondante degli eventuali processi deformativi che lo caratterizzano.

Nello specifico, sono stati identificati circa **50.000 MP** (complessivamente per le due geometrie orbitali) nell'intera area di indagine. I MP corrispondono ad elementi naturali e antropici presenti nell'area, caratterizzati da un'elevata stabilità alla riflessione delle onde radar nel tempo. Una maggiore densità di MP si rileva, di conseguenza, sul tracciato di interesse e nei centri abitati, mentre la densità risulta inferiore nelle aree densamente vegetate e coltivate. Dall'analisi delle mappe dei MP (sia in geometria orbitale ascendente che discendente) si evince chiaramente come, in alcuni settori, si rilevino spostamenti apprezzabili.

In particolare, relativamente all'area oggetto di studio, tra le zone maggiormente interessate da fenomeni deformativi (per entità di spostamento, quantità di punti di misura e ridondanza di informazione) si evidenzia l'area nei pressi degli abitati di **Guinza** e **Valpiana** (Figura 14 e Figura 15), dove si osserva un potenziale coinvolgimento delle opere Galleria Valpiana e Viadotto Valpiana, in prossimità delle quali si osservano deformazioni con velocità massima lungo LOS strumentale di circa 8 mm/anno.

Si rilevano, infine, punti di misura più o meno isolati con velocità eccedenti l'errore strumentale (pari a circa ± 1.0 mm/anno) in altri settori dell'area di studio.

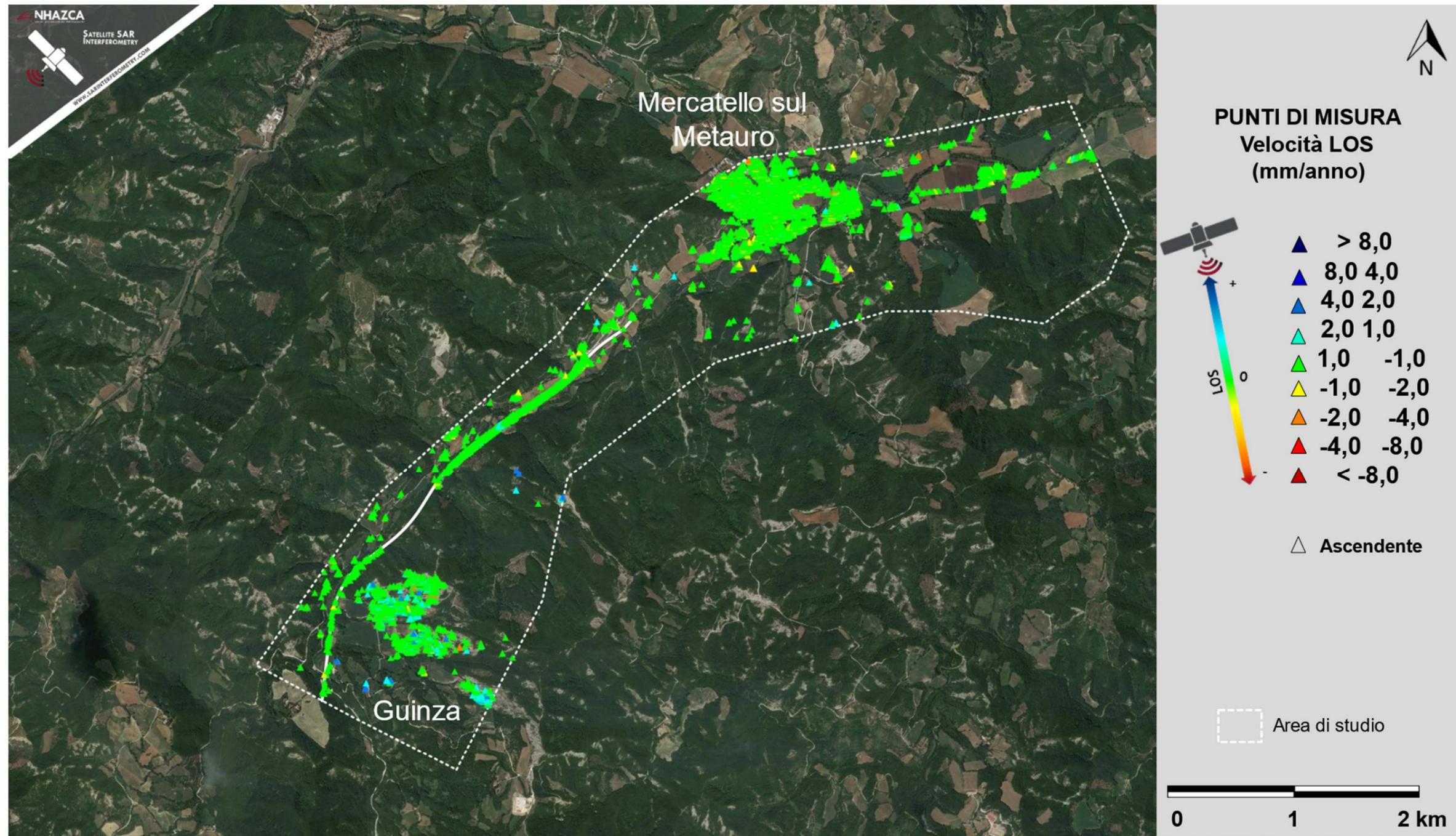


Figura 14: velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR nell'area di indagine – Stack ascendente.

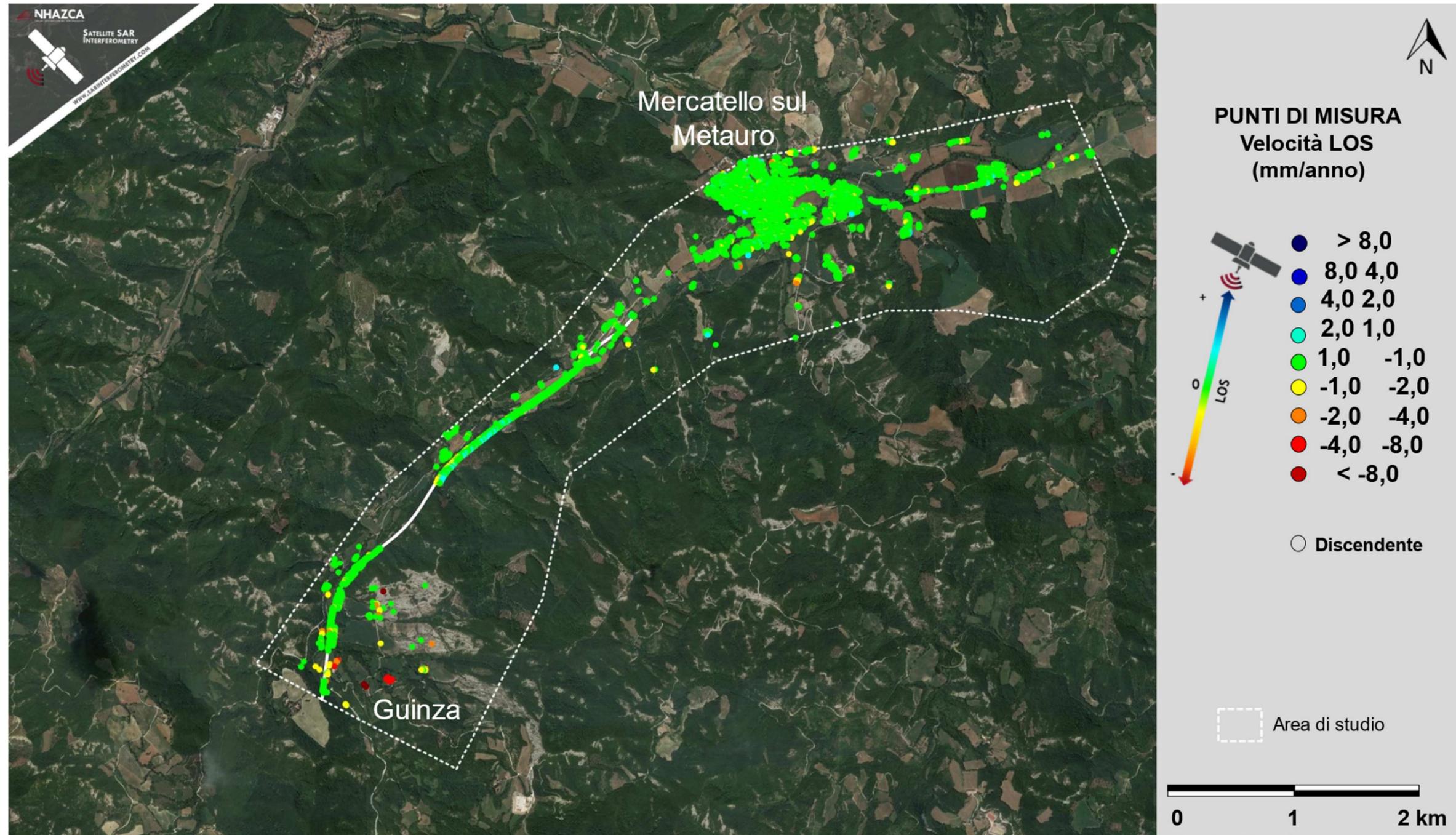


Figura 15: velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR nell'area di indagine – Stack discendente.

3.2 Risultati derivanti dalle attività di post-elaborazione

Le indagini integrative condotte (descritte nel par. 2.4) hanno consentito di contestualizzare le deformazioni osservate, riscontrare evidenze deformative in sito e, soprattutto, di approfondirne la loro evoluzione sia dal punto di vista temporale che spaziale.

Come mostrato in Figura 16, l'area di studio è stata suddivisa in tre "Settori" che vengono descritti di seguito in paragrafi dedicati (vedi par. da 3.2.1 a 3.2.3).

Il principale prodotto derivante dalle attività di post-elaborazione è rappresentato dalle **Mappe di velocità dei Punti di Misura Sintetici (PMS) nelle direzioni verticale ed orizzontale (Est-Ovest)**, derivanti dalla scomposizione vettoriale delle misure lungo la linea di vista strumentale (LOS) dei MP ottenuti in geometria orbitale ascendente e discendente (Figura 17 e Figura 18).

Si ricorda che le misure di spostamento e di velocità dei punti di misura sono calcolate lungo la linea di vista del sensore (LOS). Questo implica che gli spostamenti rilevati sui singoli punti di misura rappresentano, in realtà, la proiezione degli spostamenti reali lungo la congiungente sensore-bersaglio. In presenza di moti puramente verticali, il movimento stimato è facilmente riconducibile alla deformazione lungo la direzione verticale, ma se il bersaglio in analisi presenta anche spostamenti orizzontali, la misura ottenuta è il risultato della combinazione plan-altimetrica degli spostamenti. Tuttavia, attraverso l'utilizzo delle due geometrie orbitali di acquisizione, è possibile distinguere i due contributi. Una scomposizione vettoriale dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati nelle due geometrie orbitali è stata eseguita, attraverso l'utilizzo di algoritmi proprietari, per ottenere i vettori di spostamento lungo la direzione orizzontale (Est-Ovest) e verticale, riportate rispettivamente in Figura 17 e Figura 18. In particolare, l'area di indagine è stata discretizzata in celle esagonali (con raggio del cerchio inscritto pari a 20 m) secondo una griglia regolare. I risultati mostrano i valori risultanti delle sole celle (di seguito definite come "MP sintetiche") contenenti almeno un punto di misura per entrambe le geometrie orbitali.

Al fine di indagare l'evoluzione temporale dei fenomeni deformativi osservati, è stata condotta un'analisi di *Trend Change Detection* (TCD) utilizzando algoritmi proprietari sviluppati e calibrati da NHAZCA S.r.l. L'analisi ha l'obiettivo di identificare variazioni repentine dei trend di deformazione e l'occorrenza di eventuali movimenti accelerativi di potenziale criticità. Tuttavia, dalle analisi effettuate, è stato possibile determinare come i movimenti riscontrati siano caratterizzati da tassi deformatici costanti nel tempo e non sono state riscontrate fasi in cui si assiste a particolari accelerazioni/decelerazioni dei trend deformativi.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti dall'analisi interferometrica differenziale **DInSAR**, per il

periodo compreso tra il 2011 e il 2020, sono stati esaminati circa 500 interferogrammi (complessivamente per tutte e tre le aree di studio, per la geometria orbitale ascendente e discendente). L'analisi con tecniche DInSAR, sebbene abbia risentito molto della consistente presenza di vegetazione e delle condizioni metereologiche nei periodi invernali, non ha fornito ulteriori indizi deformativi rispetto a quelli già evidenziati con l'analisi A-DInSAR.

