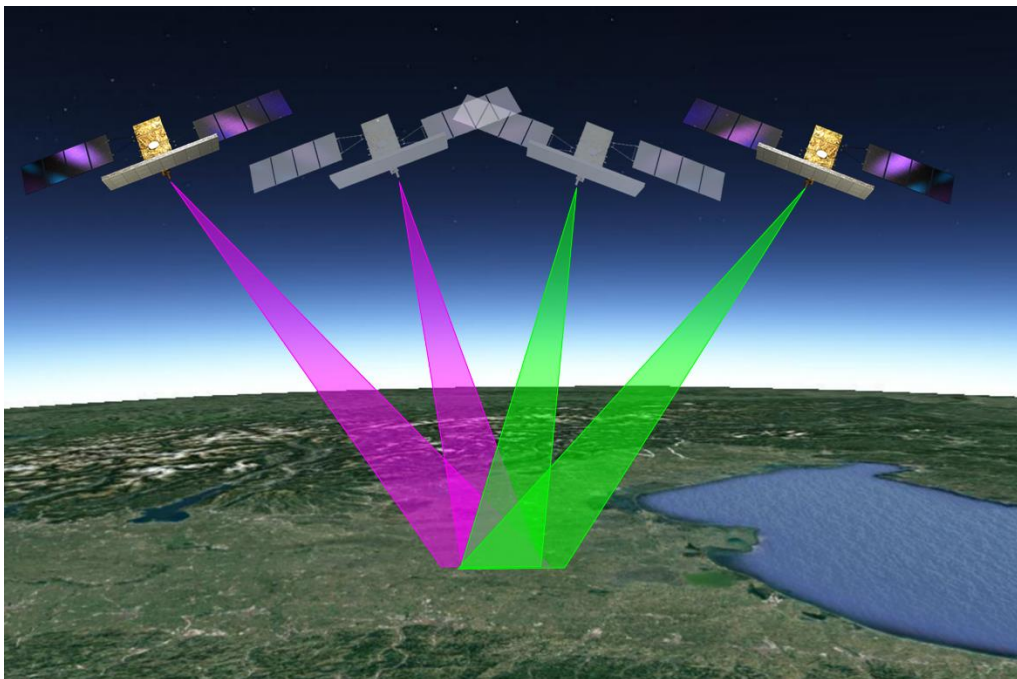


**ANALISI STORICA DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO
MEDIANTE INTERFEROMETRIA SAR SATELLITARE DELL'AREA
DELLA CONCESSIONE SELVA MALVEZZI (COMUNE DI BUDRIO-
BO) LEGATA ALLO SVILUPPO DEL GIACIMENTO "SELVA"
TRAMITE IL POZZO DI PRODUZIONE PODERE MAIAR-1**

**RELAZIONE TECNICA ANALISI STORICA
COSTELLAZIONE COSMO-SKYMED SERIE STORICA 2008 – 2022**



Cliente: PoValley Operations Pty Ltd
Rif. contratto: Ordine di Servizio PVO 25/22 MMpp
N° Prot.: NZ2409-U_080622
Data emissione: 08-06-2022
Redatto da: Geol. G. Pantozzi
Revisionato da: Dott. S. Scancella

INDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUZIONE ALLE ATTIVITÀ..... | 3 |
| 2. ATTIVITÀ SVOLTE | 5 |
| 2.1. Selezione ed acquisizione delle immagini SAR satellitari e dei dati di base..... | 5 |
| 2.2. Elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare | 8 |
| 2.2.1. Criteri di scelta dei reference points: la subsidenza nella Pianura Emiliano-Romagnola | 9 |
| 2.3. Post-elaborazione e validazione dei risultati..... | 10 |
| 3. RISULTATI OTTENUTI | 12 |
| 4. CONCLUSIONI | 25 |
| BIBLIOGRAFIA | 27 |
| GLOSSARIO | 28 |
| APPENDICE | 30 |
| <i>L'Interferometria SAR Satellitare</i> | 30 |
| <i>Generalità sui sistemi SAR (Synthetic Aperture Radar)</i> | 30 |
| <i>Le immagini SAR satellitari</i> | 31 |
| <i>La costellazione COSMO-SkyMed dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI)</i> | 34 |
| <i>Principi di base dell'Interferometria SAR differenziale (DInSAR)</i> | 34 |
| <i>Analisi con metodologia Advanced DInSAR</i> | 37 |

1. INTRODUZIONE ALLE ATTIVITÀ

Facendo seguito all'affidamento dell'incarico avente ad oggetto "Analisi storica delle deformazioni del suolo mediante Interferometria SAR Satellitare dell'area della concessione Selva Malvezzi (Comune di Budrio-Bo) legata allo sviluppo del giacimento "Selva" tramite il pozzo di produzione Podere Maiar-1" (Ordine di Servizio PVO 25/22 MMpp), NHAZCA S.r.l. ha eseguito un'analisi storica mediante tecniche di Interferometria SAR Satellitare (InSAR) su dati d'archivio ad alta risoluzione acquisite dalla costellazione COSMO-SkyMed (Agenzia Spaziale Italiana) per la stima di eventuali spostamenti subiti dal terreno e dalle strutture ricadenti all'interno di un'area di circa 160 km² (Figura 1).

Le analisi A-DInSAR (*Advanced Differential SAR Interferometry*) sono state condotte su un dataset in doppia geometria orbitale (ascendente e discendente) acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed nel periodo compreso tra ottobre 2008 e marzo 2022.



Figura 1: Ubicazione dell'area di studio (poligono rosso) comprensiva dell'area pozzo Podere Maiar e del giacimento Selva (Comune di Budrio - BO). Nel triangolo bianco è indicata l'ubicazione della stazione GNSS e del corner reflector già presenti in prossimità dell'area di estrazione.

L'obiettivo delle attività è stato quello di fornire informazioni sul comportamento deformativo storico di oltre un decennio delle strutture e infrastrutture all'interno dell'area di studio, con particolare attenzione su possibili fenomeni di subsidenza e deformazioni del suolo in prossimità dell'area di estrazione e del pozzo di produzione Podere Maiar-1, al fine di discriminare eventuali deformazioni indotte dalle future attività di estrazione legate alla coltivazione del giacimento "Selva".

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 (<https://visualizationtool.nhazca.com/login.php>).

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 2008-2022). Più in dettaglio, si riportano di seguito le principali attività:

- selezione e acquisizione delle immagini SAR satellitari (par. 2.1);
- elaborazione immagini SAR con Interferometria SAR Satellitare (par.2.2);
- post-elaborazione e validazione dei risultati (par. 2.3);

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*, 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 **426 immagini SAR** (Figura 3) provenienti dagli archivi dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) così distribuite:

- **222 immagini** in formato *Single Look Complex* (SLC) acquisite in geometria orbitale ascendente ad opera dei satelliti **COSMO-SkyMed** dal **11 novembre 2008 al 28 settembre 2021** (Figura 4 e Figura 5);
- **204 immagini** in formato *Single Look Complex* (SLC) acquisite in geometria orbitale discendente ad opera dei satelliti **COSMO-SkyMed** dal **31 ottobre 2008 al 12 marzo 2022** (Figura 4 e Figura 5).

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.

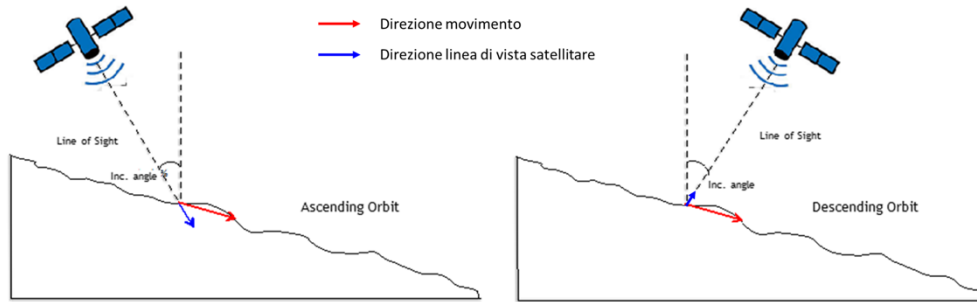


Figura 2: Rappresentazione schematica dell'interazione tra la linea di vista satellitare (LOS) e la topografia locale per un versante con esposizione a Est. In rosso il movimento reale, in blu lo stesso proiettato lungo la LOS satellitare in funzione della geometria orbitale ascendente (sinistra) e discendente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

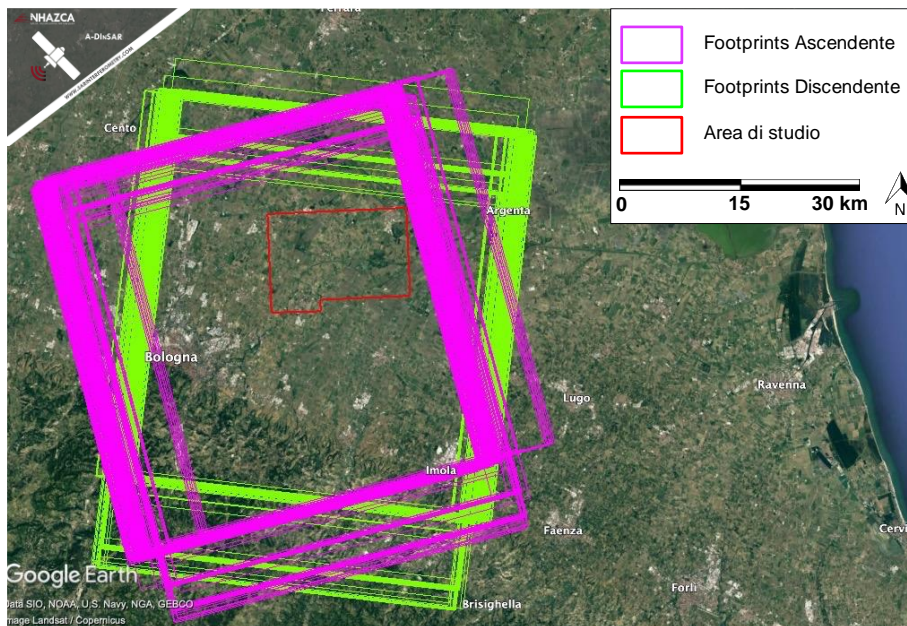


Figura 3: footprint delle immagini SAR satellitari COSMO-SkyMed utilizzate, in geometria orbitale ascendente e discendente, con ubicazione dell'area di studio.

