Copia analogica DPC-DPC_GDPCFRC_DeNiSCl26A0853D6705253 12/2026 1/2026

PROTEZIONE CIVILE
CENTRO DI COMPETENZA
Università degli Studi di Firenze

istituto per il rilevamento elettromagnetico dell'ambiente

cima RESEARCH FOUNDATION

Le frane di Niscemi del gennaio 2026

Rapporto di aggiornamento

Supporto tecnico-scientifico agli interventi di prevenzione strutturale e di riduzione del rischio idrogeologico nel territorio di Niscemi



Contratto tra: Commissario straordinario per l'area di Niscemi
e Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze

Firenze, 13 novembre 2026

Responsabili del progetto

Prof. Nicola CASAGLI - nicola.casagli@unifi.it
Presidente del Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze (CPC-UNIFI)

Prof. Luca FERRARIS - luca.ferraris@cimafoundation.org
Presidente della Fondazione CIMA

Dott. Claudio DE LUCA - deluca.c@irea.cnr.it
CNR Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA)

Gruppo di lavoro CPC-UNIFI

Silvia BIANCHINI, Giovanni GIGLI, Veronica PAZZI, Federico RASPINI, Francesco BECATTINI, Tommaso BENI, Tommaso CARLÀ, Pierluigi CONFUORTO, Matteo DEL SOLDATO, Gabriele FIBBI, Teresa GRACCHI, Agnese INNOCENTI, Camilla MEDICI, Olga NARDINI, Massimiliano NOCENTINI, Teresa NOLESINI, Aldo PIOMBINO, Francesco POGGI

Gruppo di lavoro Fondazione CIMA

Lorenzo ALFIERI, Lorenzo CAMPO, Simone GABELLANI, Andrea LIBERTINO, Umberto MORRA DI CELLA, Flavio PIGNONE, Roberto TIRASSO

Gruppo di lavoro CNR IREA

Manuela BONANO, Francesco CASU, Riccardo LANARI, Michele MANUNTA, Giovanni ONORATO, Yenni ROA, Pasquale STRIANO, Ivana ZINNO

Con la collaborazione dell'OGS

Antonio BRATUS, Massimo GIORGI, Stefano MAFFIONE, Matthia Ugo POTLECA, Michele POTLECA, Stefano PICOTTI, Oziel SOUZA DE ARAUJO

TAVOLA DEI CONTENUTI

1 INTRODUZIONE 4

2 INQUADRAMENTO DELL'AREA IN ESAME 5

3 ANALISI INTERFEROMETRICA DEI DATI RADAR SATELLITARI 7

4 ANALISI DEI DATI GNSS 10

5 APPROFONDIMENTO DELLA VALUTAZIONE DEL RISCHIO RESIDUO NEI SETTORI CRITICI DEL CENTRO ABITATO 12

5.1 VIA GORIZIA - SP10 13

5.2 SAN GIUSEPPE - VIA USTICA 14

5.3 TRATTO SUD SP10 15

5.4 PARCHEGGIO DEL CIMITERO 16

6 ANALISI DI RILIEVI TOPOGRAFICI 19

7 ANALISI DATI GEOFISICI 22

7.1 CARICABILITÀ ELETTRICA DEL TERRENO IP (*INDUCED POLARIZATION*) 23

7.2 RECUPERO DEL POTENZIALE SPONTANEO (SP, *SELF-POTENTIAL*) DA TECNICA DI ACQUISIZIONE NON CONVENZIONALE 28

7.3 ANALISI INTEGRATA DEI DATI GEOFISICI (ERT, IP, SP E SISMICI) 36

8 REDAZIONE DEI DOCUMENTI DI FATTIBILITÀ DELLE ALTERNATIVE PROGETTUALI 38

8.1 AMBITO TORRENTE BENEFIZIO (BE) 39

8.2 AMBITO FRANA SUD (FS) 40

8.3 AMBITO FRANA CENTRALE (FC) 40

8.4 AMBITO FRANA NORD (FN) 41

8.5 SINTESI DEI QUADRI ECONOMICI 41

9 CONCLUSIONI 43

BIBLIOGRAFIA 45

1 Introduzione

Il presente documento costituisce un rapporto di aggiornamento sull'evoluzione del fenomeno franoso di Niscemi (CL). Esso copre in particolare il periodo successivo al precedente rapporto del 14 ottobre 2026.

Il fenomeno franoso si è attivato in due fasi principali, il 15-16 e il 25-26 gennaio 2026, coinvolgendo infrastrutture viarie e aree del centro abitato. I rapporti tecnici precedenti, pubblicati tra il 26 febbraio e il 14 ottobre 2026 (Casagli *et al.*, 2026a-g), hanno ricostruito l'evoluzione del dissesto, definito un modello interpretativo del meccanismo di movimento e documentato gli esiti del monitoraggio.

L'attività è svolta dal Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze (CPC-UNIFI). Il Centro è stato attivato nell'emergenza dal Dipartimento della Protezione Civile nazionale (DPC), d'intesa con quello regionale (DRPC). Dal 22 luglio 2026 opera nell'ambito di un contratto di supporto tecnico-scientifico agli interventi di prevenzione strutturale e di riduzione del rischio idrogeologico, stipulato con il Commissario straordinario per l'area di Niscemi (D.L. 27 febbraio 2026, n. 25). Accordi analoghi legano al Commissario il CNR-IREA, per l'elaborazione dei dati radar satellitari, e la Fondazione CIMA, per i rilievi topografici e le indagini idrologiche e idrauliche.

Il rapporto presenta i dati di monitoraggio radar satellitare interferometrico elaborati dal CPC-UNIFI e dal CNR-IREA, acquisiti fino al 24 ottobre 2026. Prosegue così le attività avviate durante le fasi emergenziali e di prima caratterizzazione. A questi dati si affiancano l'analisi dei rilievi topografici da drone effettuati dalla Fondazione CIMA e le misure della rete GNSS installata e gestita dall'INGV, aggiornate al 5 novembre 2026. Completano il quadro conoscitivo le indagini geofisiche dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, finalizzate alla caratterizzazione stratigrafica e idrogeologica del sottosuolo.

L'integrazione di queste fonti restituisce un quadro deformativo continuo e multitemporale dell'area in dissesto. Su questa base, il rapporto approfondisce i settori del centro abitato e dei versanti circostanti che presentano movimenti significativi e richiedono quindi particolare attenzione.

In continuità con il precedente rapporto (Casagli *et al.*, 2026g), l'analisi di dettaglio attraverso dati radar satellitari riguarda i tre settori già individuati nella porzione sud-orientale dell'abitato: via Gorizia - SP10, San Giuseppe - via Ustica e il tratto più meridionale della SP10. A questi si aggiunge la verifica di una segnalazione, pervenuta dalla Regione Siciliana in data 7 novembre 2026, relativa all'area di parcheggio a nord dell'abitato.

Il rapporto riporta altresì la sintesi delle attività di supporto tecnico-scientifico fornite dal CPC-UNIFI alle società INGEO s.r.l. e Rocksoil S.p.A. per la redazione dei documenti di fattibilità delle alternative progettuali (DOCFAP) nell'ambito del programma degli interventi strutturali.

Il rapporto si inserisce nell'ambito dell'approccio di gestione adattiva del rischio residuo, già adottato fin dalle prime fasi emergenziali (Casagli *et al.*, 2026a), fondato sul progressivo affinamento delle conoscenze disponibili e sulla conseguente modulazione delle misure di salvaguardia in funzione dell'evoluzione del dissesto.

Con riferimento al contratto del 22 luglio 2026 fra il CPC-UNIFI e il Commissario straordinario, il presente rapporto comprende attività relative ai seguenti pacchetti di lavoro:

- WP 1 Caratterizzazione geologica e geomorfologica;
- WP 2 Monitoraggio satellitare radar interferometrico;
- WP 3 Dati satellitari ottici e rilievi con drone;
- WP 4 Analisi dei dati geofisici;
- WP 6 Valutazione del rischio residuo nel centro abitato;
- WP 8 Scenari di rischio e gestione adattiva del rischio;
- WP 9 Supporto al programma degli interventi strutturali.

2 Inquadramento dell'area in esame

L'area di Niscemi è caratterizzata da una spiccata predisposizione ai fenomeni di instabilità gravitativa, connessa all'alternanza fra livelli sabbioso-arenacei permeabili e le sottostanti unità argilloso-limose a comportamento meccanico più debole, in un contesto morfostrutturale che ha già dato luogo, in passato, a movimenti franosi di rilevanti dimensioni, come quelli documentati nel 1790 e nel 1997.

In seguito agli eventi di gennaio 2026, è stata introdotta e rimodulata più volte, a seconda delle evidenze sul campo e dei dati di monitoraggio disponibili, una fascia di interdizione del centro abitato:

- 150 m dalla linea di scarpata nel centro abitato, stabiliti in via cautelativa nell'immediatezza dell'evento con Ordinanza sindacale n. 12 del 28 gennaio 2026;
- 100 m dalla medesima linea di scarpata definiti con l'Ordinanza sindacale n. 19 del 28 febbraio 2026 sulla base del Rapporto del 26 febbraio 2026 (Casagli *et al*., 2026a);
- revoca del provvedimento per cinque isolati del quartiere Sante Croci, proposta nel Rapporto del 5 giugno 2026 (Casagli *et al*., 2026d) e recepita con l'Ordinanza sindacale n. 32 del 19 giugno 2026.

L'ubicazione dell'area e la fascia di interdizione vigente sono riportate in Figura 1, la quale indica altresì i tre corpi di frana individuati:

- la Frana Nord, attivatasi nella prima fase del 15-16 gennaio 2026 con spostamenti di oltre 12 m diretti prevalentemente verso ovest, che ha determinato il collasso della SP12;
- la Frana Centrale, corpo principale coinvolto nell'evento del 25-26 gennaio con spostamenti di circa 50 m verso sud-ovest, bordata a sud-est dal Torrente Benefizio in forte incisione, che ha generato la scarpata a ridosso del margine urbano;
- la Frana Sud, coinvolta nel secondo evento e separata dalla precedente dal Torrente Benefizio, con spostamenti medi di circa 7 m verso ovest-sud-ovest, che ha causato la parziale distruzione della SP10.

Nella stessa figura è inoltre riportata l'area indicata nei precedenti rapporti come di "possibile espansione" della Frana Sud (Casagli *et al*., 2026a-g).

Nel periodo più recente sono emersi nuovi elementi geomorfologici a monte della scarpata principale della Frana Centrale, analizzati a partire dal Rapporto del 4 agosto 2026 (Casagli *et al*., 2026e) e nei successivi aggiornamenti (Casagli *et al*., 2026f-g).

In particolare, sono stati individuati una frattura in prossimità del plesso scolastico San Giuseppe e una retrogressione del coronamento della frana lungo la contigua via Ustica.

Ulteriori segnali deformativi interessano il settore tra via Gorizia e la SP10 e il tratto meridionale della SP10, in corrispondenza dell'area di possibile espansione della Frana Sud, caratterizzato da fessurazioni diffuse e da modeste deformazioni del piano stradale.

Tali settori sono oggetto di specifico approfondimento anche nel presente rapporto di monitoraggio.



Figura 1 - Inquadramento dell'area di studio, con i corpi di frana e la fascia di interdizione vigente (campitura rossa).

3 Analisi interferometrica dei dati radar satellitari

Il monitoraggio radar satellitare interferometrico ha l'obiettivo di fornire un quadro deformativo continuo e multitemporale dell'intero abitato di Niscemi e dei versanti circostanti, con particolare riferimento al centro abitato, alla fascia di interdizione e ai tre corpi di frana.

L'aggiornamento presentato in questo rapporto estende le serie interferometriche alle acquisizioni più recenti, così da verificare la persistenza o l'eventuale evoluzione dei segnali deformativi individuati nelle fasi precedenti.

A tal fine è stata effettuata l'analisi multitemporale, focalizzata sulla situazione successiva agli eventi di gennaio 2026, sulle acquisizioni della costellazione Sentinel-1 elaborate con l'algoritmo SBAS (Small BAseline Subset) (Berardino *et al*., 2002; Casu *et al.,* 2014; Manunta *et al.,* 2019; Lanari *et al.,* 2020; De Luca *et al.,* 2022). Il dettaglio delle immagini utilizzate è riportato in Tabella 1.

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Intervallo temporale
Sentinel-1	C	Ascendente	31/01/2026 - 23/10/2026
Sentinel-1	C	Discendente	07/02/2026 - 24/10/2026

Tabella 1 - Specifiche tecniche dei *dataset* utilizzati per l'analisi interferometrica post-evento di gennaio 2026.

L'analisi si è basata sull'esame delle mappe di spostamento differenziale dei punti di misura (*Measurement Points* - MP) nel periodo post-evento (Tabella 1).

Lo spostamento differenziale registrato nel periodo post-evento è stato rappresentato mediante una scala di colori graduata e centrata sullo zero; la finestra di stabilità è posta a ±0,5 cm, in funzione della precisione della tecnica e della deviazione standard del *dataset*.

È opportuno considerare che l'interpretazione dei dati interferometrici deve tenere conto della geometria di acquisizione, che ne determina la sensibilità alle diverse componenti di movimento. Nel caso specifico di Niscemi, dove i versanti instabili e i relativi spostamenti sono orientati prevalentemente verso ovest/sud-ovest, la geometria discendente risulta più sensibile ai segnali deformativi. Nella proiezione lungo la linea di vista del satellite (LOS: *line-of-sight*) della geometria discendente, infatti, le componenti di spostamento verticale e orizzontale verso ovest si sommano, poiché entrambe vengono lette come un allontanamento dal satellite; al contrario, lungo la LOS della geometria ascendente le medesime componenti tendono a compensarsi reciprocamente, dato che il movimento verticale indica un allontanamento mentre quello verso ovest si traduce in un avvicinamento al sensore, attenuando così il segnale complessivo rilevato.

Alla luce di tali considerazioni, emerge come il versante interessato dal fenomeno franoso, a valle e a ovest dell'abitato e in gran parte all'esterno della fascia di interdizione, mostri in entrambe le geometrie spostamenti dell'ordine di alcuni centimetri, in allontanamento dal sensore.

Diverso è invece il quadro del centro abitato e della fascia di interdizione. In geometria ascendente (Figura 2, zona nord; Figura 3, zona sud) l'area risulta nel complesso stabile, con la quasi totalità dei punti entro la finestra di stabilità (±0,5 cm) e solo pochi punti isolati oltre soglia. In geometria discendente (Figura 4, zona nord; Figura 5, zona sud), più sensibile alle componenti di movimento del versante, si individuano invece aree con spostamenti oltre soglia anche all'interno della fascia di interdizione, in particolare nel settore della Frana Centrale compreso fra il Belvedere e il Torrente Benefizio, nonché alcuni punti a monte della fascia.

I settori più significativi (via Gorizia - SP10, San Giuseppe - via Ustica e tratto sud della SP10) sono analizzati in dettaglio, con le relative serie temporali, nella Sezione 5.

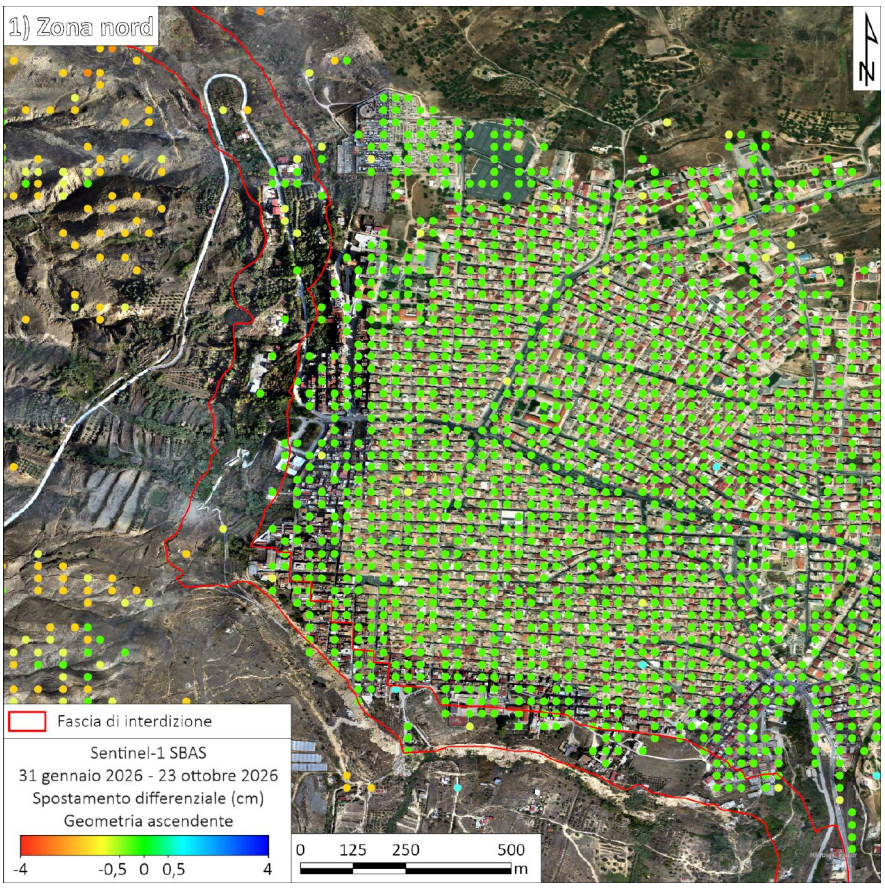

Figura 2 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria ascendente nell'intervallo temporale 31 gennaio - 23 ottobre 2026.

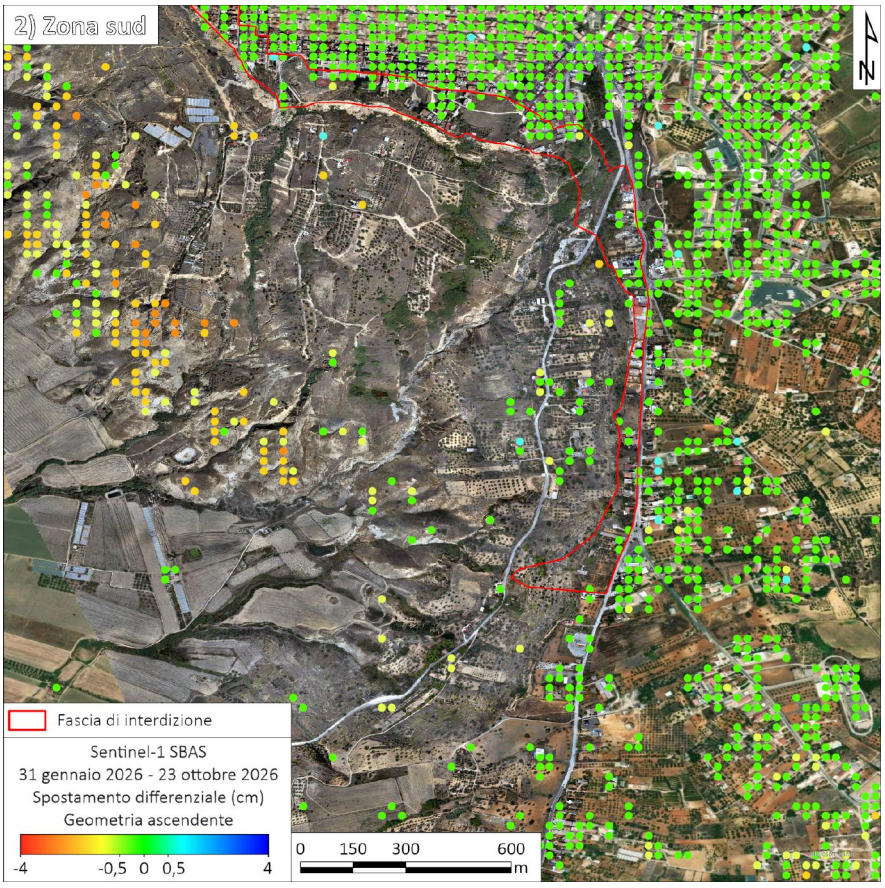

Figura 3 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria ascendente nell'intervallo temporale 31 gennaio - 23 ottobre 2026.

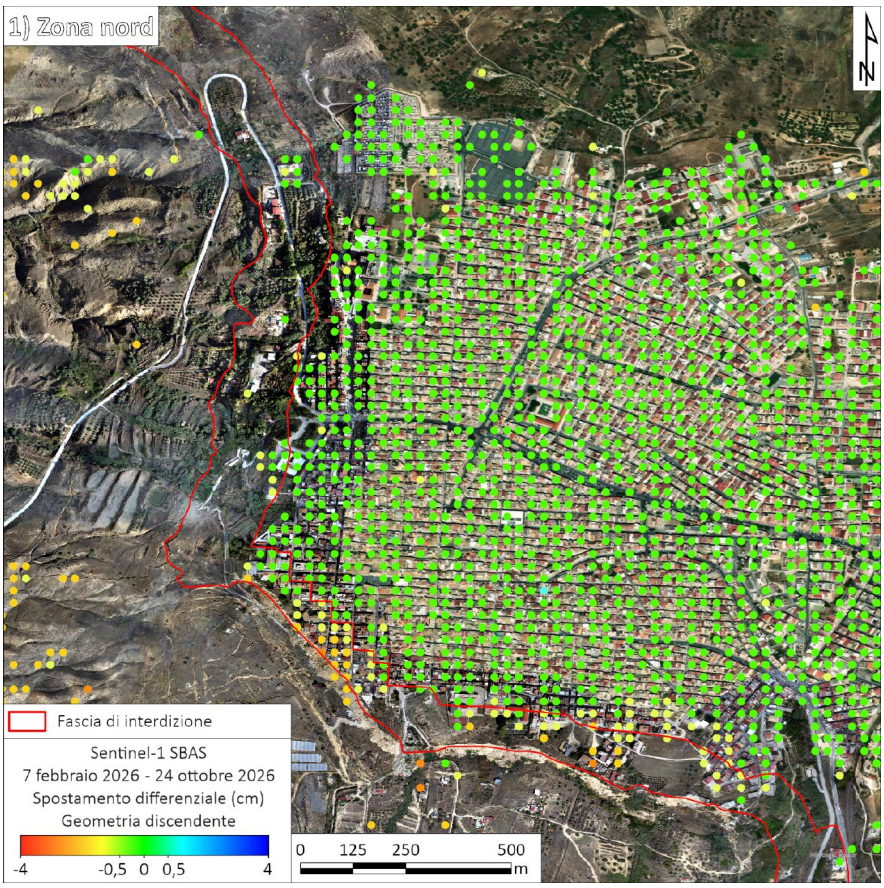

Figura 4 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria discendente nell'intervallo temporale 7 febbraio - 24 ottobre 2026.