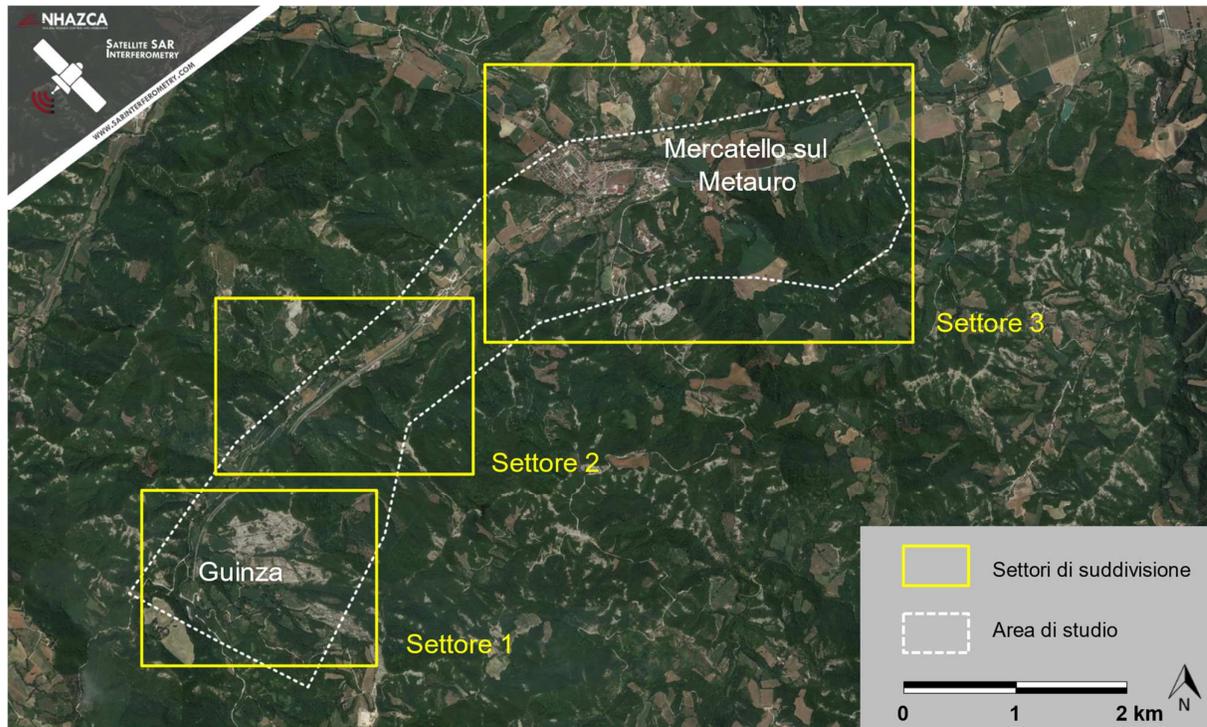


Figura 16: Ubicazione dei “Settori” di maggiore interesse, che vengono discussi nei par. da 3.2.1 a 3.2.3.

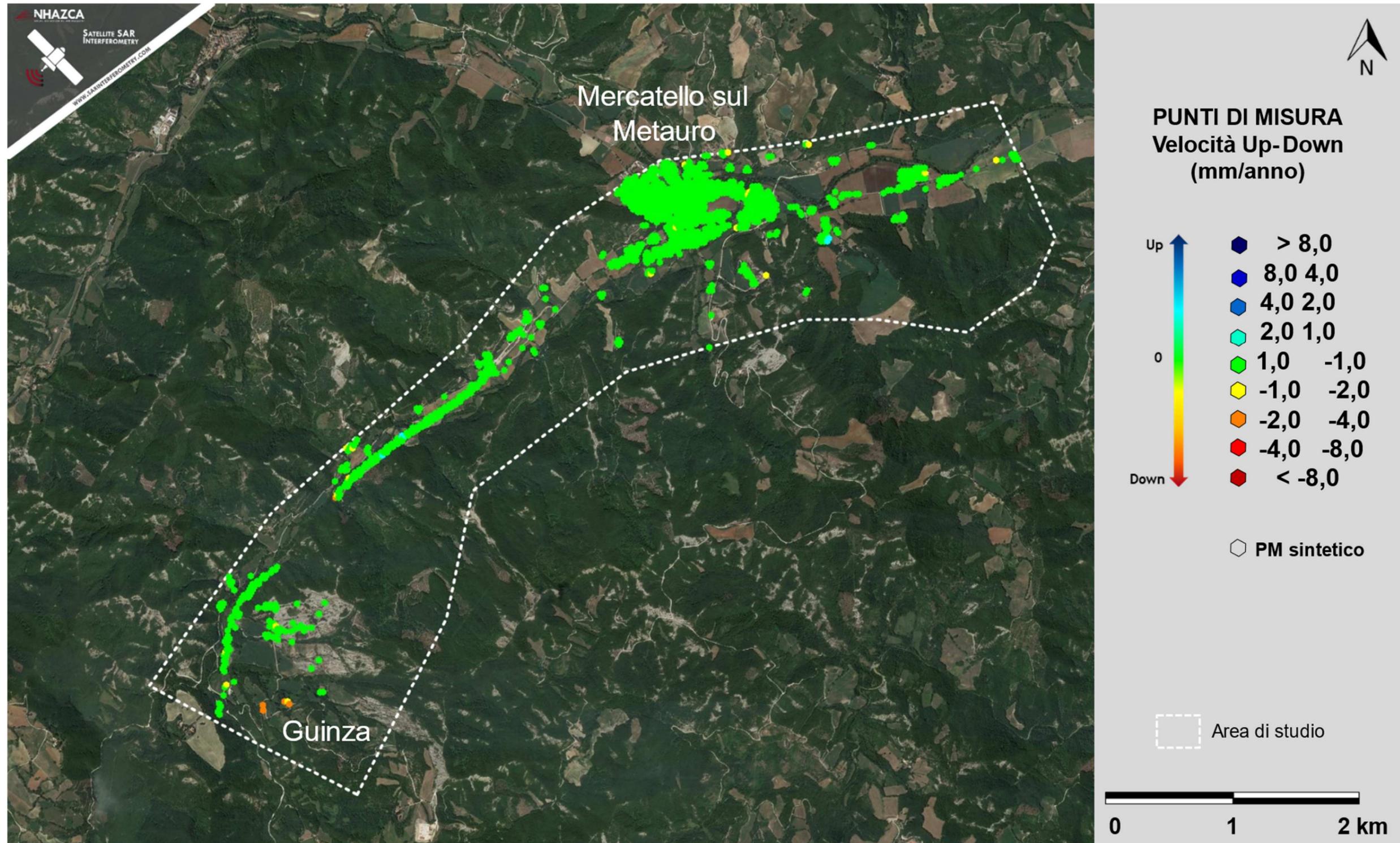


Figura 17: velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione verticale. Valori positivi = Up; Valori negativi = Down.

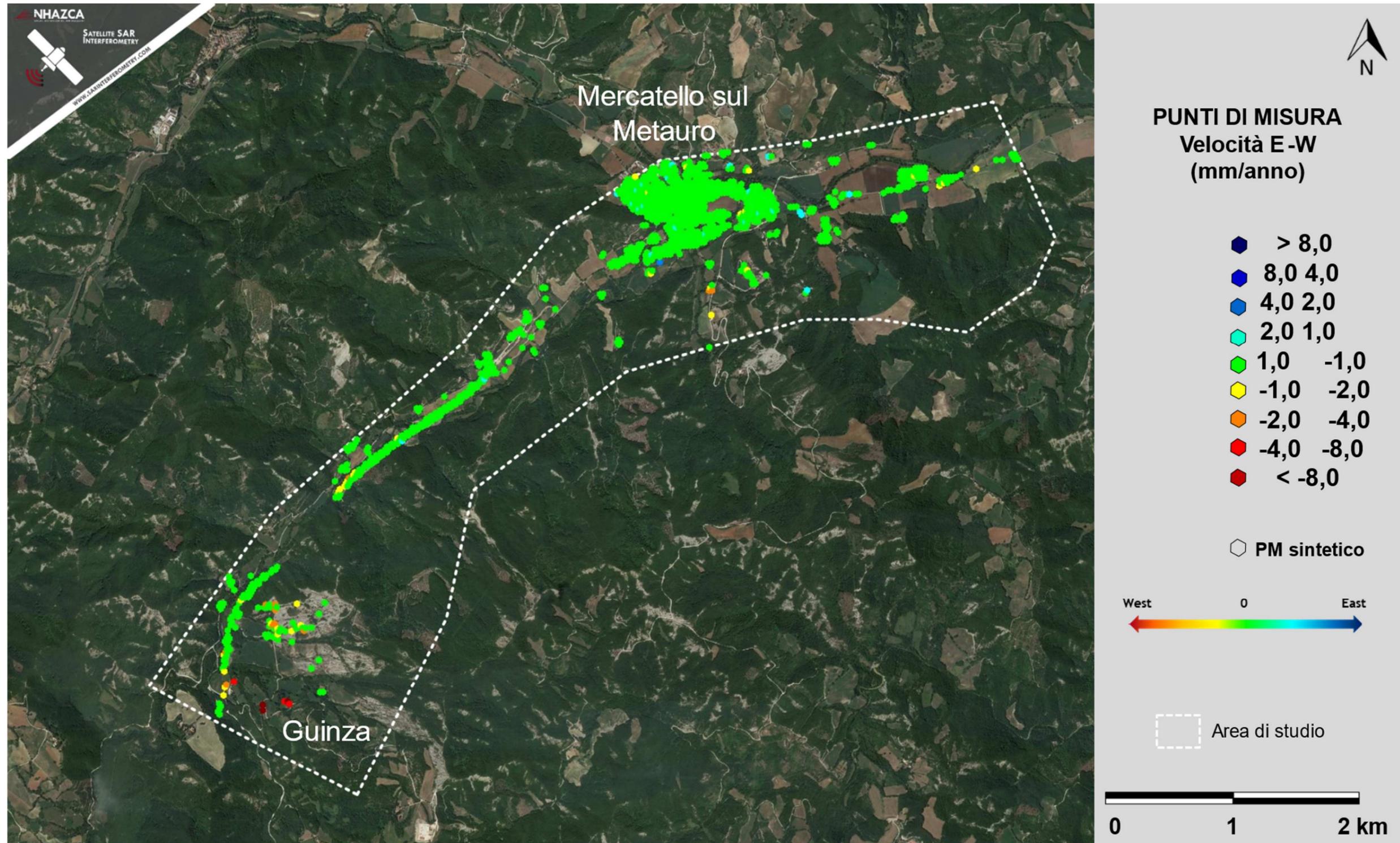


Figura 18: velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione orizzontale. Valori positivi = Est; Valori negativi = Ovest.

3.2.1 Settore 1

Nelle aree che comprendono le frazioni di Guinza, Cagnone, Valpiana, la Galleria Valpiana e il tratto stradale che va dal Viadotto Valpiana fino alla Galleria S. Veronica si osservano spostamenti di rilevante entità in alcuni settori.

In questo settore, i sopralluoghi tecnici di sito, hanno fatto emergere la presenza di lesioni su alcuni edifici presenti nell'area e si sono rilevati molto utili per confermare le osservazioni desunte dall'analisi A-DInSAR (Figura 19 e Figura 20).

In particolare si rilevano (Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24):

- Spostamenti di lieve entità in corrispondenza delle spalle del Viadotto Valpiana, con tassi massimi di circa 4 mm/anno lungo la LOS. Tali spostamenti si concentrano in due porzioni molto localizzate (come evincibile dalle serie temporali di spostamento dei punti MP1 e MP2 -Asc e -Desc) all'interno di una zona segnalata come "Accumulo di frana inattiva/quiescente/paleofrana" secondo la Carta Geomorfologica fornita dalla Committenza.
- Spostamenti di lieve/media entità che interessano i versanti a Nord della località Cagnone (MP7-Asc e -Desc, MP8-Asc), classificati nella carta geomorfologica fornita dalla Committenza come "superfici strutturali" localmente "rielaborate e/o degradate", anche denudate da "erosione areale/dilavamento diffuso". Gli spostamenti rilevati, dell'ordine di alcuni mm/anno e con trend deformativi eterogenei, sono presumibilmente ascrivibili a fenomeni di tipo superficiale.
- Spostamenti di rilevante entità che interessano le abitazioni nelle frazioni di Cagnone, Guinza e Valpiana, distribuite sul versante ad Est rispetto al tracciato stradale di interesse, immergente verso di quest'ultimo, con entità massime di circa 8 mm/anno lungo la LOS, come riportato anche nelle serie temporali di spostamento dei relativi MP (da MP3 a MP6 per entrambi i dataset). Si rileva che alcuni edifici coinvolti nei fenomeni deformativi sono situati in corrispondenza di una frana già nota in letteratura e censita come scivolamento rotazionale (APAT, 2007). In base alle mappe di velocità dei punti di misura sintetici nelle direzioni verticale e orizzontale (Figura 22), in corrispondenza di questa porzione di territorio si osservano evidenti spostamenti verso Ovest (dell'ordine di circa 10 mm/anno), e spostamenti più ridotti sulla verticale, in abbassamento (con massimi di circa 3 mm/anno).

