



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Centro per la
Protezione Civile

Le frane di Niscemi del gennaio 2026

Rapporto n.1



Firenze, 26 febbraio 2026

Responsabile del progetto

Prof. Nicola CASAGLI

Presidente del Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze

Professore ordinario di Geologia Applicata - Università degli Studi di Firenze

Via G. La Pira n.4

50121 FIRENZE (Italy)

Tel: 055 2757523

Email: nicola.casagli@unifi.it

Gruppo di lavoro

Prof.ssa Silvia BIANCHINI

Prof. Giovanni GIGLI

Prof.ssa Veronica PAZZI

Prof. Federico RASPINI

Dott. Francesco BECATTINI

Dott. Tommaso BENI

Dott. Tommaso CARLÀ

Dott. Pierluigi CONFUORTO

Dott. Matteo DEL SOLDATO

Dott. Gabriele FIBBI

Dott.ssa Agnese INNOCENTI

Dott.ssa Camilla MEDICI

Dott.ssa Olga NARDINI

Dott. Massimiliano NOCENTINI

Dott.ssa Teresa NOLESINI

Dott. Aldo PIOMBINO

Dott. Francesco POGGI

TAVOLA DEI CONTENUTI

1	INTRODUZIONE	5
2	INQUADRAMENTO DELL'AREA	7
2.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	7
2.2	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	10
3	LE FRANE DI NISCEMI	13
3.1	LA FRANA DEL 1790	13
3.2	LA FRANA DEL 1997	14
3.3	GLI EVENTI FRANOSI DEL 2026.....	16
3.3.1	Perimetrazione ed evoluzione.....	16
3.3.2	Meccanismo di movimento.....	23
3.3.3	Morfometria.....	25
3.4	CAUSE PREDISponentI E DI INNESCO	25
3.4.1	Assetto litologico e contrasto di permeabilità e di competenza.....	25
3.4.2	Processi erosivi	26
3.4.3	Precipitazioni	27
3.4.4	Sismicità	28
3.4.5	Presenza di litotipi evaporitici	28
3.4.6	Controllo tettonico.....	28
3.4.7	Concomitanza di cause.....	29
4	ANALISI DEI DATI SATELLITARI <i>RADAR</i> INTERFEROMETRICI	30
4.1	DESCRIZIONE DELLE TECNICHE IMPIEGATE	31
4.1.1	Interferometria <i>radar</i> satellitare differenziale - DInSAR	32
4.1.2	Elaborazione SBAS.....	32
4.1.3	Elaborazione SqueeSAR.....	34
4.1.4	Elaborazione <i>Pixel Offset Tracking</i>	37
4.1.5	Dynamic InSAR	37
4.2	SATELLITI UTILIZZATI.....	38
4.2.1	Sentinel-1	38
4.2.2	COSMO-SkyMed.....	39
4.2.3	SAOCOM.....	39
4.2.4	Capella <i>Space</i>	39
4.3	ANALISI PRE-EVENTO.....	40
4.3.1	Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SBAS	40
4.3.2	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SBAS.....	45
4.3.3	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SqueeSAR.....	50
4.4	ANALISI CO-EVENTO.....	55
4.4.1	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica DInSAR	56
4.4.2	COSMO-SkyMed e SAOCOM - elaborazione con tecnica <i>Pixel Offset Tracking</i>	57
4.5	ANALISI POST-EVENTO.....	58
4.5.1	Capella <i>Space</i> - elaborazione con tecnica DInSAR.....	59
4.5.2	Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SBAS	60
4.5.3	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SBAS.....	65
4.5.4	Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SqueeSAR	70
4.5.5	COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SqueeSAR.....	75
4.5.6	Sentinel-1 - elaborazione con tecnica Dynamic InSAR	80
5	ANALISI DEI DATI SATELLITARI OTTICI	82
5.1	TECNICA DI ELABORAZIONE COSI-CORR.....	82
5.2	SATELLITI <i>PLANETSCOPE</i>	83
5.3	ANALISI DEGLI SPOSTAMENTI TRA L'8 GENNAIO 2026 E IL 17 GENNAIO 2026	84
5.4	ANALISI DEGLI SPOSTAMENTI TRA IL 17 GENNAIO 2026 E IL 27 GENNAIO 2026	85
5.5	ANALISI DEGLI SPOSTAMENTI TRA IL 27 GENNAIO 2026 E IL 2 FEBBRAIO 2026	87
6	INDAGINI GEOFISICHE	88
6.1	TOMOGRAPFIE ELETTRICHE 3D CON <i>FULLWAVER</i>	88
6.1.1	Campagna di acquisizione.....	90
6.1.2	Risultati	92
6.2	INDAGINE SISMICA AD ALTA RISOLUZIONE IN ONDE P E SH	99
6.2.1	I metodi di sismica attiva.....	99