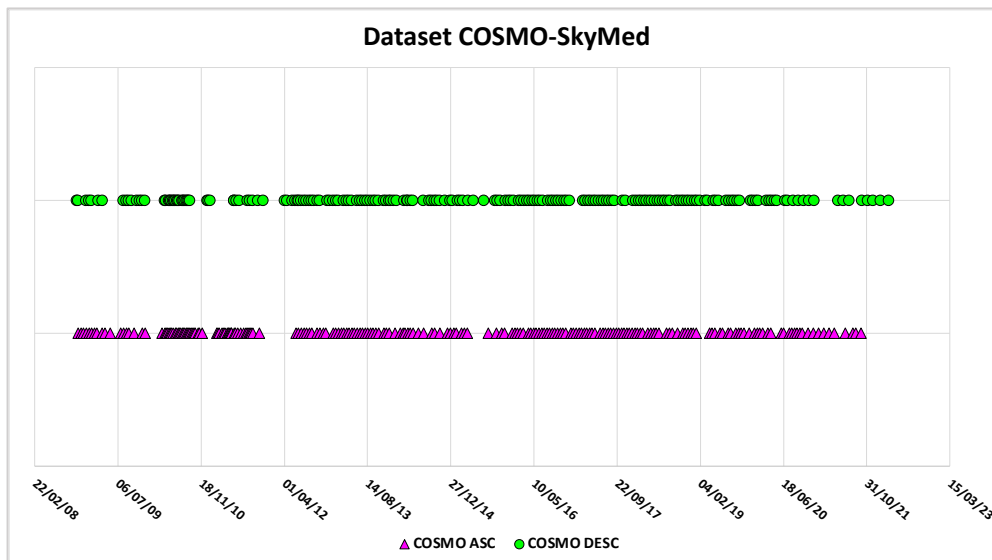


Figura 4: distribuzione temporale delle immagini SAR COSMO-SkyMed satellitari utilizzate.

RELAZIONE TECNICA ANALISI STORICA
 COSTELLAZIONE COSMO-SKYMED SERIE STORICA 2008 – 2022

| COSMO-SkyMed Ascending | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|----------|----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|
| 1 | 11/11/08 | 35 | 22/08/10 | 69 | 04/11/11 | 103 | 01/03/14 | 137 | 28/07/16 | 171 | 24/02/18 | 205 | 05/06/20 |
| 2 | 27/11/08 | 36 | 29/08/10 | 70 | 11/06/12 | 104 | 17/03/14 | 138 | 13/08/16 | 172 | 28/03/18 | 206 | 21/06/20 |
| 3 | 13/12/08 | 37 | 06/09/10 | 71 | 27/06/12 | 105 | 29/03/14 | 139 | 29/08/16 | 173 | 13/04/18 | 207 | 23/07/20 |
| 4 | 29/12/08 | 38 | 14/09/10 | 72 | 13/07/12 | 106 | 14/04/14 | 140 | 14/09/16 | 174 | 29/04/18 | 208 | 08/08/20 |
| 5 | 14/01/09 | 39 | 22/09/10 | 73 | 29/07/12 | 107 | 30/04/14 | 141 | 30/09/16 | 175 | 15/05/18 | 209 | 24/08/20 |
| 6 | 30/01/09 | 40 | 30/09/10 | 74 | 14/08/12 | 108 | 16/05/14 | 142 | 16/10/16 | 176 | 31/05/18 | 210 | 09/09/20 |
| 7 | 15/02/09 | 41 | 09/10/10 | 75 | 30/08/12 | 109 | 17/06/14 | 143 | 01/11/16 | 177 | 18/07/18 | 211 | 25/09/20 |
| 8 | 03/03/09 | 42 | 16/10/10 | 76 | 15/09/12 | 110 | 19/07/14 | 144 | 17/11/16 | 178 | 03/08/18 | 212 | 11/10/20 |
| 9 | 04/04/09 | 43 | 01/11/10 | 77 | 17/10/12 | 111 | 05/09/14 | 145 | 19/12/16 | 179 | 19/08/18 | 213 | 12/11/20 |
| 10 | 20/04/09 | 44 | 09/11/10 | 78 | 02/11/12 | 112 | 21/09/14 | 146 | 04/01/17 | 180 | 20/09/18 | 214 | 14/12/20 |
| 11 | 22/05/09 | 45 | 25/11/10 | 79 | 22/11/12 | 113 | 23/10/14 | 147 | 20/01/17 | 181 | 22/10/18 | 215 | 15/01/21 |
| 12 | 25/07/09 | 46 | 21/02/11 | 80 | 08/12/12 | 114 | 10/12/14 | 148 | 05/02/17 | 182 | 07/11/18 | 216 | 16/02/21 |
| 13 | 10/08/09 | 47 | 02/03/11 | 81 | 21/01/13 | 115 | 26/12/14 | 149 | 21/02/17 | 183 | 23/11/18 | 217 | 20/03/21 |
| 14 | 26/08/09 | 48 | 09/03/11 | 82 | 06/02/13 | 116 | 15/01/15 | 150 | 09/03/17 | 184 | 09/12/18 | 218 | 21/04/21 |
| 15 | 11/09/09 | 49 | 25/03/11 | 83 | 22/02/13 | 117 | 31/01/15 | 151 | 25/03/17 | 185 | 25/12/18 | 219 | 24/06/21 |
| 16 | 13/10/09 | 50 | 03/04/11 | 84 | 10/03/13 | 118 | 04/03/15 | 152 | 10/04/17 | 186 | 10/01/19 | 220 | 11/08/21 |
| 17 | 30/11/09 | 51 | 10/04/11 | 85 | 26/03/13 | 119 | 20/03/15 | 153 | 26/04/17 | 187 | 31/03/19 | 221 | 27/08/21 |
| 18 | 16/12/09 | 52 | 26/04/11 | 86 | 11/04/13 | 120 | 05/04/15 | 154 | 12/05/17 | 188 | 16/04/19 | 222 | 28/09/21 |
| 19 | 30/03/10 | 53 | 04/05/11 | 87 | 27/04/13 | 121 | 11/08/15 | 155 | 13/06/17 | 189 | 02/05/19 | | |
| 20 | 15/04/10 | 54 | 05/05/11 | 88 | 13/05/13 | 122 | 28/09/15 | 156 | 29/06/17 | 190 | 03/06/19 | | |
| 21 | 23/04/10 | 55 | 12/05/11 | 89 | 29/05/13 | 123 | 30/10/15 | 157 | 15/07/17 | 191 | 19/06/19 | | |
| 22 | 01/05/10 | 56 | 20/05/11 | 90 | 14/06/13 | 124 | 15/11/15 | 158 | 31/07/17 | 192 | 21/07/19 | | |
| 23 | 09/05/10 | 57 | 21/05/11 | 91 | 30/06/13 | 125 | 02/01/16 | 159 | 16/08/17 | 193 | 06/08/19 | | |
| 24 | 17/05/10 | 58 | 05/06/11 | 92 | 16/07/13 | 126 | 18/01/16 | 160 | 01/09/17 | 194 | 07/09/19 | | |
| 25 | 25/05/10 | 59 | 13/06/11 | 93 | 01/08/13 | 127 | 03/02/16 | 161 | 17/09/17 | 195 | 23/09/19 | | |
| 26 | 02/06/10 | 60 | 29/06/11 | 94 | 17/08/13 | 128 | 19/02/16 | 162 | 03/10/17 | 196 | 09/10/19 | | |
| 27 | 18/06/10 | 61 | 15/07/11 | 95 | 02/09/13 | 129 | 06/03/16 | 163 | 19/10/17 | 197 | 25/10/19 | | |
| 28 | 26/06/10 | 62 | 31/07/11 | 96 | 18/09/13 | 130 | 07/04/16 | 164 | 04/11/17 | 198 | 26/11/19 | | |
| 29 | 04/07/10 | 63 | 16/08/11 | 97 | 04/10/13 | 131 | 23/04/16 | 165 | 20/11/17 | 199 | 28/12/19 | | |
| 30 | 12/07/10 | 64 | 24/08/11 | 98 | 20/10/13 | 132 | 09/05/16 | 166 | 06/12/17 | 200 | 13/01/20 | | |
| 31 | 20/07/10 | 65 | 01/09/11 | 99 | 21/11/13 | 133 | 25/05/16 | 167 | 22/12/17 | 201 | 29/01/20 | | |
| 32 | 28/07/10 | 66 | 09/09/11 | 100 | 07/12/13 | 134 | 10/06/16 | 168 | 07/01/18 | 202 | 14/02/20 | | |
| 33 | 05/08/10 | 67 | 17/09/11 | 101 | 23/12/13 | 135 | 26/06/16 | 169 | 23/01/18 | 203 | 17/03/20 | | |
| 34 | 13/08/10 | 68 | 25/09/11 | 102 | 28/01/14 | 136 | 12/07/16 | 170 | 08/02/18 | 204 | 02/04/20 | | |

| COSMO-SkyMed Descending | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----------|----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|-----|----------|--|--|
| 1 | 31/10/08 | 35 | 01/01/11 | 69 | 11/06/13 | 103 | 15/07/15 | 137 | 18/06/17 | 171 | 20/03/19 | | |
| 2 | 08/11/08 | 36 | 09/01/11 | 70 | 27/06/13 | 104 | 17/09/15 | 138 | 04/07/17 | 172 | 21/04/19 | | |
| 3 | 26/12/08 | 37 | 02/06/11 | 71 | 13/07/13 | 105 | 03/10/15 | 139 | 20/07/17 | 173 | 07/05/19 | | |
| 4 | 11/01/09 | 38 | 03/06/11 | 72 | 29/07/13 | 106 | 19/10/15 | 140 | 05/08/17 | 174 | 23/05/19 | | |
| 5 | 27/01/09 | 39 | 18/06/11 | 73 | 14/08/13 | 107 | 20/11/15 | 141 | 21/08/17 | 175 | 10/07/19 | | |
| 6 | 08/03/09 | 40 | 04/07/11 | 74 | 30/08/13 | 108 | 06/12/15 | 142 | 06/09/17 | 176 | 26/07/19 | | |
| 7 | 01/04/09 | 41 | 21/08/11 | 75 | 15/09/13 | 109 | 22/12/15 | 143 | 24/10/17 | 177 | 11/08/19 | | |
| 8 | 07/08/09 | 42 | 06/09/11 | 76 | 01/10/13 | 110 | 07/01/16 | 144 | 09/11/17 | 178 | 27/08/19 | | |
| 9 | 23/08/09 | 43 | 22/09/11 | 77 | 17/10/13 | 111 | 08/02/16 | 145 | 27/12/17 | 179 | 12/09/19 | | |
| 10 | 08/09/09 | 44 | 24/10/11 | 78 | 18/11/13 | 112 | 24/02/16 | 146 | 12/01/18 | 180 | 28/09/19 | | |
| 11 | 24/09/09 | 45 | 25/11/11 | 79 | 04/12/13 | 113 | 11/03/16 | 147 | 28/01/18 | 181 | 01/12/19 | | |
| 12 | 26/10/09 | 46 | 01/04/12 | 80 | 20/12/13 | 114 | 27/03/16 | 148 | 13/02/18 | 182 | 17/12/19 | | |
| 13 | 11/11/09 | 47 | 17/04/12 | 81 | 01/01/14 | 115 | 12/04/16 | 149 | 01/03/18 | 183 | 02/01/20 | | |
| 14 | 27/11/09 | 48 | 19/05/12 | 82 | 17/01/14 | 116 | 28/04/16 | 150 | 17/03/18 | 184 | 18/01/20 | | |
| 15 | 13/12/09 | 49 | 05/06/12 | 83 | 02/02/14 | 117 | 14/05/16 | 151 | 02/04/18 | 185 | 06/03/20 | | |
| 16 | 12/04/10 | 50 | 20/06/12 | 84 | 22/03/14 | 118 | 30/05/16 | 152 | 18/04/18 | 186 | 22/03/20 | | |
| 17 | 20/04/10 | 51 | 24/06/12 | 85 | 07/04/14 | 119 | 15/06/16 | 153 | 04/05/18 | 187 | 07/04/20 | | |
| 18 | 06/05/10 | 52 | 10/07/12 | 86 | 11/04/14 | 120 | 01/07/16 | 154 | 20/05/18 | 188 | 23/04/20 | | |
| 19 | 14/05/10 | 53 | 26/07/12 | 87 | 27/04/14 | 121 | 02/08/16 | 155 | 05/06/18 | 189 | 09/05/20 | | |
| 20 | 22/05/10 | 54 | 11/08/12 | 88 | 13/05/14 | 122 | 18/08/16 | 156 | 21/06/18 | 190 | 26/06/20 | | |
| 21 | 30/05/10 | 55 | 27/08/12 | 89 | 16/07/14 | 123 | 03/09/16 | 157 | 07/07/18 | 191 | 12/07/20 | | |
| 22 | 07/06/10 | 56 | 12/09/12 | 90 | 17/08/14 | 124 | 19/09/16 | 158 | 23/07/18 | 192 | 13/08/20 | | |
| 23 | 15/06/10 | 57 | 24/09/12 | 91 | 02/09/14 | 125 | 05/10/16 | 159 | 08/08/18 | 193 | 14/09/20 | | |
| 24 | 23/06/10 | 58 | 14/10/12 | 92 | 18/09/14 | 126 | 21/10/16 | 160 | 09/09/18 | 194 | 16/10/20 | | |
| 25 | 01/07/10 | 59 | 30/10/12 | 93 | 04/10/14 | 127 | 06/11/16 | 161 | 25/09/18 | 195 | 17/11/20 | | |
| 26 | 09/07/10 | 60 | 13/12/12 | 94 | 20/10/14 | 128 | 22/11/16 | 162 | 11/10/18 | 196 | 19/12/20 | | |
| 27 | 25/07/10 | 61 | 29/12/12 | 95 | 21/11/14 | 129 | 08/12/16 | 163 | 27/10/18 | 197 | 12/05/21 | | |
| 28 | 02/08/10 | 62 | 18/01/13 | 96 | 23/12/14 | 130 | 26/02/17 | 164 | 12/11/18 | 198 | 13/06/21 | | |
| 29 | 10/08/10 | 63 | 03/02/13 | 97 | 04/01/15 | 131 | 14/03/17 | 165 | 28/11/18 | 199 | 15/07/21 | | |
| 30 | 18/08/10 | 64 | 19/02/13 | 98 | 05/02/15 | 132 | 30/03/17 | 166 | 14/12/18 | 200 | 03/10/21 | | |
| 31 | 26/08/10 | 65 | 23/03/13 | 99 | 21/02/15 | 133 | 15/04/17 | 167 | 30/12/18 | 201 | 04/11/21 | | |
| 32 | 03/09/10 | 66 | 08/04/13 | 100 | 09/03/15 | 134 | 01/05/17 | 168 | 15/01/19 | 202 | 06/12/21 | | |
| 33 | 11/09/10 | 67 | 24/04/13 | 101 | 10/04/15 | 135 | 17/05/17 | 169 | 31/01/19 | 203 | 23/01/22 | | |
| 34 | 24/12/10 | 68 | 10/05/13 | 102 | 12/05/15 | 136 | 02/06/17 | 170 | 04/03/19 | 204 | 12/03/22 | | |