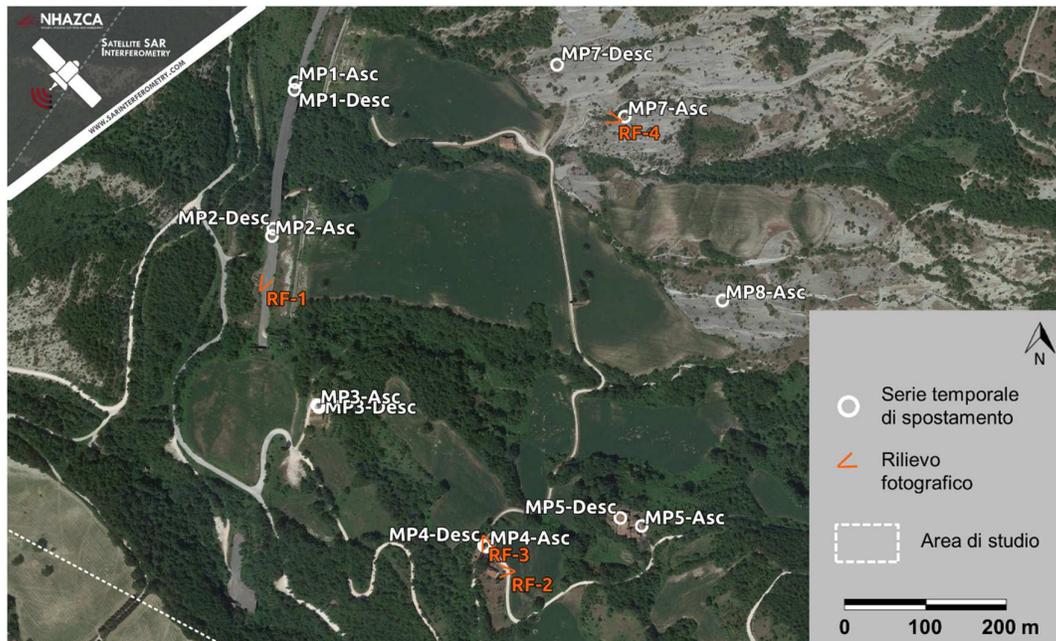


Figura 19: Ubicazione di alcuni dei rilievi fotografici maggiormente significativi effettuati durante il sopralluogo tecnico, situati in corrispondenza delle serie temporali di spostamento dei punti di misura, riportate in Figura 23 e Figura 24.

In corrispondenza della spalla Sud del Viadotto Valpiana, vicino alla Galleria Valpiana, durante il sopralluogo effettuato in data 15/12/2020 è stata osservata l'emergenza di acqua a getto continuo in corrispondenza di alcuni dreni della porzione Nord del muro di contenimento (Figura 20, RF-1). Tale zona corrisponde all'area in cui sono state individuate le serie temporali di spostamento MP2-Asc e -Desc. I punti di misura ottenuti in quest'area, in corrispondenza del muro di contenimento e della strada subito a valle, mostrano trend di spostamento variabili tra 1.5 e 4 mm/anno.

In corrispondenza della chiesa di San Lorenzo a Guinza e di una casa nelle immediate vicinanze (Figura 20, RF-2 e RF-3) sono state osservate fratture e lesioni sulle pareti; la frattura individuata sulla chiesa mostra un rigetto verso valle. I punti di misura ottenuti sulle strutture mostrano trend di spostamento che superano gli 8 mm/anno. Si riporta, infine, un'evidenza fotografica della morfologia delle superfici strutturali (secondo la carta geomorfologica fornita dalla Committenza), in cui è possibile osservare (Figura 20, RF-4): i) una superficie di strato a franapoggio immergente verso Ovest, ii) il sottostante e vegetato accumulo di frana inattiva/quiescente/paleofrana (sempre in base alla carta geomorfologica fornita dalla Committenza).



Figura 20: alcuni dei rilievi fotografici effettuati durante i sopralluoghi tecnici; (RF-1) vista del muro di contenimento nei pressi del Viadotto Valpiana, nel rettangolo rosso evidenziati i dreni che, al momento del sopralluogo, rilasciavano acqua; evidenze di lesionamento su una parete della chiesa di San Lorenzo a Guinza (RF2) e sul muro di una casa nelle immediate vicinanze (RF-3), segnalate dai rettangoli rossi; (RF-4) visuale ripresa dalla superficie strutturale (classificata secondo la carta geomorfologica fornita dalla Committenza) nei pressi del cimitero di Guinza.

3.2.2 Settore 2

Nei pressi del tratto stradale in prossimità della Loc. Valbuona (Figura 25 e Figura 26) si osservano spostamenti di lieve entità lungo la LOS come riportato dalle serie temporali di spostamento dei MP (Figura 27). Tali spostamenti risultano localizzati in due zone, una corrispondente all'imbocco della galleria presente nella porzione sud-orientale del settore (MP8-Desc, MP9-Asc e MP9-Desc), l'altra in prossimità della porzione centrale del Settore 2, in corrispondenza degli MP10-Asc e MP10-Desc.

- Nella porzione di tracciato stradale posta vicino all'imbocco della galleria si osserva una situazione di sostanziale assenza di spostamenti apprezzabili con la geometria orbitale ascendente (MP9-Asc), mentre con la geometria discendente si riscontrano deformazioni di lieve entità lungo LOS in avvicinamento dal sensore presso la carreggiata posta Sud (MP8-Desc), in allontanamento lungo la carreggiata Nord (MP9-Desc), con entità massime di circa 2 mm/anno. Il fenomeno osservato si localizza nelle adiacenze di una Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV) censita nel catalogo IFFI (APAT, 2007).
- Presso la porzione centrale del Settore 2 sono stati rilevati spostamenti di lieve entità in avvicinamento al sensore per entrambe le geometrie orbitali (MP10-Asc e MP10-Desc), con valori massimi di circa 2 mm/anno lungo la LOS.

3.2.3 Settore 3

Il Settore 3 comprende il territorio analizzato compreso fra l'abitato di Mercatello sul Metauro e le zone nelle immediate vicinanze. Come testimoniato dalle mappe di velocità in Figura 28 e Figura 29, in questo Settore non si osservano movimenti di rilevante entità. Si riportano tuttavia alcune serie temporali che mostrano lievi spostamenti, in corrispondenza di alcuni edifici isolati e situati nell'area di studio (Figura 30).

- Su alcune case site in Via Sant'Andrea in Corona sono presenti MP con lievi spostamenti in avvicinamento al sensore, di poco superiori a 1 mm/anno, in geometria ascendente (MP11-Asc) e spostamenti dell'ordine degli 1,5 – 2 mm/anno in allontanamento dal sensore per la geometria discendente (MP11-Desc). Si rileva che alcune case sono situate in corrispondenza di una frana già conosciuta in letteratura e censita come colamento lento (APAT, 2007).
- Presso degli edifici situati a Est di Mercatello sul Metauro si rilevano lievi spostamenti in avvicinamento al sensore per entrambe le geometrie orbitali, di

entità massima dell'ordine di circa 3 mm/anno. Gli edifici si trovano a valle due colamenti lenti e in prossimità di una frana complessa presenti nel catalogo IFFI (APAT, 2007).

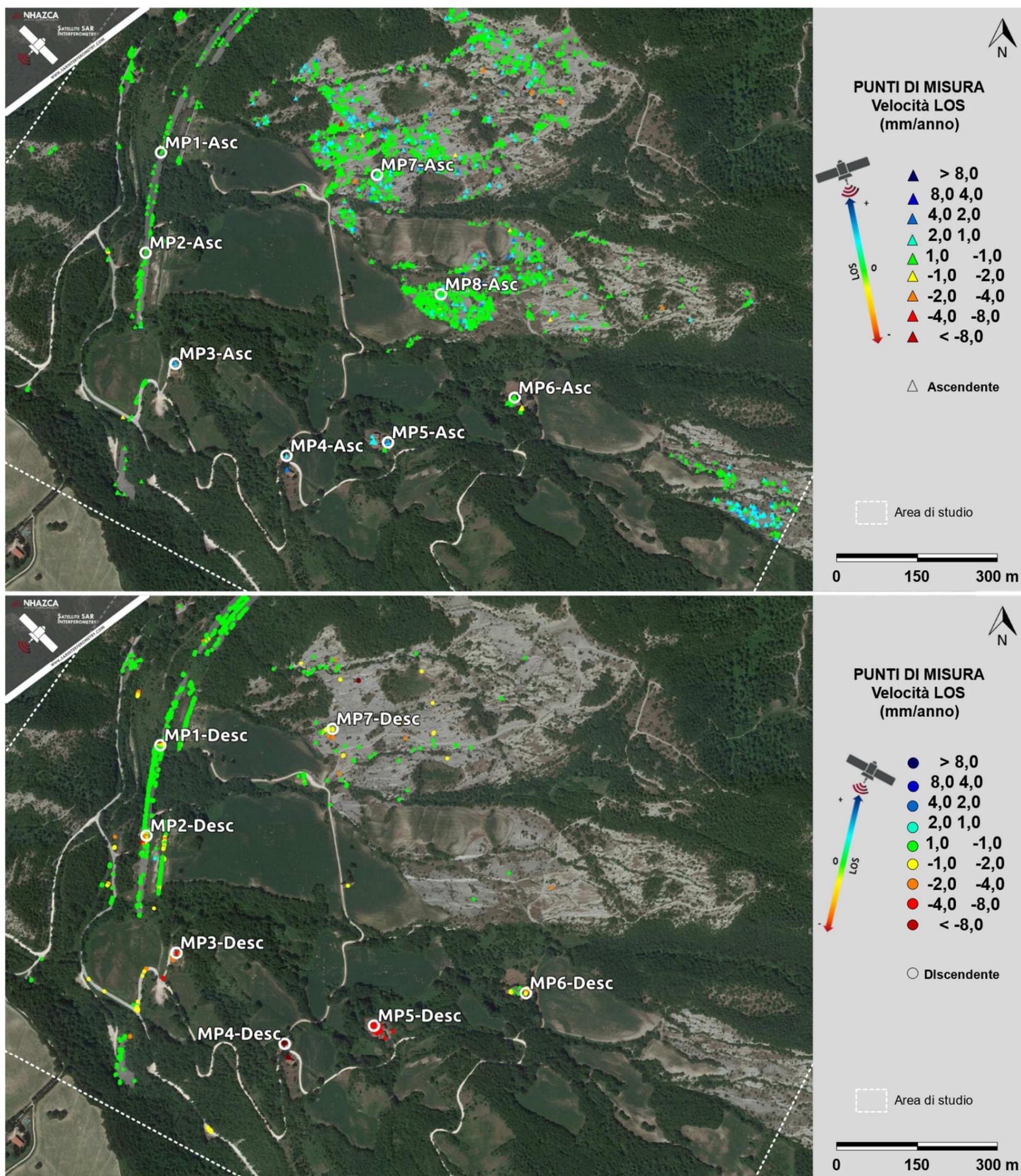


Figura 21: Velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR per gli stack ascendente (in alto) e discendente (in basso) per le aree relative al Settore 1. In bianco sono evidenziati i punti di misura di cui si riportano le serie temporali di spostamento (Figura 23 e Figura 24).

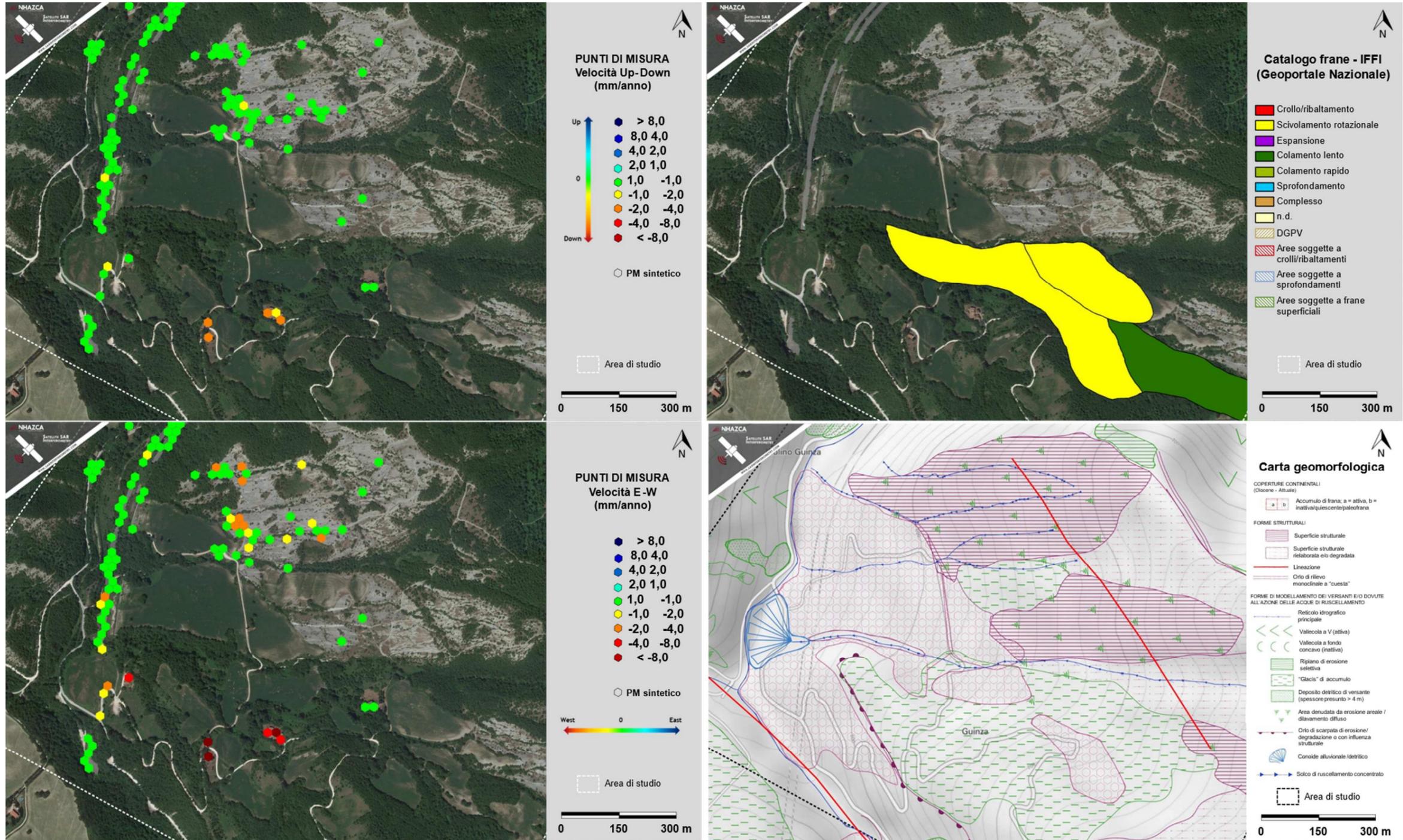


Figura 22: A sinistra, velocità dei punti di misura sintetici (direzione verticale ed Est-Ovest) per le aree comprese nel Settore 1. A destra, prodotti cartografici IFFI (APAT, 2007) e carta geomorfologica fornita dalla Committenza, relativi al Settore 1.