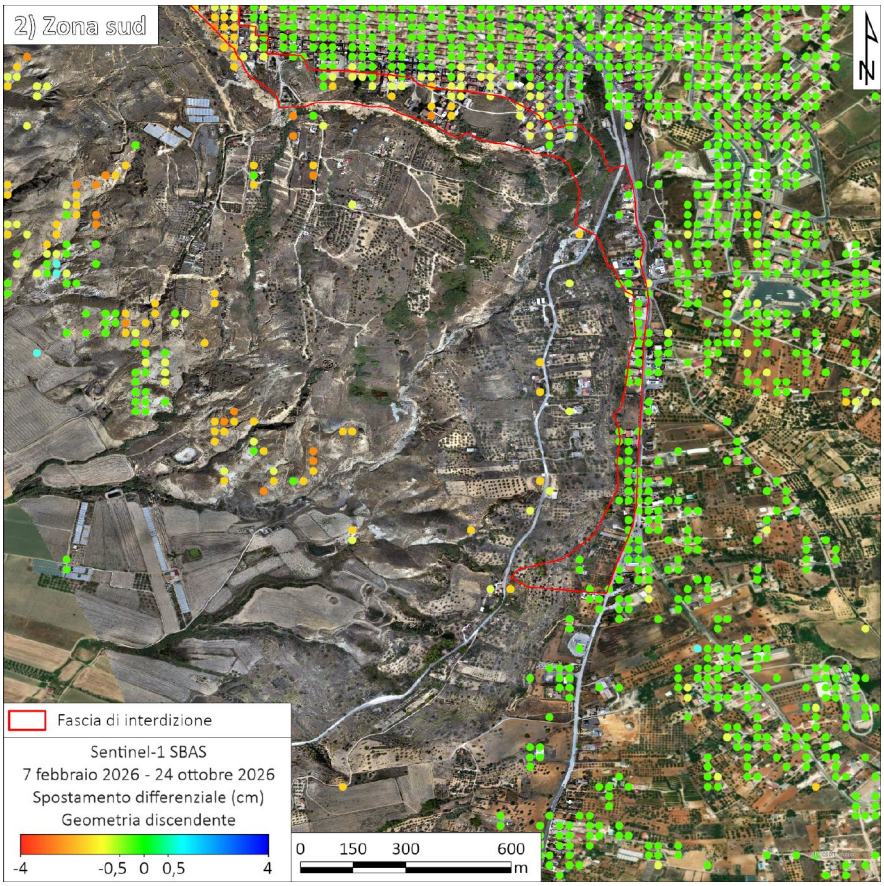

Figura 5 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria discendente nell'intervallo temporale 7 febbraio - 24 ottobre 2026.

4 Analisi dei dati GNSS

Il monitoraggio con interferometria radar satellitare è integrato dalla rete di sensori GNSS installata dall'INGV nell'area di Niscemi, la cui ubicazione, insieme ai vettori di spostamento orizzontale registrati nel periodo, è riportata in Figura 6. Le serie temporali delle tre componenti di spostamento di ciascuna stazione - est (*easting*), nord (*northing*) e verticale (*up*) - sono riportate in Figura 7.

Quanto evidenziato dal monitoraggio interferometrico satellitare trova riscontro nei dati della rete GNSS: la maggior parte delle stazioni non mostra spostamenti significativi, con le tre componenti che oscillano entro pochi millimetri attorno allo zero per l'intero periodo di osservazione. Si segnala che lungo la SP12 la stazione NP12 è stata affiancata a settembre 2026 dalla nuova stazione N212 e successivamente dismessa nel mese di ottobre; la serie temporale riportata in Figura 7 (NP12/N212) raccorda i dati delle due stazioni.

La sola stazione a evidenziare una deformazione significativa è la NSGP, ubicata immediatamente a monte della fessura di neoformazione antistante il plesso scolastico San Giuseppe, il cui vettore di spostamento si distingue nettamente da quello di tutte le altre stazioni (Figura 6). La stazione registra un movimento progressivo verso sud, fino a circa 7 cm, accompagnato da un abbassamento di quota di entità comparabile e da una componente verso est di circa 1,7 cm. La deformazione, già segnalata nel precedente rapporto, risulta tuttora in atto e in accelerazione: l'accentuazione del movimento osservata a partire da metà settembre prosegue con velocità crescenti nel corso di ottobre.

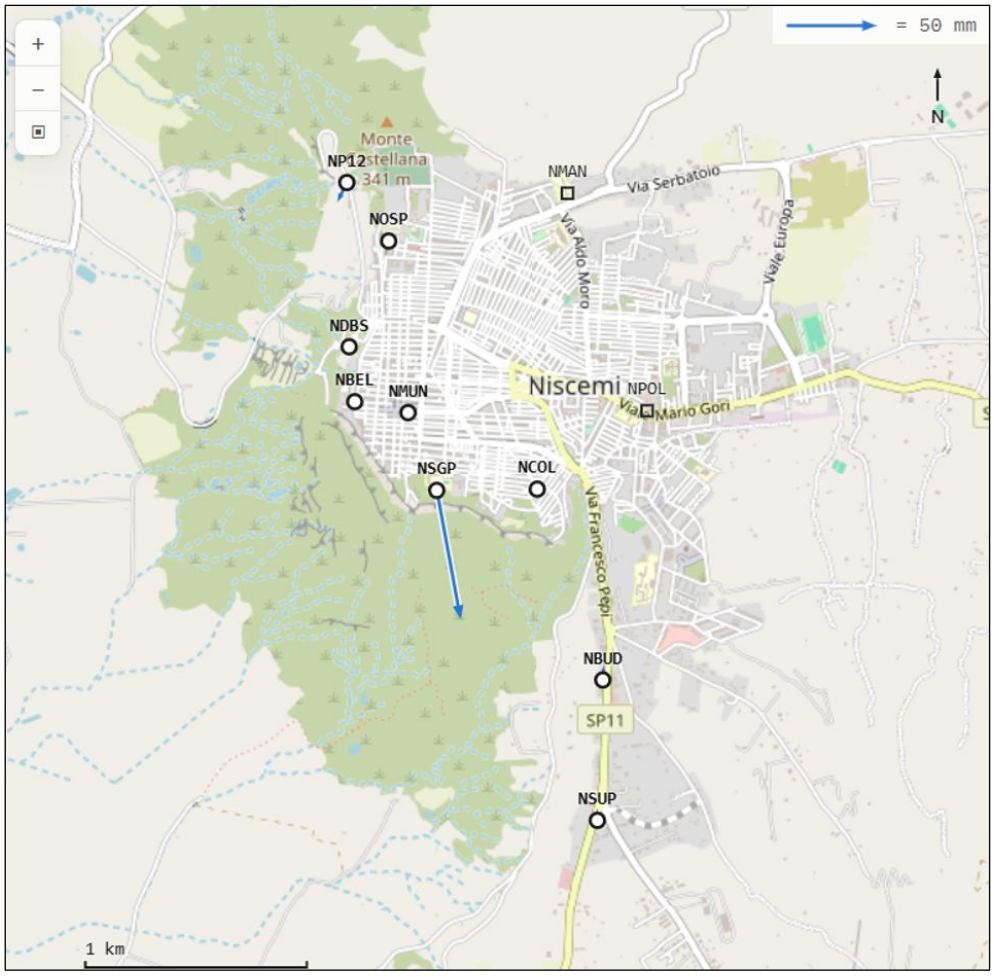

Figura 6 - Ubicazione delle stazioni della rete di monitoraggio GNSS installata dall'INGV nell'area di Niscemi, con i relativi vettori di spostamento aggiornati al 5 novembre 2026.

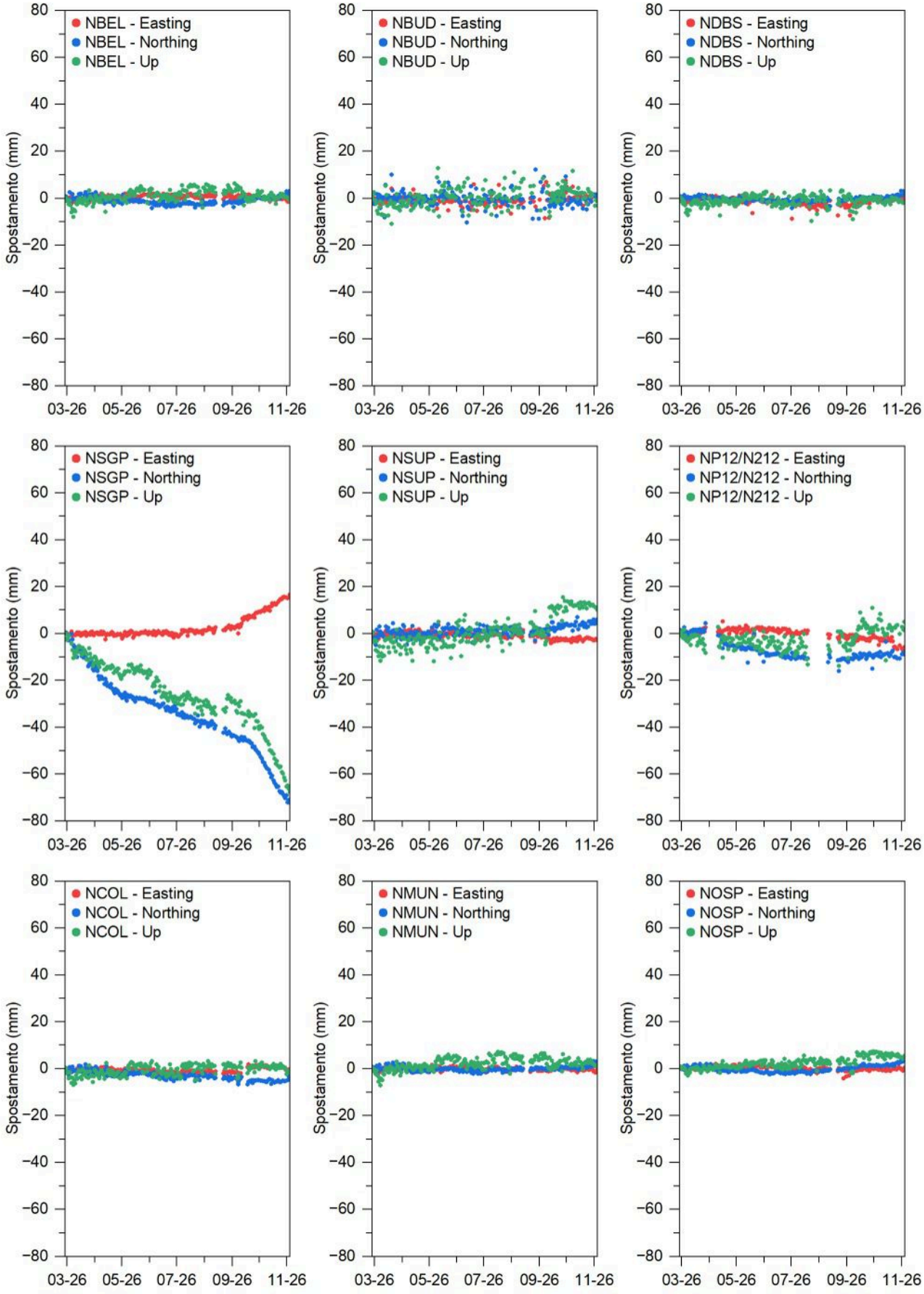

Figura 7 - Serie temporali delle componenti di spostamento delle stazioni di monitoraggio GNSS dell'INGV.

5 Approfondimento della valutazione del rischio residuo nei settori critici del centro abitato

Quanto delineato nelle Sezioni 3 e 4 non evidenzia, per gran parte del centro abitato, deformazioni significative rilevabili mediante le tecniche di monitoraggio impiegate. Nella porzione sud-orientale dell'abitato permangono invece segnali deformativi significativi nei tre settori analizzati nel rapporto del 14 ottobre 2026 (Casagli *et al*., 2026g), per i quali si fornisce di seguito una valutazione aggiornata del rischio residuo:

- il settore che comprende via Gorizia e la SP10, parzialmente esteso a monte della fascia di interdizione, nel quale gli spostamenti differenziali superano la finestra di stabilità;
- il settore compreso fra il plesso scolastico San Giuseppe e via Ustica, all'interno della fascia di interdizione lungo la scarpata principale della Frana Centrale;
- il tratto sud della SP10, in corrispondenza della Frana Sud e dell'area indicata come di sua possibile espansione.

L'ubicazione dei tre settori è riportata in Figura 8. Per ciascun settore sono riportate le mappe di spostamento differenziale e le serie temporali dei punti di interesse, relative al periodo successivo all'evento del 26 gennaio 2026.

Le serie temporali di spostamento iniziano nel 2021 e i valori sono cumulati a partire dalla prima acquisizione. I grafici mostrano solo il periodo successivo all'evento. Per questo il primo punto rappresentato non è pari a zero: corrisponde allo spostamento cumulato dal 2021 fino a quella data.

Mappe e serie temporali sono riportate solo per la geometria discendente. In geometria ascendente, infatti, nessun settore mostra spostamenti significativi e i punti di misura ricadono per lo più nella finestra di stabilità

In Figura 8 è inoltre riportata l'ubicazione dell'area di parcheggio, a nord dell'abitato e a est del cimitero, analizzata (Sezione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) a seguito di una segnalazione pervenuta dalla Regione Siciliana in data 7 novembre 2026.

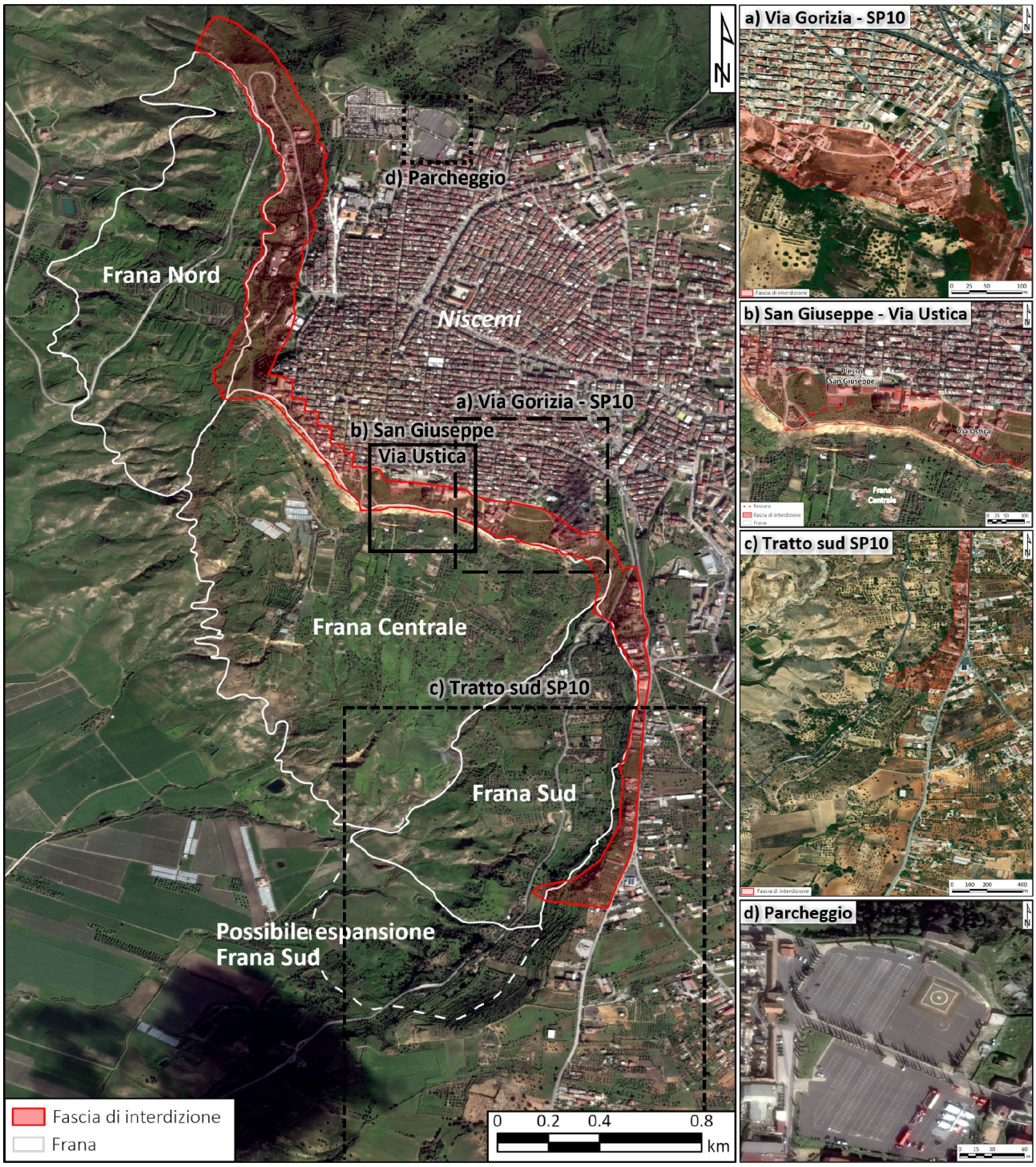

Figura 8 - Ubicazione dei tre settori oggetto di approfondimento: a) via Gorizia - SP10, b) San Giuseppe - via Ustica e c) Tratto sud SP10. È inoltre indicata d) l'area di parcheggio a est del cimitero, oggetto di segnalazione. La campitura rossa indica la fascia di interdizione vigente. Le linee rosse tratteggiate mostrano le principali fessurazioni sul terreno.

5.1 Via Gorizia - SP10

Il settore in esame è ubicato nella porzione meridionale dell'abitato, tra via Gorizia e la SP10, all'interno della fascia di interdizione e in parte a monte di questa (Figura 8a).

Il dato Sentinel-1 in geometria discendente (Figura 9) evidenzia alcuni punti con spostamenti differenziali che superano la finestra di stabilità, localizzati lungo il margine della fascia di interdizione e nelle aree esterne a essa. Le serie temporali, relative al periodo post-evento, mostrano una tendenza all'allontanamento dal sensore seguita da una progressiva stabilizzazione. Gli spostamenti maggiori, dell'ordine di 2 cm, si registrano

in prossimità del margine della fascia di interdizione, mentre nelle aree a monte di questa i valori si riducono a circa 1 cm.

Il dato in geometria discendente è coerente con un movimento di versante; tuttavia, va tenuto conto dei contributi riconducibili a disturbi atmosferici e a rumore residuo, che possono influenzarne la lettura, nonché della sostanziale stabilità riscontrata in geometria ascendente.

Ai fini della valutazione del rischio residuo, si raccomanda comunque di mantenere il settore sotto osservazione mediante il monitoraggio satellitare e ispezioni periodiche *in situ*, così da coglierne tempestivamente eventuali variazioni di tendenza.

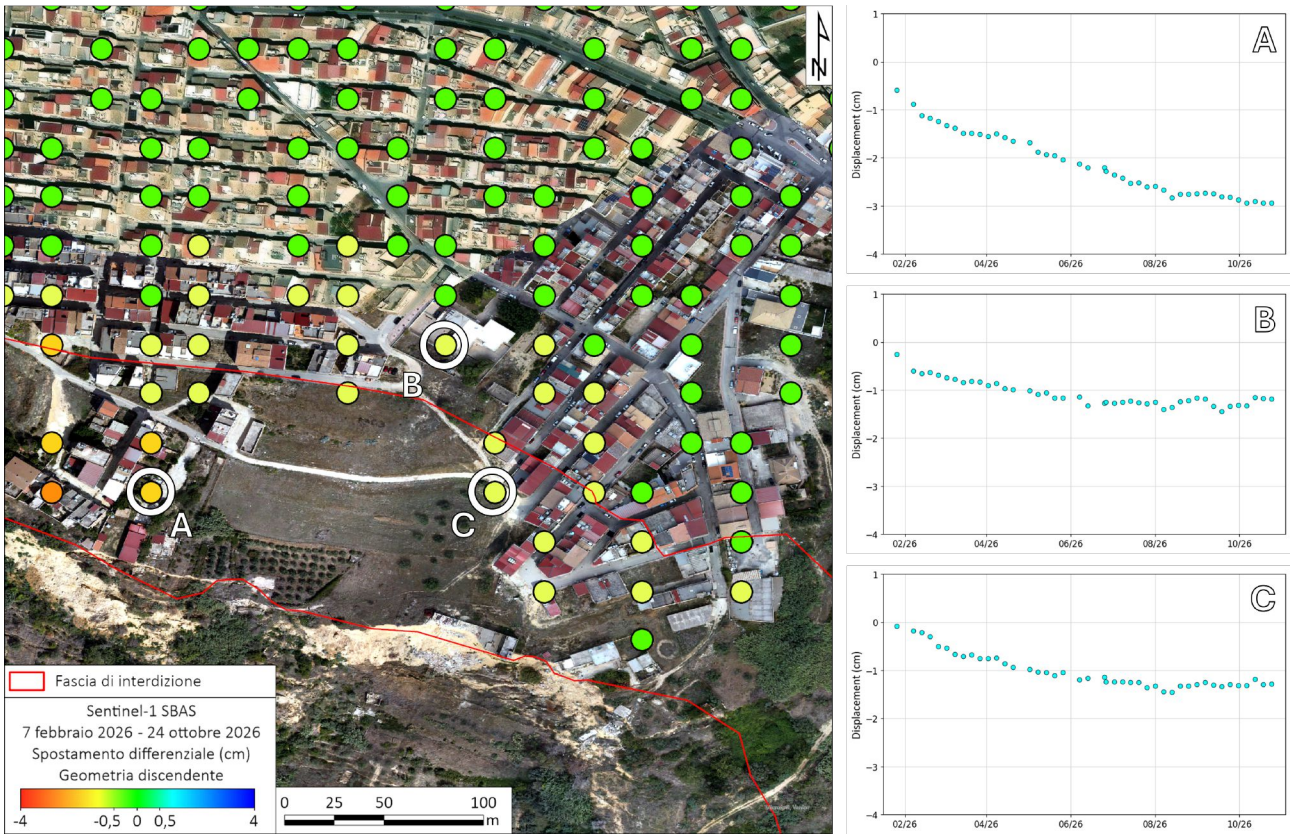

Figura 9 - Mappa degli spostamenti differenziali Sentinel-1 in geometria discendente (SBAS, 7 febbraio - 24 ottobre 2026), dettaglio del settore di via Gorizia - SP10. A destra, le serie temporali post-evento dei punti evidenziati in mappa. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

5.2 San Giuseppe - Via Ustica

Il settore compreso fra il plesso scolastico San Giuseppe e via Ustica, lungo la scarpata principale della Frana Centrale, già oggetto di analisi di dettaglio nei precedenti rapporti (Casagli *et al*., 2026f-g), è interessato dalla fessurazione principale antistante il plesso scolastico, in corrispondenza della quale è stato realizzato l'intervento di impermeabilizzazione mediante la posa di teloni, quale misura provvisoria di mitigazione (Casagli *et al*., 2026g). Il settore è stato riesaminato alla luce dei nuovi dati Sentinel-1.

Il dato Sentinel-1 in geometria discendente (Figura 10), più sensibile ai movimenti del versante in esame, evidenzia lungo la scarpata principale della Frana Centrale diversi punti con spostamenti differenziali che superano la finestra di stabilità. Le serie temporali, relative al periodo post-evento, mostrano una tendenza all'allontanamento dal sensore, con spostamenti dell'ordine di 2-2,5 cm lungo la scarpata principale. In prossimità del plesso scolastico il segnale risulta sostanzialmente stabile da giugno 2026, mentre nel settore di via Ustica l'allontanamento prosegue fino a settembre, con un rallentamento nelle ultime acquisizioni.