6.2.2	Campagna di acquisizione	100
6.2.3	Risultati: tomografia dei primi arrivi	105
6.2.4	Risultati: <i>imaging</i> a riflessione	108
6.2.5	Risultati: onde di superficie.....	111
6.3	INTEGRAZIONE INDAGINE GEOELETTRICA E SISMICA.....	116
7	CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOTECNICA	118
7.1	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	118
7.1.1	Stratigrafia.....	118
7.1.2	Proprietà geotecniche.....	118
7.1.3	Inclinometri	119
7.1.4	Piezometria	121
7.2	MODELLAZIONE NUMERICA	122
7.2.1	Modello con saturazione totale delle argille.....	124
7.2.2	Modello con saturazione parziale delle argille.....	126
8	VALUTAZIONE DEL RISCHIO RESIDUO NEL CENTRO ABITATO	131
8.1	MODELLO DI ARRETRAMENTO DELLA SCARPATA PRINCIPALE	131
8.2	SCENARI DI ARRETRAMENTO IN FUNZIONE DEL FATTORE DI SICUREZZA	132
8.3	MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI NELLA FASCIA DI INTERDIZIONE	139
9	INTERVENTI DI RIDUZIONE E MONITORAGGIO DEL RISCHIO RESIDUO	141
9.1	SCENARIO DI ARRETRAMENTO DELLA SCARPATA DI NEOFORMAZIONE	141
9.2	SCENARIO DI RIATTIVAZIONE DEL FENOMENO PROFONDO	142
9.3	STRATEGIE DI MITIGAZIONE NEL MEDIO PERIODO	142
9.4	STRATEGIE DI MITIGAZIONE NEL LUNGO PERIODO	143
9.5	GESTIONE ADATTIVA DEL RISCHIO	144
9.6	MONITORAGGIO E SISTEMI DI ALLERTA.....	144
10	CONCLUSIONI	146
11	BIBLIOGRAFIA	151

1 Introduzione

Nel mese di gennaio 2026 il territorio comunale di Niscemi, in provincia di Caltanissetta, è stato interessato da un fenomeno franoso complesso in rapida evoluzione. Una prima fase significativa è stata registrata tra il 15 e il 16 gennaio 2026 e una successiva riattivazione tra il 25 e il 26 gennaio 2026.

Durante la prima attivazione si è assistito al cedimento della Strada Provinciale SP12, mentre il secondo evento ha coinvolto il settore urbano del quartiere Sante Croci - Belvedere, l'area del torrente Benefizio e la Strada Provinciale SP10, portando all'evacuazione precauzionale di circa 500 persone.

A seguito dell'evento il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri (DPC) in accordo con la Regione Siciliana, ha attivato il Centro di Competenza dell'Università degli Studi di Firenze (di seguito CPC-UNIFI) in data 26 gennaio 2026 per un supporto tecnico finalizzato alle attività di monitoraggio del fronte di frana e alla verifica del rischio residuo per il territorio interessato.

In data 27 gennaio 2026 è stato eseguito un sopralluogo nel corso del quale è stato effettuato un volo a bordo dell'elicottero dei Vigili del Fuoco per avere una visione complessiva delle aree interessate dal dissesto. In seguito, il sopralluogo ha interessato la porzione di centro abitato delimitata come zona rossa che da ordinanza comunale comprende ad oggi una fascia di 150 m dalla scarpata di frana verso l'interno dell'abitato, per verificare sul campo l'eventuale presenza di fratture e segnali di instabilità a terra e sui manufatti.

Il totale complessivo degli evacuati in tutto il territorio coinvolto (cosiddetta "zona rossa" + aree limitrofe di sicurezza) ammonta a circa 1.500 persone.

L'area in esame è caratterizzata da una spiccata predisposizione ai fenomeni di instabilità gravitativa, legata alla combinazione di fattori geologici, geomorfologici, idrogeologici e strutturali. L'assetto litostratigrafico locale, contraddistinto dall'alternanza di livelli sabbioso-arenacei permeabili e di unità argilloso-marnose poco permeabili e a comportamento meccanico più debole, determina condizioni favorevoli all'innescio e alla riattivazione di scivolamenti profondi, specialmente in presenza di pressioni interstiziali elevate e di processi erosivi al piede dei versanti.

Tali caratteristiche, unite al controllo esercitato dalle strutture tettoniche connesse al fronte della Falda di Gela, configurano un contesto morfostrutturale complesso, nel quale i movimenti gravitativi assumono talora dimensioni rilevanti e carattere policiclico.

Al fine di caratterizzare la frana in oggetto, sono stati analizzati i prodotti dei rilievi topografici ad alta risoluzione acquisiti dal Comune di Niscemi e dalla Regione Siciliana nei giorni successivi all'evento. Ciò ha consentito di perimetrare il dissesto, di discriminare i versanti in frana in tre movimenti coalescenti e cinematicamente distinti e di definirne il meccanismo di movimento.

Per quanto riguarda l'attività di monitoraggio satellitare, sono stati analizzati dati pre-evento, co-evento e post-evento, che hanno consentito di misurare le deformazioni superficiali pregresse e in atto nel paese di Niscemi. Nello specifico, sono stati impiegati dati acquisiti dai satelliti Sentinel-1, COSMO-SkyMed, SAOCOM e Capella Space.

Le immagini SAR sono state elaborate mediante tecniche di interferometria differenziale (DInSAR) e multi-temporale, adottando gli approcci SqueeSAR e SBAS (*Small Baseline Subset*) per effettuare valutazioni differenti a seconda della fase di attività. È stata inoltre effettuata un'elaborazione basata sulle variazioni di ampiezza del segnale elettromagnetico chiamata *Pixel Offset Tracking*. Infine, sono state analizzate coppie di immagini ottiche ad alta risoluzione *PlanetScope* con lo scopo di caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale degli spostamenti durante e dopo le fasi principali dei dissesti.

Per la ricostruzione del modello 3D del sottosuolo sono state effettuate dall'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. Il CPC-UNIFI, presente sul posto con proprio personale, ha svolto funzioni di coordinamento delle attività, di collegamento tra l'OGS, il DPC e il DRPC Sicilia, partecipando inoltre a entrambe le campagne di acquisizione.