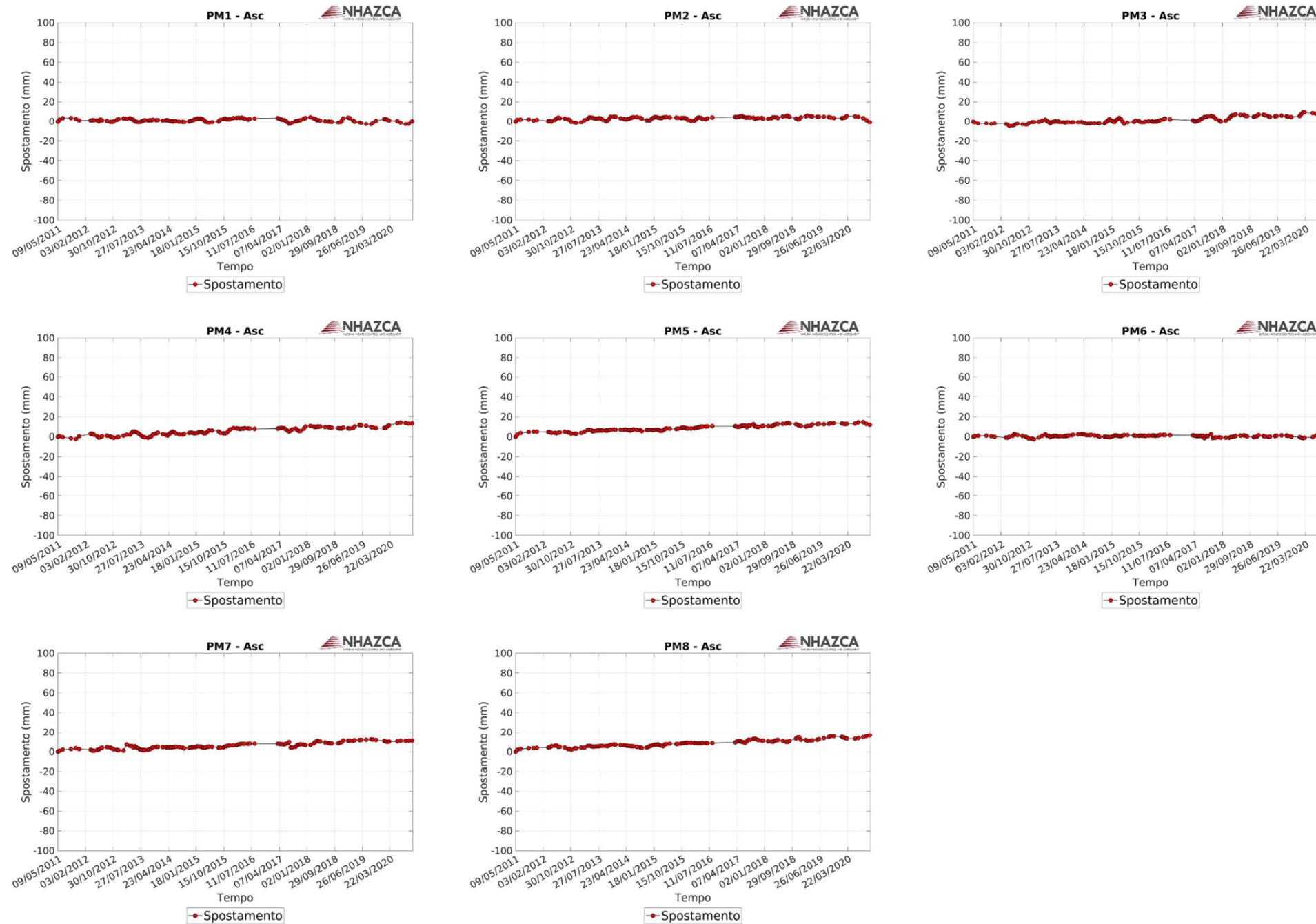


Figura 23: Serie temporali di spostamento dei punti di misura relativi al Settore 1, le cui ubicazioni sono riportate in Figura 21 (stack ascendente).

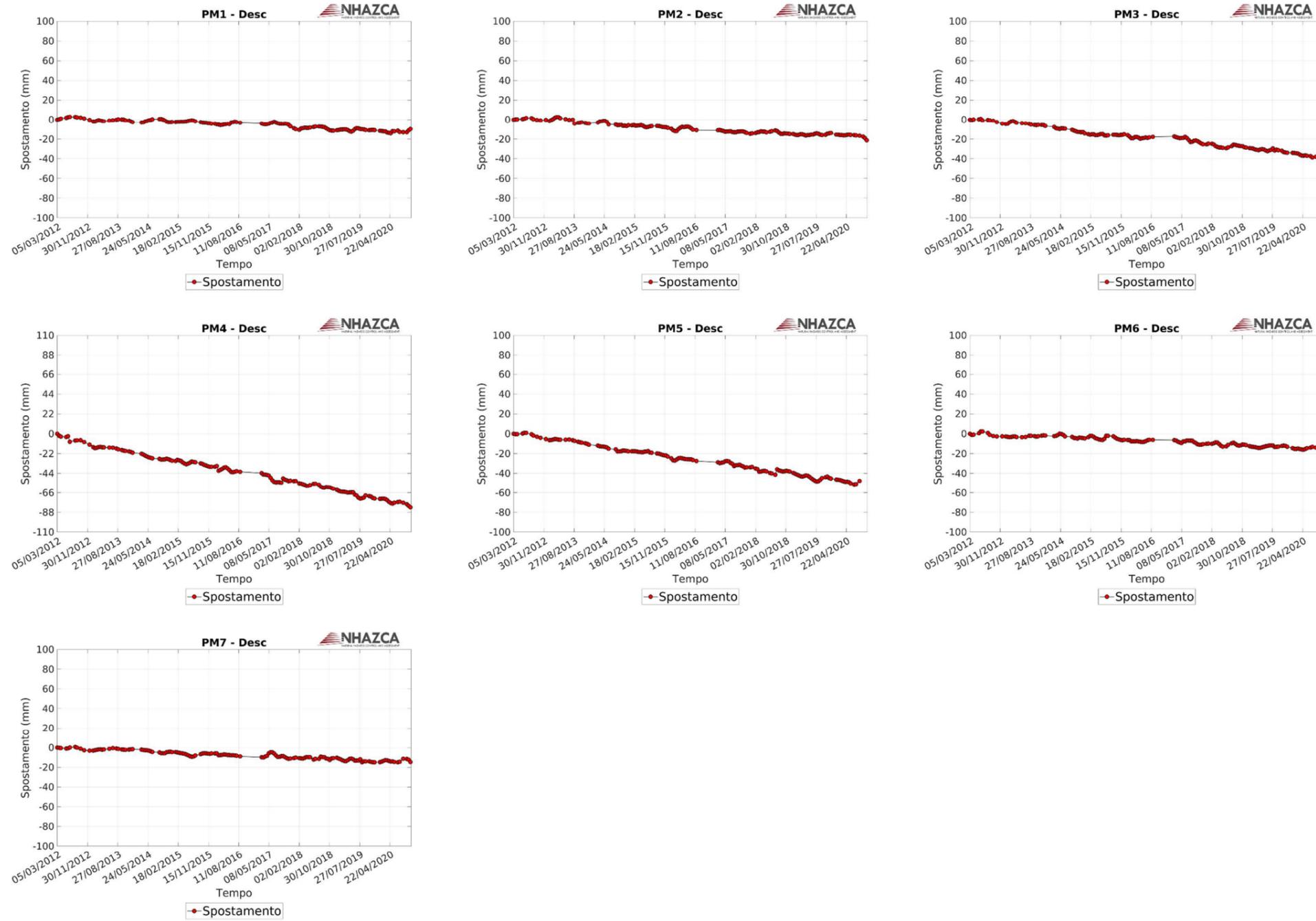


Figura 24: Serie temporali di spostamento dei punti di misura relativi al Settore 1, le cui ubicazioni sono riportate in Figura 21 (stack discendente).

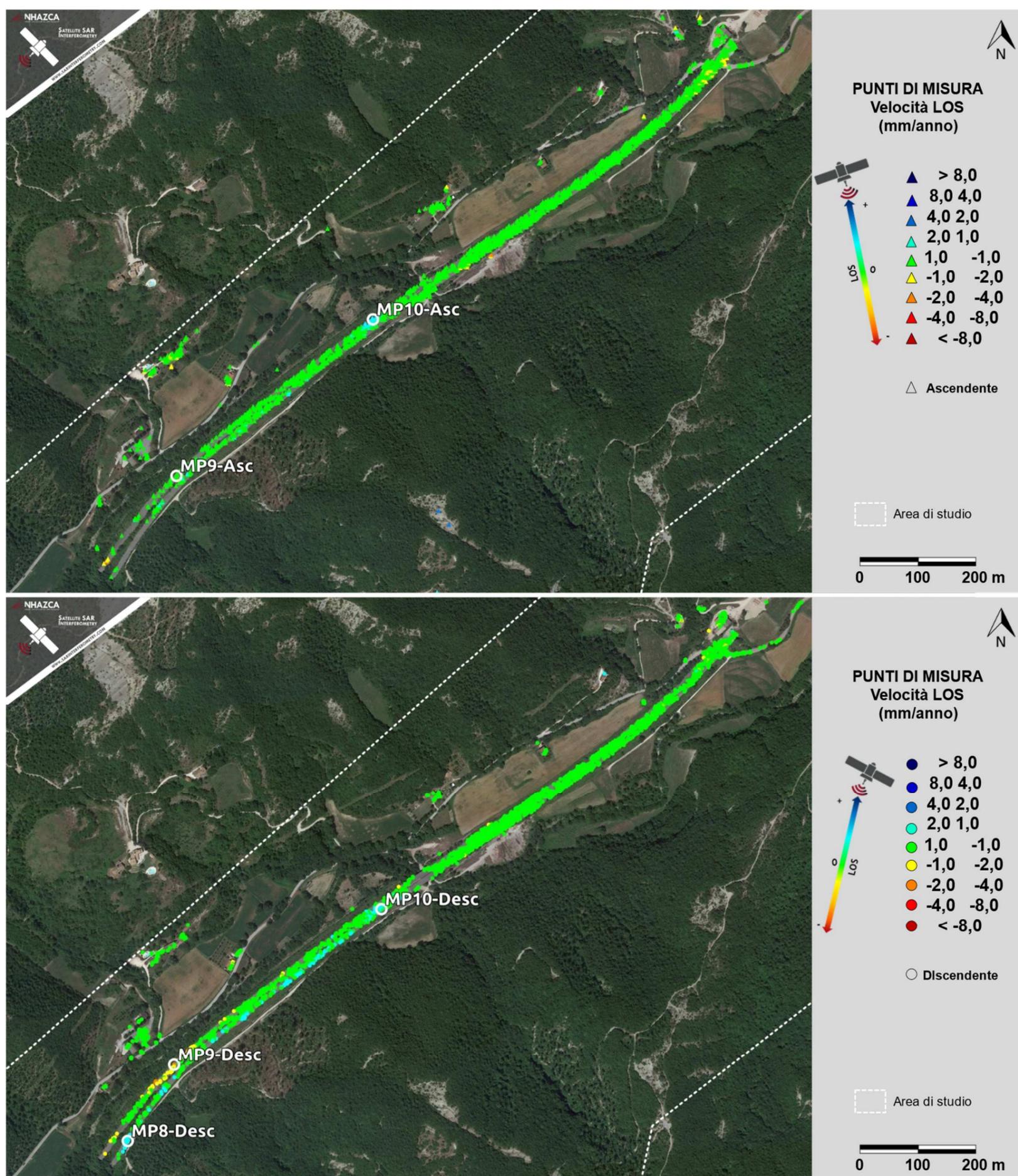


Figura 25: Velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR per gli *stack* ascendente (in alto) e discendente (in basso) per le aree relative al Settore 2. In bianco sono evidenziati i punti di misura di cui si riportano le serie temporali di spostamento (Figura 27).