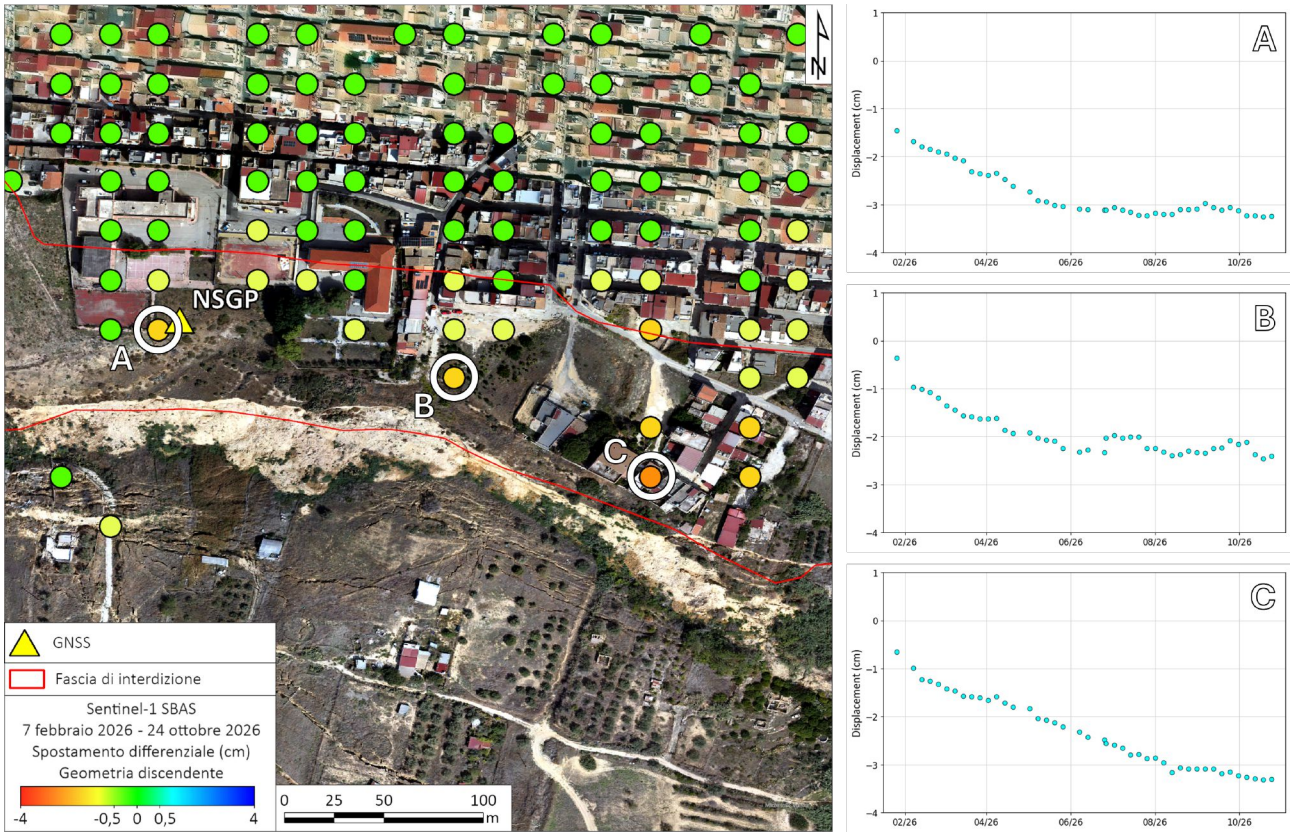

Figura 10 - Mappa degli spostamenti differenziali Sentinel-1 in geometria discendente (SBAS, 7 febbraio - 24 ottobre 2026), dettaglio dei settori del plesso scolastico San Giuseppe e di via Ustica. A destra, le serie temporali post-evento dei punti evidenziati in mappa. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

I dati della stazione GNSS NSGP (Sezione 4), ubicata sul ciglio della scarpata in prossimità del plesso scolastico, subito a monte della fessura di neoformazione, documentano un progressivo spostamento verso sud, un abbassamento di quota di entità comparabile e una componente verso est. A differenza del dato interferometrico, che tende alla stabilizzazione, il GNSS registra una netta accentuazione del movimento a partire dalla seconda metà di settembre 2026, a indicare una deformazione tuttora in atto e in fase di accelerazione.

La differenza è riconducibile principalmente alla distribuzione dei punti di misura interferometrici, localizzati prevalentemente sulle strutture poste a monte della fessura e quindi esterne al settore in maggiore movimento, oltre che alla diversa risoluzione spaziale e copertura temporale dei dati.

Ai fini della valutazione del rischio residuo, si raccomanda di mantenere il settore sotto costante osservazione mediante monitoraggio satellitare, GNSS e ispezioni periodiche *in situ*.

5.3 Tratto sud SP10

Il settore sud della SP10, in corrispondenza della Frana Sud e dell'area indicata come di sua "possibile espansione" (Casagli et al., 2026a-c), oggetto di analisi di dettaglio nel precedente rapporto (Casagli *et al*., 2026g), è stato analizzato con i nuovi dati Sentinel-1.

Trattandosi di un'area prevalentemente agricola e non urbanizzata, la densità e la qualità dei punti di misura sono inferiori rispetto al centro abitato. Il dato in geometria discendente (Figura 11) evidenzia diversi punti con spostamenti differenziali oltre la finestra di stabilità, prevalentemente situati all'interno del corpo di frana. Le serie temporali, relative al periodo post-evento, mostrano una tendenza all'allontanamento dal sensore, con spostamenti dell'ordine di 1-2 cm all'interno del corpo di frana. Il quadro sembra complessivamente orientato alla stabilizzazione, pur con oscillazioni riconducibili alla minore qualità del dato in area non urbanizzata.

Alla luce delle evidenze disponibili e delle incertezze connesse all'evoluzione del fenomeno, allo stato attuale si ritiene opportuno mantenere interdetta la cosiddetta "area di possibile espansione" della Frana Sud.

Nei prossimi aggiornamenti, sulla base dell'evoluzione desunta dai dati di monitoraggio, potrà essere proposta una revisione della perimetrazione della frana e della relativa fascia di interdizione a monte.

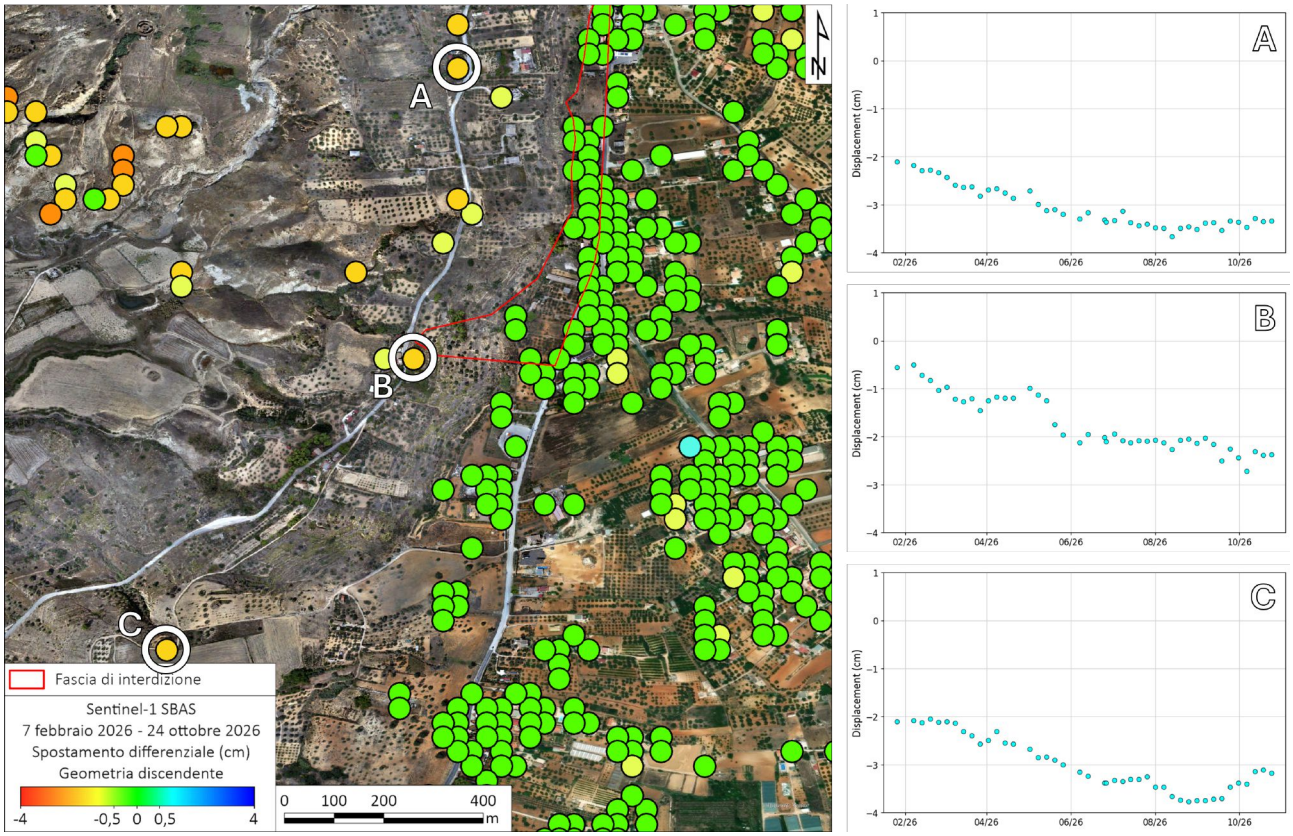

Figura 11 - Mappa degli spostamenti differenziali Sentinel-1 in geometria discendente (SBAS, 7 febbraio - 24 ottobre 2026), dettaglio del settore sud della SP10. A destra, le serie temporali post-evento dei punti evidenziati in mappa. Le linee rosse indicano la fascia di interdizione vigente.

5.4 Parcheggio del cimitero

In seguito alla segnalazione pervenuta dalla Regione Siciliana in data 7 novembre 2026, relativa alla presenza di fessurazioni nell'area di parcheggio del cimitero di Niscemi, utilizzata come piazzola per elicotteri, ubicata a nord dell'abitato (Figura 8d), è stata condotta una specifica verifica dell'area.

Le fessurazioni segnalate non appaiono di recente formazione: sono infatti chiaramente riconoscibili nel rilievo aerofotogrammetrico da drone eseguito dalla Fondazione CIMA nell'aprile 2026 (Casagli *et al*., 2026c) e, ancor prima, nelle immagini disponibili sullo strumento *Street View* di *Google Maps*, risalenti ad agosto 2021 (Figura 12). La loro geometria e distribuzione appaiono riconducibili a una discontinuità del manto stradale connessa a un pregresso intervento di ripristino della pavimentazione, piuttosto che a una deformazione gravitativa in atto.

L'area è stata inoltre analizzata mediante i dati Sentinel-1. Le mappe di spostamento differenziale e le relative serie temporali, esaminate sia sull'intero periodo di acquisizione sia limitatamente alla fase post-evento, non evidenziano spostamenti significativi in nessuna delle due geometrie, con la totalità dei punti di misura entro la finestra di stabilità (Figura 13, geometria ascendente; Figura 14, geometria discendente).

Si rileva unicamente, in geometria ascendente, un lieve segnale in allontanamento dal sensore in corrispondenza del punto A, potenzialmente compatibile con la cinematica del versante sottostante; tale tendenza è tuttavia riconoscibile già a partire dal 2022 e non mostra accelerazioni o variazioni di rilievo nel periodo successivo agli eventi di gennaio 2026, ai quali non risulta pertanto correlata.

I dati COSMO-SkyMed, anch'essi analizzati, non sono riportati in quanto non apportano informazioni aggiuntive rispetto a quanto rilevato da Sentinel-1.

Si osserva, al riguardo, che un eventuale movimento del versante sottostante sarebbe diretto prevalentemente verso nord-est e risulterebbe pertanto meglio rilevabile in geometria ascendente; va tuttavia considerato che la tecnica interferometrica è scarsamente sensibile alla componente di spostamento nord-sud, che non può quindi essere adeguatamente valutata.

Nel complesso, le evidenze disponibili non indicano una deformazione significativa dell'area: le fessurazioni segnalate non risultano riconducibili all'attività dei corpi di frana che interessano i versanti occidentali e meridionali del centro abitato.



Figura 12 - Area di parcheggio nei pressi del cimitero, così come osservabile dall'ortofoto acquisita dalla Fondazione CIMA ad aprile 2026 (a) e dalla ripresa *Street View* di Google Maps di agosto 2021 (b).

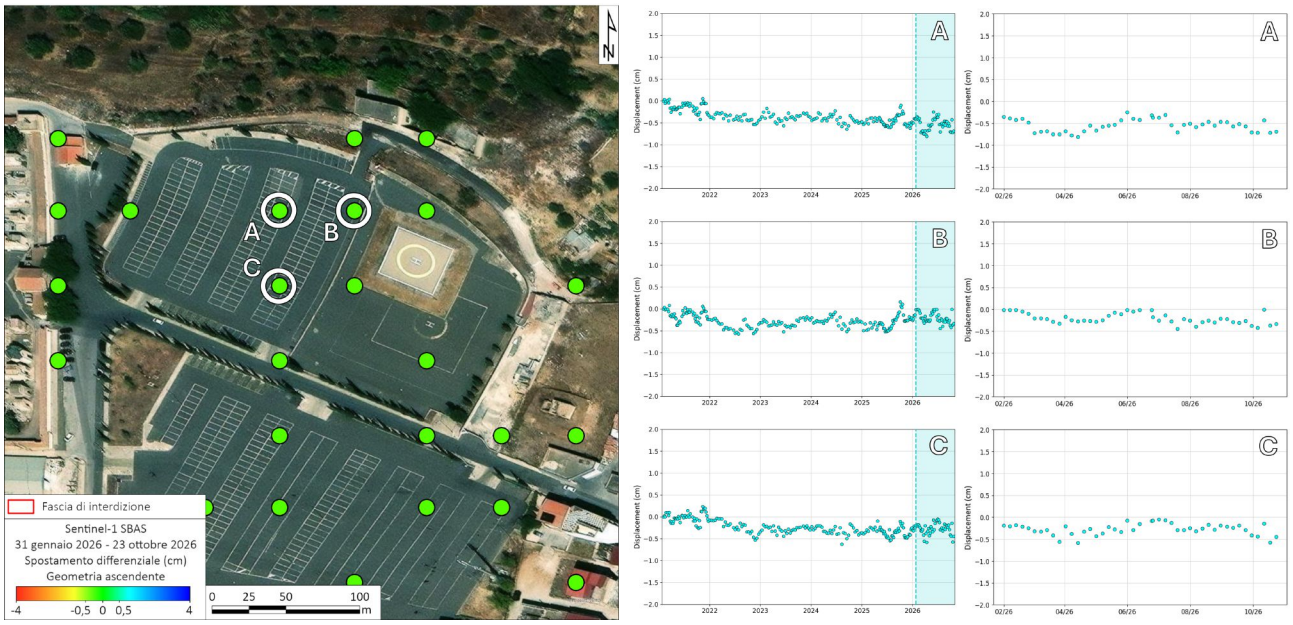

Figura 13 - Mappa degli spostamenti differenziali Sentinel-1 in geometria ascendente (SBAS, 31 gennaio - 23 ottobre 2026), dettaglio dell'area di parcheggio a est del cimitero. A destra, le serie temporali dei punti evidenziati in mappa, riportate sull'intero periodo di acquisizione (colonna di sinistra) e limitatamente alla fase post-evento (colonna di destra).

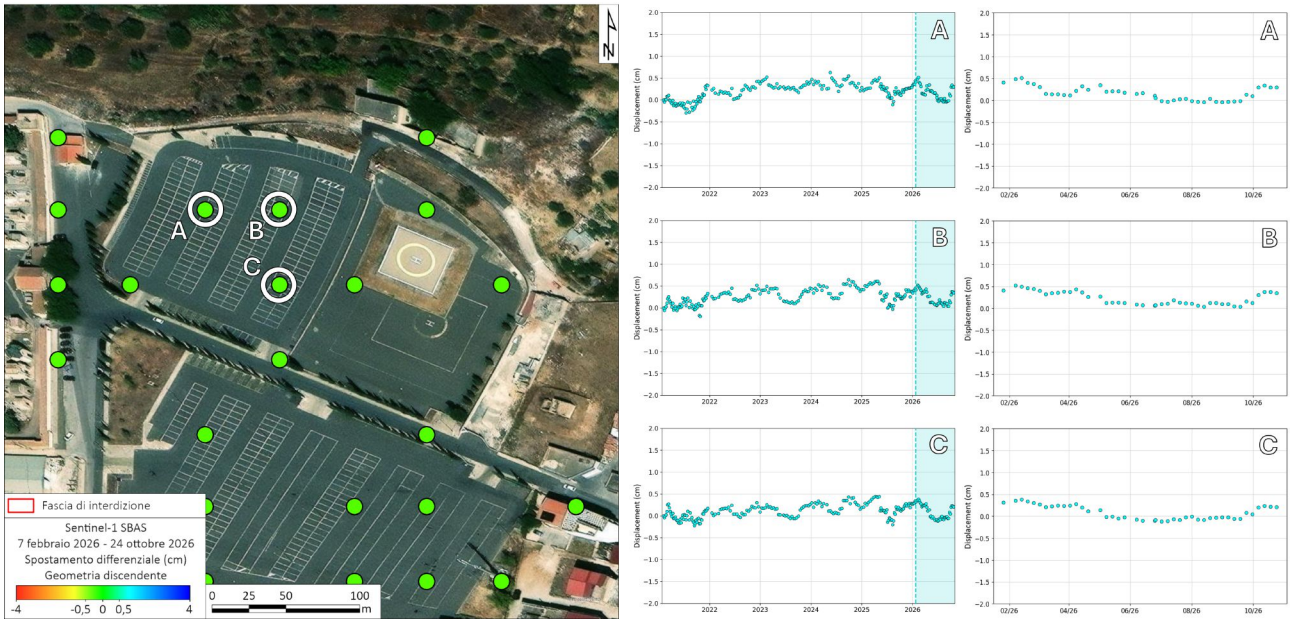

Figura 14 - Mappa degli spostamenti differenziali Sentinel-1 in geometria discendente (SBAS, 7 febbraio - 24 ottobre 2026), dettaglio dell'area di parcheggio a est del cimitero. A destra, le serie temporali dei punti evidenziati in mappa, riportate sull'intero periodo di acquisizione (colonna di sinistra) e limitatamente alla fase post-evento (colonna di destra).

6 Analisi di rilievi topografici

Il recente insorgere di nuove evidenze geomorfologiche nella zona San Giuseppe - Via Ustica (fessure e scarpate di neoformazione, fenditure su pareti di edifici, deformazioni del piano di campagna) indica una persistente dinamica di movimento associata all'evoluzione retrogressiva della porzione orientale della Frana Centrale.

A tal proposito, si sottolinea che già in Casagli *et al.* (2026a) si riportava come *"Sulla base delle geometrie osservate, del confronto con la frana del 1997 e dell'evento storico del 1790, è plausibile ipotizzare un ulteriore arretramento del ciglio di scarpata dell'ordine di alcune decine di metri, soprattutto in caso di nuovi eventi pluviometrici significativi. Tale evoluzione potrebbe coinvolgere ulteriori edifici posti in prossimità del margine instabile e compromettere in modo permanente tratti di viabilità strategica […]".*

Il rilievo topografico da drone acquisito dalla Fondazione CIMA a fine settembre 2026, secondo le stesse modalità descritte in Casagli *et al*. (2026c), è già stato impiegato per aggiornare le valutazioni quantitative relative all'arretramento della scarpata della Frana Centrale (Casagli *et al*., 2026g). Nel presente rapporto il rilievo è stato confrontato con l'analogo prodotto acquisito dalla Regione Siciliana a inizio febbraio 2026, estendendo l'analisi alle intere aree in dissesto. La procedura ha previsto il ricampionamento del rilievo della Fondazione CIMA secondo una maglia regolare con passo di 10 cm e, successivamente, il suo allineamento di dettaglio con il rilievo della Regione Siciliana in accordo con il sistema di coordinate WGS84 UTM 33N (codice EPSG 32633) e con il sistema di quote ortometriche relative al geoide EGM2008.

È stato quindi applicato un algoritmo di calcolo delle distanze di tipo *point-to-point*, al fine di ottenere stime distinte per le tre componenti X (*easting*), Y (*northing*) e Z (verticale). Infatti, mentre l'arretramento dei fronti di scarpata può essere quantificato con maggior accuratezza in riferimento alle componenti planimetriche delle distanze o mediante algoritmi di tipo *mesh-to-point* (Casagli *et al.*, 2026g), l'isolamento della componente verticale risulta più idoneo alla valutazione di eventuali movimenti generalizzati dei corpi di frana e di processi erosivi/deposizionali lungo l'alveo del torrente Benefizio.

La Figura 15 illustra il risultato della procedura sopradescritta di confronto tra nuvole di punti, con un inquadramento di dettaglio dell'area della Frana Centrale e del torrente Benefizio, dal momento che non si riscontrano variazioni significative in corrispondenza della Frana Sud e della Frana Nord. In particolare, si identificano:

- l'ampio fronte di distacco in massa nei pressi di via Ustica (originatosi a fine luglio 2026);
- alcune nicchie di arretramento in rapida evoluzione (con relativi coni di accumulo detritico) lungo la scarpata principale, ricadenti tra l'area del plesso scolastico San Giuseppe e l'area di via Roma nel quartiere Sante Croci (Casagli *et al.*, 2026e-g);
- un approfondimento generalizzato dell'alveo del torrente Benefizio.

Non si riscontrano variazioni morfologiche significative in corrispondenza del Graben o più a valle dello stesso, a indicazione del fatto che i fenomeni di riattivazione nei pressi del plesso scolastico San Giuseppe, sebbene di natura profonda, non stanno al momento implicando una rimobilizzazione dell'intera estensione del corpo della Frana Centrale.

Al contrario, risulta evidente la presenza di una prevalente dinamica di erosione dell'alveo del torrente Benefizio: le differenze di quota negative lungo il suo corso, nel periodo febbraio-settembre 2026, arrivano a superare localmente 5 m in valore assoluto. Allo stesso tempo, si riscontrano soltanto due tratti dell'alveo caratterizzati da una tangibile dinamica di deposizione, comunque molto meno pronunciata rispetto a quella di erosione, con differenze di quota positive tendenzialmente inferiori a 1,5 m.