Sono stati raccolti e analizzati i dati geotecnici disponibili che hanno permesso di ricostruire la stratigrafia dell'area, definendo spessori, assetto giaciturale e parametri di resistenza al taglio dei principali litotipi, con particolare attenzione al contrasto tra sabbie e argille. I dati strumentali sono stati utilizzati per inquadrare le condizioni di deformazione e il regime delle pressioni interstiziali. Sulla base di tali informazioni è stata impostata una modellazione numerica bidimensionale alle differenze finite, finalizzata alla verifica del modello geologico e alla simulazione del comportamento meccanico del versante in differenti condizioni idrauliche.

Al fine di valutare il rischio residuo per il centro abitato è stato elaborato un modello speditivo di arretramento della scarpata principale che lambisce la porzione meridionale dell'abitato in località Sante Croci. Tale modello ha fornito un supporto tecnico alla definizione di una fascia di interdizione e rispetto più oggettiva rispetto a quella di 150 m individuata nella fase di prima emergenza, stabilita in assenza del supporto dei dati che sono stati successivamente acquisiti.

Il rapporto si conclude con la formulazione di indicazioni preliminari finalizzate alla definizione di una strategia organica di mitigazione e gestione del rischio residuo associato al complesso franoso. Tali indicazioni non hanno carattere progettuale, ma intendono fornire un quadro di riferimento tecnico-scientifico a supporto delle successive fasi di pianificazione, progettazione e programmazione degli interventi.

Le proposte riguardano, da un lato, le misure strutturali e non strutturali orientate alla riduzione dei fattori predisponenti e innescanti, con particolare attenzione al controllo delle infiltrazioni, alla regimazione delle acque superficiali e alla protezione dall'erosione al piede del versante; dall'altro, le azioni volte alla gestione del rischio residuo, attraverso la regolamentazione dell'uso del suolo, l'eventuale delocalizzazione degli elementi maggiormente esposti e la definizione di adeguate fasce di rispetto.

Particolare rilievo è attribuito al sistema di monitoraggio, inteso come strumento essenziale per la sorveglianza dell'evoluzione del fenomeno, la valutazione dell'efficacia degli interventi e l'eventuale attivazione di misure di protezione civile. In tale ambito si evidenzia la necessità di integrare osservazioni geomorfologiche, strumentazione in sito e tecniche di telerilevamento, al fine di garantire un controllo continuo e aggiornato delle condizioni di stabilità.

L'insieme delle indicazioni proposte si inserisce in un approccio di gestione adattiva del dissesto, fondato sull'aggiornamento progressivo delle conoscenze e sulla modulazione degli interventi in funzione dell'evoluzione del quadro morfologico e idrogeologico.

2 Inquadramento dell'area

2.1 Inquadramento geologico

L'abitato di Niscemi sorge su un pianoro di terreni sabbioso-arenacei che domina la Piana di Gela, a una quota media di circa 320-340 m s.l.m., caratterizzato da una morfologia prevalentemente tabulare. Il pianoro raggiunge la quota massima di circa 608 m verso nord-est, in direzione di Caltagirone (Figura 1), e degrada progressivamente da nord-est verso sud-ovest fino alla valle del Torrente Maroglio, affluente in sinistra idrografica del Fiume Gela, dove si registrano quote prossime ai 40 m s.l.m.

Dal punto di vista geologico-strutturale, l'area ricade nel settore sud-orientale dell'Avanfossa Gela-Catania, in prossimità del limite con l'altopiano Ibleo, ubicato verso sud-est, che costituisce il dominio di avampaese del sistema (Dipartimento Protezione Civile, 2000; Relazione Geologica della Regione Siciliana, 2019).