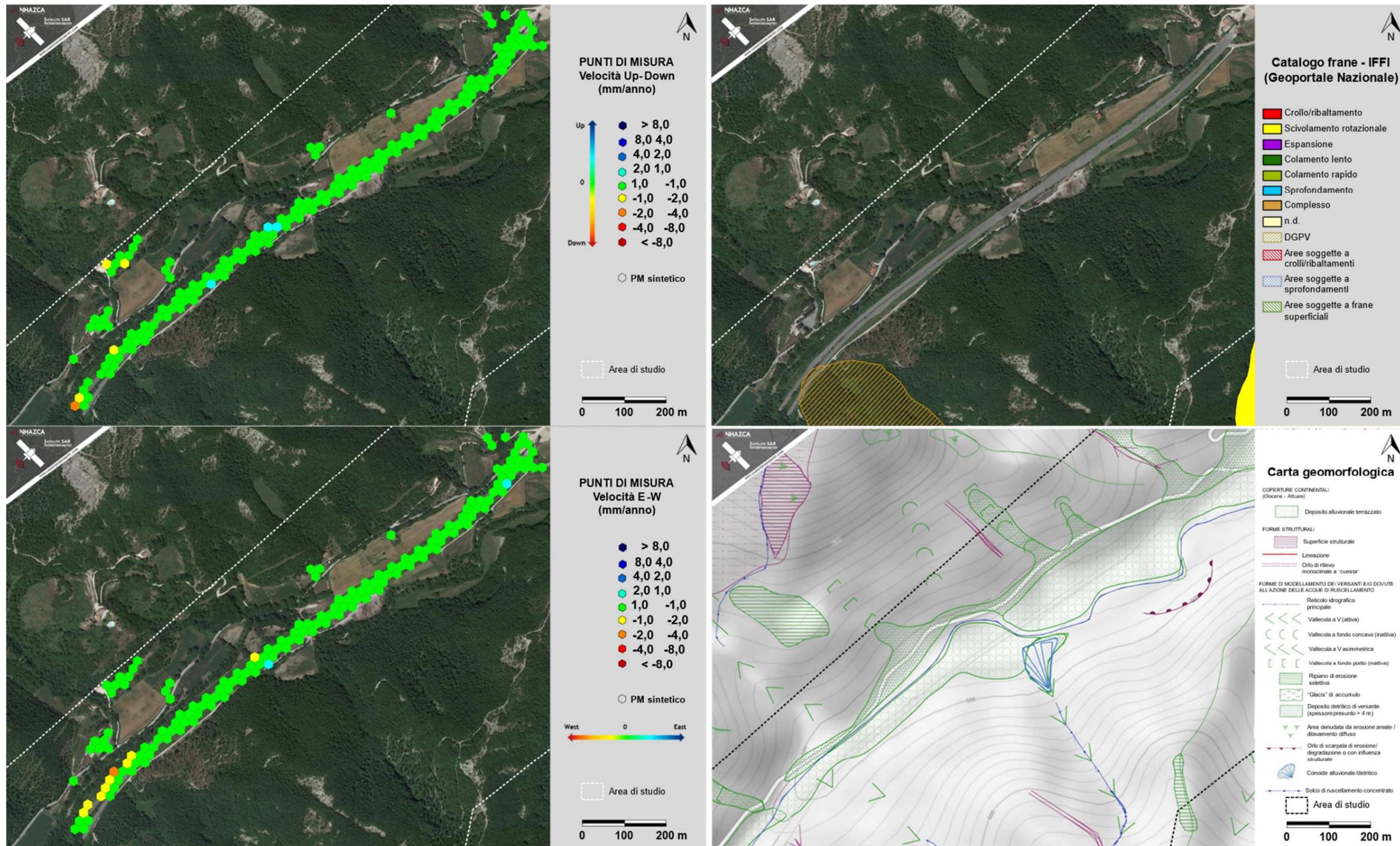


Figura 26: A sinistra, velocità dei punti di misura sintetici (direzione verticale ed Est-Ovest) per le aree relative al Settore 1. A destra, prodotti cartografici IFFI (APAT, 2007) e carta geomorfologica fornita dalla Committenza, relativi al Settore 2.

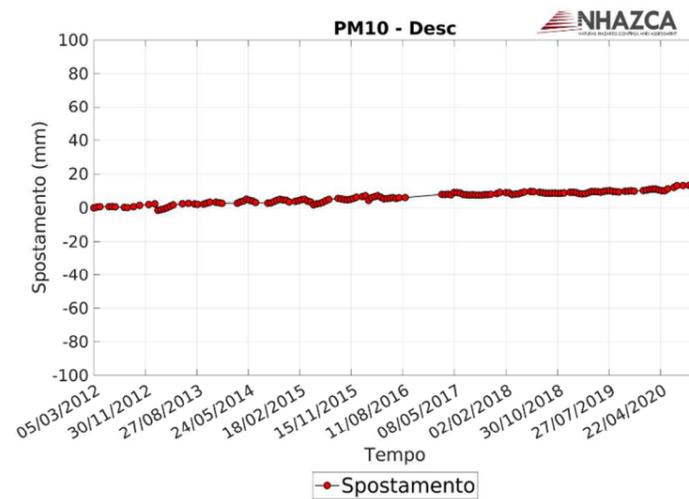
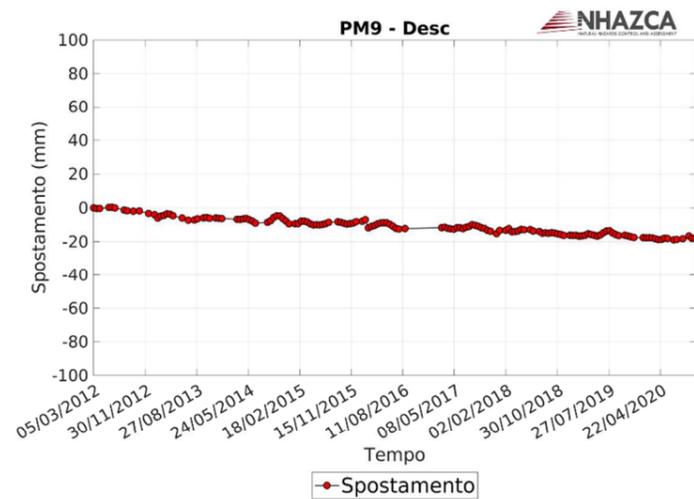
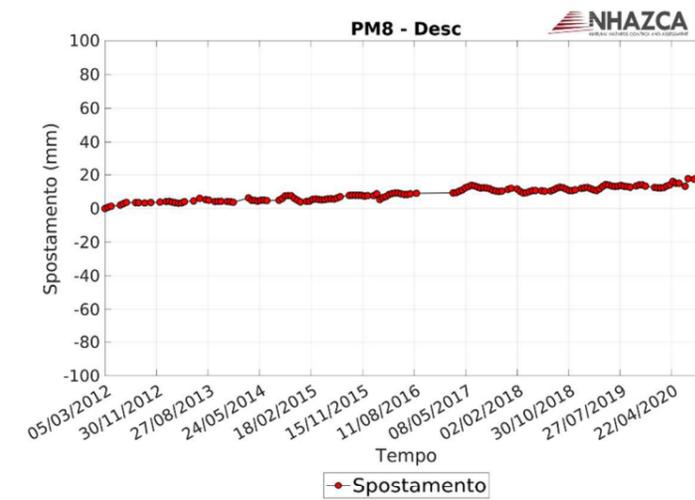
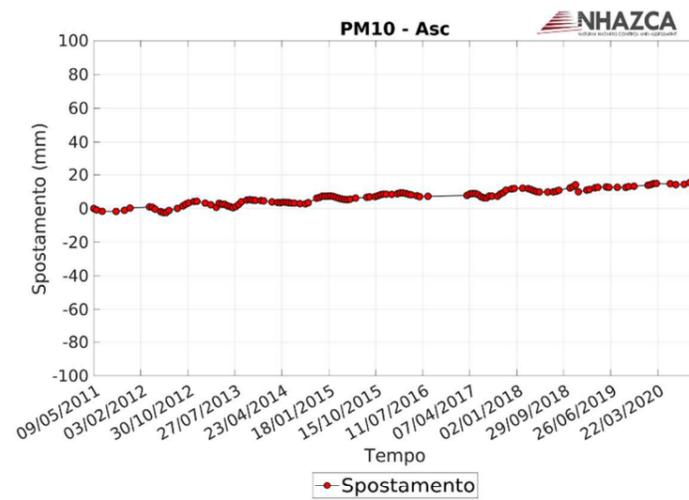
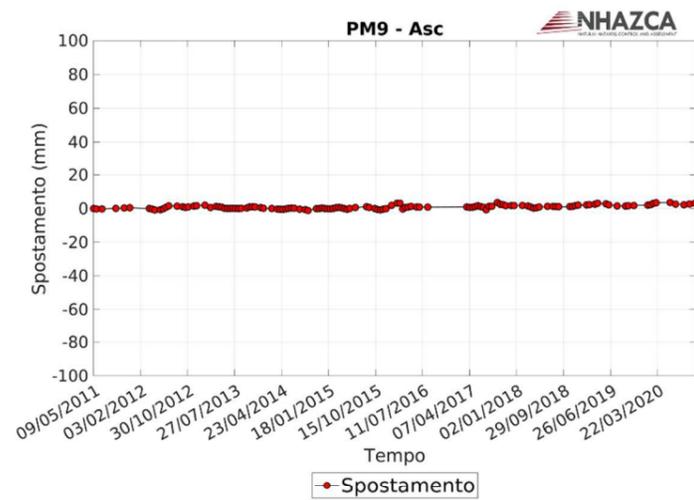


Figura 27: Serie temporali di spostamento dei punti di misura relativi al Settore 2, le cui ubicazioni sono riportate in Figura 25 (stack ascendente e discendente).

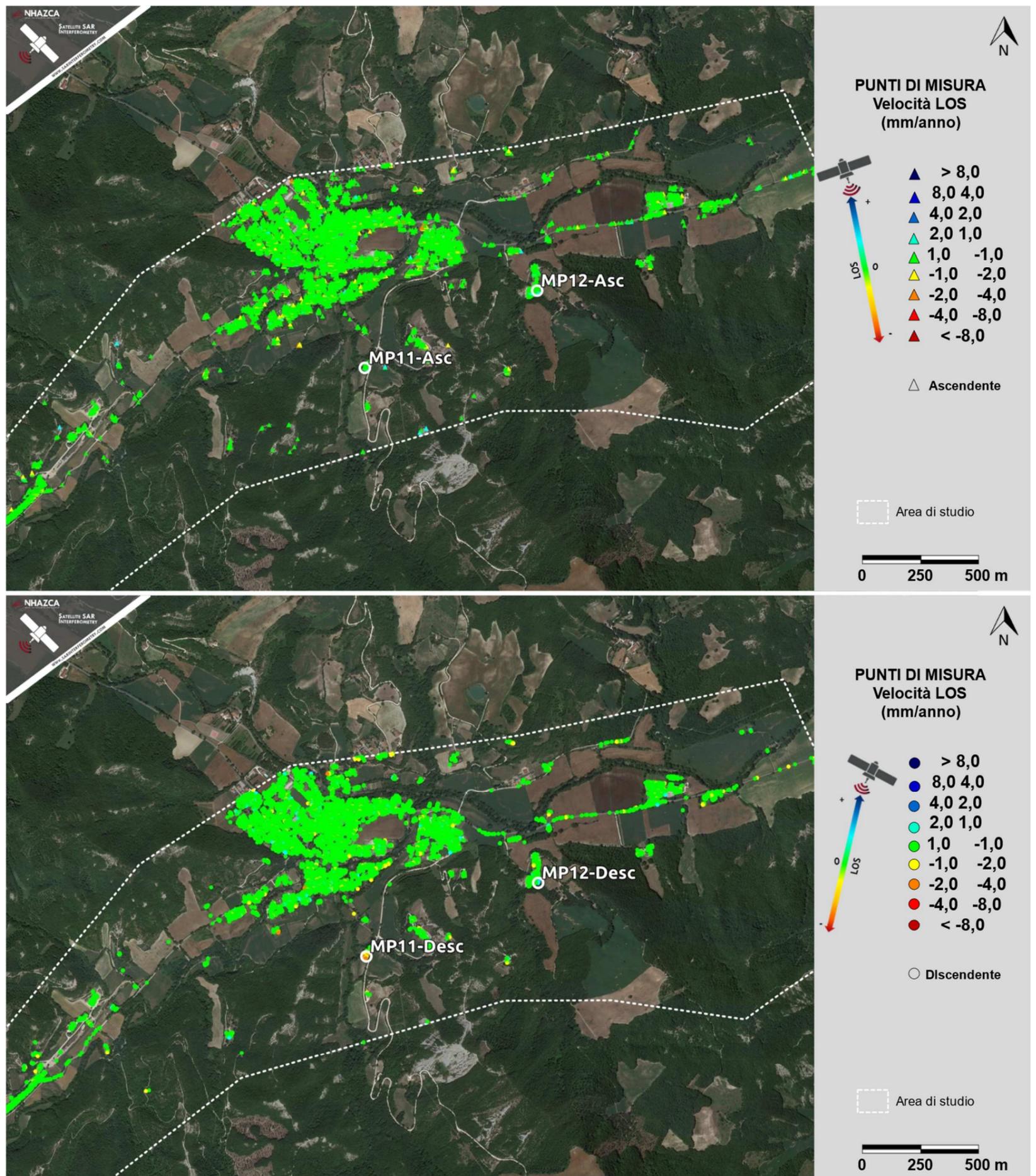


Figura 28: Velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR per gli *stack* ascendente (in alto) e discendente (in basso) per le aree relative al Settore 3. In bianco sono evidenziati i punti di misura di cui si riportano le serie temporali di spostamento (Figura 30).