Al fine di meglio esplicitare la distribuzione dei tratti in erosione e in deposizione, in Figura 16 viene riportato l'andamento dei profili di fondo del torrente estrapolati dai già menzionati rilievi di febbraio e settembre 2026; in particolare, i profili si estendono a partire dal punto di re-immissione delle acque in superficie nei pressi dell'incrocio tra la SP10 e la SP11 fino al loro sbocco nella piana di Gela, oltre il piede della Frana Centrale. Contestualmente, il grafico delinea l'andamento delle rispettive differenze di quota, i cui valori sono

mediati lungo una finestra mobile di lunghezza pari a 50 m; pertanto i picchi minimi e massimi sono lievemente più contenuti rispetto a quanto evincibile dalla Figura 15.

Si conferma la netta prevalenza dei tratti in erosione, mentre i tratti in deposizione appaiono circoscritti a intervalli sub-pianeggianti ubicati subito a valle delle pendenze più elevate. Integrando i valori in Figura 16 e considerando una larghezza media del fondo dell'alveo pari a 2 m per i tratti in erosione, si ottiene una stima approssimativa di 5000 m³ in relazione al volume di materiale asportato nel periodo febbraio-settembre 2026. Analogamente, considerando una maggior larghezza media del fondo dell'alveo (5 m) nei due principali tratti in deposizione (Figura 15), il volume di materiale depositato si attesta indicativamente su 1000 m³.

Ciò suggerisce che gli eventi di gennaio abbiano profondamente alterato la sezione e il profilo di fondo del torrente, discostandolo significativamente dal suo profilo di equilibrio. Le evidenze ottenute supportano inoltre l'ipotesi, già formulata da Castiglione *et al.* (2000), che l'azione ciclica di alleggerimento al piede dei versanti sia uno dei principali fattori predisponenti alla riattivazione delle frane di Niscemi.

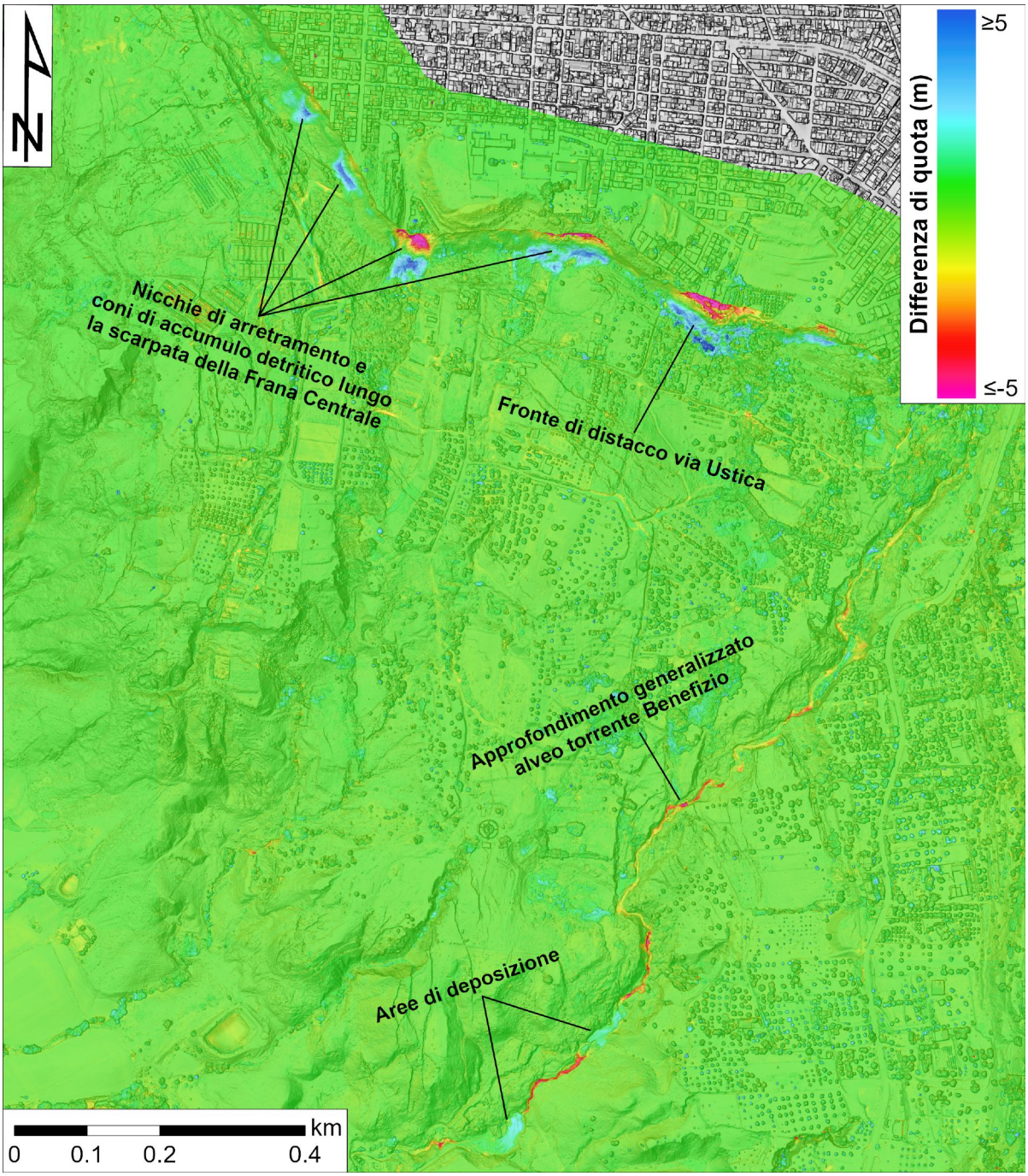

Figura 15 - Spostamenti ricavati dal confronto tra rilievi topografici di febbraio e settembre 2026, acquisiti rispettivamente dalla Regione Siciliana e dalla Fondazione CIMA.

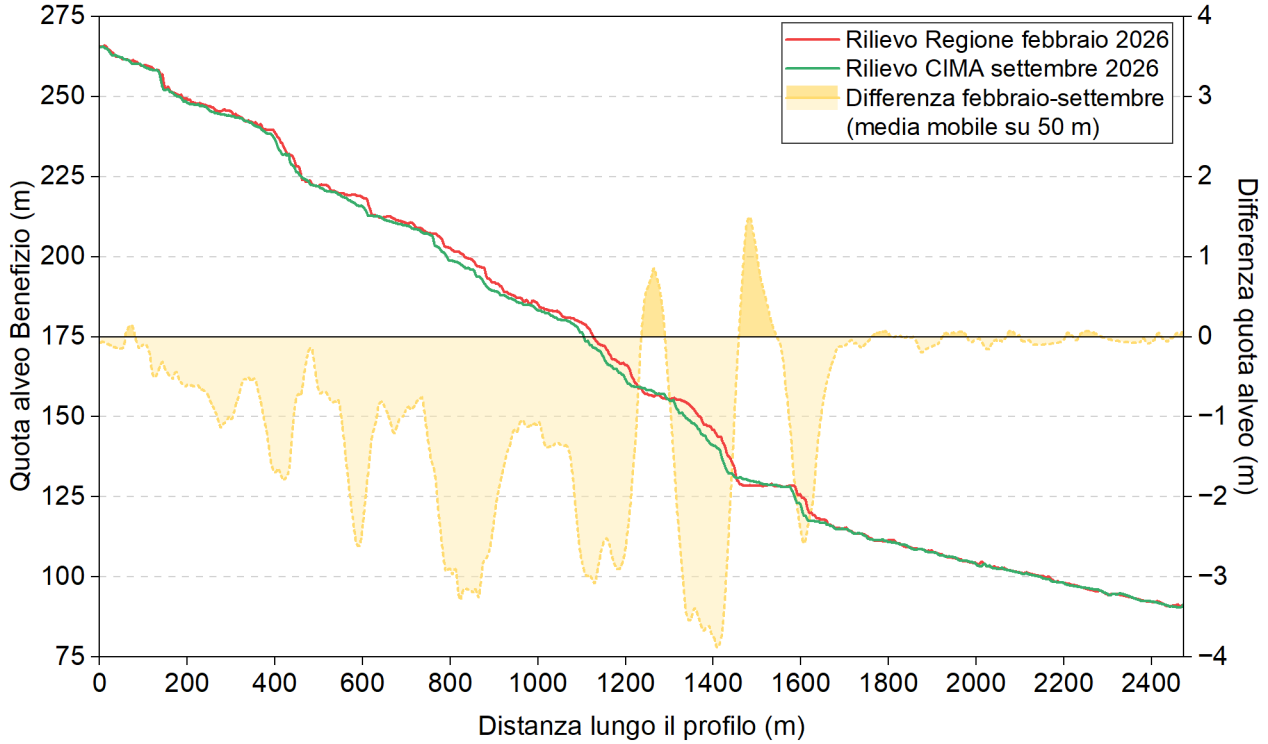

Figura 16 - Profili di fondo del torrente Benefizio alla data dei rilievi topografici da drone effettuati dalla Regione Siciliana (febbraio 2026) e dalla Fondazione CIMA (settembre 2026); l'andamento delle differenze di quota è mediato su una finestra mobile di 50 m per limitare l'influenza di valori estremi sulla leggibilità del grafico.

7 Analisi dati geofisici

Con la nota 6222/DG/DRPC Sicilia del 3 febbraio 2026 "*Emergenza Frana Niscemi - Esecuzione indagini geofisiche sulla frana di Niscemi*" la Presidenza della Regione Siciliana - Dipartimento della Protezione Civile (DRPC Sicilia) ha richiesto all'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS una prospezione geoelettrica 3D e una prospezione sismica ad alta risoluzione in onde P e SH nell'abitato di Niscemi.

L'uso combinato dei dati derivanti da indagini sismiche attive e da tomografia di resistività elettrica (ERT) costituisce oggi una pratica consolidata per aumentare l'affidabilità dei modelli del sottosuolo. Mentre le misure sismiche quantificano principalmente le proprietà elastiche del terreno (velocità di propagazione delle onde P e S, legate a densità e rigidezza dei materiali), i dati ERT forniscono informazioni sulla distribuzione della resistività elettrica e della caricabilità, legate alla porosità, alla saturazione di fluido e alla composizione litologica delle unità geologiche.

Il sistema *FullWaver* della *Iris Instrument* utilizzato (Casagli *et al.*, 2026c) è stato progettato per la misura di resistività, polarizzazione indotta e potenziale spontaneo su grandi superfici 2D e 3D con topografia complessa. Nel presente aggiornamento vengono presentati i risultati della caricabilità elettrica (IP, *Induced Polarization*) del sottosuolo e del Potenziale Spontaneo (SP, *Self-Potential*) acquisiti per la stessa area (indicata in Figura 17) per cui in Casagli *et al.* (2026c) è già stato fornito un modello 3D di resistività.

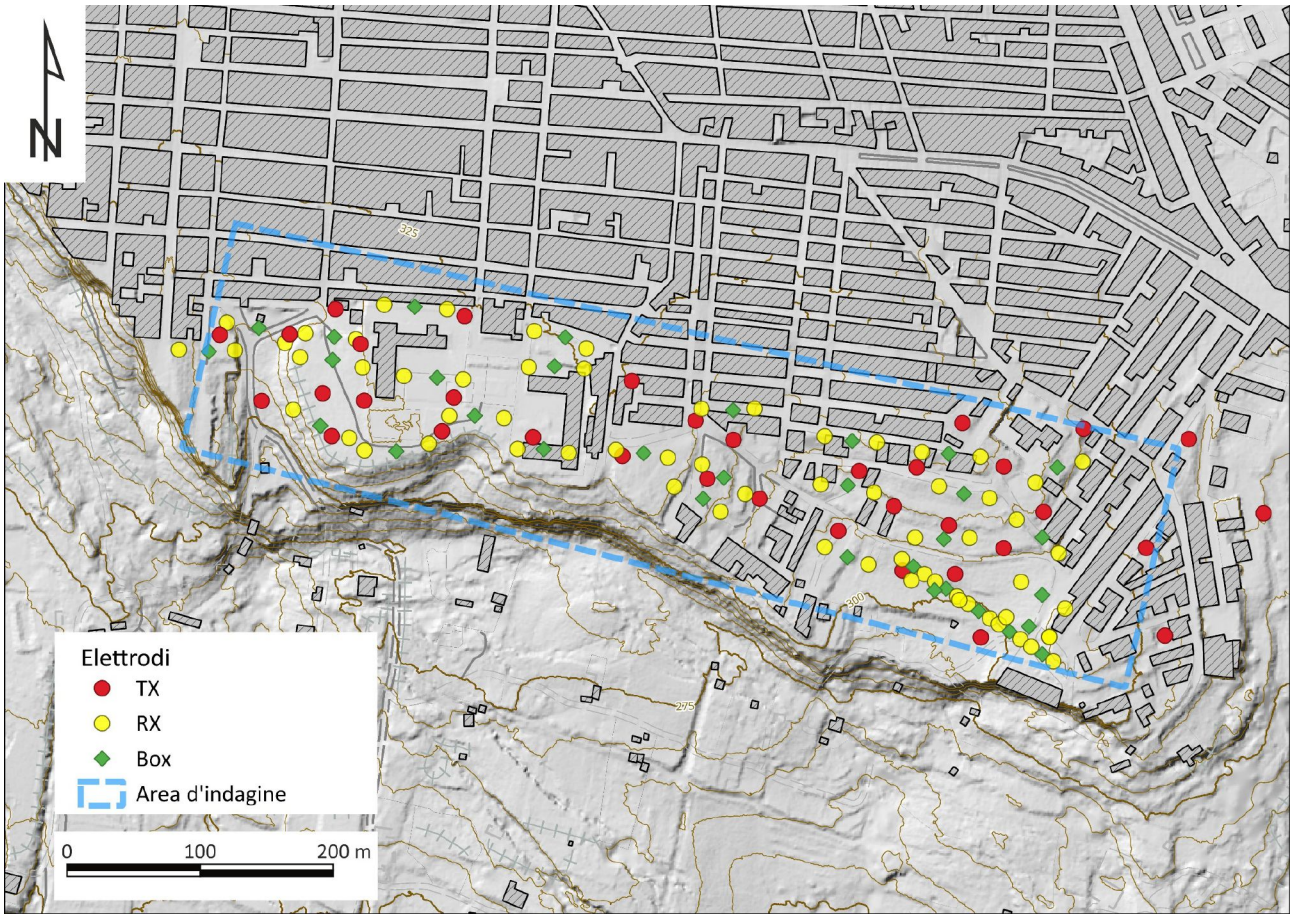

Figura 17 - Distribuzione dei *box*-P2 (rombi in verde) e degli elettrodi (P1 e P3) di acquisizione del potenziale (RX, in giallo). Si ricorda che, per ciascun *box*, la misura del potenziale avviene tra la coppia P1-P2 e la coppia P3-P2. In rosso sono indicate le posizioni dei poli negativi usati per la trasmissione della corrente (TX). In blu è indicata la pianta dell'area indagata.

7.1 Caricabilità elettrica del terreno IP (*Induced Polarization*)

Il metodo della caricabilità elettrica del terreno si basa sull'acquisizione del tempo di scarica del terreno a seguito di un'energizzazione (quella necessaria per acquisire le misure di resistività elettrica): quando la corrente applicata viene spenta, la tensione tra gli elettrodi di potenziale impiega un tempo finito e misurabile (da secondi a diversi minuti) per decadere fino a zero perché il terreno immagazzina temporaneamente carica (cioè si polarizza) e si comporta in qualche modo come un condensatore.

Tanto più un terreno è in grado di immagazzinare carica elettrica, ad esempio per la presenza di argilla, tanto più il valore della caricabilità sarà elevato; tuttavia, le cause esatte del fenomeno di polarizzazione indotta non sono ancora del tutto note. Si ritiene che i due meccanismi principali siano la "polarizzazione dei grani" (sovratensione) del terreno e la polarizzazione di membrana (elettrolitica), entrambi di natura elettrochimica.

L'acquisizione condotta per caratterizzare il contesto geologico profondo al di sotto dell'abitato di Niscemi, pur presentando una potenziale complessità data dall'abitato stesso, mostra valori di caricabilità praticamente privi di rumore antropico (Figura 18). Le misure sono quindi risultate di ottima qualità, identificando chiaramente una curva di scarica (grafico in basso al centro in Figura 19). Questa tendenza è confermata anche nella misura dipolo-dipolo dove si osserva un andamento analogo della curva di scarica, campionata in 8 finestre temporali, considerato il tempo di 2000 ms impostato per questo tipo di misura.

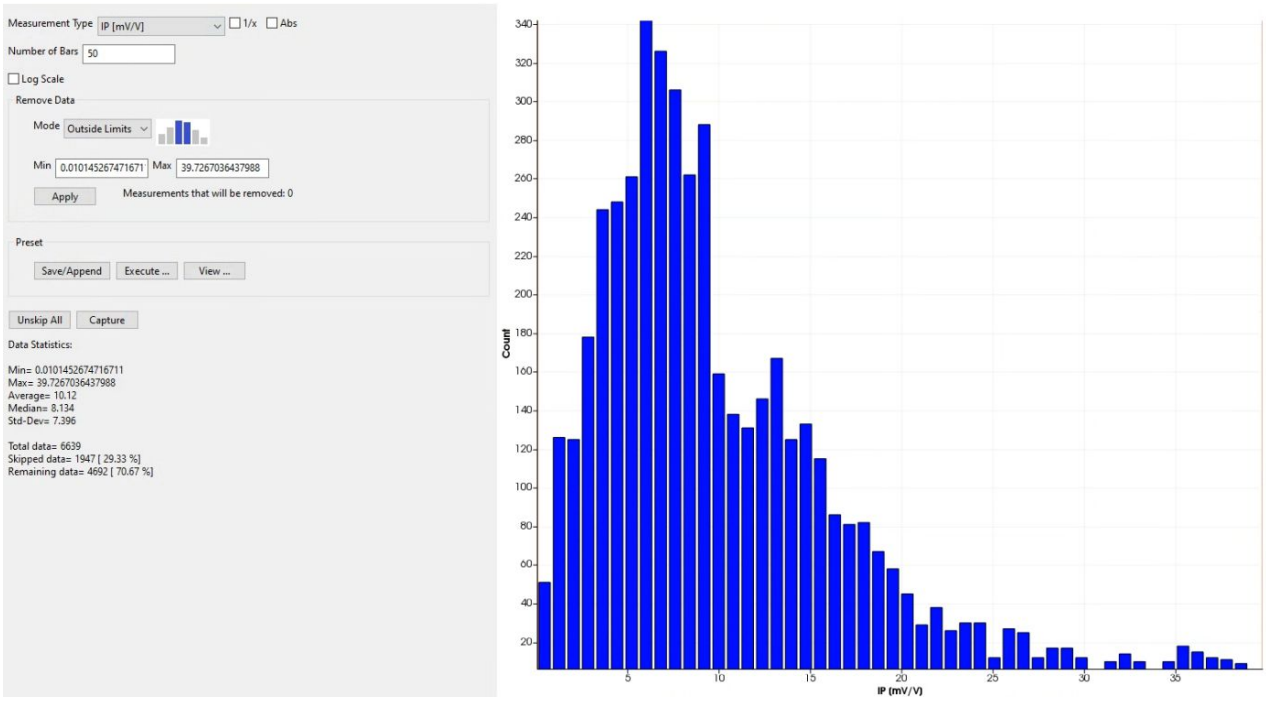

Figura 18 - Istogramma dei valori di caricabilità misurati che evidenzia valori bassi con una distribuzione asimmetrica.

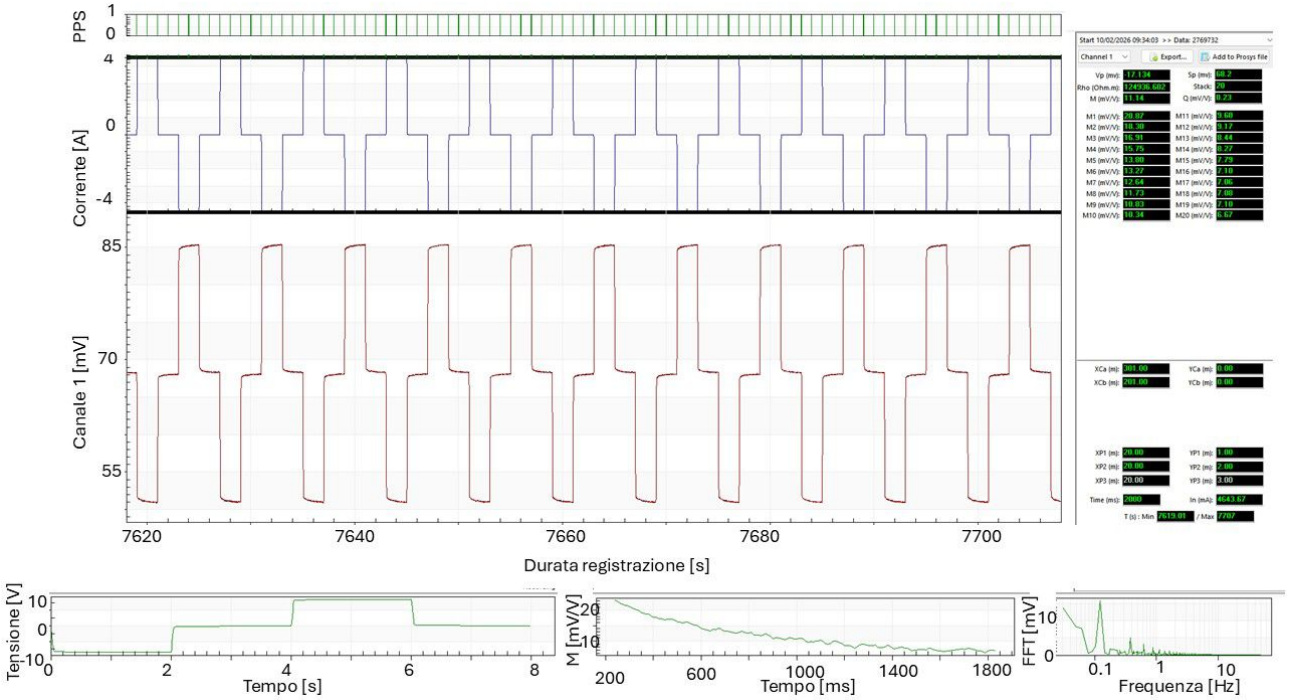

Figura 19 - In blu il grafico dell'andamento temporale dell'intensità di corrente (mA) iniettata in corrispondenza del dipolo di trasmissione TX301-TX201 (quadripolo di tipo dipolo-dipolo). In rosso il grafico dell'andamento temporale del corrispondente segnale di potenziale (mV) registrato dal primo canale del *box* V-FW n. 20. In basso a sinistra il segnale mediato sui diversi *stack* di misura. In basso al centro la curva di scarica della caricabilità.

In Figura 20 è riportata la distribuzione spaziale dei valori di caricabilità acquisiti.