Figura 5: calendario delle acquisizioni delle immagini SAR COSMO-SkyMed utilizzate (geometria orbitale ascendente e 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 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 all'area pozzo. Al fine di ottimizzare l'affidabilità dei risultati, tale punto di riferimento, è stato comunque localizzato prendendo in considerazione il "**Rilievo della subsidenza nella Pianura Padana Emiliano-Romagnola**" del periodo 2011-2016 (Arpae, 2018). I criteri di selezione dei due *reference points* sono descritti nel par. 2.2.1. Pertanto, per le due geometrie orbitali sono stati identificati i seguenti punti di riferimento:

- localizzazione punto di riferimento dataset ascendente: lat 44°35'43.04"N lon 11°32'38.68"E;
- localizzazione punto di riferimento dataset discendente: lat. 44°32'36.59"N, lon. 11°28'8.17"E.

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 **PMC (PM Candidates)**, ovvero l'identificazione dei punti idonei ad essere analizzati. Per questo scopo viene analizzata la **mappa della riflettività**, 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 rispetto ad aree vegetate, specchi d'acqua etc.

I **PMC** sono inoltre 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**, 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*).

Una volta analizzati i dati di base relativi al segnale radar e identificati i PMC, 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.

2.2.1. Criteri di scelta dei reference points: la subsidenza nella Pianura Emiliano-Romagnola

Si ricorda che 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* - cfr. *Appendice*).

Dunque, 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 considerato fermo e rispetto al quale tutte le altre velocità vengono calcolate.

Con l'obiettivo di valutare gli eventuali movimenti verticali del suolo in corrispondenza dell'area di studio e di conseguenza posizionare in maniera adeguata i *reference points* nel presente lavoro, sono stati consultati i dati relativi al Rilievo della subsidenza nella Pianura Emiliano-Romagnola, affidato dalla Regione Emilia-Romagna ad Arpae, per il periodo 2011-2016. Tale lavoro ha previsto l'elaborazione di immagini SAR acquisite dal satellite RADARSAT-2 (*Canadian Space Agency*) mediante tecniche di Interferometria SAR Satellitare Avanzata. Le analisi sono state calibrate e validate in funzione dei dati acquisiti da diverse stazioni GNSS. In Figura 6 è possibile osservare uno stralcio della Carta delle velocità del movimento verticale del suolo (Rilievo della subsidenza nella Pianura Emiliano-Romagnola, 2018), nella porzione di territorio comprendente la concessione di Selva Malvezzi e i comuni di Budrio e Molinella. È possibile osservare che l'area in esame è interessata da valori medi di spostamento verticale compresi tra un minimo di -2,5 mm/anno fino ad un massimo di -17,5 mm/anno nel centro abitato di Budrio. I *reference points* utilizzati per le analisi COSMO-SkyMed oggetto del presente elaborato, sono stati selezionati all'interno di porzioni di territorio ricadenti in settori caratterizzati da spostamenti assenti o comunque prossimi a 0 mm/anno.

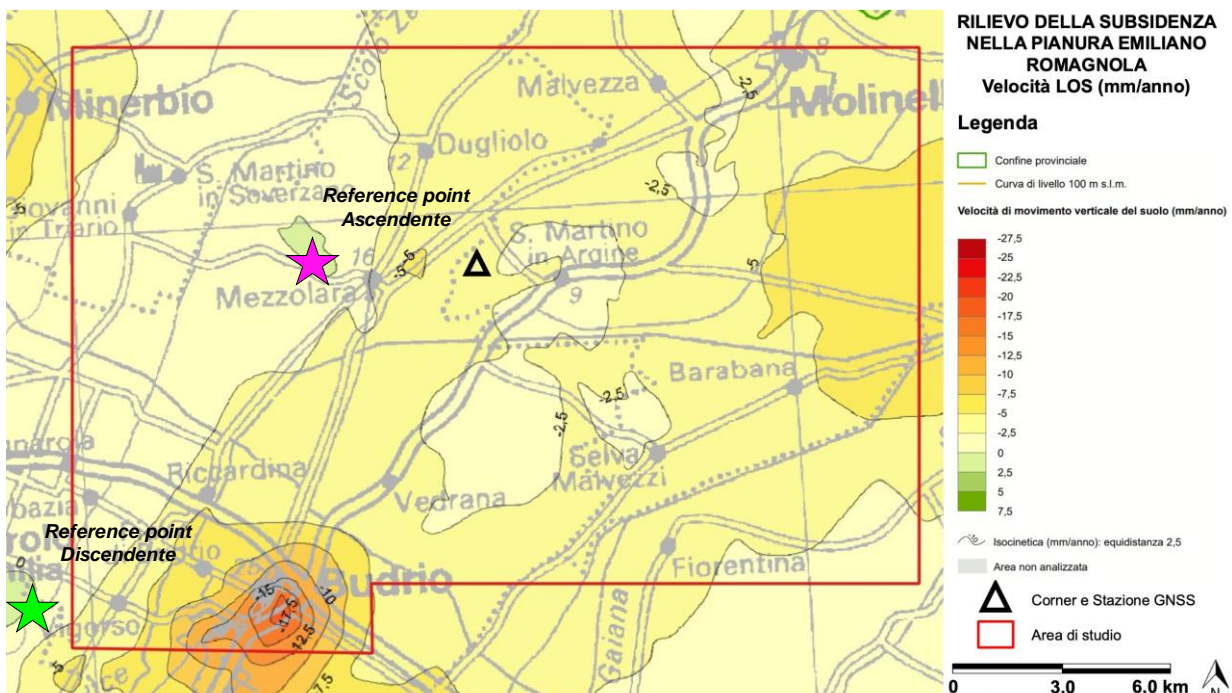


Figura 6: Rilievo della subsidenza nella Pianura Emiliano Romagnola (Arpae, 2018). Le stelle riportano la posizione dei due *reference points* scelti per le due geometrie orbitali

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 630.000 punti di misura (PM)** affidabili in tutta l'area di indagine **per la geometria orbitale ascendente** e **circa 660.000 PM 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.

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 viola) 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 stimato è di circa $\pm 1,50$ mm/anno.

Al fine di contestualizzare i risultati dell'analisi A-DInSAR e integrare le informazioni così ottenute nell'analisi dei processi deformativi presenti nell'area di studio, è stato condotto uno studio delle informazioni di letteratura, incluse alcune delle principali banche dati relative ai processi deformativi del territorio. In particolare, è stata consultata la relazione inviata dalla committenza "*Istanza di Concessione di Coltivazione denominata "Selva Malvezzi" derivante dal Permesso di Ricerca PODERE GALLINA. Aggiornamento del Piano di Monitoraggio. (Studio Tecnico Associato di Geologia per PoValley Operations, 2019)*".

3. RISULTATI OTTENUTI

I risultati ottenuti dall'analisi A-DInSAR sono riportati in Figura 7 e Figura 8 attraverso mappe che mostrano le velocità medie annue dei punti di misura (PM). L'indagine eseguita ha consentito di ottenere un'ottima distribuzione spaziale dei PM lungo l'intera area di studio e in particolare nei principali centri abitati ricadenti nell'area (*Minerbio, Mezzolara di Budrio, Budrio, Molinella, ecc.*) e in prossimità del futuro punto di coltivazione, sia in geometria ascendente che discendente. Questo ha consentito un'osservazione ridondante degli eventuali processi deformativi che lo caratterizzano. Nello specifico, sono stati identificati circa **1.300.000 PM** (complessivamente per le due geometrie orbitali) nell'intera area di indagine. I PM corrispondono ad elementi naturali e antropici presenti nel settore, caratterizzati da un'elevata stabilità alla riflessione delle onde radar nel tempo. Una maggiore densità di PM si rileva, di conseguenza, nei centri abitati e nelle infrastrutture, mentre la densità risulta inferiore nelle aree densamente vegetate e coltivate.

Come prodotto derivante dalle attività di post-elaborazione, vengono riportate le 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 PM ottenuti in geometria orbitale ascendente e discendente (Figura 7 e Figura 8). Infatti, 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 (cfr. *Appendice*). 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 plano-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 9 e Figura 10. In particolare, l'area di indagine è stata discretizzata in celle esagonali (con raggio del cerchio inscritto pari a 10 m) secondo una griglia regolare. I risultati mostrano i valori risultanti delle sole celle ("PM sintetici") contenenti almeno un punto di misura per entrambe le geometrie orbitali.