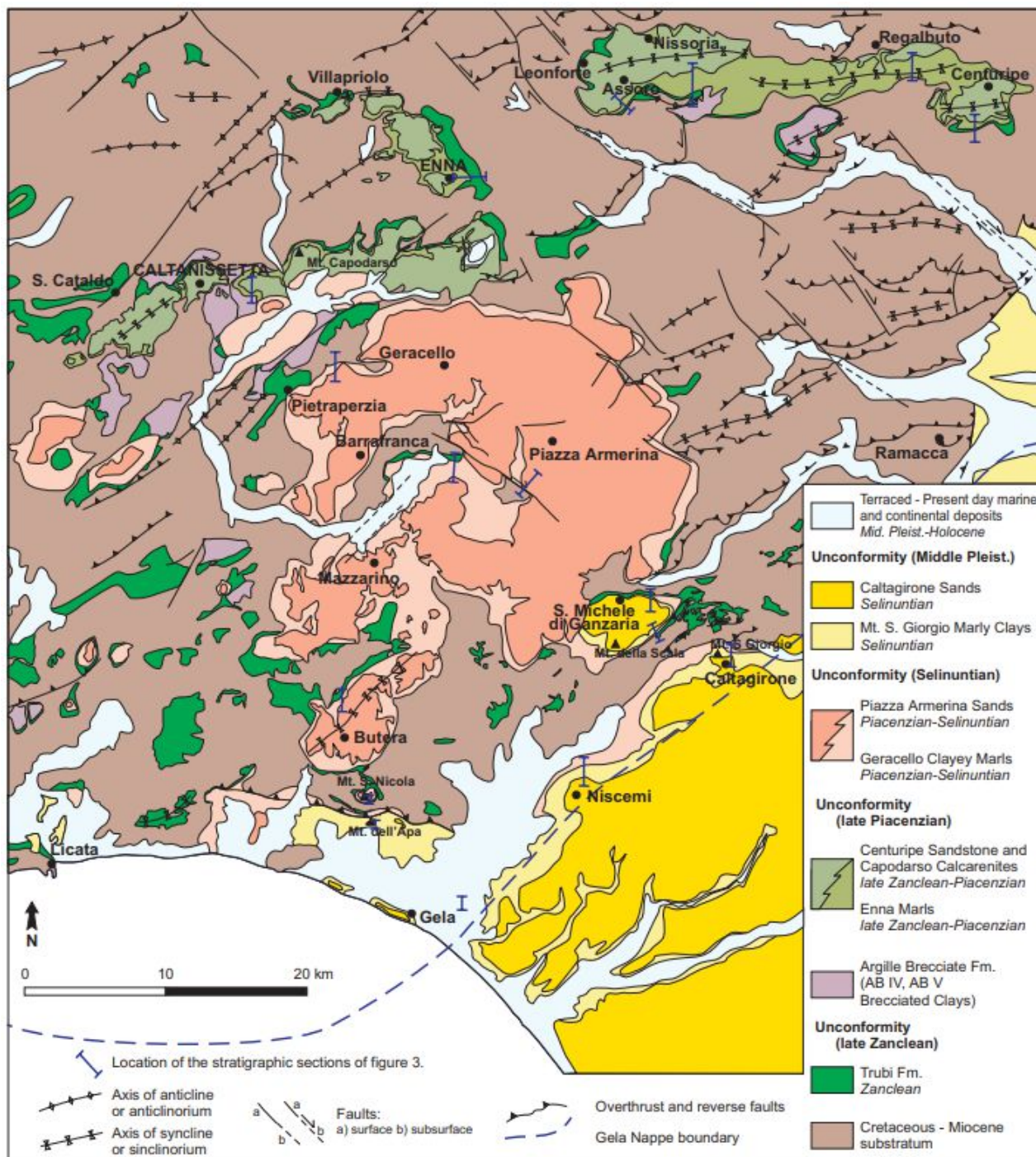


Figura 1 - Carta geologica schematica delle unità litostratigrafiche plio-pleistoceniche dell'area in esame (da Di Grande e Giandinoto, 2001)

I terreni su cui insiste l'abitato sono impostati secondo una monoclinale a giacitura sub-orizzontale, con lieve immersione verso sud e sud-est. Il margine dell'abitato è in gran parte delimitato da scarpate a pendenza variabile, localmente sub-verticali, alte fino ad alcune decine di metri, sviluppate con andamento prevalente nord-sud sul lato occidentale, est-ovest nel settore meridionale e nuovamente nord-sud in direzione di Gela, tra le Strade Provinciali SP10 e SP11.

Alla base delle scarpate si impostano pendii a bassa inclinazione (circa 10°), intensamente incisi da calanchi e solchi erosivi prodotti dal ruscellamento superficiale non regimato proveniente dal pianoro e dalle emergenze sorgive locali. L'assetto morfologico attuale è riconducibile ai sollevamenti tettonici regionali, cui è seguita un'intensa fase di modellamento subaereo responsabile delle profonde incisioni che caratterizzano il settore vallivo.

Dal punto di vista geologico, l'area è interessata dall'affioramento di una successione lito-stratigrafica compresa tra il Pliocene medio e il Pleistocene inferiore, che ricopre in discordanza angolare i depositi del Bacino Terziario di Caltanissetta riferibili alla Falda di Gela (Figura 2), non affioranti nell'area urbana.

A pochi chilometri a est dell'abitato si rinviene il settore orientale del sovrascorrimento della Falda di Gela sull'Avampese Ibleo, con andamento sud-ovest/nord-est (Figura 1), elemento strutturale che ha condizionato l'evoluzione morfologica regionale. Il fronte della Falda di Gela è caratterizzato da strutture compressive (sovrascorrimenti, pieghe, *pop-up*, *triangle zone*) che hanno condizionato la morfologia e la distribuzione dei sedimenti più recenti (Rizzo, 2004).

La serie stratigrafica locale, descritta dall'alto verso il basso, è così articolata (Dipartimento Protezione Civile, 2000; Relazione Geologica della Regione Siciliana, 2019):

- **depositi alluvionali recenti e attuali (Olocene):** sedimenti connessi all'attività deposizionale del Torrente Maroglio e dei corsi d'acqua tributari, affioranti lungo le aste torrentizie e localmente terrazzati; costituiti da ciottoli poligenici immersi in matrice sabbioso-limoso-argillosa, da scarsamente cementati a sciolti;
- **sabbie con livelli arenacei (Plio-Pleistocene):** formazione prevalente nel sottosuolo dell'abitato, costituita da sabbie medio-fini a componente prevalentemente quarzosa, subordinate litiche, mediamente addensate, di colore giallastro con locali tonalità bruno-rossastre superficiali dovute a fenomeni di ossidazione; si presentano ben stratificate e alternano a livelli arenacei e calcarenitici a cemento prevalentemente carbonatico (più raramente siliceo), talora fossiliferi, con giacitura sub-orizzontale e lieve immersione verso sud. Sono presenti lenti e livelli di limi sabbiosi talora argillosi, con spessori variabili da pochi decimetri fino a 9-10 m e discreta continuità laterale. Lo spessore complessivo della formazione sabbioso-arenacea, sulla base di dati di sondaggio ubicati a est e sud-est dell'abitato, varia tra 30 e 60 m;
- **limi sabbiosi e limi argillosi (Plio-Pleistocene):** sottostanti alla formazione sabbiosa, con spessore medio di circa 10 m, costituiti da limo con frazione argillosa variabile, con scheletro sabbioso più evidente nella parte sommitale; colore dal grigio-giallastro al grigio-azzurro con l'aumentare della profondità; tessitura compatta al taglio fresco e giacitura sub-orizzontale con lieve immersione verso sud;
- **argille marnose azzurre (Pliocene medio):** costituiscono il substrato impermeabile della successione; si tratta di un'alternanza di argille marnose e marne argillose grigio-azzurre, passanti verso l'alto a livelli più sabbiosi grigio-beige; presentano spessore di alcune centinaia di metri ed elevata continuità laterale. Poggiano trasgressivamente sulle formazioni del Bacino di Caltanissetta e non affiorano nell'area sommitale del pianoro, ma sono note attraverso i dati di sondaggio.