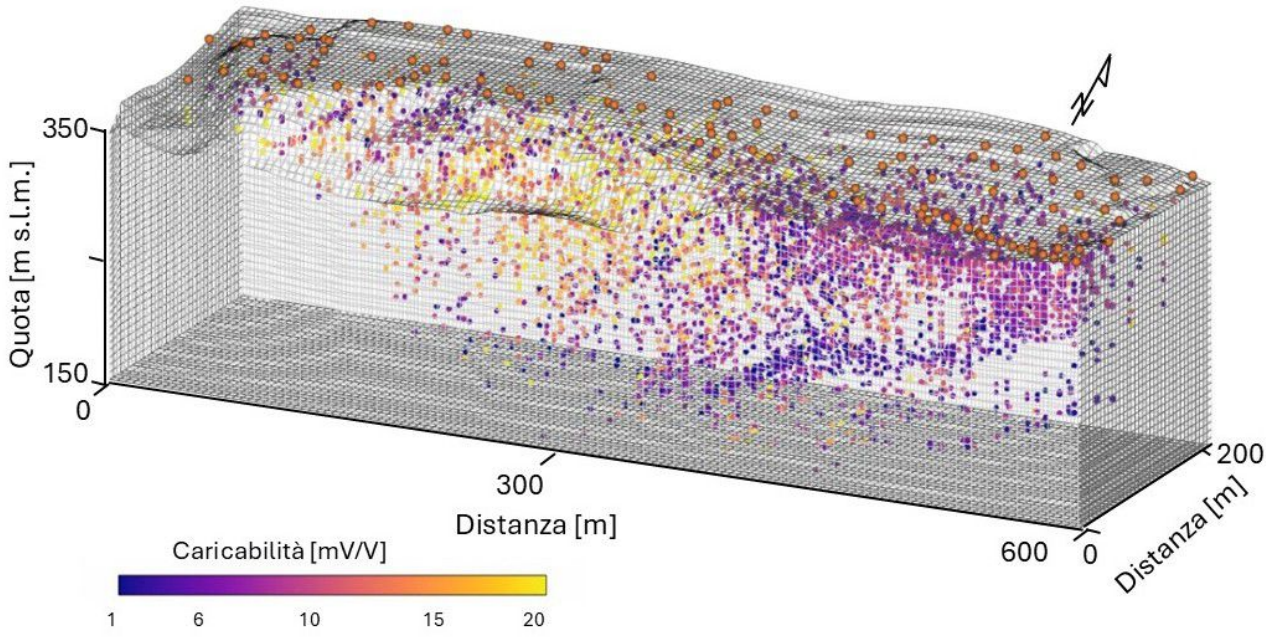

Figura 20 - Ubicazione nel sottosuolo dei valori di caricabilità (pallini colorati) utilizzati nell'inversione derivanti dal filtraggio del dato di campagna e *mesh* 3D usata per l'inversione.

L'elaborazione dei dati IP è stata effettuata utilizzando il *software* ViewLab 3D della Geostudi Astier, versione 3.8, attraverso il classico processo dell'inversione geofisica 3D. Come modello di resistività di partenza per questa inversione della caricabilità è stato usato l'*output* dell'inversione dei dati di resistività apparente (già presentato in Casagli *et al*., 2026c).

Il modello 3D di caricabilità ottenuto è riportato in Figura 21: esso mostra una distribuzione della caricabilità superficiale disomogenea, mentre in profondità tale distribuzione si uniforma, evidenziando una zona (indicata in A in Figura 21) a bassissima caricabilità posta ad una profondità tra 50 m e 100 m.

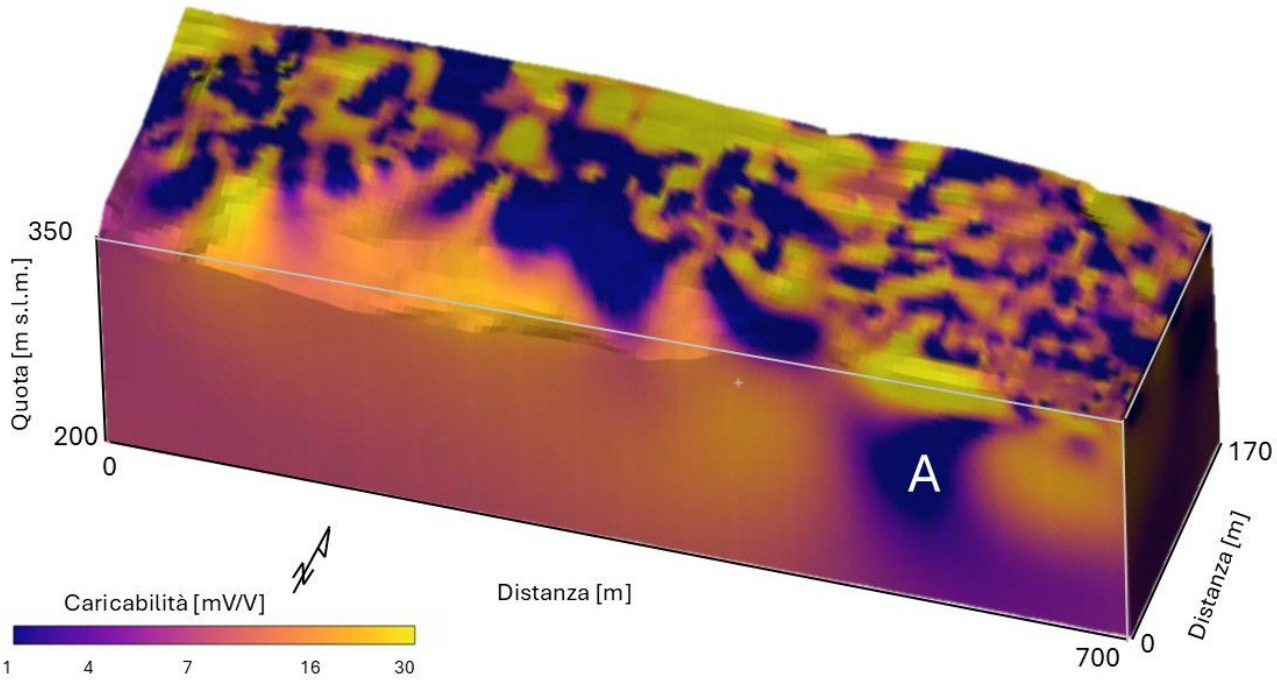

Figura 21 - Modello 3D di caricabilità (mV/V) del sottosuolo dell'area indagata. È indicata (A) la zona a bassissima caricabilità posta a una profondità compresa tra circa 50 m e 100 m.

In Figura 22 e Figura 23 sono riportate rispettivamente alcune sezioni trasversali (orientate sud-nord) e longitudinali (orientate ovest-est) che mettono in luce la presenza di un corpo a bassa caricabilità localizzato nella porzione est dell'area indagata e che si estende dalla superficie fino a più di 100 m di profondità nelle argille.

In Figura 24 sono riportate tre sezioni orizzontali a diversa profondità (300 m, 260 m e 200 m s.l.m.) che confermano, soprattutto in profondità, la presenza di questo corpo a bassa caricabilità.

Valori così bassi di caricabilità potrebbero essere da attribuire a un alto contenuto in acqua, oppure ad una diversa composizione mineralogica, oppure infine ad una diversa compattazione del terreno, più elevata in questa area. È da escludere che tali valori bassi di caricabilità siano da attribuire alla presenza di acqua salata, in quanto la resistività in quell'area, pur essendo bassa, non presenta i valori tipici dell'acqua salata (cioè intorno a 1 Ωm).

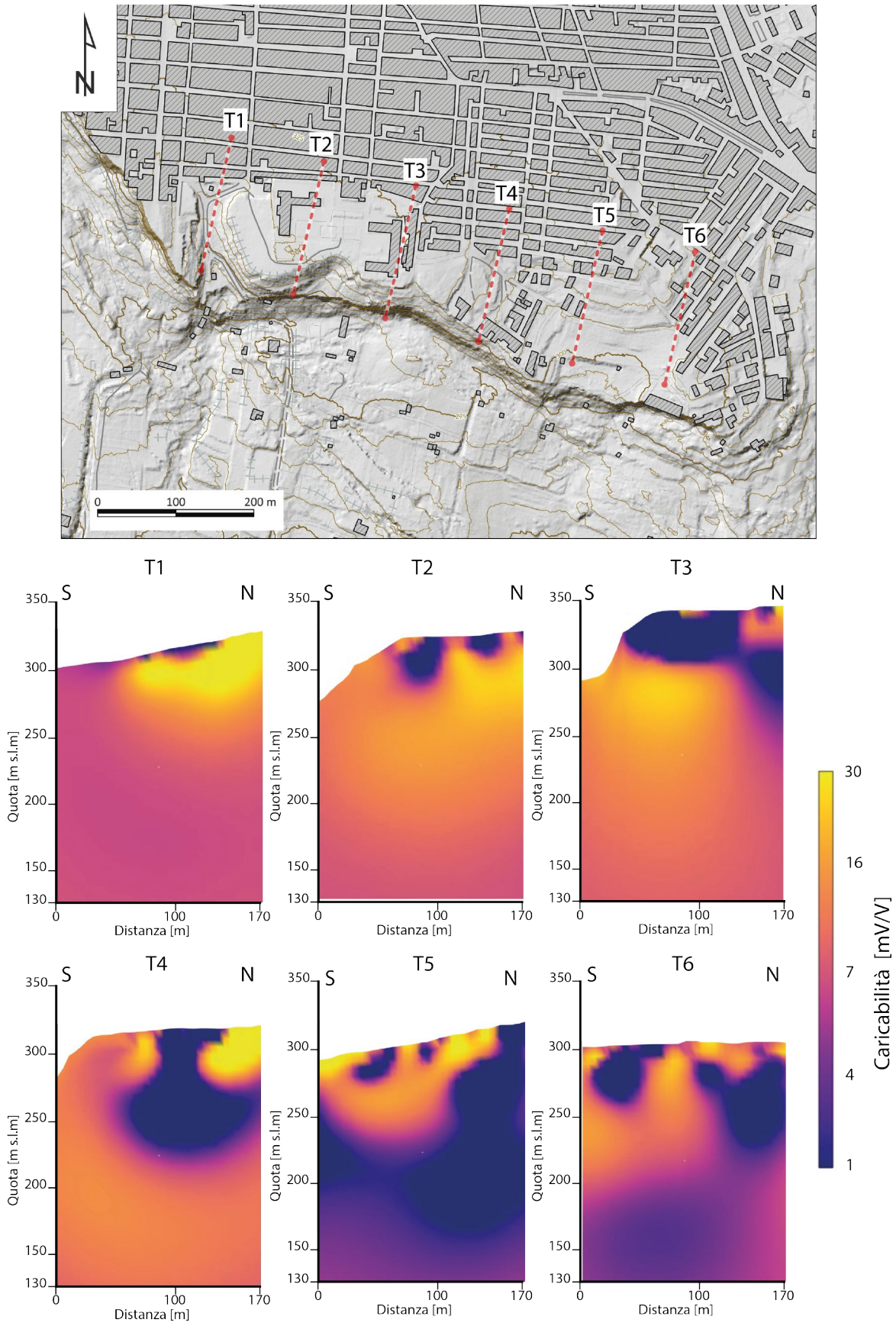

Figura 22 - Sezioni trasversali al corpo di frana (T1-T6) estratte dall'intero volume indagato. La loro localizzazione in pianta è mostrata nel pannello in alto. Tutte e sei le sezioni sono orientate da sud a nord. Colori freddi indicano valori di caricabilità bassi, mentre i colori caldi indicano alti valori di caricabilità.

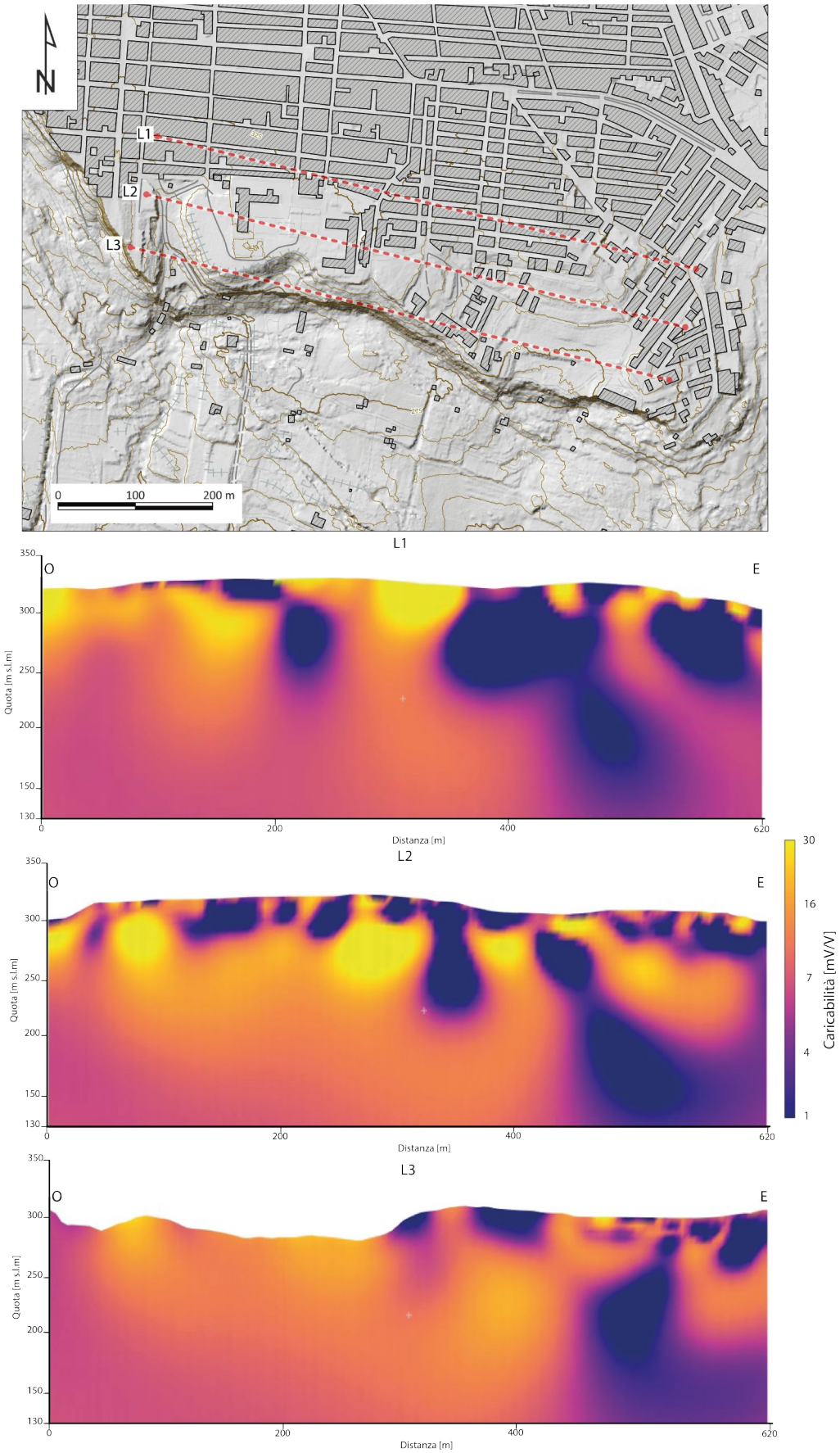

Figura 23 - Sezioni longitudinali (L1-L3) estratte dall'intero volume indagato. La loro localizzazione in pianta è mostrata nel pannello in alto. Tutte e tre le sezioni sono orientate da ovest a est. Colori freddi indicano valori di caricabilità bassi, mentre i colori caldi indicano alti valori di caricabilità.

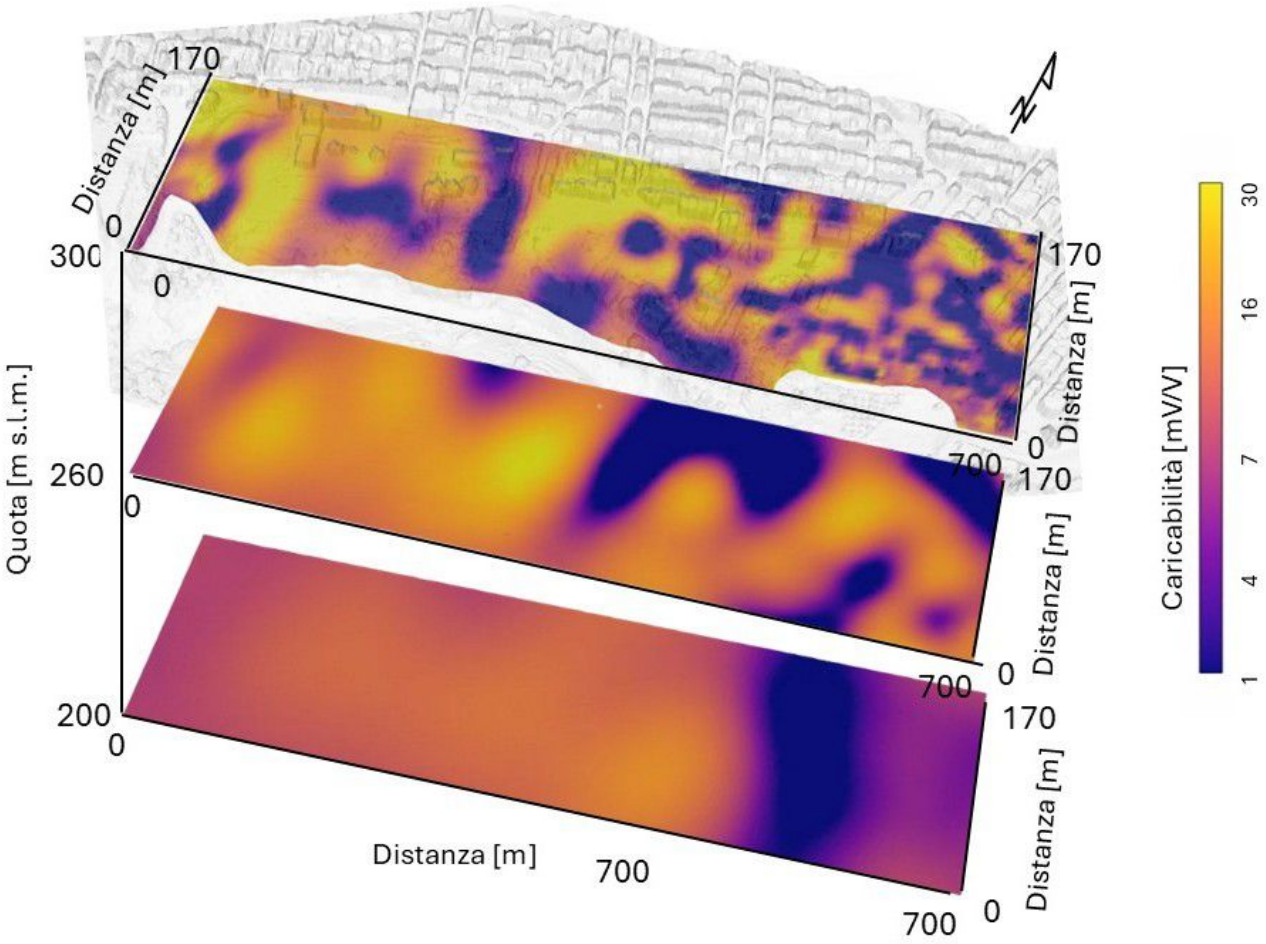

Figura 24 - Sezioni orizzontali estratte dall'intero volume indagato a tre diverse profondità (300 m, 260 m e 200 m s.l.m.). Colori freddi indicano valori di caricabilità bassi, mentre i colori caldi indicano alti valori di caricabilità.

7.2 Recupero del Potenziale Spontaneo (SP, *Self-Potential*) da tecnica di acquisizione non convenzionale

Il metodo del Potenziale Spontaneo (SP) è una tecnica geoelettrica passiva, che misura differenze di potenziale elettrico naturalmente presenti nel sottosuolo, senza necessità di energizzazione artificiale. A differenza dei metodi geoelettrici attivi (ERT e IP), il segnale SP è generato da processi fisico-chimici che avvengono spontaneamente nel sottosuolo, ed è quindi per sua natura più difficile da isolare e interpretare quantitativamente, richiedendo comunque un'attenta rimozione delle componenti di rumore antropico e ambientale (correnti telluriche, correnti vaganti industriali, effetti di polarizzazione elettrodica e di contatto elettrodo-suolo).

In letteratura (Sill, 1983; Jouniaux *et al*., 2009; Revil e Jardani, 2013) vengono generalmente riconosciute tre principali famiglie di sorgenti del segnale di Potenziale Spontaneo:

- potenziale elettrocinetico (*streaming potential*): generato dal flusso di un fluido elettrolitico attraverso un mezzo poroso carico elettricamente. Il moto relativo tra il fluido nei pori e la superficie minerale (rivestita dal doppio strato elettrico) trascina cariche elettriche, generando una corrente di convezione e, di conseguenza, un campo elettrico misurabile in superficie. È la sorgente dominante nei contesti di infiltrazione, percolazione, flusso di falda e instabilità di versante;
- potenziale elettrochimico (di diffusione e di membrana/*redox*): legato a gradienti di concentrazione ionica tra fluidi di diversa composizione chimica oppure a reazioni di ossido-riduzione in presenza di corpi mineralizzati o conduttori elettronici;

- potenziale termoelettrico (effetto *Seebeck*): associato a gradienti termici nel sottosuolo generalmente trascurabili alle profondità e nei contesti di studio geotecnico-idrogeologico superficiale.

Nel contesto della frana di Niscemi, caratterizzato da un assetto litostratigrafico costituito dall'alternanza di livelli sabbioso-arenacei permeabili e unità argilloso-marnose a bassa permeabilità, la sorgente di segnale SP attesa e di maggior interesse è quella elettrocinetica. In particolare, ci si attende che il segnale possa essere sensibile a:

- percorsi preferenziali di infiltrazione e di deflusso idrico sotterraneo all'interno della coltre superficiale rimaneggiata e del corpo di frana;
- variazioni laterali di saturazione tra i litotipi sabbiosi permeabili e le unità argillose sature, coerentemente con i contrasti di resistività individuati dall'indagine ERT;
- possibili zone di richiamo o di emergenza idrica in corrispondenza di scarpate e nicchie di distacco, dove i gradienti idraulici indotti dal movimento franoso possono essere localmente più elevati;
- eventuali contrasti elettrochimici associati alla presenza di litotipi evaporitici (Casagli *et al*., 2026c) come fattore litologico rilevante per l'area.

Il sistema *FullWaver* della *Iris Instrument* utilizzato per caratterizzare il contesto geologico profondo al di sotto dell'abitato di Niscemi (Casagli *et al*., 2026c) è progettato, oltre che per la misura della resistività e della polarizzazione indotta, anche per la registrazione continua e autonoma del SP su un numero elevato di canali indipendenti.

I ricevitori *V-FullWaver*, infatti, campionano la differenza di potenziale ogni 10 ms, indipendentemente dai cicli di energizzazione, consentendo di registrare, oltre all'effetto del segnale artificiale indotto dall'iniezione di corrente, anche il campo di potenziale naturale del terreno nei tempi di silenzio tra un'energizzazione e l'altra.