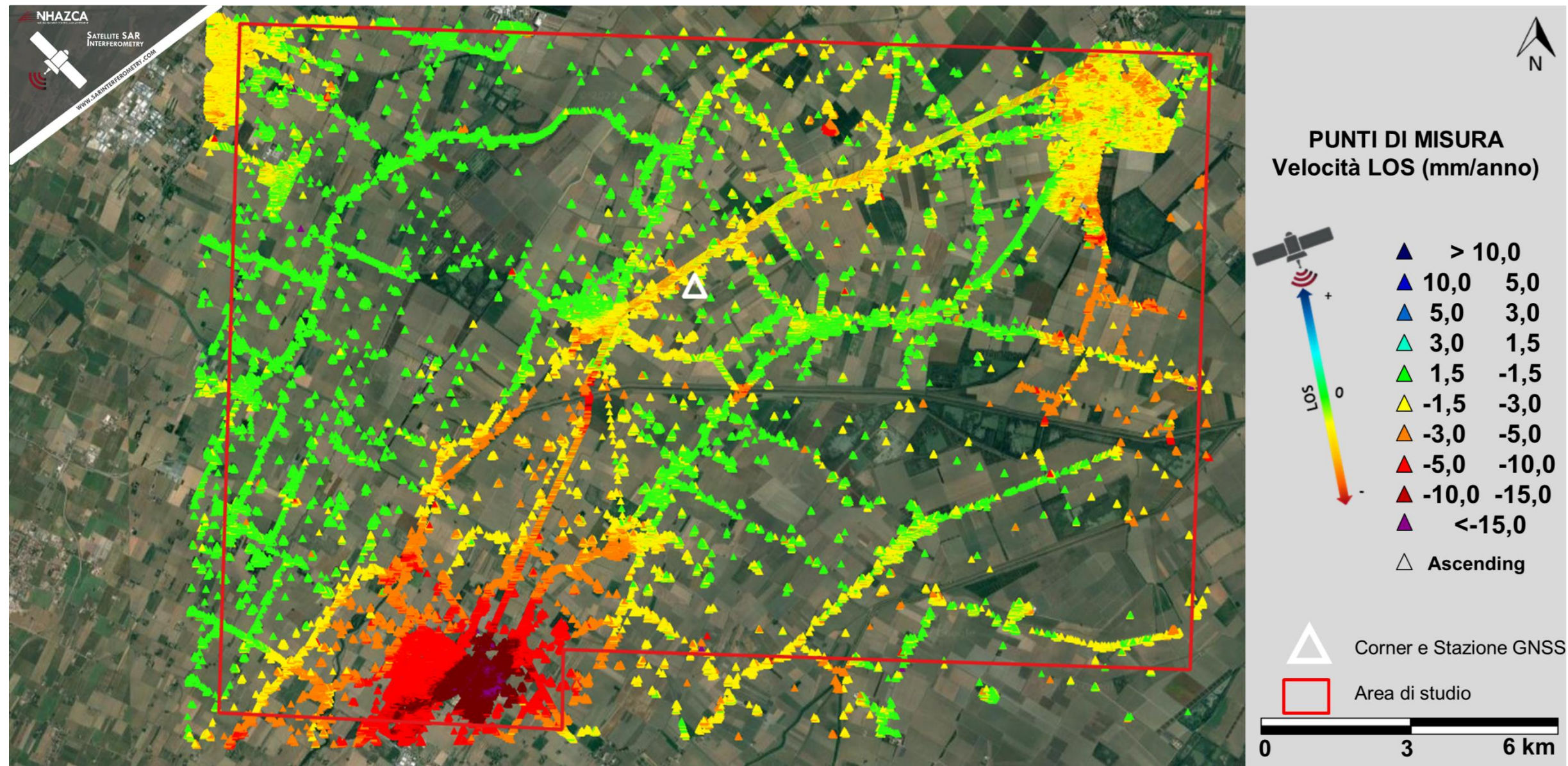


Figura 7: velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR nell'area di indagine – Stack ascendente.

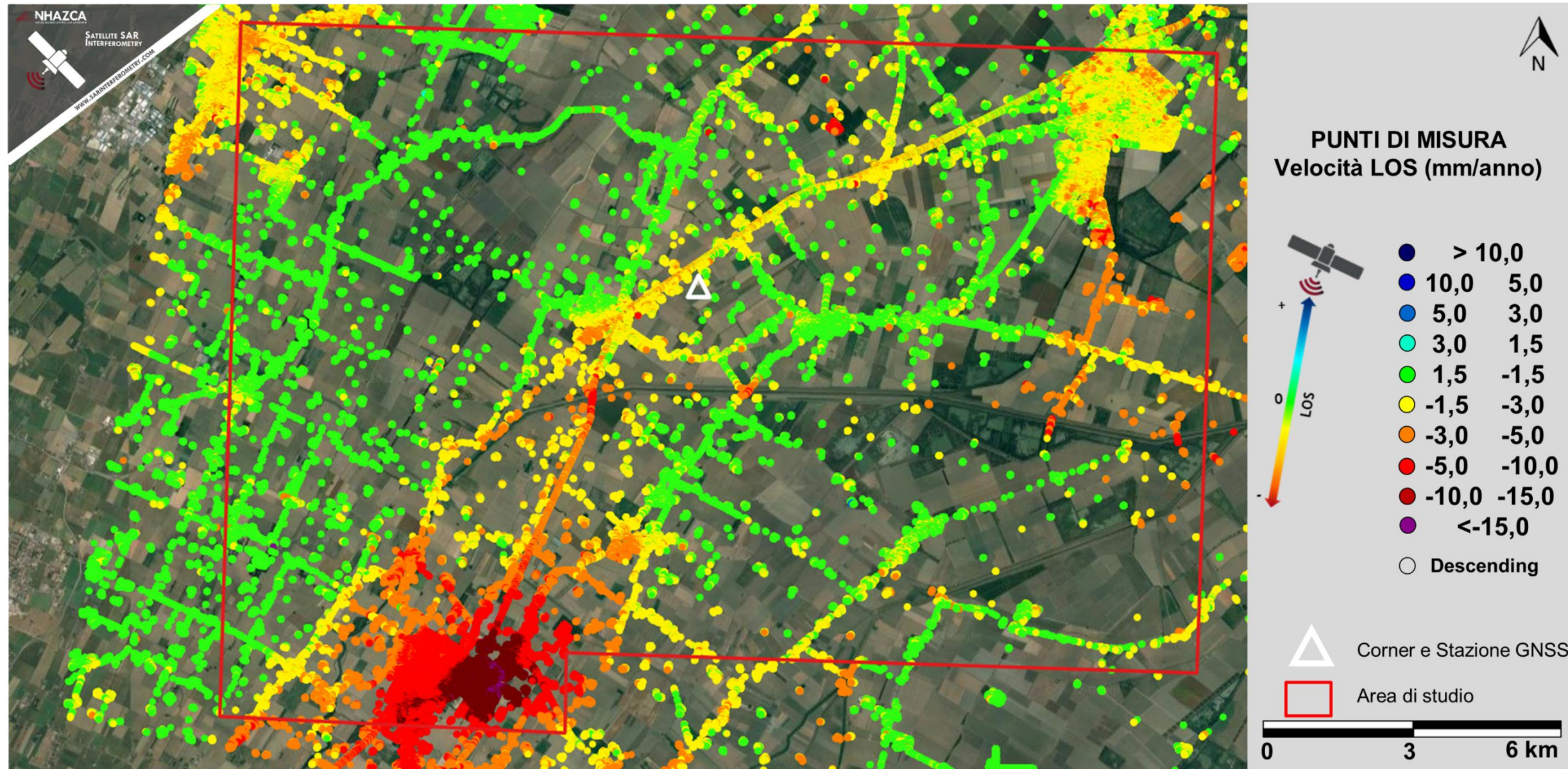


Figura 8: velocità dei punti di misura ottenute da analisi A-DInSAR nell'area di indagine – Stack discendente.

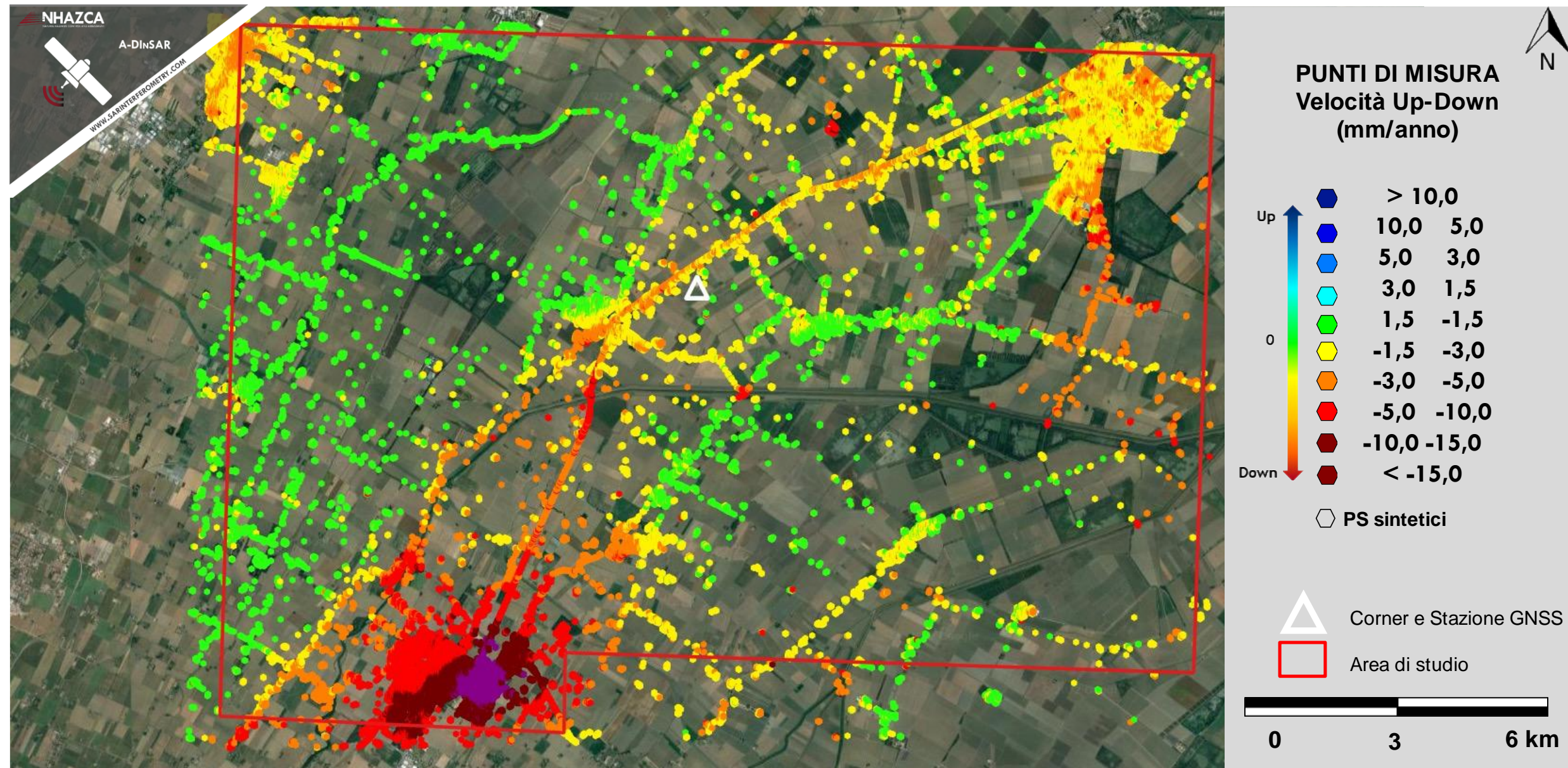


Figura 9: velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione verticale. Valori positivi = Up; Valori negativi = Down.