L'assetto idrogeologico è strettamente controllato dalle caratteristiche di permeabilità delle litologie. Le sabbie e i livelli arenacei presentano buona permeabilità primaria per porosità e consentono l'infiltrazione delle acque meteoriche fino al contatto con il substrato argilloso impermeabile, dove si imposta una falda acquifera di tipo freatico.

Ulteriori condizioni di accumulo idrico possono localmente determinarsi in corrispondenza di lenti limose intercalate nella formazione sabbioso-arenacea, dando luogo a modeste falde sospese. Le emergenze sorgive lungo le scarpate risultano generalmente correlate a tali contatti litologici.

I depositi sabbioso-arenacei, debolmente cementati, risultano facilmente aggredibili dalle acque superficiali; il ruscellamento concentrato e non regimato determina incisioni profonde, morfologie calanchive e un progressivo arretramento delle scarpate.

Sono evidenti fenomeni di instabilità localizzata e distacchi, in particolare alla base dei versanti, dove l'azione combinata dell'erosione superficiale e della circolazione idrica al contatto sabbie-argille favorisce condizioni di instabilità (Dipartimento Protezione Civile, 2000; Relazione Geologica della Regione Siciliana, 2019).

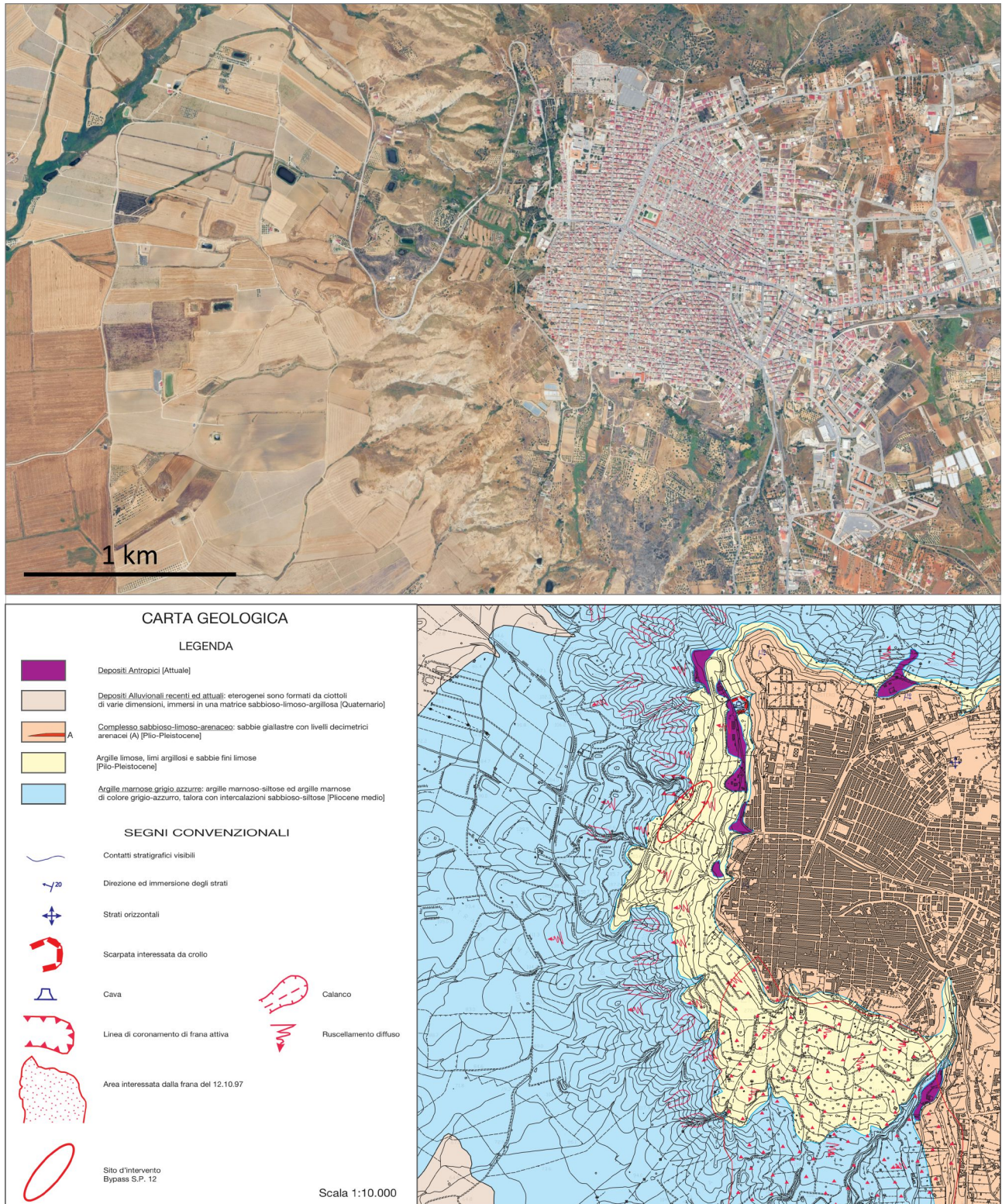


Figura 2 - In alto è riportata la vista satellitare ortogonale dell'area di Niscemi; in basso la carta geologica del settore occidentale dell'abitato di Niscemi (modificata da Relazione Geologica della Regione Siciliana, 2019).