I valori di SP sono quindi stati estratti dal dataset totale, recuperando quella parte di segnale che tradizionalmente viene considerata come rumore e quindi scartata nella procedura standard di elaborazione ERT/IP.

È importante sottolineare che si tratta di una tecnica di acquisizione non convenzionale (Souza de Araujo *et al*., 2024), denominata *Sparse Gradient* (SG) o, nella sua declinazione più estesa, *Full Sparse Gradient* (FSG), sostanzialmente diversa dalle tecniche SP tradizionali (*Fixed-Base* o *Leapfrog*) descritte in letteratura (Barde-Cabusson *et al*., 2021).

Le principali caratteristiche della tecnica SG/FSG sono l'assenza di un riferimento comune a tutti gli elettrodi e l'assenza di una somma cumulativa dei gradienti, che impediscono di ricostruire un campo di potenziale assoluto, a vantaggio di una maggiore copertura areale e di un'elevata risoluzione temporale (Souza de Araujo *et al*., 2024).

Conseguentemente, i dati non possono essere interpretati secondo i canoni standard per fornire la stima quantitativa di parametri idraulici, ma il risultato sarà di tipo qualitativo, orientato all'individuazione di *pattern* spaziali e temporali coerenti con i processi sopra descritti.

Per il recupero del segnale SP nell'area dell'abitato di Niscemi sono state impiegate complessivamente 31 unità riceventi (identificate come Rx1-Rx32, assente l'unità Rx19), indicate dai rombi verdi in Figura 17, che hanno fornito complessivamente 62 punti di misura del potenziale spontaneo (pallini gialli Rx in Figura 17).

Si sottolinea inoltre che il sistema, progettato primariamente per l'acquisizione ERT/IP, utilizza elettrodi in acciaio inossidabile (soggetti a una polarizzazione elettrochimica di contatto che si traduce in un potenziale di *offset* e in un *drift* temporale potenzialmente rilevanti), e non elettrodi non polarizzabili che rappresentano lo standard raccomandato per l'acquisizione SP di alta qualità.

La procedura di elaborazione applicata ai dati grezzi, sviluppata secondo la metodologia descritta in Souza de Araujo *et al*. (2025, 2026) e adattata al caso di Niscemi, si è articolata nelle fasi seguenti.

- selezione ed *editing* delle finestre temporali per sincronizzare l'intervallo temporale comune a tutte le unità *datalogger*: è stato selezionato l'intervallo comune dalle ore 11:00 alle ore 17:00, corrispondente a 6 ore di misure continue (Figura 25 e Figura 26);
- *anti-spike filter*, filtro *boxcar* con finestra di 90 s e rimozione delle alte frequenze residue per rimuovere il potenziale artificiale indotto dall'energizzazione per acquisire i valori di resistività (Figura 25);
- ricampionamento su finestre di 10 min del segnale recuperato a ciascun *box* per uniformare la base temporale e ridurre il volume dei dati (Figura 26);
- ricostruzione delle mappe di potenziale spontaneo per singolo istante temporale ottenute interpolando i valori registrati da tutte le unità attive in un dato orario;
- ricostruzione delle mappe *time-lapse* con intervallo temporale di 30 min per seguire l'evoluzione spaziale e temporale del campo SP nel corso dell'acquisizione;
- analisi del segnale analitico (*Analytic Signal Amplitude*, ASA) per evidenziare i bordi e i centri delle anomalie SP, indipendentemente dalla polarità del corpo sorgente. L'ASA è una tecnica mutuata dai metodi magnetici e gravimetrici (Souza de Araujo *et al.*, 2024) e particolarmente utile con dati SG/FSG proprio perché non richiede un riferimento di potenziale assoluto, ma lavora sui gradienti spaziali del campo osservato;
- stima e visualizzazione del vettore di campo elettrico risultante, ottenuto dalla combinazione dei due canali di gradiente (ch1 e ch2) di ciascuna unità, per avere una rappresentazione indicativa della direzione locale del flusso elettrocinetico, e quindi, per inferenza, della direzione di deflusso idrico sotterraneo dominante nell'intorno di ciascun *box*.

A titolo di esempio, in Figura 25 è riportato il recupero completo dello SP al box Rx1 (linea blu) sovrapposto ai dati grezzi caratterizzati dalla presenza di potenziale artificiale (barre verticali in rosso), mentre in Figura 26 è riportato l'SP recuperato su entrambi i canali dei primi sei *box* (Rx1-Rx6).

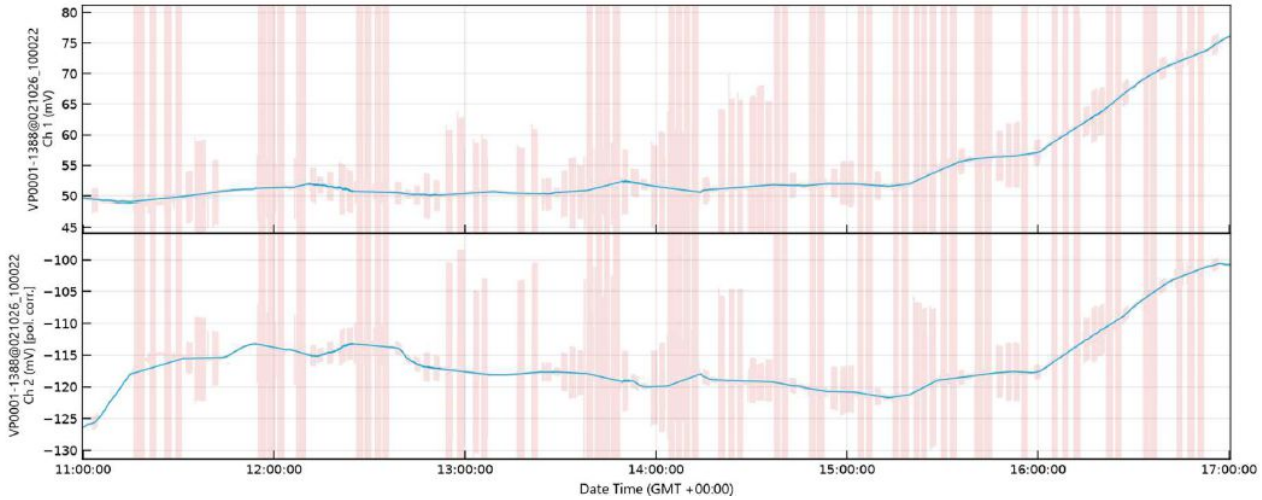

Figura 25 - Recupero completo del campo elettrico naturale (in blu) sul *datalogger* Rx1, con intervallo di campionamento originario di 10 ms. Le barre verticali rosse corrispondono al potenziale elettrico artificiale registrato durante l'iniezione di corrente della tomografia ERT.

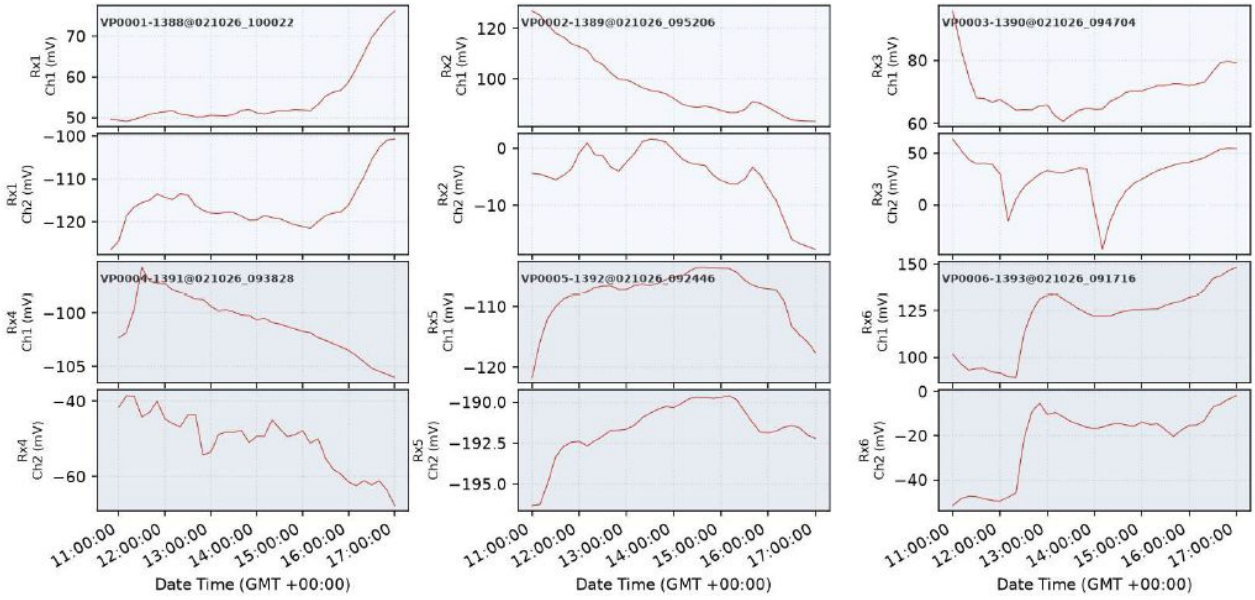

Figura 26 - Potenziale elettrico recuperato sui *datalogger* Rx1-Rx6, ricampionato su finestre di 10 min.

L'analisi comparata di queste curve SP recuperate e ricampionate a 10 min mostra un comportamento non omogeneo tra le diverse unità, in quanto alcune (ad es. Rx1-ch1, Rx3-ch1, in Figura 26) presentano, dopo le prime decine di minuti, un andamento relativamente stazionario, con oscillazioni contenute attorno a un valore medio stabile; altre unità (ad es. Rx4 in Figura 26) mostrano invece un andamento di salita o discesa più marcato e progressivo, talvolta con una forma a "campana" (aumento progressivo seguito da una diminuzione, o viceversa, chiamato *hat-shaped anomaly*).

Un andamento di questo tipo non può essere attribuito a priori alla sola deriva del potenziale di contatto elettrodo-suolo, perché potrebbe anche essere associato a fenomeni di infiltrazione o percolazione d'acqua nel sottosuolo in prossimità del dipolo di misura.

Le due ipotesi, deriva elettrodica e anomalia idrogeologica transitoria di tipo *hat-shaped*, non sono necessariamente alternative e, sulla base dei soli dati qui presentati, non è possibile distinguerle con certezza.

Alcuni criteri, mutuati dalla letteratura di riferimento, possono tuttavia orientare l'interpretazione: (i) un *trend* puramente monotono, senza inversione di segno entro la finestra di acquisizione, è più compatibile con una deriva progressiva di natura elettrochimica; (ii) un andamento a campana completo (salita e successiva discesa, o viceversa, entro la stessa giornata) è più tipico dell'anomalia idrogeologica transitoria; (iii) la ricorrenza dello stesso pattern su unità vicine e la sua coerenza con le zone di anomalia SP/ASA persistenti individuate nelle mappe rafforzano l'ipotesi di un'origine reale rispetto a quella strumentale, che tende invece a essere più casuale e non correlata spazialmente tra unità diverse.

Le mappe orarie del SP mostrano una distribuzione spaziale eterogenea del segnale, con settori a potenziale relativamente più positivo alternati a settori negativi, coerentemente con la natura sparsa dell'acquisizione e l'assenza di un riferimento comune propria della tecnica SG/FSG.

A titolo di esempio, in Figura 27, è riportata quella relativa alle ore 13:00 dove si distingue un polo positivo ben definito e di forte ampiezza (prossimo a +100 mV) in corrispondenza del *datalogger* Rx6, nel settore nord-occidentale dell'area indagata; un secondo massimo relativo, di ampiezza inferiore (dell'ordine di +50/+75 mV) e forma più allungata, si osserva nel settore centrale, in prossimità del gruppo Rx22, Rx23 e Rx24.

In direzione opposta, un polo negativo marcato e spazialmente concentrato, con valori prossimi a -100 mV, si individua in corrispondenza delle unità Rx4 e Rx5 nel settore centro-orientale: la sua geometria a contorni chiusi e concentrici, ben distinta dal fondo circostante, è compatibile con una sorgente localizzata piuttosto che con una transizione litologica graduale.

Nel settore sud-orientale (unità Rx26-Rx32), il campo SP mostra infine un'alternanza più fitta di piccoli massimi e minimi su distanze di poche decine di metri, indice di una maggiore variabilità laterale del segnale in questo tratto del versante, verosimilmente legata alla maggiore densità di unità ravvicinate in quel settore.

Il polo positivo di Rx6 e i poli negativi di Rx1 e Rx4 si collocano tutti in corrispondenza dell'area urbanizzata.

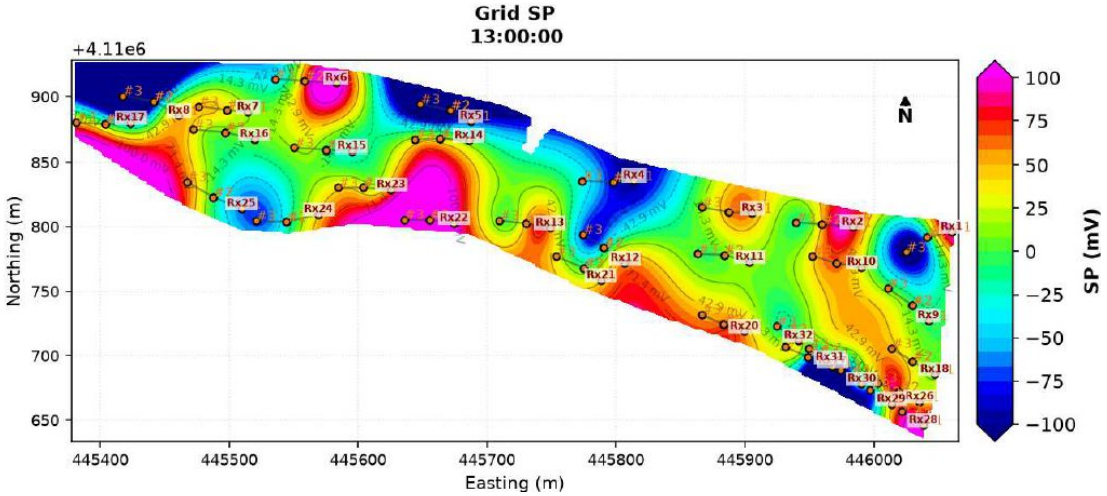

Figura 27 - Mappa del potenziale elettrico relativa alle ore 13:00, con i 31 *datalogger* disponibili.

La sequenza *time-lapse* (Figura 28), ricostruita dalle ore 11:00 alle 16:30 a passo di 30 min, mostra un'evoluzione progressiva della distribuzione del potenziale, con alcuni settori che mantengono polarità e ampiezza relativamente stabili nel tempo, verosimilmente associati a contrasti litologici o idrogeologici persistenti, e altri settori in cui si osservano variazioni più marcate, potenzialmente legate a processi dinamici di infiltrazione o a effetti locali di deriva elettrodica.

L'osservazione in *time-lapse* di un dato SP sparso come quello qui presentato è particolarmente informativa proprio perché consente di distinguere le anomalie persistenti, più facilmente attribuibili a strutture stazionarie del sottosuolo, da quelle transitorie, più plausibilmente legate a rumore strumentale o a fenomeni idrologici rapidi.

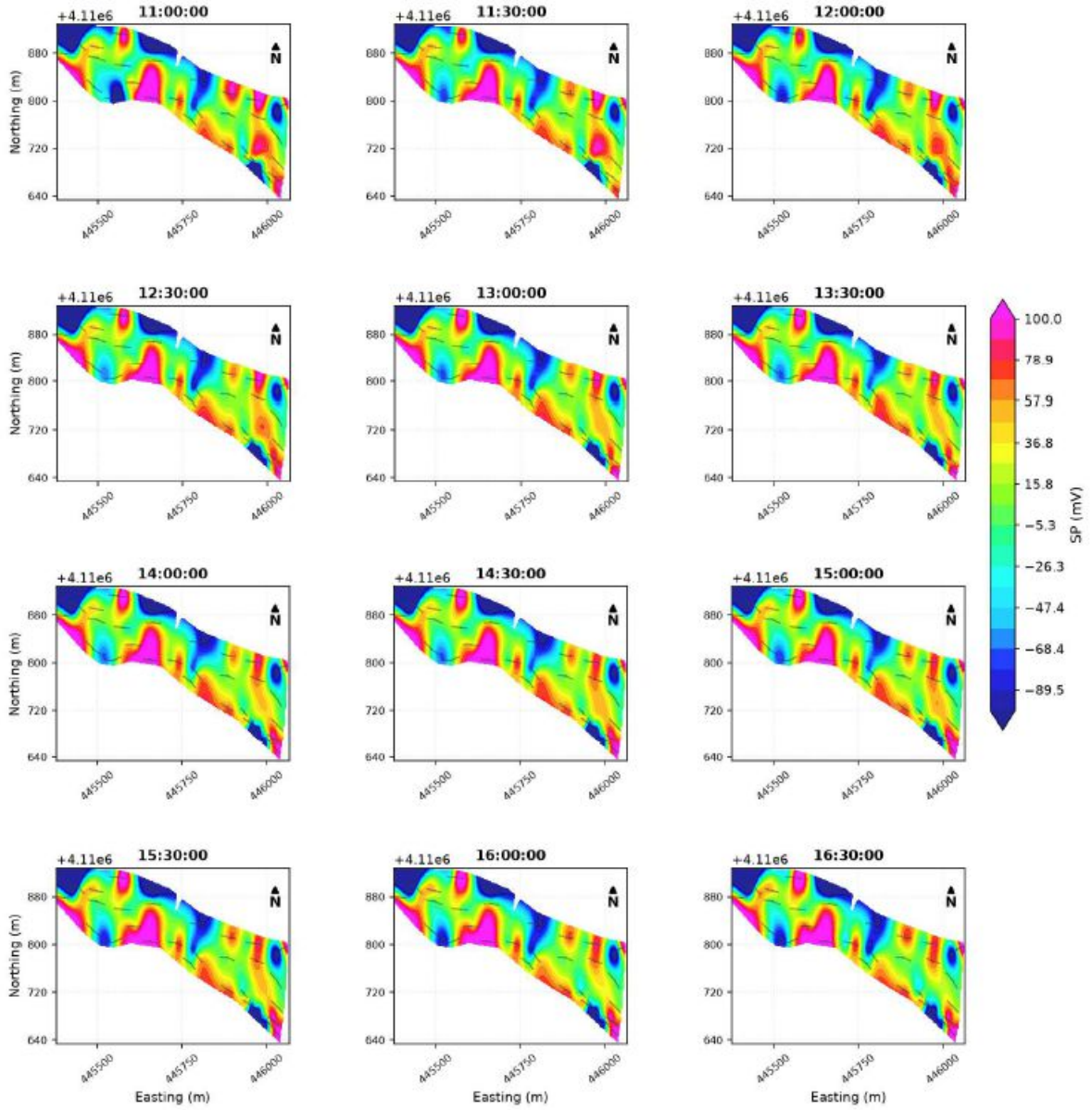

Figura 28 - Mappa *time-lapse* del potenziale elettrico recuperato, dalle ore 11:00 alle 16:30, con intervallo di rappresentazione di 30 min.

Nella sequenza *time-lapse* (Figura 28) il polo positivo di Rx6 e il polo negativo di Rx1 e Rx4, già individuati nella mappa alle 13:00, risultano riconoscibili con continuità in gran parte dei fotogrammi, pur con oscillazioni di ampiezza tra un passo temporale e l'altro: tale persistenza spaziale, mantenuta per diverse ore, è l'elemento che permette di attribuire a queste anomalie un significato legato a strutture o processi reali del sottosuolo, piuttosto che a rumore casuale.

Nel settore sud-orientale (Rx26-Rx32) la distribuzione di massimi e minimi locali cambia invece più sensibilmente da un fotogramma all'altro, sia in posizione sia in polarità: questo comportamento, più dinamico, è compatibile con due ipotesi non mutuamente esclusive: da un lato la maggiore sensibilità di questo settore agli effetti di deriva elettrodica, dall'altro la possibile presenza di più anomalie idrogeologiche transitorie di tipo *hat-shaped* che si sviluppano e si esauriscono nell'arco di poche ore, in un settore in cui la densità di unità ravvicinate (Rx26-Rx32) potrebbe riflettere proprio la presenza di più percorsi di infiltrazione a piccola scala.

In Figura 29, a titolo di esempio, è riportata l'analisi ASA per i dati delle ore 13:00, analisi che, come detto, permette di individuare in modo più netto i baricentri delle anomalie SP, riducendo l'ambiguità interpretativa legata alla polarità relativa propria dei dati non riferiti.

In particolare, valori più elevati di ASA (tonalità magenta, >5-6 mV/m) si concentrano in corrispondenza di Rx1, Rx5, Rx6, Rx8 e Rx17 e del gruppo Rx26-Rx32, confermando che qui il campo SP non è soltanto elevato in ampiezza ma presenta anche il gradiente spaziale più marcato dell'intera area indagata.

Il settore centrale (Rx10, Rx11 e Rx16), che nella mappa SP ospitava il polo negativo più intenso in termini di valore assoluto, mostra invece valori di ASA relativamente contenuti (inferiori a 2 mV/m): questa apparente discrepanza indica che l'anomalia negativa di Rx11, pur essendo la più marcata in ampiezza, si sviluppa con un gradiente spaziale più graduale, verosimilmente per la maggiore distanza tra le unità in questo tratto del profilo oppure per una transizione idrogeologica meno brusca rispetto a quella che genera il polo di Rx6.

Ne consegue che le due anomalie, sebbene entrambe rilevanti, sono probabilmente espressione di meccanismi o configurazioni idrauliche non identiche.

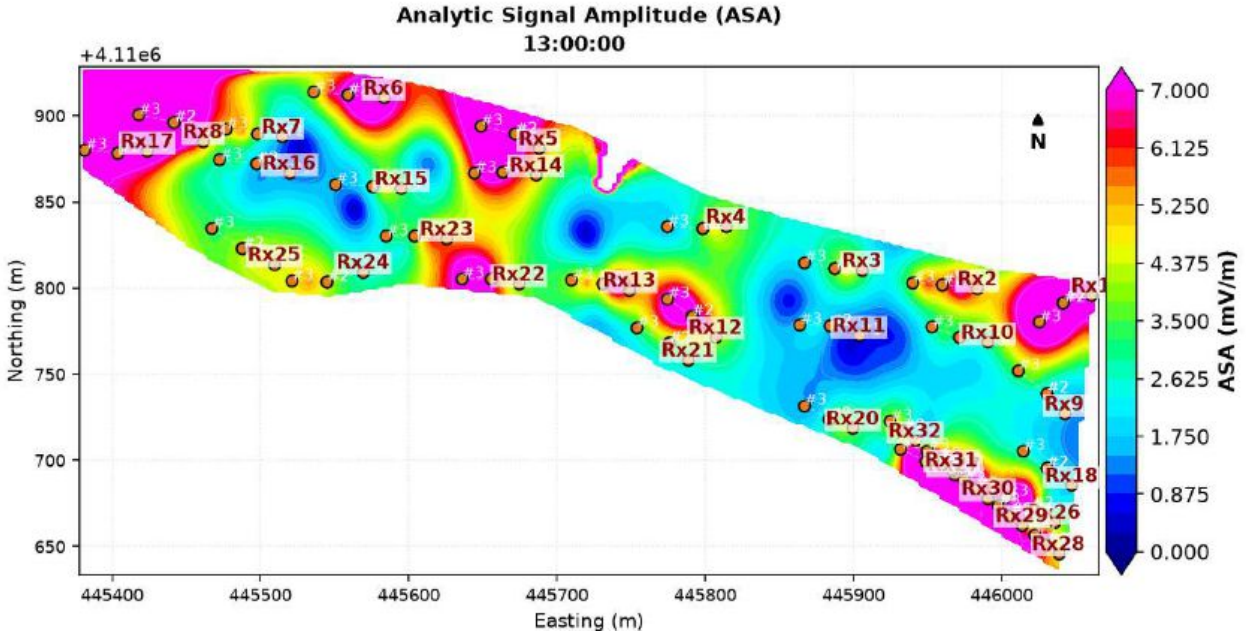

Figura 29 - Applicazione dell'approccio del segnale analitico (ASA) ai dati relativi alle ore 13:00.