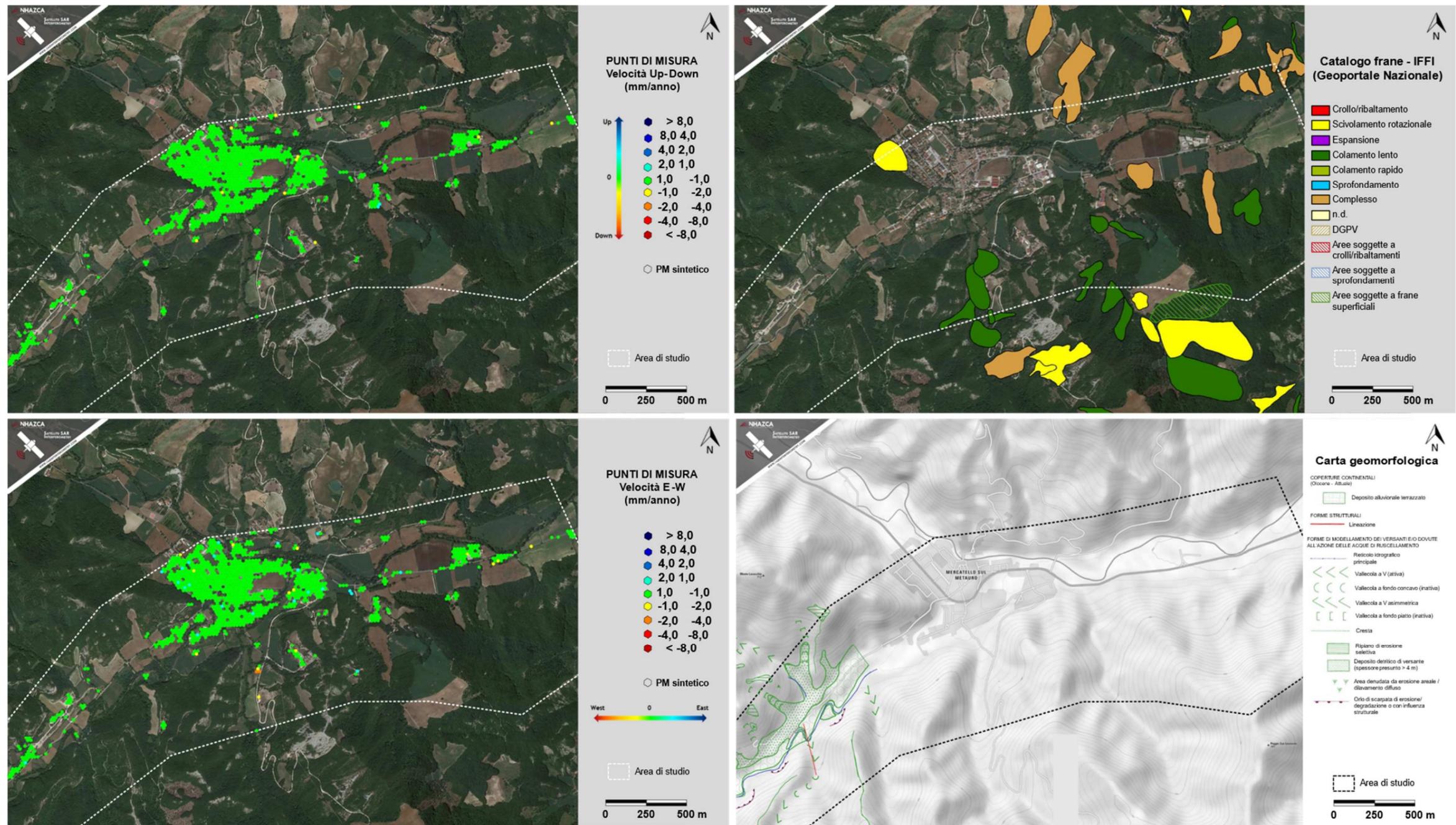


Figura 29: A sinistra, velocità dei punti di misura sintetici (direzione verticale ed Est-Ovest) per le aree relative al Settore 3. A destra, prodotti cartografici IFFI (APAT, 2007) e carta geomorfologica fornita dalla Committenza, relativi al Settore 3.

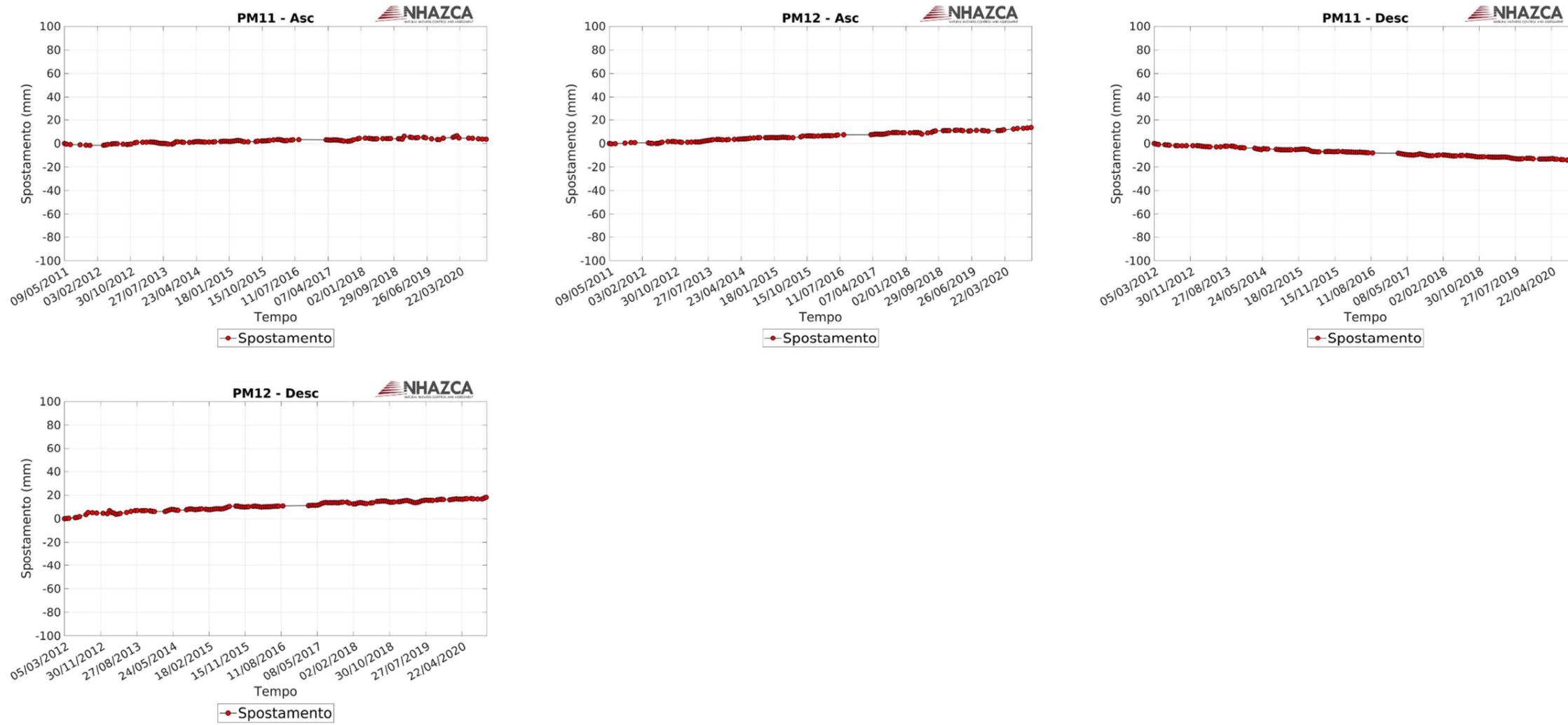


Figura 30: Serie temporali di spostamento dei punti di misura relativi al Settore 3, le cui ubicazioni sono riportate in Figura 28 (stack ascendente e discendente).

4. CONCLUSIONI

I risultati delle analisi, eseguite con tecniche A-DInSAR a partire da immagini COSMO-SkyMed in doppia geometria orbitale, hanno consentito di identificare e quantificare i tassi e i *trend* di spostamento nell'area di indagine per il periodo 2011-2020, con particolare riferimento ai settori potenzialmente interferenti con il tracciato stradale di interesse.

Lo studio del materiale disponibile in letteratura e l'analisi dei dati derivanti dai due sopralluoghi, effettuati nelle data 18/9/2020 e 15/12/2020, hanno permesso di contestualizzare le deformazioni ricavate dall'analisi interferometrica.

L'indagine eseguita ha consentito di ottenere un'ottima distribuzione spaziale dei MP nell'area di studio, sia in geometria ascendente che discendente, così da consentire un'osservazione localmente anche ridondante dei processi deformativi che lo caratterizzano (sono stati identificati circa 50.000 MP complessivamente per le due geometrie orbitali).

Dall'analisi dei risultati A-DInSAR (sia in geometria orbitale ascendente che discendente) si evince chiaramente come in alcuni limitati settori si rilevino spostamenti apprezzabili.

In particolare, relativamente all'area oggetto di studio, tra le zone più interessate da tali evidenze (per entità ed estensione degli spostamenti, quantità di punti di misura e ridondanza di informazione), si evidenzia l'area nei pressi degli abitati di **Guinza** e **Valpiana** (Figura 14 e Figura 15), dove si osserva un potenziale coinvolgimento delle opere della Galleria Valpiana, in prossimità delle quali si osservano deformazioni con velocità massima lungo LOS strumentale di circa 8 mm/anno.

Nei par. da 3.2.1 a 3.2.3 vengono discusse in dettaglio alcune porzioni del tracciato di interesse, le cui ubicazioni sono mostrate in Figura 16.

Nel Settore 1 (da Figura 21 a Figura 24) si rilevano spostamenti di lieve entità in corrispondenza delle spalle del Viadotto Valpiana, con tassi massimi di circa 4 mm/anno lungo la LOS; spostamenti di lieve/media entità che interessano i versanti a Nord della località Cagnone (MP7-Asc e -Desc, MP8-Asc), presumibilmente ascrivibili a fenomeni di tipo superficiale e infine spostamenti di rilevante entità che interessano le abitazioni nelle frazioni di Cagnone, Guinza e Valpiana, distribuite su un versante localizzato a Est del tracciato stradale di interesse, con entità massime di circa 8 mm/anno lungo la LOS (da MP3 a MP6 per entrambi i dataset).

I sopralluoghi tecnici di sito, che hanno fatto emergere la presenza di lesioni su alcuni edifici presenti nell'area, si sono rilevati molto utili ad integrare le informazioni desunte

dall'analisi A-DInSAR.

Nel Settore 2 (Figura 25 e Figura 26) si osservano spostamenti di lieve entità lungo la LOS localizzati in due zone, una corrispondente all'imbocco presente nella porzione sud-orientale del settore (MP8-Desc, MP9-Asc e MP9-Desc), l'altra in prossimità della porzione centrale del settore, in corrispondenza degli MP10-Asc e MP10-Desc.

Nel Settore 3 (Figura 28 e Figura 29), non si osservano movimenti di rilevante entità, ad eccezione di alcuni edifici isolati e non ritenuti di particolare interesse nell'ambito del presente studio.

Stanti i risultati ottenuti nell'ambito del presente lavoro, **si suggerisce di eseguire dei periodici aggiornamenti delle analisi A-DInSAR con i dati COSMO-SkyMed** che si renderanno disponibili nei prossimi mesi/anni al fine di eseguire un monitoraggio di controllo dei processi già riconosciuti e verificare l'insorgenza di possibili nuovi fenomeni di instabilità gravitativa interferenti con le opere, eventualmente, mediante l'installazione di corner reflector in settori maggiormente sensibili o che siano risultati privi, nel presente studio, di punti di misura (es. a causa della presenza di folta vegetazione), in particolare in corrispondenza dei settori 1 e 2.