2.2 Inquadramento geomorfologico

Il territorio di Niscemi si inserisce nel settore meridionale del Bacino di Caltanissetta, lungo il margine settentrionale della Piana di Gela, in un contesto morfostrutturale direttamente legato all'evoluzione compressiva plio-pleistocenica del fronte della Falda di Gela.

L'abitato occupa un rilievo a morfologia sub-tabulare (Figura 3), interpretabile come residuo di una superficie terrazzata marina successivamente sollevata e progressivamente incisa dall'erosione subaerea e dal reticolo idrografico.

Tale superficie sommitale, posta intorno ai 300 m s.l.m., è delimitata sui lati occidentale e meridionale da scarpate morfologiche nette, che segnano il passaggio a versanti meno acclivi degradanti in direzione della Piana di Gela, fino a raccordarsi con le incisioni del Torrente Maroglio e del Torrente Benefizio.

L'andamento planimetrico di questi orli di scarpata e la loro persistenza lungo direttrici preferenziali suggeriscono un controllo morfostrutturale riconducibile a discontinuità tettoniche profonde e a strutture compressive legate al fronte della Falda di Gela, come evidenziato negli studi sulla frana di Niscemi del 1997 (Rizzo, 2004).

Il modellamento dei versanti è fortemente condizionato dall'azione del reticolo idrografico a regime torrentizio (Figura 3), che incide con elevata energia stagionale le successioni argilloso-marnose e sabbioso-calcarenitiche plioceniche e pleistoceniche. Le incisioni principali presentano sezioni strette e versanti acclivi, con evidenti fenomeni di erosione di fondo e laterale; l'erosione regressiva che ne deriva determina un progressivo arretramento dei cigli del pianoro e un indebolimento del piede dei versanti, favorendo l'innescio di cinematismi gravitativi retrogressivi.

Nei settori in cui affiorano le litologie argillose, il paesaggio è caratterizzato da diffuse morfologie calanchive: fossi profondamente incisi, separati da creste sottili e acclivi, testimoniano una dinamica di denudazione superficiale continua, alimentata dall'alternanza stagionale di saturazione e disseccamento dei terreni fini. Tali forme, oltre a rappresentare un elemento distintivo del paesaggio locale, costituiscono indicatori di elevata erodibilità e di persistente instabilità superficiale. Tali forme del paesaggio sono riconoscibili nel settore meridionale e occidentale del paese, a valle della superficie terrazzata su cui sorge il centro del paese.

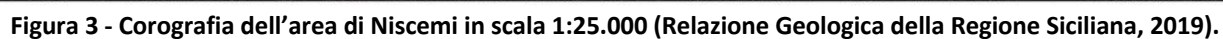
La sovrapposizione di livelli sabbiosi e calcarenitici relativamente più permeabili su argille marnose a comportamento meccanico più debole introduce ulteriori condizioni di predisposizione all'instabilità. Le differenze di permeabilità e resistenza al taglio favoriscono la concentrazione di flussi idrici lungo superfici di contatto e la possibile attivazione di scivolamenti gravitativi, sia superficiali sia più profondi.

In questo quadro si inseriscono i movimenti gravitativi di grande estensione che hanno interessato il versante meridionale dell'abitato, tra cui l'evento del marzo 1790 e quello dell'ottobre 1997, con superfici di scorrimento impostate entro le argille plioceniche e con un marcato controllo strutturale legato alla geometria del fronte della Falda di Gela (Rizzo, 2004).

Le indagini geofisiche e le ricostruzioni geologiche proposte in tali studi indicano come le deformazioni superficiali si colleghino a discontinuità poste a notevole profondità, confermando l'influenza dell'assetto morfostrutturale sull'evoluzione dei versanti.

A conferma di quanto sopra riportato, anche le cartografie ufficiali del PAI della Regione Siciliana e l'Inventario IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) di ISPRA segnalano lungo i margini occidentali e meridionali del pianoro la presenza di corpi di frana quiescenti e attivi, delineando un quadro di instabilità diffusa e policiclica coerente con le caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche dell'area (Figura 4, Figura 5).

Nel loro insieme, scarpate marginali, superfici terrazzate relitte, incisioni torrentizie, sistemi calanchivi e grandi corpi di frana costituiscono un sistema geomorfologico dinamico, in cui entra in gioco l'azione combinata di fattori strutturali, erosivi e idrogeologici, i quali contribuiscono a modellare i versanti.