Un'anomalia ASA che mantiene posizione e ampiezza pressoché costanti nel tempo è interpretabile con maggiore confidenza come espressione di un contrasto strutturale o idrogeologico reale del sottosuolo, mentre un'anomalia ASA che compare, si sposta o scompare rapidamente nell'arco di poche decine di minuti è più verosimilmente legata a rumore, a effetti di deriva elettrodica o a fenomeni superficiali di breve durata (Rx25 e Rx24) come filtrazione/percolazione d'acqua.

A tal fine è stata condotta anche l'analisi *time-lapse* dell'ASA mostrata in Figura 30 che mostra come il baricentro dell'anomalia in corrispondenza di Rx6 si mantenga riconoscibile lungo l'intera finestra 11:00-16:30, indicando con maggiore confidenza un'origine strutturale reale.

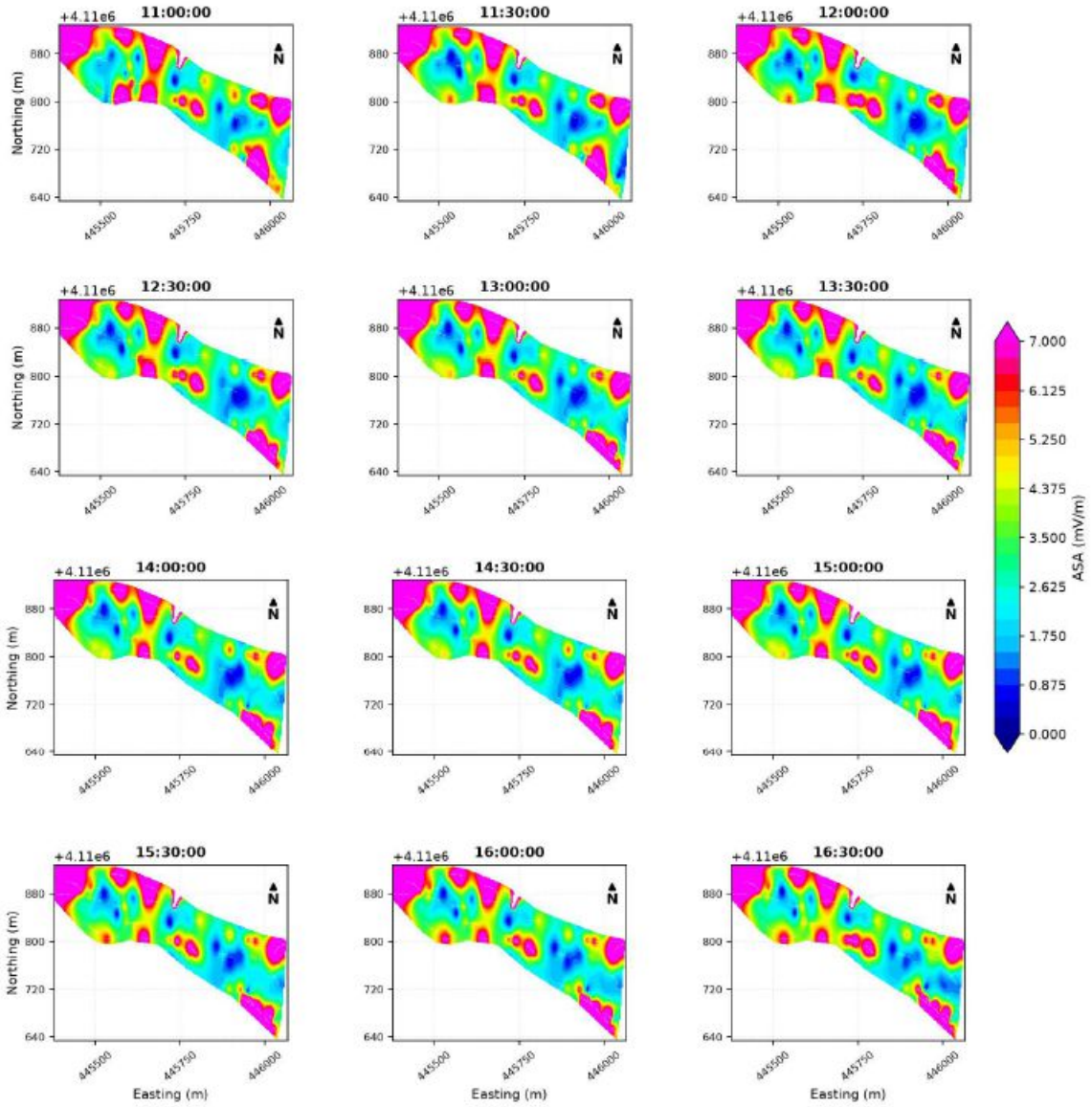

Figura 30 - Mappa *time-lapse* del segnale analitico (ASA), dalle ore 11:00 alle 16:30, con intervallo di rappresentazione di 30 min.

Infine, il vettore di campo elettrico risultante (Figura 31), calcolato sull'intera serie temporale (11:00-17:00, con campionamento a 10 min) e rappresentato con una scala cromatica temporale (frecce in azzurro chiaro per i tempi più tardivi, in blu scuro per i tempi più recenti/iniziali), fornisce un'indicazione indiretta della direzione locale del gradiente elettrocinetico in corrispondenza di ciascuna unità ricevente.

La rotazione o la stabilità di tali vettori nel tempo costituisce un ulteriore indicatore della natura dinamica o stazionaria del processo che genera il segnale in ciascun settore del versante.

La mappa dei vettori del campo elettrico risultante (Figura 31) evidenzia una marcata eterogeneità nel comportamento dinamico delle diverse zone: nel settore nord-occidentale (unità Rx15, Rx16, Rx23, Rx24 e Rx25) si osserva il maggiore addensamento di vettori di ampiezza normalizzata elevata, con orientazioni multiple e un'evidente rotazione della direzione nel corso della giornata, ben visibile nel passaggio dai toni azzurro chiaro (tempi più tardivi) ai toni blu scuro (tempi più recenti).

Questo comportamento è compatibile con un regime elettrocinetico dinamico e spazialmente complesso, atteso in prossimità di una zona di convergenza di più percorsi di flusso o di infiltrazione attiva, ed è spazialmente coerente con la presenza, nello stesso settore, del polo positivo SP e ASA individuato presso Rx6 (Figura 27 e Figura 29).

Un secondo addensamento di vettori intensi, anch'esso caratterizzato da direzioni variabili nel tempo, si osserva nel settore sud-orientale (Rx9, Rx18 e Rx26-Rx32), in corrispondenza della zona di maggiore variabilità già segnalata nelle mappe SP e ASA. Le unità del settore centro-orientale (Rx1-Rx5, Rx10, Rx13, Rx14 e Rx20) mostrano invece vettori di ampiezza più contenuta e orientazione più stabile nel tempo: in particolare, l'unità Rx20 presenta un vettore isolato con orientazione pressoché costante verso ovest, potenzialmente indicativo di un gradiente idraulico persistente e unidirezionale in quel punto del versante, diversamente dal comportamento più caotico osservato nei due addensamenti principali.

Questa lettura combinata, poli SP/ASA intensi e persistenti in coincidenza con i settori di massima densità e rotazione dei vettori, costituisce l'indicazione più coerente di un'origine elettrocinetica genuina per le anomalie del settore nord-occidentale.

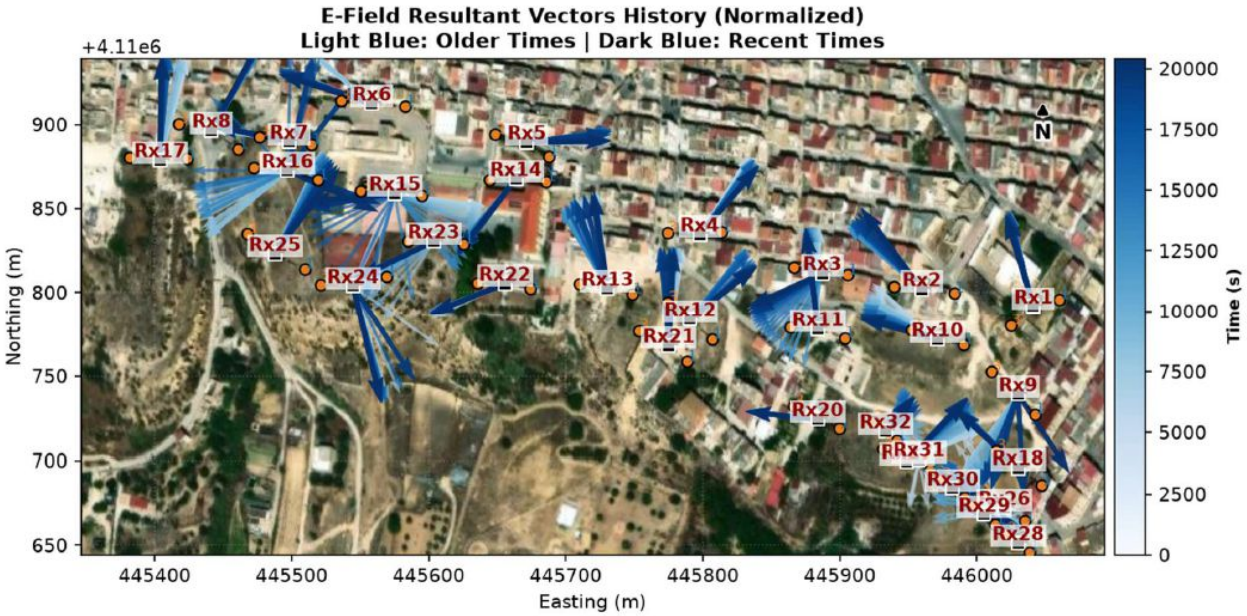

Figura 31 - Sovrapposizione dei vettori del campo elettrico risultante ad un'immagine da satellite dell'area indagata.

7.3 Analisi integrata dei dati geofisici (ERT, IP, SP e sismici)

L'integrazione tra i risultati SP e IP qui presentati e i risultati ERT e sismici presentati in Casagli e*t al*. (2026c) permette alcune considerazioni:

- è stata individuata una zona a bassa caricabilità nella porzione più orientale dell'area indagata, a partire dalla superficie e che si estende fino a più di 100 m di profondità nelle argille (Figura 22, Figura 23 e Figura 24). Valori così bassi di caricabilità potrebbero essere da attribuire a un alto contenuto in acqua, oppure a una diversa composizione mineralogica, oppure a una diversa compattazione del terreno, più elevata in questa area. È da escludere che tali valori bassi di caricabilità siano da attribuire alla presenza di acqua salata, in quanto la resistività in quell'area, pur essendo bassa, non presenta i valori tipici dell'acqua salata (cioè intorno a 1 Ωm);
- i settori dove il vettore di campo elettrico risultante (Figura 31) mostra un orientamento coerente e stabile nel tempo sono potenzialmente indicativi di gradienti idraulici persistenti, compatibili con le direzioni di scivolamento individuate dalle tecniche di telerilevamento ottico e radar (COSI-Corr, DInSAR/SqueeSAR) descritte in Casagli *et al*. (2026c), che indicano spostamenti fino a 50 m nel settore centrale con direzione sud-sud/ovest e fino a 12 m nel settore nord con direzione preferenziale verso ovest;
- l'assenza di segnale SP significativo, o la presenza di segnale instabile nel tempo, nei settori in cui il monitoraggio radar satellitare (COSMO-SkyMed, Sentinel-1) indica sostanziale stabilità pregressa (settore nord del centro abitato) è coerente con un quadro idrogeologico meno attivo in quelle aree.

In Figura 32 è mostrata una sovrapposizione tra alcune mappe di IP (a partire da una quota più superficiale, 300 m s.l.m., fino ad una quota più profonda, 200 m s.l.m.) e i vettori di campo elettrico risultante: tale sovrapposizione mostra un buon accordo tra le aree a bassa caricabilità (colori blu-viola) e il campo elettrico con un orientamento coerente e stabile nel tempo, rafforzando l'ipotesi che tali zone siano potenzialmente indicative di gradienti idraulici persistenti nel tempo.

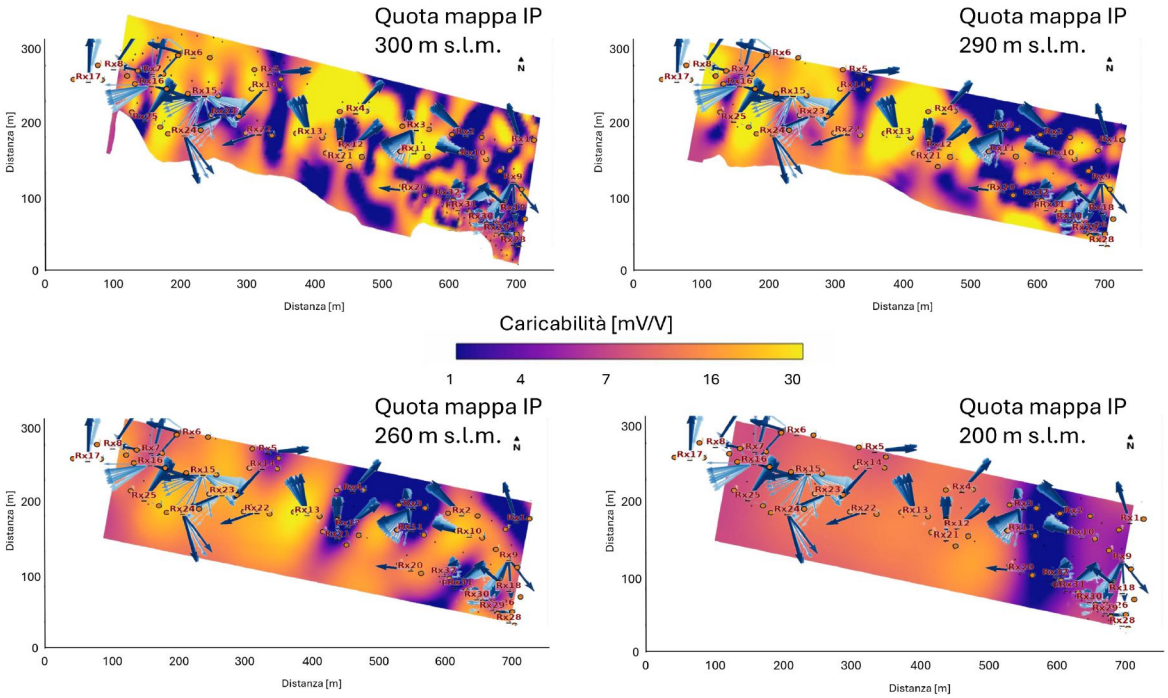

Figura 32 - Sovrapposizione delle mappe di IP a diverse quote con i vettori del campo elettrico risultante.

8 Redazione dei documenti di fattibilità delle alternative progettuali

Alla data del presente rapporto, la società INGEO s.r.l., incaricata della progettazione con il supporto di Rocksoil S.p.A., ha consegnato formalmente al Commissario straordinario per l'area di Niscemi i documenti di fattibilità delle alternative progettuali (DOCFAP) relativi a tutti e quattro gli ambiti di intervento:

- Torrente Benefizio (31 luglio 2026);
- Frana Sud (31 agosto 2026);
- Frana Centrale (30 settembre 2026);
- Frana Nord (21 ottobre 2026).

Nell'ambito delle attività svolte per il Commissario straordinario, il CPC-UNIFI ha fornito supporto tecnico-scientifico alle società incaricate della progettazione per la redazione dei DOCFAP, contribuendo al raccordo tra il quadro conoscitivo dei dissesti e la definizione delle alternative progettuali. Il contributo ha riguardato, in particolare, l'interpretazione dei dati disponibili e delle più recenti evidenze di monitoraggio, l'esame degli aspetti geologici, geomorfologici e geotecnici rilevanti per gli interventi e l'analisi comparativa delle possibili soluzioni, anche in relazione alla loro efficacia nella riduzione del rischio e alla loro coerenza con una strategia di gestione adattiva.

I quattro DOCFAP sono stati presentati a tutte le parti interessate nel corso della riunione tecnica tenutasi il 30 ottobre 2026 presso la Prefettura di Caltanissetta. Nella riunione sono stati illustrati il quadro dei dissesti, l'approccio di riduzione e gestione adattiva del rischio, le alternative esaminate per ciascun ambito e le soluzioni prescelte con i relativi quadri economici. È stata inoltre ribadita la necessità degli interventi di regimazione delle acque bianche e nere nel centro abitato, non compresi nei DOCFAP.

I documenti assumono come riferimento il quadro conoscitivo e metodologico delineato da Casagli *et al.* (2026c) per la caratterizzazione dei versanti interessati dai fenomeni franosi, la suddivisione e la definizione degli ambiti di intervento e l'attribuzione dei relativi livelli di priorità. Essi recepiscono inoltre le più recenti evidenze strumentali e le interpretazioni sull'evoluzione dei dissesti riportate nei successivi rapporti. In particolare, si fondano su quanto descritto in merito a:

- il modello interpretativo generale del dissesto;
- il ruolo svolto dal contrasto di permeabilità tra sabbie e argille e dalle circolazioni idriche profonde alimentate dall'abitato;
- la valutazione del rischio residuo e della fascia di interdizione;
- l'elenco degli interventi per ambito e le relative stime preliminari, pari complessivamente a circa 75,1 milioni di euro (di cui 1,55 milioni per il monitoraggio);
- il sistema di monitoraggio finalizzato agli interventi e la strategia di gestione adattiva del rischio.

Il raggruppamento in ambiti funzionali (Figura 33) è mirato a ridurre il numero di lotti e migliorare il coordinamento tra le opere; l'ambito del centro abitato (AB), relativo all'adeguamento delle reti fognaria e acquedottistica, non rientra in questa serie di elaborati.

Prima della loro finalizzazione, il CPC-UNIFI ha esaminato le bozze di ciascun DOCFAP e ha trasmesso a INGEO osservazioni scritte di dettaglio, distinguendo le questioni di merito dalle potenziali ambiguità presenti nei documenti.

Nel complesso, il CPC-UNIFI ha svolto una funzione di verifica tecnico-scientifica, volta ad accertare la coerenza delle scelte progettuali con il quadro geologico e con l'evoluzione dei fenomeni franosi documentata dal monitoraggio. L'attività di revisione ha inoltre contribuito a migliorare le stime economiche e i criteri di confronto tra le diverse alternative, nonché a consolidare l'impostazione adattiva e osservazionale degli interventi.

Per l'estensione del sistema franoso (oltre 80 milioni di m^3 su un fronte di circa 4,7 km), per la profondità delle superfici di scorrimento (fino a circa 80 m) e per il suo carattere policiclico e retrogressivo, nessuno dei DOCFAP assume come obiettivo l'arresto definitivo dei movimenti.

Coerentemente con Casagli *et al.* (2026c), la strategia adottata è graduale, integrata e adattiva: gli interventi agiscono sui fattori che controllano l'evoluzione dei dissesti (acque profonde, acque superficiali, erosione al piede) e sull'esposizione delle infrastrutture, mentre il rischio residuo viene progressivamente ridotto e gestito nel tempo.

Il monitoraggio non ha solo funzione di allerta, ma è parte integrante del processo progettuale secondo il metodo osservazionale: le opere saranno realizzate per fasi, dando priorità al controllo delle acque, e la loro configurazione (per esempio lunghezza, numero e orientamento dei dreni) sarà calibrata sulla risposta osservata dei versanti.

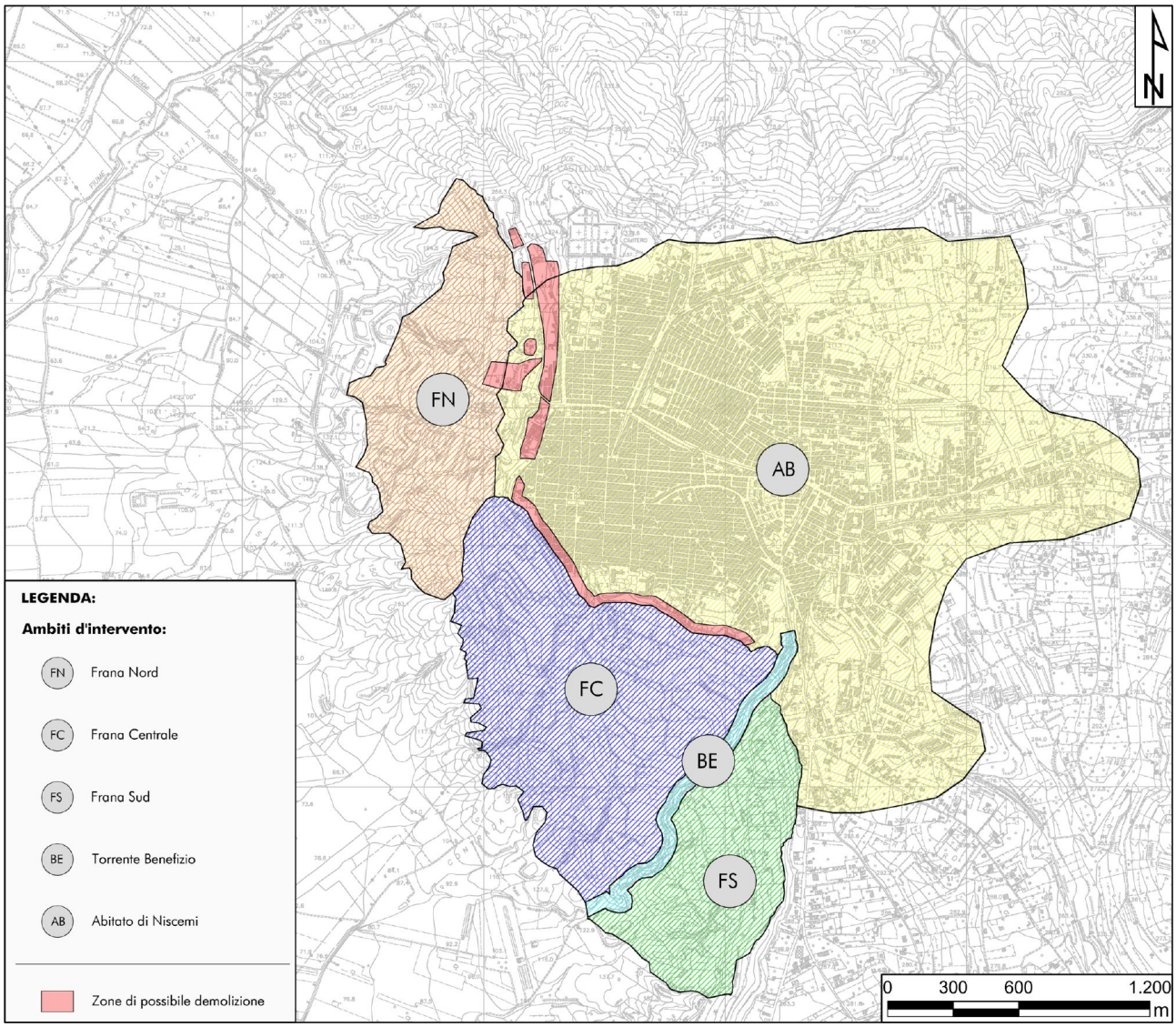

Figura 33 - Delimitazione degli ambiti di intervento: Frana Nord (FN), Frana Centrale (FC), Torrente Benefizio (BE), Frana Sud (FS) e centro abitato (AB).