Infatti, al fine di migliorare i risultati di A-DInSAR durante una potenziale fase di monitoraggio, i settori di versante non coperti da MP possono essere analizzati attraverso l'installazione di corner reflector artificiali (Figura 31). La progettazione e l'installazione di una rete di tali target artificiali permetterà di aumentare la copertura spaziale dei MP, al fine di ottenere informazioni sugli spostamenti, a partire dalla data di installazione, con estrema precisione e di caratterizzare una porzione più ampia del versante. Si ritiene necessario almeno un anno di acquisizioni per poter considerare affidabili i trend di spostamento relativi ad eventuali nuovi punti di misura, quali *corner reflector*.



Figura 31: esempio di un *corner reflector* progettato, realizzato e installato da NHAZCA S.r.l. in un'area vegetata priva di target radar idonei

BIBLIOGRAFIA

1. Autorità di Bacino Distrettuale Appennino Centrale, 2020 (agg.). Cartografia PAI vigente.
2. APAT, 2007. Rapporto sulle frane in Italia: il Progetto IFFI. Metodologia, risultati e rapporti regionali. Rapporti APAT, 78, 681.
3. Hanssen, Ramon F. (2001), "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis", Kluwer Academic.
4. ISPRA. Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio n.278 "Pieve Santo Stefano".
5. Kampes, B.M. (2006) Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Remote Sensing and Digital Image Processing; Springer: Dordrecht, The Netherlands.
6. Massonnet, D.; Feigl, K. L. (1998), "Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface", Rev. Geophys.36(4): 441–500, 1998 RvGeo. 36.441M, doi: [10.1029/97RG03139](https://doi.org/10.1029/97RG03139).
7. Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, (March), 6–43.
8. Tarquini S., Isola I., Favalli M., Battistini A. (2007) TINITALY, a digital elevation model of Italy with a 10 m-cell size (Version 1.0). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/TINITALY/1.0>

APPENDICE

L'Interferometria SAR Satellitare

L'InSAR (Interferometric Synthetic Aperture RADAR) (Massonnet et al., 1998; Hanssen, 2001), che si basa sul confronto di immagini RADAR acquisite in tempi diversi, rappresenta la principale metodologia di telerilevamento satellitare impiegata ad oggi per la misura degli spostamenti della superficie terrestre e delle strutture presenti su di essa. Il principio alla base delle metodologie Multi-Image InSAR o Advanced DInSAR (A-DInSAR) è costituito dalla combinazione delle informazioni provenienti da un elevato numero di immagini, che permette la ricostruzione di serie temporali di spostamento di oggetti a terra ben visibili dal satellite nell'intero periodo analizzato. Tale approccio viene condiviso da diverse metodologie di analisi che hanno in comune l'obiettivo di ottimizzare le informazioni di spostamento racchiuse nel segnale delle immagini SAR acquisite in tempi diversi su una medesima area.

L'utilizzo delle tecniche A-DInSAR permette, non solo di individuare un dato processo deformativo, passato o in atto, ma anche di stimarne l'evoluzione nel tempo e nello spazio. Di seguito sono presentati con maggior dettaglio alcuni approfondimenti tecnici sui sistemi InSAR satellitari e sulla metodologia A-DInSAR, adottata in questo lavoro.

Generalità sui sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar)

*Per RADAR (**Radio Detection And Ranging**) si intende un sistema in grado di emettere un impulso di energia elettromagnetica e di registrarne il segnale di ritorno (**eco**), prodotto a seguito della riflessione di un oggetto al suolo (**target**). Tale impulso si propaga come segnale elettromagnetico avente **lunghezza d'onda λ** nel dominio delle **microonde**. I sistemi RADAR rappresentano strumenti di telerilevamento attivi poiché non è richiesta illuminazione solare e le frequenze utilizzate sono in grado di attraversare la copertura nuvolosa. Con tale sistema si è quindi in grado di determinare la presenza e la distanza degli oggetti presenti sulla scena. Le capacità di riflessione degli oggetti presenti sulla superficie osservata assumono un'importanza fondamentale così come le proprietà **dielettriche** (capacità di condurre/trasmettere) di tali superfici.*

*Il sistema **SAR (Synthetic Aperture Radar)** è una particolare tipologia di radar la cui caratteristica è di sfruttare il moto lungo una traiettoria predefinita (come ad esempio*

l'orbita di un satellite su cui è montato il sensore) per osservare la stessa area da più angoli di vista, "simulando" quindi un'antenna di grandi dimensioni, al fine di incrementare la risoluzione al suolo. Questa particolare geometria di acquisizione è schematizzata in Figura 32.

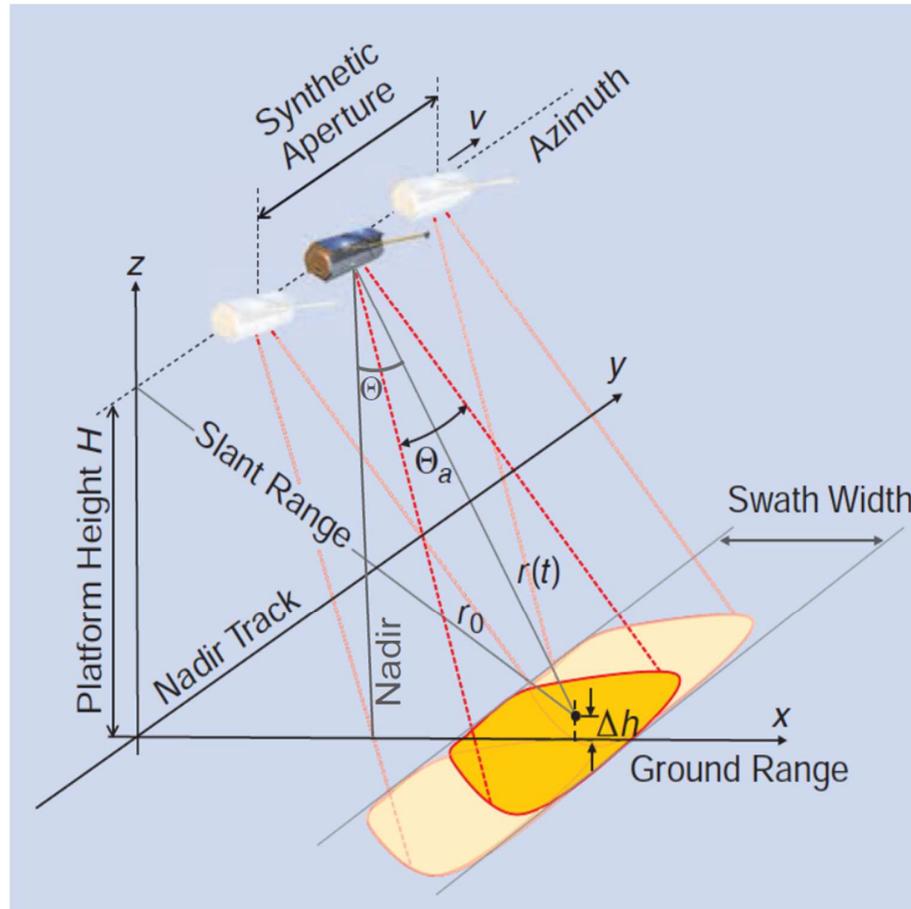


Figura 32: geometria di acquisizione SAR (Moreira et al. 2013, modificato).

Le immagini acquisite, rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, Line of Sight), sono caratterizzate da una risoluzione in **Slant Range** e in **Azimuth**.

La prima (Slant Range) si riferisce alla risoluzione lungo la direzione di propagazione del segnale, perpendicolare all'orbita e inclinata di un angolo θ - detto off-nadir - rispetto alla normale al suolo.

La seconda (Azimuth) si riferisce alla risoluzione lungo la direzione di volo del satellite, che, in prima approssimazione, può essere considerata quasi Nord-Sud.

Le immagini SAR satellitari

L'immagine SAR satellitare è composta, quindi, da una matrice di pixel disposti lungo le direzioni di azimuth (parallela al movimento del satellite) e di slant range (perpendicolare a quest'ultima).

Ogni pixel contiene le informazioni di ampiezza e fase del segnale retrodiffuso dagli oggetti presenti sulla superficie osservata.

Mentre l'ampiezza individua l'energia del segnale riflesso verso il sensore, la fase racchiude l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche, ovvero il percorso compiuto dal segnale lungo il tragitto sensore-target.

I satelliti possono acquisire in due geometrie diverse: il passaggio del satellite su una stessa area avviene in direzione circa Nord-Sud (geometria discendente) ed in direzione circa Sud-Nord (geometria ascendente) (Figura 33). A causa della configurazione side-looking dei satelliti, la stessa area, quindi, viene rilevata da due angoli di vista quasi complementari.

È bene osservare che la geometria di acquisizione, anche in funzione delle orbite dei sensori SAR, può determinare delle difficoltà oggettive nel rilevamento degli spostamenti con determinate caratteristiche. Ad esempio, in aree caratterizzate da elevata energia di rilievo o con geometria speculare rispetto all'inclinazione di misura del satellite sul piano orizzontale si possono presentare problemi di distorsione dell'immagine (layover) o addirittura zone d'ombra (shadowing) che possono rendere difficoltosa l'analisi dei dati (Figura 34).

Inoltre, sotto determinate condizioni di movimento (es. spostamenti a forte componente orizzontale con prevalente direzione N-S o con determinate inclinazioni), può risultare possibile l'analisi del dato ma non la misura accurata del movimento. In questi ultimi casi, se non analizzati attentamente, si possono determinare interpretazioni errate o non congruenti con il fenomeno indagato.

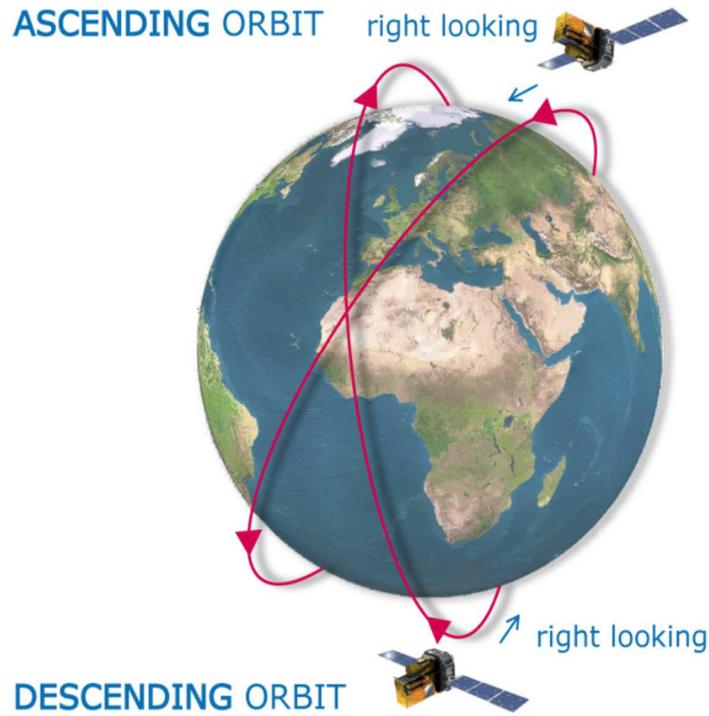


Figura 33: geometrie di acquisizione delle immagini SAR.

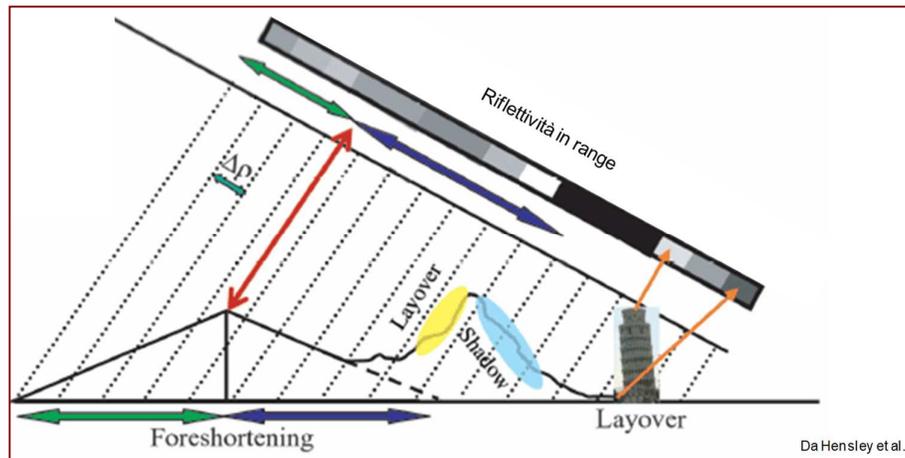


Figura 34: principali distorsioni geometriche.

La costellazione COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI)

La costellazione COSMO-SkyMed è un sistema composto da 4 satelliti "gemelli". Il primo satellite è stato lanciato nel giugno 2007, mentre la costellazione è stata completata nel novembre 2010 con il lancio del quarto satellite.

Tutti i satelliti sono dotati di sensori RADAR ad apertura sintetica (SAR) ad alta risoluzione in banda X (con lunghezza d'onda pari a 3,1 cm), in grado di osservare attraverso la copertura nuvolosa e in assenza di luce solare.