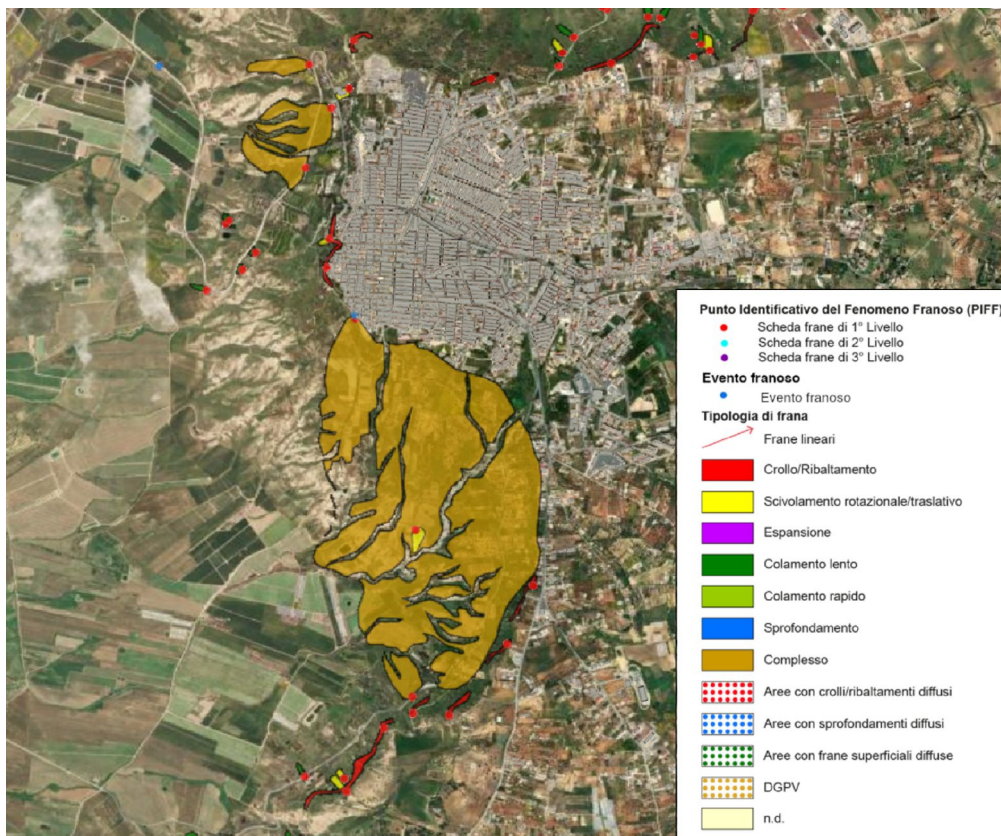


Figura 4 - Inventario dei fenomeni franosi IFFI.

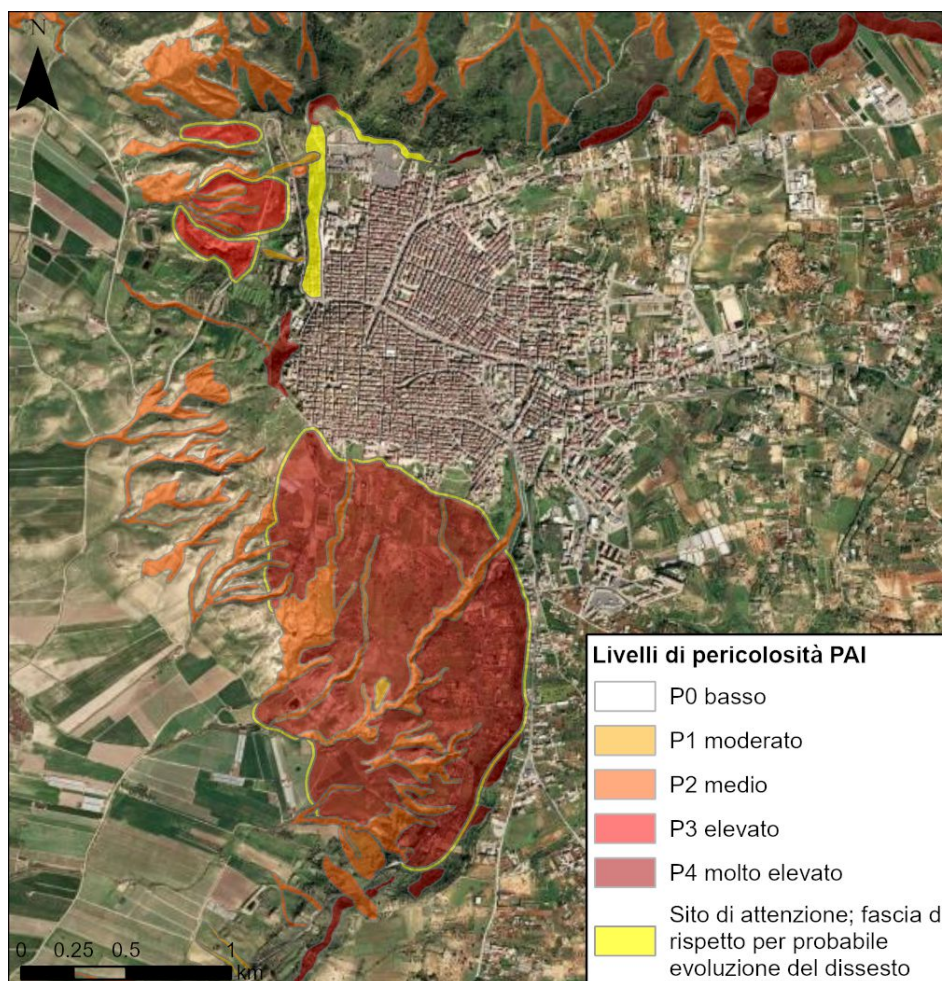


Figura 5 - Pericolosità da frana PAI (Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia).