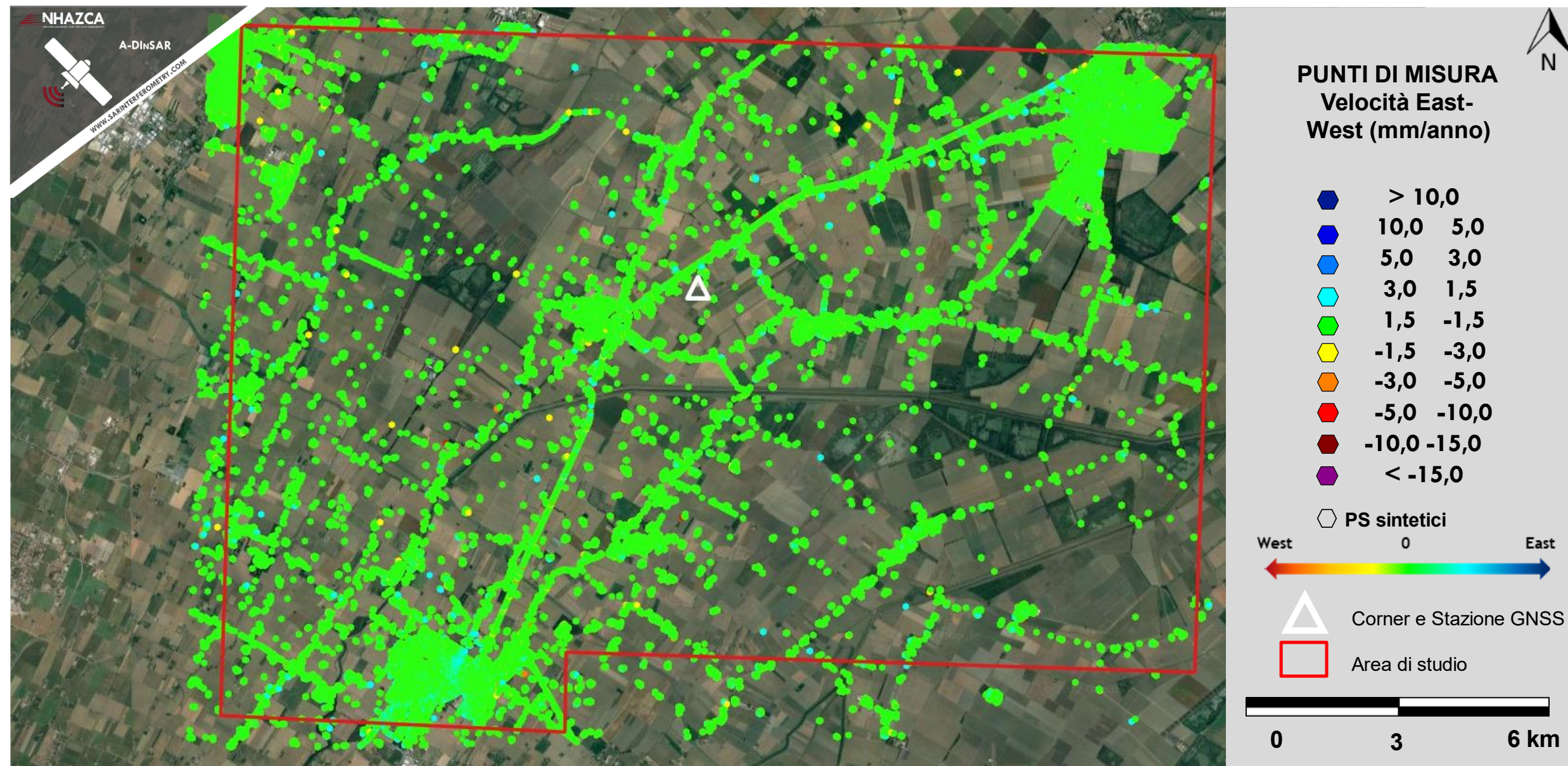


Figura 10: velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione orizzontale (Est-Ovest). Valori positivi = Est; Valori negativi = Ovest.

Dall'analisi delle mappe dei PM (sia in geometria orbitale ascendente che discendente) si evince che l'intera area di studio, e in particolare nel pozzo di produzione "Podere Maiar 1dir" **sia affetta da fenomeni deformativi di lungo periodo diffusi e di entità localmente molto variabile, da lieve a media**. Dall'osservazione delle mappe di deformazione in direzione verticale e orizzontale, si osserva una prevalente componente deformativa in tutta l'area di studio in direzione verticale, in abbassamento, mentre risultano assenti deformazioni rilevanti nella direzione orizzontale.

La zona interessata da maggiori deformazioni risulta essere il centro abitato di Budrio (BO), in accordo con quanto rilevato dal Rilievo della subsidenza nella Pianura Emiliano Romagnola (Arpae, 2018). In tale settore, le analisi hanno restituito spostamenti medi in allontanamento lungo la LOS dell'ordine di -9,00 mm/anno in entrambe le geometrie orbitali, con massimi locali di oltre -20,00 mm/anno in entrambe le geometrie orbitali. Dall'osservazione delle mappe di deformazione in direzione verticale e orizzontale, si osservano spostamenti medi in abbassamento di -12,60 mm/anno (Figura 9), con massimi locali di circa -25,00 mm/anno.

Per quanto riguarda la zona di maggior interesse, ovvero, la piazzola del pozzo di produzione "Podere Maiar 1dir", l'area è affetta da **spostamenti di lungo periodo di lieve entità** in allontanamento lungo la LOS compresi tra i **-1,50 e -3,00 mm/anno** per entrambe le geometrie orbitali. In tale settore, nel mese di giugno 2020 sono stati installati, n. 1 stazione GNSS e un n. 1 corner reflector satellitare (NZ1859-U_090721, già trasmessa alla Committenza) con l'obiettivo di ottenere un punto di misura di elevata qualità, aumentare il grado informativo, e per una più esaustiva investigazione della piazzola di estrazione. I risultati ottenuti nell'area in prossimità del pozzo di produzione sono riportati in Figura 11, mentre in Figura 12 e Figura 13 si riportano le serie temporali dei PM selezionati delle due geometrie. In generale, le serie temporali dei PM che ricadono nello stralcio in Figura 11 sono caratterizzate, in entrambe le geometrie orbitali, da uno spostamento cumulato medio nell'intero periodo analizzato (oltre un decennio) dell'ordine dei - 20,00 mm con valori massimi di circa - 50,00 mm per la geometria orbitale discendente e circa - 40,00 mm per l'ascendente. La scomposizione vettoriale, riportata in Figura 14, ha restituito valori ricadenti nell'intervallo di stabilità per la componente orizzontale e valori compresi tra i -1,50 e -3,00 mm/anno per la componente verticale. In questo contesto, le serie temporali del *corner reflector* installato mostrano uno spostamento cumulato (in circa 2 anni) di circa -3,00 mm nella direzione verticale e un trend caratterizzato da lievi oscillazioni stagionali (Figura 14). Tali misure risultano in linea con quanto misurato

dalla postazione GNSS nelle immediate vicinanze e di cui sono stati già riportati i primi risultati (vedi prot. NZ1859-U_090721).

A valle delle attività di elaborazione e validazione dei dati A-DInSAR sono state effettuate delle **attività di post-elaborazione** tramite l'applicazione di algoritmi proprietari con lo scopo di contestualizzare le deformazioni osservate e, soprattutto di definire eventuali interferenze con gli elementi di interesse della Committenza. Nello specifico sono state prodotte le **Heat Maps**, elaborate sia per la geometria orbitale ascendente che per la geometria orbitale discendente. Le mappe di concentrazione, basate sull'interpolazione dei valori di velocità dei PM ottenuti permettono di visualizzare un dato continuo nello spazio gli spostamenti misurati pesati per la coerenza temporale evidenziando così le zone a maggiore velocità (Figura 14 e Figura 15).

Per ulteriori approfondimenti sul resto dell'area di studio si rimanda alla consultazione dei risultati tramite il portale web **NHAZCA InSAR Visualization Tool**.

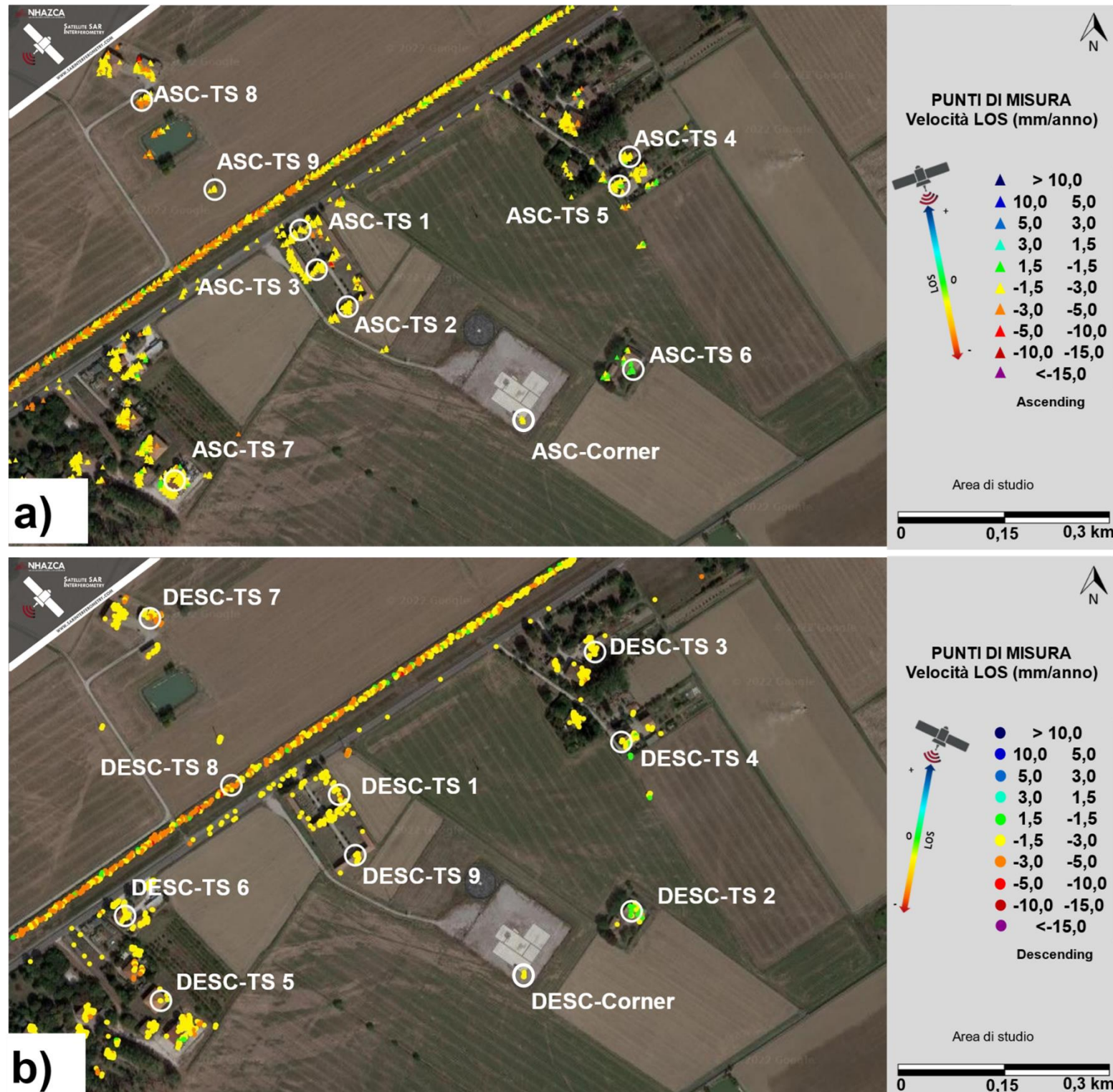


Figura 11: Pozzo di produzione "Podere Maiar 1dir": In a) mappa di velocità dei punti di misura in geometria ascendente, in b) mappa dei punti di misura in geometria discendente. In bianco sono evidenziati i punti di misura di cui si riportano le serie temporali di spostamento in Figura 12 e Figura 13.