Il sistema è stato concepito con scopi duali, ovvero civili e militari, mediante una condivisione regolamentata della risorsa.

Il sensore può acquisire con diverse risoluzioni (inversamente proporzionale all'estensione areale dell'osservazione), a seconda delle configurazioni impostate: "Spotlight" (risoluzione metrica su un'area di pochi km quadrati), "Stripmap" (risoluzione di 3 m per l'acquisizione di una striscia continua di superficie terrestre larga 40 km) e "scanSAR" (risoluzione di 100 m per l'acquisizione di un'area di 200 km²).

Principi di base dell'Interferometria SAR differenziale (DInSAR)

La tecnica tradizionale per la derivazione di informazioni di spostamenti da dati SAR è l'Interferometria differenziale (DInSAR), che si basa sull'analisi della variazione del valore di fase tra due distinte acquisizioni e permette di calcolare gli spostamenti della superficie terrestre.

L'informazione sulla differenza di fase viene ricavata dal cosiddetto **Interferogramma**, che costituisce l'elemento basilare della metodologia.

In particolare, la fase di ogni pixel è formata dalla somma di due termini:

$$\varphi = \varphi_s + \varphi_r \quad (1)$$

Il primo (φ_s) è legato ai retrodiffusori presenti nella scena, il secondo (φ_r) dipende dal doppio percorso **Satellite – Punto di misura** e dalla lunghezza d'onda dell'impulso elettromagnetico inviato e successivamente registrato dal sensore stesso:

$$\varphi_r = \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \quad (2)$$

dove r è la distanza satellite-punto di misura valutata nella direzione di range e λ è la lunghezza d'onda. Tuttavia, la fase di una singola immagine SAR è inutilizzabile in quanto:

- ϕ_s è casuale;
- ϕ_r contiene decine di milioni di angoli giro (poiché le λ sono di pochi centimetri ed r di qualche centinaio di chilometri).

Infatti, l'onda elettromagnetica, per il generico pixel, viene inviata verso la superficie terrestre dall'antenna SAR e, durante il percorso **Satellite – Punto di misura**, l'onda compie milioni di cicli e successivamente colpisce tale porzione di territorio con una determinata fase. Successivamente viene quindi retrodiffusa dai vari oggetti (componente ϕ_s casuale a causa delle riflessioni multiple) e ritorna al satellite che, con opportuni sistemi di acquisizione, registra l'informazione.

Considerando invece la differenza di fase fra due immagini SAR, il termine ϕ_s si annulla, nell'ipotesi che le caratteristiche di retrodiffusione siano rimaste immutate e la **fase interferometrica** $\Delta\phi$ sia uguale a:

$$\Delta\phi = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta R \quad (3)$$

$\Delta\phi$ è caratterizzata dai seguenti contributi principali:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_f + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{displ} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{err} \quad (4)$$

La $\Delta\phi_f$ è detta fase di terra piatta (flat earth) ed è dovuta ai differenti angoli di vista dei satelliti al momento dell'acquisizione dell'immagine. Rappresenta un contributo di disturbo facilmente rimovibile.

La $\Delta\phi_{topo}$ è la componente di fase che contiene l'informazione topografica, ovvero la relazione tra fase e quote. Questo contributo di fase viene stimato mediante l'utilizzo di un DEM (Digital Elevation Model).

La $\Delta\phi_{atm}$ rappresenta un disturbo causato dal contributo di fase interferometrica generata dal variare delle condizioni atmosferiche tra le diverse acquisizioni delle immagini SAR.

La $\Delta\phi_{displ}$ è il contributo alla fase interferometrica totale dovuti agli spostamenti della superficie terrestre.

La $\Delta\phi_{err}$ è rumore di decorrelazione non direttamente determinabile.

L'interferogramma differenziale è ottenuto a partire dalla (4) dopo aver corretto il contributo di terra piatta ed eliminato la fase topografica, utilizzando un DEM. Alla fase di spostamento restano sommati il contributo atmosferico e gli eventuali errori. Il sistema di acquisizione delle immagini che formano la coppia interferometrica è caratterizzato dalla baseline geometrica (detta baseline normale o perpendicolare) (Figura 35) e dalla baseline temporale (ovvero l'intervallo di tempo tra le due acquisizioni), che influenzano e, in taluni casi, compromettono la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR.

La baseline normale è legata alla diversa posizione occupata dal satellite durante i vari passaggi lungo la stessa orbita. Questo avviene perché essi si discostano leggermente dalla traiettoria nominale; di fatto, vi sono delle variazioni dell'ordine delle centinaia di metri tra le orbite percorse dal satellite nei passaggi successivi e di conseguenza la geometria di acquisizione per la stessa zona presenta di volta in volta angoli leggermente diversi.

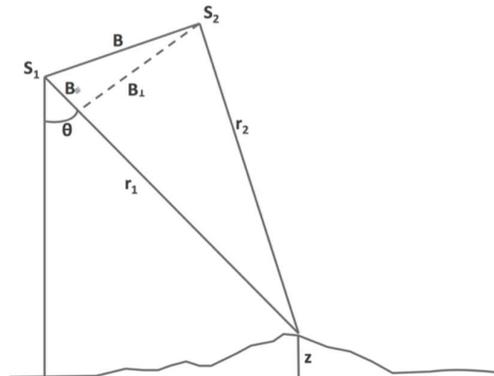


Figura 35: baseline geometrica. Geometria di acquisizione di due immagini SAR. S1 e S2 rappresentano la posizione dei satelliti in tempi diversi; θ è l'angolo nadir-off; r_1 e r_2 sono la distanza satellite-bersaglio per le due acquisizioni; B rappresenta la baseline geometrica (esagerato per chiarezza) mentre z rappresenta l'altezza topografica rilevata.

La baseline temporale, invece, causa un disturbo noto come temporal decorrelation che diventa più evidente nel caso in cui il tempo intercorso fra le due immagini SAR è molto lungo. Tale degradazione della qualità dipende dal fatto che nell'intervallo temporale, possono avvenire dei cambiamenti delle condizioni che rendono non valida l'eguaglianza dei termini di fase ϕ fra le due immagini. Le cause principali di tale variazione sono: variazioni della copertura vegetale (es. incendi o deforestazioni; tipo di vegetazione stagionale), gelate, disgeli, costruzione di opere e strutture o manufatti.

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni. La presenza di disturbo atmosferico rappresenta uno dei principali limiti per l'osservazione delle deformazioni; con una sola coppia di immagini SAR, tuttavia, non è possibile stimare ed eliminare questo disturbo.

Analisi con metodologia Advanced DInSAR

Lo sviluppo delle tecniche interferometriche multi-image (o Advanced DInSAR – A-DInSAR), ha rappresentato un notevole passo in avanti nell'analisi dei fenomeni deformativi della superficie terrestre attraverso l'uso di immagini SAR satellitari. Innanzitutto, l'uso di dataset composti da molte immagini SAR consente la stima e la rimozione del contributo atmosferico, che è in grado di nascondere i processi deformativi. Tali metodologie, inoltre, consentono l'analisi multitemporale dei processi deformativi con la possibilità di ottenere serie temporali di spostamento per molti oggetti sulla scena osservata.

La più nota tecnica A-DInSAR si basa sull'analisi di oggetti molto "stabili", da un punto di vista radaristico, e naturalmente presenti nell'area d'interesse. Tali target, caratterizzati da un'elevata qualità del segnale radar nel tempo, costituiscono dei veri e propri punti di misura (measurement point - MP) interferometrici (Kampes, 2006).

Tali "punti di misura" privilegiati, che il satellite identifica sul territorio hanno proprietà tali da consentire stime accurate della loro distanza dal sensore, con la possibilità di individuare e quantificare spostamenti di frazioni di centimetro. Sono buoni riflettori quei punti di misura che presentano una buona e stabile retrodiffusione del segnale radar emesso dal satellite. Tale caratteristica è propria di target come edifici, vie di comunicazione (strade, ferrovie), tralicci e opere quali dighe, ponti ecc. In particolari condizioni, rappresentano dei buoni riflettori anche le rocce esposte.

Questa fitta rete naturale di "punti di misura" permette di conoscere sia lo spostamento locale (es. un singolo edificio), sia di ricostruire, su scala più ampia, l'andamento dei moti superficiali (es. frane, subsidenze, faglie, ecc.).

Alla base dell'individuazione di ogni punto di misura c'è un'analisi statistica di time series di immagini radar.

Le misure di spostamento e di velocità dei punti di misura riguardano solo la componente dello spostamento e della velocità **lungo la linea di vista del sensore (LOS)**. Questo

*implica che i movimenti misurati sono in realtà la proiezione degli spostamenti del punto lungo la **coniungente sensore-bersaglio**. In presenza di moti puramente verticali (es. subsidenza), il movimento stimato è facilmente riconducibile alla deformazione lungo la direzione verticale, ma se il bersaglio in analisi presenta anche spostamenti orizzontali, la misura ottenuta è il risultato della combinazione plano-altimetrica degli spostamenti. Utilizzando una sola geometria di acquisizione non è in generale possibile distinguere i due contributi a meno di assunzioni a priori.*

Inoltre, le misure di spostamento sono di tipo relativo nel tempo (rispetto all'acquisizione di riferimento, immagine master) e nello spazio (rispetto a un punto di riferimento considerato stabile, detto reference point).

*Infatti, l'analisi prevede la scelta di un'immagine **master**, legata all'esigenza di minimizzare i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica. Si sceglie quindi come master l'immagine del dataset che minimizza la dispersione di baseline temporali e geometriche rispetto alle altre immagini del dataset, definite **slave**.*

Le misure di velocità calcolate sono differenziali: esse non esprimono un valore assoluto di spostamento di un punto a terra ma indicano le velocità del punto di misura in relazione ad uno scelto come riferimento (il reference point). Tale punto è un target radar di misura che per ipotesi è considerato fermo e rispetto al quale tutte le altre velocità vengono calcolate.

*A ciascun punto di misura è associato un valore di **coerenza temporale** che misura l'accordo tra i dati e i modelli di spostamento utilizzati in fase di analisi. Tuttavia, se le caratteristiche dei retrodiffusori cambiano tra un'osservazione e l'altra, la fase interferometrica contiene un rumore casuale che inficerà l'affidabilità dei risultati ottenuti. L'entità di tale rumore viene valutata attraverso l'immagine di coerenza fra le due immagini SAR della coppia interferometrica; in altri termini, la coerenza è una misura indiretta del disturbo della fase interferometrica. Il valore della funzione di coerenza varia fra 0 (assenza di correlazione fra pixel corrispondenti delle due SAR) e 1 (massima correlazione).*

Dall'elaborazione con la tecnica A-DInSAR, si ricavano per ciascun punto di misura:

- *la posizione (ovvero le sue coordinate geografiche: latitudine e longitudine);*
- *la velocità media di spostamento (lungo la congiungente sensore-bersaglio, LOS) in mm/anno, con una accuratezza in funzione del numero di immagini disponibili e del sensore utilizzato, che in condizioni ottimali raggiunge valori millimetrici;*

- *la serie storica di spostamento, a partire dal primo dato disponibile, con un'accuratezza pari a pochi millimetri sulla singola misura per i punti più affidabili.*

Numerosi sono i vantaggi che questa tecnica di telerilevamento ha introdotto per l'indagine degli spostamenti:

- *i punti di misura formano una "rete geodetica naturale", ovvero sono oggetti già presenti sul territorio, quali edifici, vie di comunicazione (strade, ferrovie), elementi antropici, rocce esposte, per i quali, grazie ai dati acquisiti dai satelliti ERS dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), è possibile stimare misure di spostamento a partire dal 1992 per l'analisi dei fenomeni di deformazione superficiale (subsidenze, frane, faglie);*
- *l'estensione delle immagini permette di analizzare vaste aree in tempi ristretti;*
- *l'accuratezza delle misure è molto elevata, permettendo così l'individuazione di fenomeni lenti su vaste aree altrimenti non rilevabili;*
- *i risultati sono facilmente integrabili nei sistemi informativi territoriali permettendo così una rapida integrazione con altre tecniche di indagine;*
- *la doppia geometria di acquisizione migliora la qualità delle informazioni del fenomeno analizzato: infatti, scomponendo i vettori delle velocità nelle loro componenti (orizzontale e verticale) e combinando le due geometrie, è possibile risalire al vettore di spostamento sul piano orizzontale (E-W) e su quello verticale. La componente lungo la direzione N-S non può essere misurata poiché i sensori attualmente operativi seguono orbite orientate circa N-S.*

É opportuno, inoltre, considerare i seguenti aspetti relativi alle analisi A-DInSAR:

- *le misure sono possibili solo in corrispondenza dei punti di misura: è necessario, quindi, che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di punti (almeno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte); infatti, in aree totalmente vegetate o non visibili dal satellite a causa di deformazioni prospettiche causate dalla topografia del terreno, non è possibile ottenere informazioni;*
- *l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida è molto difficile e alcuni tentativi sono possibili solo disponendo di informazioni a priori sui fenomeni in atto; anche i fenomeni a cinematica impulsiva non possono*

essere monitorati con questa tecnica, soprattutto quando movimenti di entità centimetrica sono concentrati in tempi brevi ed in aree ristrette.