8.1 Ambito Torrente Benefizio (BE)

Per il DOCFAP relativo agli interventi sul torrente Benefizio, l'alveo è stato suddiviso in sei zone omogenee. Le zone più critiche mostrano dislivelli in sponda sinistra dell'ordine di 30 m e sono direttamente connesse alle frane Sud e Centrale, di cui il torrente erode il piede. Sono state pertanto confrontate due alternative:

- **Alternativa 1**: opere strutturali, con briglie di grande e media altezza fondate su pali nei tratti più critici, integrate da opere flessibili (21,35 milioni di euro);
- **Alternativa 2**: esclusivamente opere flessibili in gabbioni e materassi tipo Reno, più economiche e adattabili alle deformazioni, ma con un'azione più limitata nei settori critici (10,15 milioni di euro).

La soluzione prescelta è una configurazione integrata, derivata dall'Alternativa 1 e alleggerita con opere flessibili dove le condizioni lo consentono: due briglie strutturali di grande altezza su pali di grande diametro nei punti più critici, briglie di media altezza in gabbioni, riempimento e riprofilatura del fondo, rivestimento con materassi tipo Reno, protezioni spondali e rinaturalizzazione delle sponde. Il quadro economico è di 20,05 milioni di euro, di cui 14,28 milioni per lavori, monitoraggio incluso.

L'indicazione di movimenti significativi persistenti sul corpo della Frana Sud (acquisita mediante interferometria radar satellitare) ha inoltre avuto un ruolo primario per:

- la definizione della tipologia e della priorità degli interventi, contribuendo a far abbandonare l'ipotesi iniziale di un ripristino condizionato della SP10 con opere di efficacia solo locale;
- l'individuazione di soluzioni più strutturate (briglie ad arco fondate su pali di grande diametro) e integrate con opere al piede lungo l'alveo, motivando lo stretto legame tra la regimazione idraulica del torrente, la stabilizzazione delle sue sponde e la stabilizzazione complessiva della Frana Sud.

8.2 Ambito Frana Sud (FS)

L'ambito di intervento Frana Sud è caratterizzato da una stretta interazione tra i dissesti e le infrastrutture: la SP10 è interessata da cedimenti diffusi, mentre la SP11, oggi non coinvolta, è esposta a un rischio non trascurabile. Oltre all'erosione al piede da parte del Benefizio, contribuiscono all'evoluzione della frana i rami torrentizi fortemente incisi (calanchi) più a sud.

Il DOCFAP sviluppa quattro alternative, derivanti dalla combinazione di due scelte: ripristinare la SP10 (alternative 1A/1B) o realizzare un nuovo tracciato di circa 2,3 km esterno alla frana (alternative 2A/2B), intervenendo o meno sui rami torrentizi incisi. I quadri economici sono pari a 14,5 milioni di euro (1A), 11 milioni di euro (1B), 28,5 milioni di euro (2A) e 25 milioni di euro (2B). Nella matrice multicriterio pesata, l'Alternativa 1A ottiene la valutazione più elevata (3,72); la 2A risulterebbe ottimale in termini di rischio residuo, ma richiede costi attualmente incompatibili con le risorse disponibili e tempi maggiori. La soluzione prescelta mantiene la SP10 con opere di sostegno locali (paratie di micropali, paratie tirantate e muri), cui si associano canne drenanti suborizzontali nei settori con maggiore concentrazione di lesioni, riprofilatura del reticolo minore con gabbioni e materassi, terre armate, sutura delle lesioni e briglie su pali nei torrenti incisi. Il quadro economico comprende 9,95 milioni di euro per lavori e monitoraggio.

Le osservazioni del CPC-UNIFI hanno riguardato soprattutto la completezza e la trasparenza della parte economica, oltreché il confronto tra le alternative progettuali. I punti principali recepiti sono:

- motivazione esplicita dell'aumento dei costi rispetto a quanto ipotizzato da Casagli *et al.* (2026c), richiamando l'evoluzione del movimento e i nuovi punti critici emersi lungo la SP10;
- adeguamento del piano di indagini per l'alternativa 2A;
- inserimento di voci relative agli espropri e trattazione del destino della vecchia SP10;
- motivazione esplicita della riduzione dei costi per gli interventi FS.3 e FS.4, in parte assorbiti dagli interventi sulla sponda sinistra del Benefizio;
- inserimento di una matrice multicriterio pesata, dalla quale l'alternativa 2A emerge come soluzione ottimale in termini di rischio residuo, ma subordinata a costi e tempi.

8.3 Ambito Frana Centrale (FC)

La Frana Centrale è la più rilevante per cedimenti verticali e spostamenti orizzontali: la scarpata principale ha uno sviluppo complessivo di quasi 1 300 m e dislivelli dell'ordine di 30 m, e sono ancora in corso fenomeni di retrogressione nei settori del plesso San Giuseppe e di via Ustica (Sezioni 5 e 6). Oltre all'erosione al piede, affrontata nell'ambito del Benefizio, ha un ruolo determinante la circolazione idrica profonda proveniente dall'abitato, che si sviluppa al contatto tra sabbie e argille in direzione del torrente.

Il DOCFAP confronta due configurazioni di drenaggio profondo, con opere complementari comuni sul corpo di frana: due gallerie drenanti di circa 700 m e 900 m con quattro imbocchi (Alternativa 1, costo 36,3 milioni

di euro), oppure un'unica galleria sostanzialmente rettilinea di circa 1 400 m, più a monte del coronamento, con due soli imbocchi (Alternativa 2, costo 32 milioni di euro). A parità di efficacia attesa sul rischio residuo, è stata prescelta l'Alternativa 2, più semplice da realizzare, con imbocchi lontani dai settori più instabili e meno onerosa. Alla galleria si associano la riprofilatura del reticolo minore e opere di regimazione delle acque superficiali, riprofilatura dei pendii, sutura delle lesioni e drenaggio diffuso sul corpo di frana; poiché la galleria attraversa il sottosuolo dell'abitato, sarà necessario un attento controllo delle deformazioni.

Le osservazioni del CPC-UNIFI sono state incentrate su aspetti relativi alla sicurezza delle gallerie drenanti, all'evoluzione della frana, alla circolazione idrica sotterranea e al monitoraggio. Nello specifico:

- si è suggerito di non quantificare la distanza delle gallerie drenanti dal coronamento della frana per l'alternativa 1, rinviando tale decisione alle eventuali fasi progettuali successive, le quali dovranno tenere adeguatamente conto dell'ulteriore evoluzione del dissesto e dei nuovi dati di monitoraggio;
- sono stati inseriti chiarimenti concettuali relativi alla configurazione dei dreni, esplicitando che la loro lunghezza e il loro assetto finale saranno tarati sullo spessore saturo riscontrato e sulla possibile interazione con gli edifici e i sottoservizi soprastanti;
- è stato chiarito che i due pozzi scavati nel Graben assumeranno anche le funzioni di emungimento inizialmente previste per l'intervento FC.3;
- è stato aggiunto un richiamo al sistema di monitoraggio previsto da Casagli *et al.* (2026c), il quale dovrà essere esplicitato nel progetto di fattibilità tecnico-economica e nel quadro economico;
- si è evidenziato che la stabilizzazione della scarpata nei pressi del plesso scolastico San Giuseppe (alternativa 1) è da considerarsi parte dei lavori delle gallerie.

8.4 Ambito Frana Nord (FN)

Il dissesto ha interrotto la SP12, che attraversa il corpo di frana per circa 1,3 km; i calanchi al piede, con la loro erosione continua, riducono il contrasto al piede del versante e costituiscono uno dei principali fattori di innesco del fenomeno. Tutte le alternative assumono che la SP12 non venga ripristinata nella sede attuale.

Il DOCFAP sviluppa quattro alternative, derivanti dalla combinazione di due scelte: realizzare una galleria drenante profonda di circa 1 500 m (alternative 1A/1B) oppure adeguare la viabilità alternativa alla SP12 già esistente, lunga circa 6,4 km, integrando le opere sul corpo di frana con un sistema diffuso di canne drenanti (alternative 2A/2B), realizzando o meno cinque briglie strutturali nei punti più critici dei calanchi. I quadri economici sono pari a 38 milioni di euro (1A), 30,4 milioni di euro (1B), 34 milioni di euro (2A) e 26,5 milioni di euro (2B). La soluzione prescelta (Alternativa 2A) unisce la mitigazione del dissesto (regimazione delle acque, riprofilature, drenaggi diffusi, condotta di grande diametro per le acque provenienti dall'abitato) e il contrasto dell'erosione al piede con le cinque briglie, alla riduzione permanente dell'esposizione, trasferendo la funzione della SP12 su una viabilità esterna al corpo di frana. La sistemazione completa del sistema dei calanchi, stimata in circa 28,6 milioni di euro di soli lavori, è rinviata a un eventuale programma futuro.

Le osservazioni del CPC-UNIFI hanno evidenziato, per la redazione della versione finale del documento, l'opportunità di:

- prevedere, in coerenza con l'ambito FC, la possibilità di integrare e/o sostituire il sistema di canne drenanti anche con la realizzazione di pozzi drenanti;
- subordinare agli esiti del monitoraggio l'apertura di un tracciato alternativo alla SP12;
- motivare nel dettaglio, soprattutto mediante considerazioni di carattere stratigrafico, idrogeologico e di deformazione dei versanti, la scelta di non perseguire una soluzione incentrata sullo scavo di una galleria drenante, la quale sarebbe stata coerente con l'ambito di intervento FC.

8.5 Sintesi dei quadri economici

La Figura 34 confronta i quadri economici delle soluzioni prescelte (comprensive delle quote per il monitoraggio) con le stime preliminari di Casagli *et al.* (2026c). L'incremento complessivo dei costi deriva dal

maggiore livello di approfondimento dei DOCFAP e, per la Frana Nord, dalla scelta di adeguare la viabilità alternativa alla SP12; in ogni caso, tali stime dovranno essere affinate nelle successive fasi progettuali.

Gli interventi di regimazione delle acque bianche e nere nel centro abitato, la cui urgenza era già stata segnalata in Casagli *et al.* (2026c), non rientrano nella presente serie di DOCFAP, ma restano indispensabili: le gallerie e i drenaggi intercettano e allontanano le acque già presenti nel sottosuolo, mentre le reti urbane devono limitarne gli apporti incontrollati, che alimentano le circolazioni profonde dirette verso i versanti instabili. La loro imprescindibilità è stata confermata dalle riattivazioni dell'estate 2026, con scarichi fognari rinvenuti nella nicchia di arretramento. Tali interventi dovranno essere programmati e strettamente coordinati con quelli dei DOCFAP.

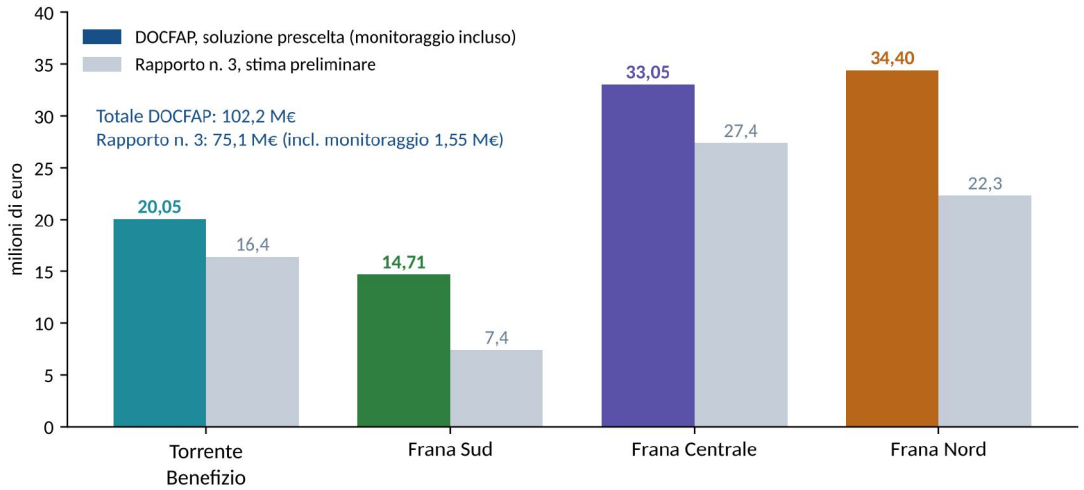

Figura 34 - Quadri economici delle soluzioni prescelte a confronto con le stime preliminari in Casagli *et al.* (2026c).

9 Conclusioni

L'aggiornamento integra i dati interferometrici Sentinel-1 (fino al 24 ottobre 2026), le misure GNSS (fino al 5 novembre 2026), i rilievi topografici da drone e le indagini geofisiche. Esso conferma che la maggior parte del centro abitato non presenta deformazioni significative. I segnali di movimento si concentrano nella porzione sud-orientale.

San Giuseppe - via Ustica. È l'area di maggiore attenzione. La stazione GNSS NSGP, a monte della fessura antistante il plesso scolastico, registra uno spostamento verso sud di circa 7 cm, un abbassamento di entità comparabile e una componente verso est di 1,7 cm. Il movimento è in accelerazione da metà settembre. I dati interferometrici indicano invece valori di 2-2,5 cm in stabilizzazione, perché i punti di misura cadono sulle strutture esterne al settore più attivo. Per quest'area il dato GNSS è quindi il riferimento più rappresentativo. Il quadro è compatibile con una riattivazione localizzata della Frana Centrale, potenzialmente legata a superfici di scivolamento profonde. Il confronto tra i rilievi topografici non mostra variazioni nel Graben né più a valle: la riattivazione, al momento, non coinvolge l'intero corpo di frana.

Via Gorizia - SP10 e tratto sud della SP10 (Frana Sud). Entrambi i settori mostrano spostamenti di 1-2 cm con tendenza alla stabilizzazione. In via Gorizia la persistenza del segnale va verificata con le prossime acquisizioni e con sopralluoghi. Sulla Frana Sud il dato è meno robusto per la scarsa densità di punti di misura, e i rilievi topografici non rilevano variazioni significative. Il settore resta comunque da tenere sotto controllo.

Parcheggio del Cimitero. Le fessurazioni nel parcheggio a est del cimitero, segnalate dalla Regione Siciliana il 7 novembre, sono preesistenti (visibili già nel 2021) e non legate all'attività delle frane.

Torrente Benefizio. I rilievi documentano un'erosione marcata dell'alveo: abbassamenti del fondo oltre 5 m e circa 5000 m³ di materiale asportato, a fronte di 1000 m³ depositati. Il dato conferma il ruolo dell'erosione al piede tra i principali fattori predisponenti e sostiene la priorità degli interventi previsti in questo ambito.

Geofisica. Nel settore orientale dell'area indagata le indagini individuano una zona a bassa caricabilità che si estende oltre 100 m di profondità. In quella zona i vettori del campo elettrico sono stabili nel tempo e indicano gradienti idraulici persistenti. Pur qualitative, queste evidenze sono utili per ubicare perforazioni e piezometri e per orientare i drenaggi profondi.

DOCFAP. I documenti dei quattro ambiti sono stati consegnati al Commissario straordinario e presentati il 30 ottobre 2026. Le osservazioni del CPC-UNIFI hanno riguardato tre aspetti: la coerenza delle soluzioni con il quadro geologico e con il monitoraggio, la trasparenza delle stime economiche e dei criteri di scelta, e l'impostazione osservazionale degli interventi. L'aumento dei costi rispetto alle stime preliminari dovrà essere verificato nelle successive fasi progettuali. Vanno programmati, in coordinamento con i DOCFAP, anche gli interventi sulle reti di acque bianche e nere del centro abitato.

Fascia di interdizione. Non si ravvisa in questa fase la necessità di modificarla. Le deformazioni di San Giuseppe - via Ustica vi ricadono interamente, mentre quelle di via Gorizia, solo in parte esterne, sono contenute e in stabilizzazione. L'area di possibile espansione della Frana Sud resta interdetta. La fascia andrà rivalutata con tempestività in tre casi: un'ulteriore accelerazione della stazione NSGP, la comparsa di nuove fessure a monte della scarpata o piogge intense. Una sua riduzione è invece prematura: andrà valutata quando saranno definite le opere di mitigazione, che potrebbero interferire con gli edifici interni alla fascia.

Priorità operative, da attuare prima della stagione piovosa:

- mantenere in efficienza le opere provvisionali presso il plesso San Giuseppe, verificandole dopo ogni evento piovoso significativo, e controllare il ruscellamento superficiale;
- intervenire con urgenza sui recapiti fognari e delle acque bianche nel settore di scarpata;
- installare strumentazione in foro (pressioni interstiziali e spostamenti profondi) tra San Giuseppe e via Ustica, integrandola se possibile con nuovi sensori GNSS;
- acquisire i risultati dei sondaggi del DRPC presso la SP11 e verificare il recupero dei due sondaggi individuati a San Giuseppe;
- proseguire il monitoraggio integrato e i sopralluoghi, intensificandoli in caso di piogge significative.

Il quadro conferma la validità della strategia di mitigazione basata su drenaggio profondo, regimazione delle acque, stabilizzazione dei versanti e monitoraggio. Le soluzioni dei DOCFAP andranno calibrate progressivamente, secondo il metodo osservazionale, sui nuovi dati geognostici e di monitoraggio.

Bibliografia

Barde-Cabusson S., Finizola A., Grobbe N., 2021. *A practical approach for self-potential data acquisition, processing, and visualization*. Interpretation, 9(1), T123-T143.

Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., 2002. *A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms*. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 40(11), 2375-2383.

Casagli N. *et al.* (2026a). *Le frane di Niscemi del gennaio 2026.* Rapporto n. 1 del 26/02/2026.

Casagli N. *et al.* (2026b). *Le frane di Niscemi del gennaio 2026.* Rapporto n. 2 del 09/03/2026.

Casagli N. *et al.* (2026c). *Le frane di Niscemi del gennaio 2026. Monitoraggio, verifica del rischio residuo e criteri di intervento per la riduzione del rischio*. Rapporto n. 3 del 20/04/2026.

Casagli N. *et al.* (2026d). Le *frane di Niscemi del gennaio 2026. Valutazione del rischio residuo nel centro abitato*. Rapporto di aggiornamento del 05/06/2026.

Casagli N. *et al.* (2026e). *Le frane di Niscemi del gennaio 2026. Aggiornamento della valutazione del rischio residuo nei pressi del plesso scolastico San Giuseppe a seguito dell'evento pluviometrico del 1° luglio 2026.* Rapporto di aggiornamento del 04/08/2026.

Casagli N. *et al.* (2026f). *Le frane di Niscemi del gennaio 2026. Monitoraggio delle deformazioni nel centro abitato e valutazione del rischio residuo nei pressi del plesso scolastico San Giuseppe e di via Ustica.* Rapporto di aggiornamento del 17/09/2026.

Casagli N. *et al.* (2026g). *Le frane di Niscemi del gennaio 2026. Supporto tecnico-scientifico agli interventi di prevenzione strutturale e di riduzione del rischio idrogeologico nel territorio di Niscemi.* Rapporto di aggiornamento del 14/10/2026.

Castiglione A., Liguori V., Umiltà G., Villari L.C., 2000. La frana di Niscemi del 12 ottobre 1997. *Risultati delle indagini e delle misure, studio geologico e geotecnico, interpretazione del dissesto, criteri d'intervento*. Relazione della Commissione Tecnico Scientifica nominata con ordinanza n. 2703 del 29/10/97. 68 pp. + allegati.

Casu F., Elefante S., Imperatore P., Zinno I., Manunta M., De Luca C., Lanari R., 2014. *SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(8), 3285-3296.

De Luca C., Casu F., Manunta M., Onorato G., Lanari R., 2022, July. *On the analysis of the DInSAR time series retrieved through the P-SBAS approach: a focus on possible bias*. In EUSAR 2022; 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, VDE, 1-4.

Jouniaux L., Maineult A., Naudet V., Pessel M., Sailhac P., 2009. *Review of self-potential methods in hydrogeophysics*. Comptes Rendus Geoscience, 341(10-11), 928-936.

Lanari R., Bonano M., Casu F., De Luca C., Manunta M., Manzo M., Onorato G., Zinno I., 2020. *Automatic generation of Sentinel-1 continental scale DInSAR deformation time series through an extended P-SBAS processing pipeline in a cloud computing environment*. Remote Sensing, 12(18), 2961.

Manunta M., De Luca C., Zinno I., Casu F., Manzo M., Bonano M., Fusco A., Pepe A., Onorato G., Berardino P., De Martino P., 2019. *The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 57(9), 6259-6281.

Revil A., Jardani A., 2013. *The Self-Potential Method: Theory and Applications in Environmental Geosciences*. Cambridge University Press.

Sill W.R., 1983. *Self-potential modeling from primary flows*. Geophysics, 48(1), 76-86.

Souza de Araujo O., Butler S., Picotti S., Francese R.G., Mendonca C.A., Fischanger F., Giorgi M., 2024. *Non-conventional arrays for self-potential surveys*. Geophysical Journal International, 239(3), 1833-1847.

Souza de Araujo O., Francese R.G., Picotti S., Fischanger F., Bratus A., Giorgi M., 2025. *Self-potential signal analysis to recognize sources of primary anomaly in a landslide: a novel approach*. Journal of Applied Geophysics, 242, 105912.

Souza de Araujo O., Francese R.G., Picotti S., Bratus A., Tessarollo A., Giorgi M., 2026. *Distributed Self-Potential Acquisition for Detecting Seepage in River Embankments*. Geophysical Prospecting, 74, e70166.