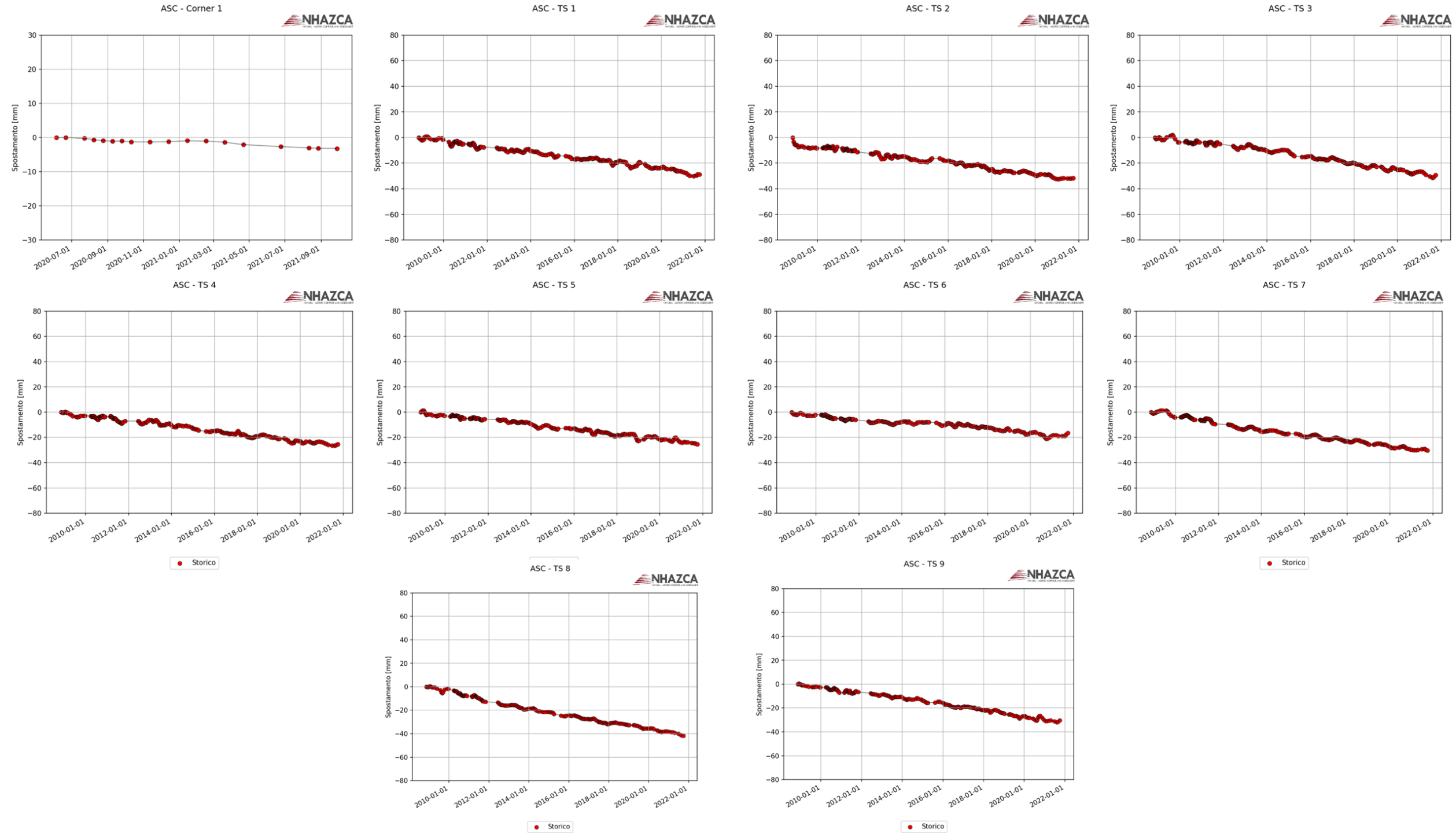


Figura 12: Serie temporali di spostamento di alcuni punti di misura ottenuti da analisi A-DInSAR (stack ascendente), le cui ubicazioni sono riportate in Figura 11.

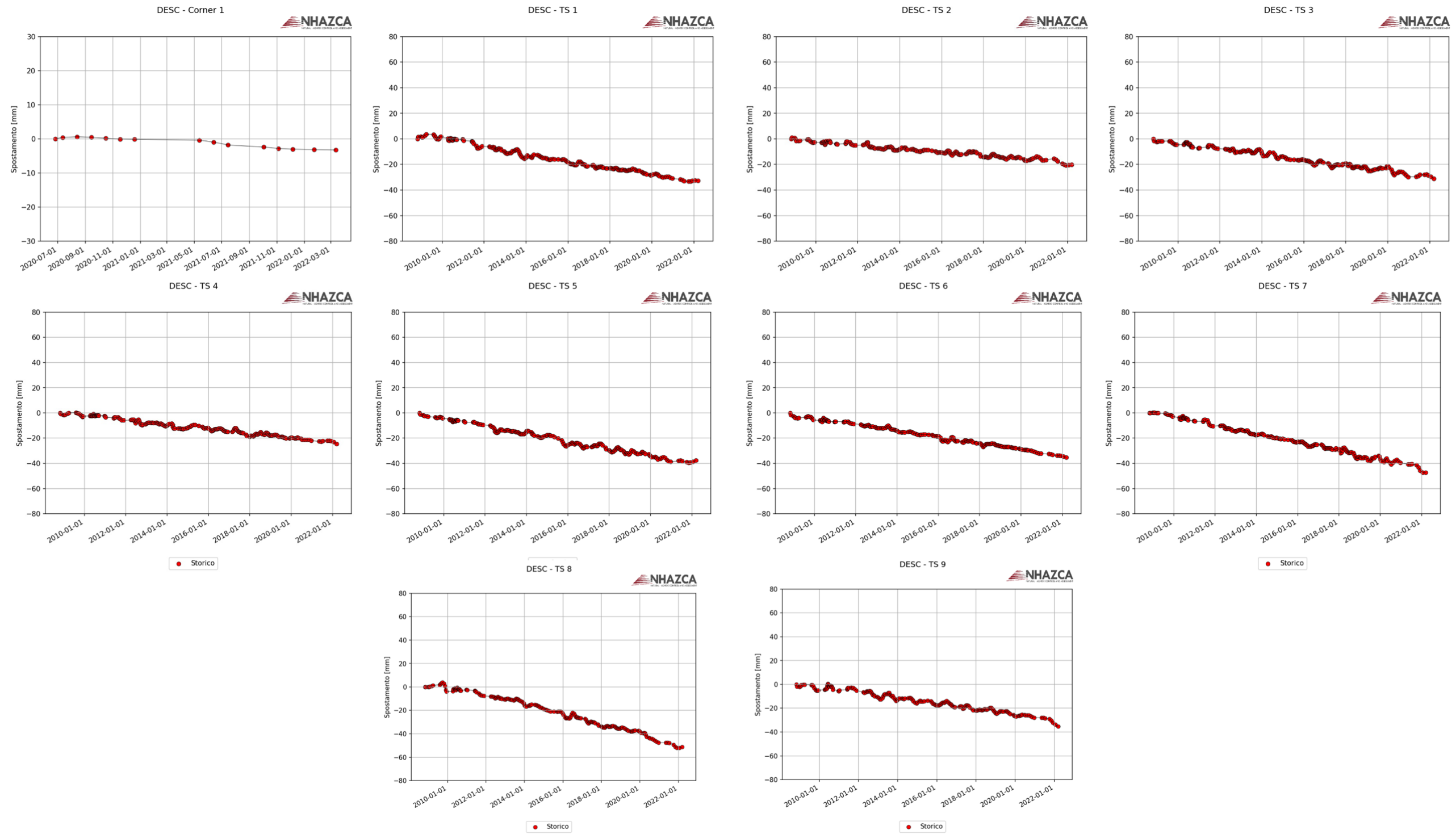


Figura 13: Serie temporali di spostamento di alcuni punti di misura ottenuti da analisi A-DInSAR (stack ascendente), le cui ubicazioni sono riportate in Figura 11.

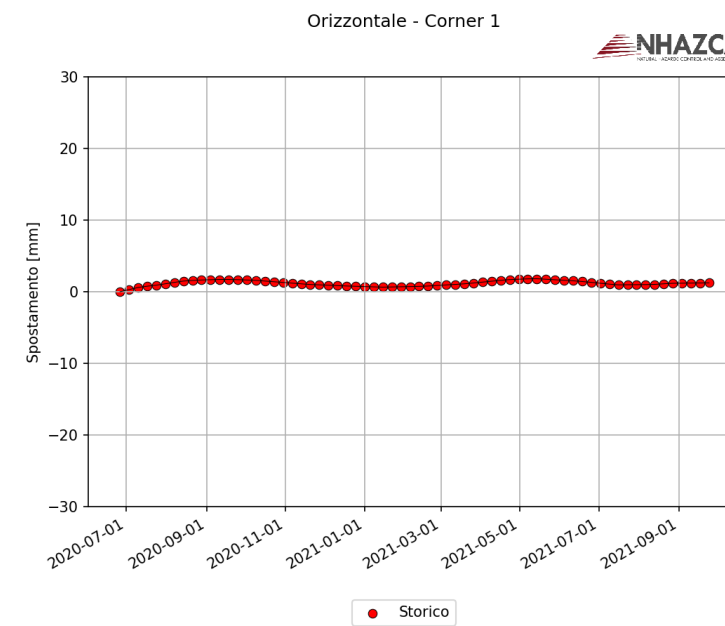
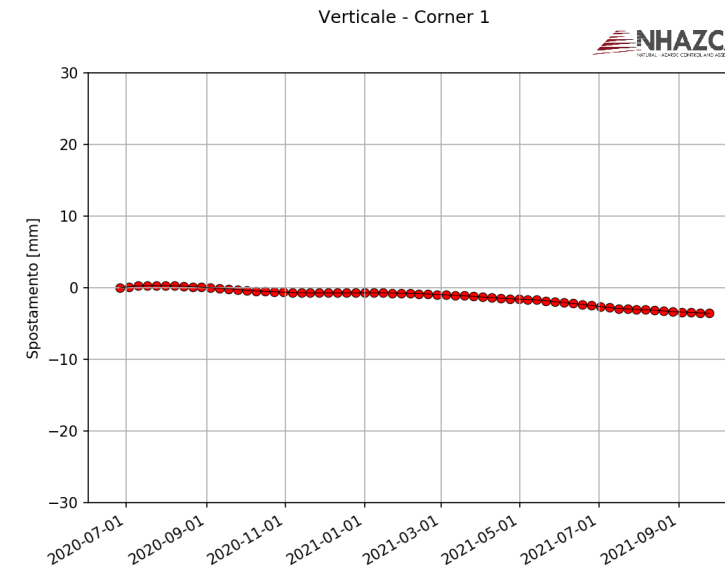
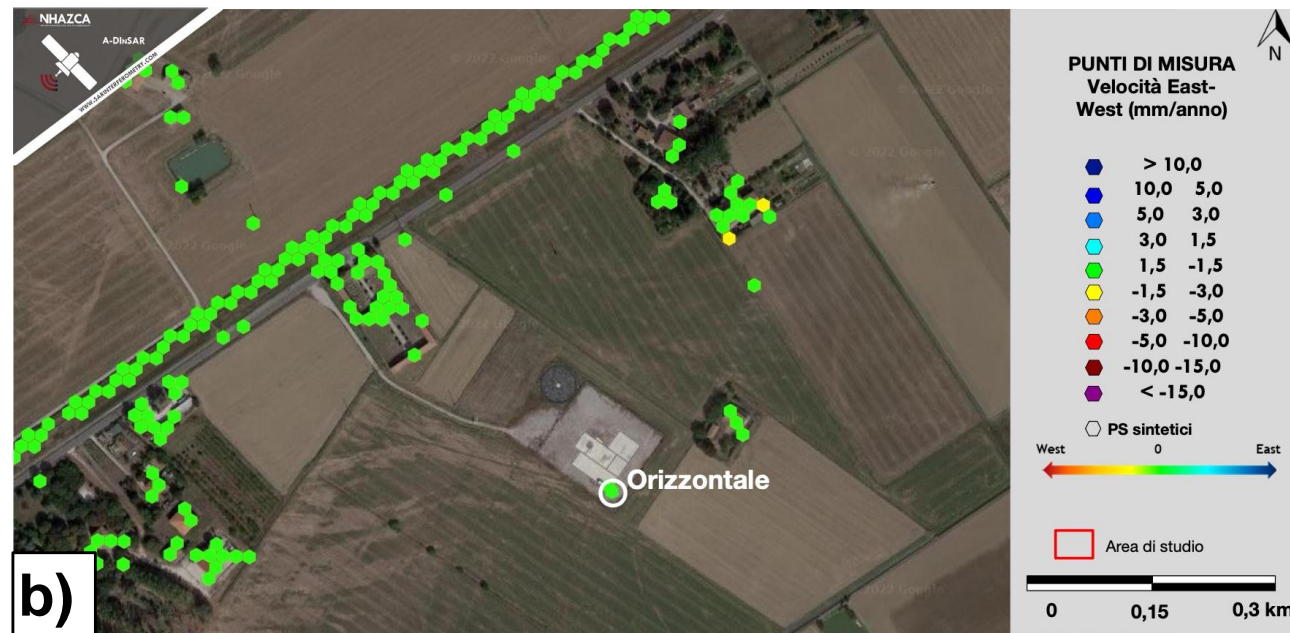
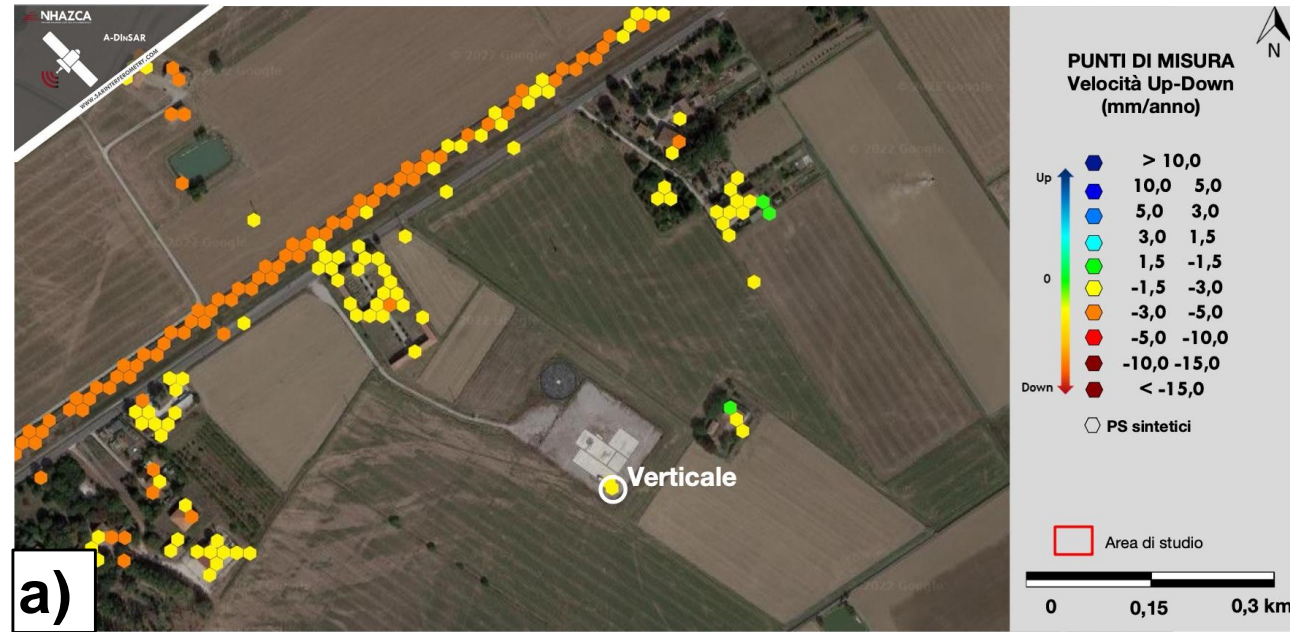


Figura 14: Pozzo di produzione "Podere Maiar 1dir": in a) velocità dei punti di misura sintetici (PMS) lungo la direzione verticale (Up-Down) in b) la componente orizzontale (Est-Ovest). A destra si riportano le serie temporali di spostamento delle componenti verticale e orizzontale del corner reflector installato in data 05-06/06/2020 riportati in c).

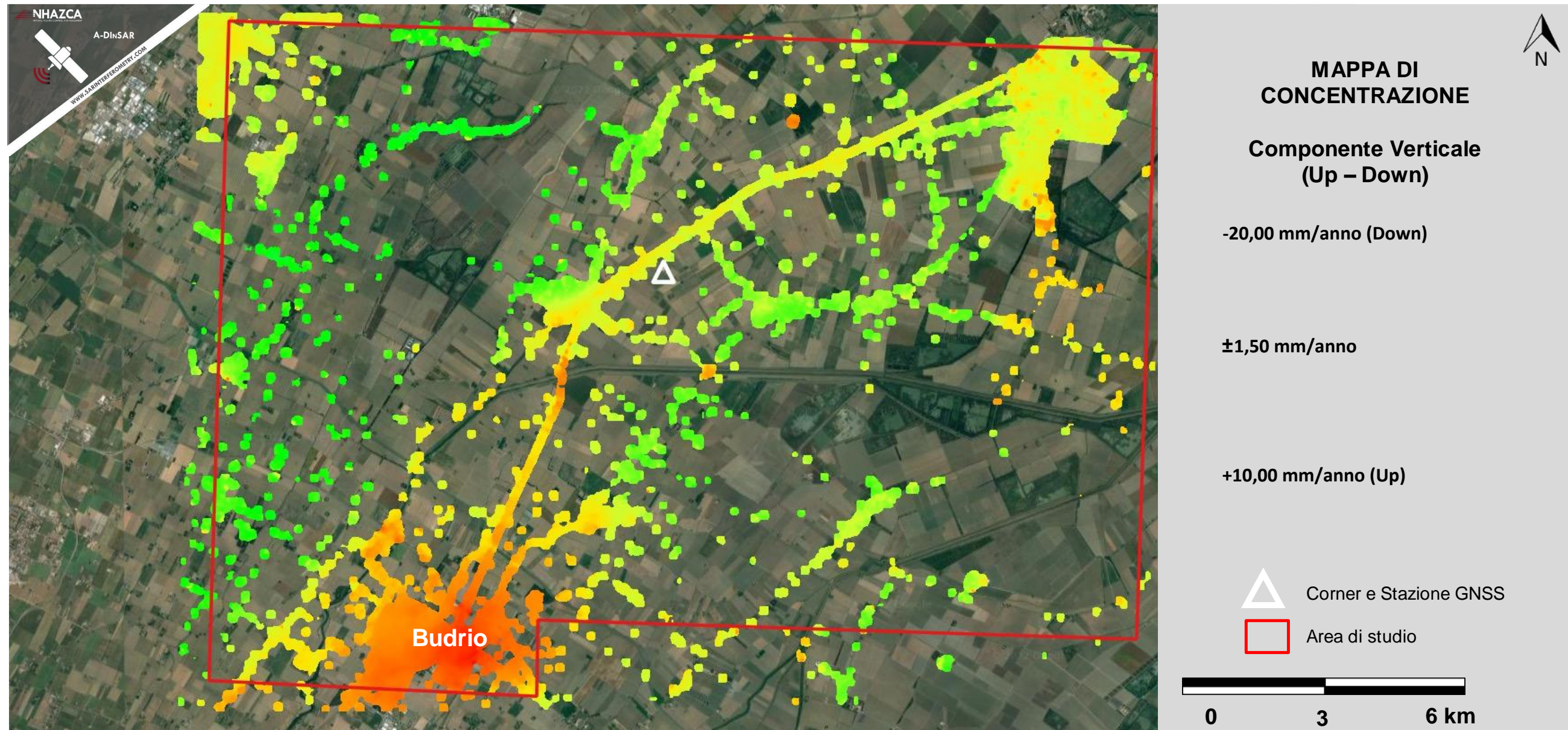


Figura 15 Mappa di concentrazione (Heat map) basate sui valori di velocità dei punti di misura ottenuti dalla scomposizione vettoriale (componente verticale).



Figura 16 Mappa di concentrazione (Heat map) basate sui valori di velocità dei punti di misura ottenuti dalla scomposizione vettoriale (componente orizzontale, direzione Est-Ovest).

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 di fondo nell'area di indagine per il periodo 2008-2022, con particolare riferimento ai settori potenzialmente interferenti con il pozzo di produzione "Podere Maira 1dir" del Giacimento Selva.

A causa della subsidenza regionale di fondo caratteristica dell'area, le analisi A-DInSAR sono state eseguite individuando i *reference points* consultando i dati relativi al Rilievo della subsidenza nella Pianura Emiliano-Romagnola (Arpae, 2018 Figura 6).

Grazie a tale approccio, le analisi A-DInSAR eseguite hanno consentito di ottenere un'ottima distribuzione spaziale dei PM nell'area di studio, sia in geometria ascendente che discendente, così da consentire un'osservazione ridondante e quindi più robusta degli eventuali processi deformativi che la caratterizzano.

Dall'analisi delle mappe dei PM (in Figura 7 e Figura 8) si evince che l'area di studio, e in particolare nel pozzo di produzione "Podere Maiar 1dir" **sia affetta da fenomeni deformativi di lungo periodo diffusi e di entità localmente molto variabile, da lieve a media**. Dall'osservazione delle mappe di deformazione in direzione verticale e orizzontale, si osserva una prevalente componente deformativa in tutta l'area di studio in direzione verticale, in abbassamento, mentre risultano assenti deformazioni rilevanti nella direzione orizzontale.

In merito al settore interferente con la piazzola del pozzo di produzione "Podere Maiar 1dir", le analisi A-DInSAR hanno restituito spostamenti di lieve intensità in allontanamento lungo la LOS compresi tra i -1,50 e -3,00 mm/anno per entrambe le geometrie orbitali (Figura 11). In tale settore, nel mese di giugno 2020 sono stati installati, n. 1 stazione GNSS e un n. 1 corner reflector satellitare (NZ1859-U_090721, già trasmessa alla Committenza) con l'obiettivo di ottenere un punto di misura di elevata qualità, aumentare il grado informativo, e per una più esaustiva investigazione della piazzola di estrazione, dove sono stati misurati spostamenti ricadenti nell'intervallo di stabilità per la componente orizzontale e spostamenti compresi tra i -1,50 e -3,00 mm/anno per la componente verticale. In questo contesto, le serie temporali del *corner reflector* installato della componente verticale e orizzontale mostrano rispettivamente uno spostamento cumulato di circa -3,00 mm in abbassamento e un trend caratterizzato da lievi oscillazioni stagionali

(Figura 14).

In conclusione, le attività di **analisi storica** basate su tecniche A-DInSAR hanno potuto quantificare i valori di deformazione del terreno in **condizioni non perturbate e antecedenti all'inizio delle attività estrattive** dell'area comprendente il "Giacimento Selva". In particolare, l'area del pozzo di produzione "Podere Maiar 1dir" è caratterizzata da tassi di subsidenza lievi con valori di circa -3,00 mm/anno come identificato dalla scomposizione vettoriale dei PM ricadenti sul corner reflector.

Pertanto, stanti i risultati del presente elaborato e con l'ipotesi di un **avvio delle attività di coltivazione del giacimento** nei prossimi mesi, si suggerisce di eseguire un **monitoraggio di controllo dei processi riconosciuti** e verificare l'insorgenza di possibili nuovi fenomeni deformativi in futuro, per cui si consiglia l'esecuzione di un servizio di monitoraggio con cadenza quadrimestrale, semestrale o annuale delle analisi A-DInSAR con i dati COSMO-SkyMed che si renderanno disponibili nei prossimi mesi/anni.

BIBLIOGRAFIA

1. Arpae (2018). Rilievo della subsidenza nella Pianura Emiliano Romagnola
2. Hanssen, Ramon F. (2001), "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis", Kluwer Academic.
3. Kampes, B.M. (2006) Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique. Remote Sensing and Digital Image Processing; Springer: Dordrecht, The Netherlands.
4. 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.
5. 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.
6. 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>
7. Zaro G. (2019). Istanza di Concessione di Coltivazione denominata "Selva Malvezzi" derivante dal Permesso di Ricerca PODERE GALLINA. Aggiornamento del Piano di Monitoraggio. Redatto da "Studio Tecnico Associato di Geologia" per PoValley Operations.

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 “*Radar* 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.

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 17.

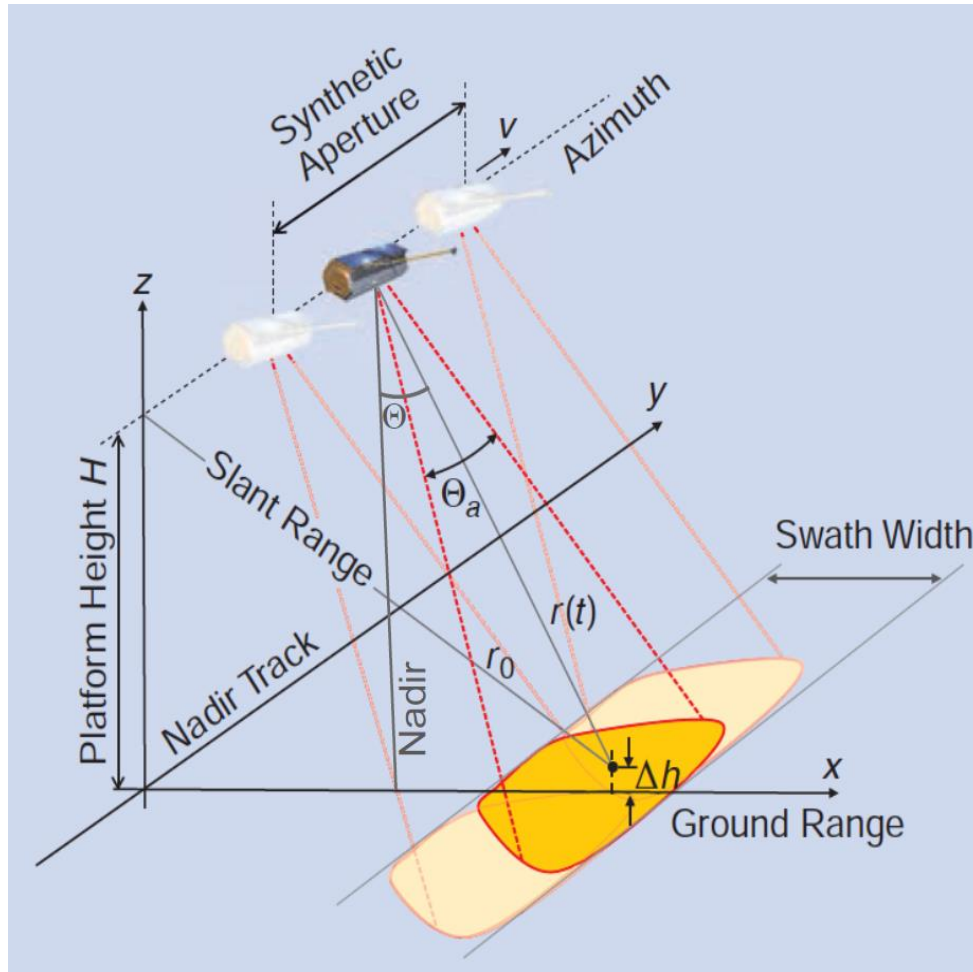


Figura 17: geometria di acquisizione SAR (Moreira et al. 2013, modificato).

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 18). 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 19).

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.

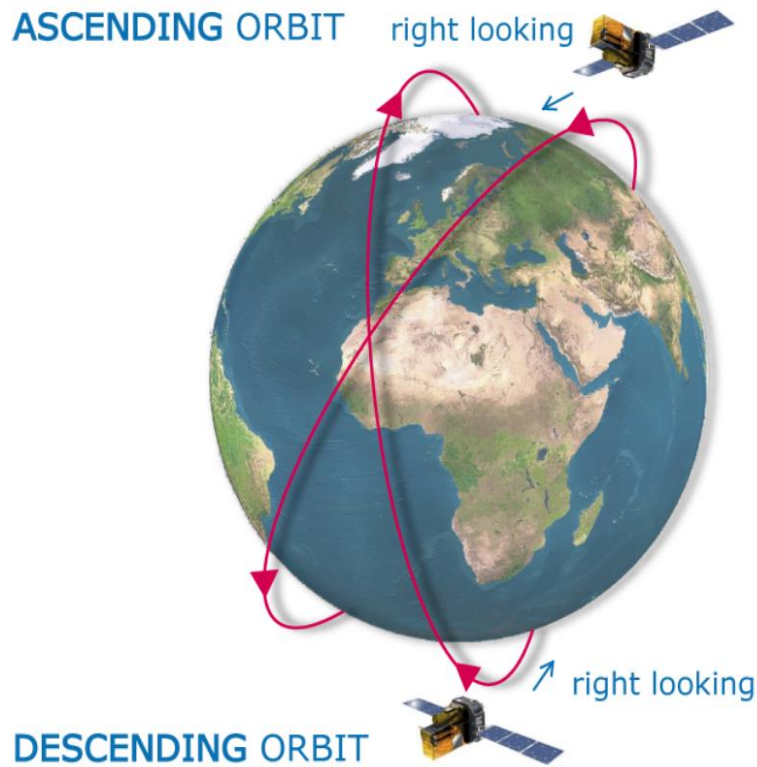


Figura 18: geometrie di acquisizione delle immagini SAR.

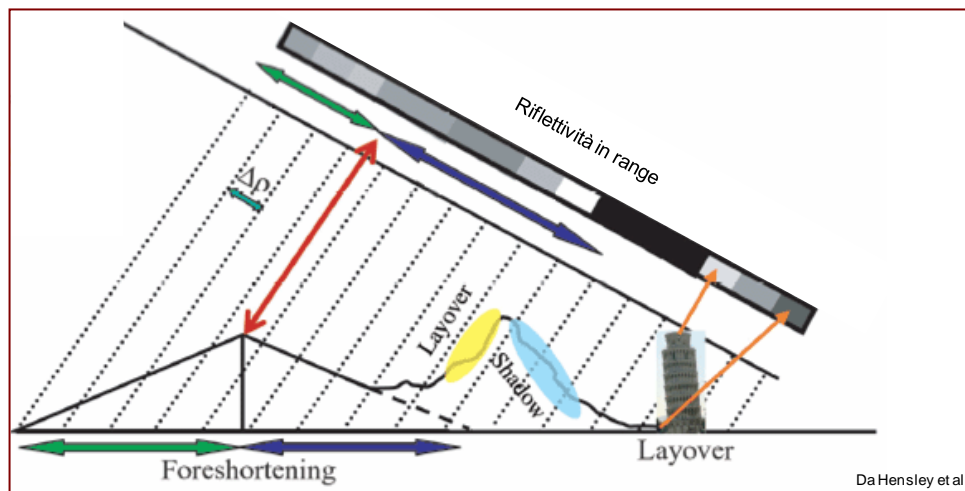


Figura 19: principali distorsioni geometriche.

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 20) 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.

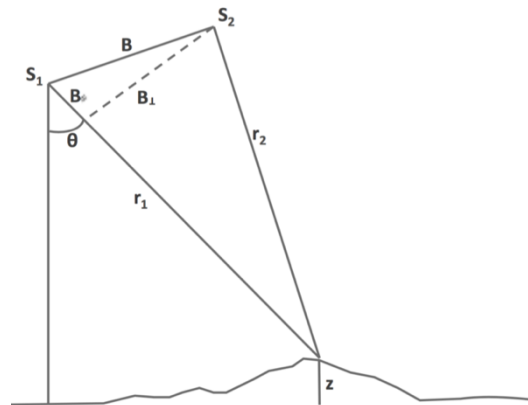


Figura 20: baseline geometrica. Geometria di acquisizione di due immagini SAR. S1 e S2 rappresentano la posizione dei satelliti in tempi diversi; θ è l'angolo nadir-off; r_1 e r_2 sono la distanza satellite-bersaglio per le due acquisizioni; B rappresenta la baseline geometrica (esagerato per chiarezza) 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_s 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 **congiungente 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.*

È 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.*