3 Le frane di Niscemi

L'abitato di Niscemi è stato più volte interessato da eventi franosi e risulta storicamente esposto a dissesti idrogeologici; di seguito si richiamano i principali episodi documentati dalle cronache. Tra questi si segnalano due eventi di maggiore rilievo, verificatisi nel 1790 e nel 1997, precedenti a quello avvenuto nel gennaio 2026. Il Sistema Informativo sulle Catastrofi Geologiche (SICI) del GNDCl riporta inoltre ulteriori fenomeni, di minore entità, registrati nel centro abitato nel 1992, 1993, 1997 e 1998, che hanno causato danni limitati alle infrastrutture e alle abitazioni presenti.

Nel seguito, al fine di caratterizzare le variazioni morfologiche antecedenti e conseguenti agli eventi di frana del 2026, sono stati utilizzati i seguenti *dataset* topografici:

- modello digitale del terreno (DTM) a 1 m derivante da rilievo LiDAR aereo realizzato nel 2010 nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento (PST) del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE);
- DTM a 2 m derivante da rilievo LiDAR aereo realizzato nel 2013 dalla Regione Siciliana;
- DTM ricampionato a 1 m derivante dalla nuvola di punti ad alta risoluzione acquisita fra il 18 gennaio e il 2 febbraio 2026 dal Comune di Niscemi mediante rilievo aerofotogrammetrico da drone;
- modello digitale di superficie (DSM) ricampionato a 1 m derivante dalla nuvola di punti ad alta risoluzione acquisita fra il 3 e il 7 febbraio 2026 dalla Regione Siciliana mediante rilievo aerofotogrammetrico da drone.

3.1 La frana del 1790

La frana del 1790 si verificò il 19 marzo e determinò alterazioni morfologiche molto più evidenti rispetto a quelle osservate negli eventi successivi, fatta eccezione per quella del 2026. Fu accompagnata da manifestazioni termiche post-parossistiche e da fenomeni precursori che, nel loro insieme, vennero interpretati come espressione di processi endogeni profondi (Masaracchio, 1970; Maugeri, 1869).

L'episodio di dissesto fu ricordato come un evento di natura tellurica (Marsiano, 1981). Una dettagliata relazione redatta all'epoca descrisse con precisione gli effetti prodotti, distinguendoli in abbassamento del terreno, sollevamento del suolo e formazione di un nuovo "vulcano" (Nava, 1792).

Quest'ultimo consiste evidentemente in una manifestazione di vulcanismo sedimentario, ossia di un fenomeno geologico contraddistinto dalla risalita e dall'emissione in superficie di miscele di fango, acqua salmastra e gas, prevalentemente metano, che danno origine a piccoli apparati conici, comunemente definiti vulcani di fango, con altezze generalmente limitate a pochi metri. Tale fenomeno non è associato a processi magmatici, ma si sviluppa in contesti sedimentari ricchi in frazioni argillose e sostanza organica, dove l'elevata pressione dei fluidi interstiziali determina la mobilitazione e la migrazione verso l'alto del materiale lungo discontinuità e fratture del mezzo geologico.

Lo sviluppo del movimento avvenne da est verso ovest; pare abbia avuto origine lungo le Coste del Banco ed è stato caratterizzato da una lunga nicchia principale. L'area interessata, delimitata superiormente dalla linea curvilinea che da Sante Croci raggiunge Poggio del Trappeto, e da lì la Punta del Pizzo del Banchitello, dove in alcuni punti i terreni sprofondarono fino a circa 20 m, area che coincide perfettamente con quella coinvolta dalla frana del 1997.

Il fenomeno evolse lentamente fino al tardo pomeriggio del 19 marzo, quando il taglio lungo il versante non superava 1 m; la mattina del 20 marzo raggiunse i 2 m, mentre la fase parossistica si sviluppò tra il 19 e il 20 marzo. Fu stimato che, nella sola giornata del 20, sollevamenti e abbassamenti raggiunsero valori massimi dell'ordine di 20 m, con velocità comprese tra 4 e 6 m/h.

Questo evento viene annoverato nelle cronache come quello più ingente in termini di spostamenti e velocità, ma anche per i più marcati sollevamenti al piede. La durata complessiva dell'evento pare essere stata anche più lunga rispetto agli altri.

L'area che va dalla costa di Sante Croci al Poggio del Trappeto è stata affetta da spostamenti significativi anche nel 1776, quando si registrarono fratture nel terreno di circa 3 m.

In merito al meccanismo di franamento, si ipotizza una rottura di base impostata su superfici di scivolamento profonde, localizzate al di sotto del fondovalle. I due rilievi della contrada Gebbiazza, già interessati da precedenti fenomeni di instabilità, registrarono inizialmente abbassamenti di alcuni metri, seguiti da significativi sollevamenti che ne incrementarono l'altezza dai circa 25 m originari fino a circa 50 m, con evidente rotazione al piede del corpo di frana.

Anche i terreni limitrofi del Vallone, inizialmente posti a quota inferiore rispetto al Benefizio, furono interessati da marcati sollevamenti; le acque ivi presenti si sollevarono insieme al fondo alveo, generando vortici e determinando la formazione di un piccolo invaso temporaneo.

Tra i fenomeni premonitori, il giorno precedente l'evento franoso fu segnalato, e avvertito dalla popolazione di Niscemi, un profondo muggito sotterraneo. Considerata l'estensione dell'area coinvolta e l'assenza di evidenti manifestazioni superficiali, tale segnale potrebbe essere ricondotto a uno scorrimento profondo del corpo di frana.

Il 20 marzo, al termine della fase parossistica, dalle fratture apertesi nel terreno furono osservate emissioni di calore e fuoriuscite di vapore. Al piede della frana, in località Conciara, il 19 marzo si formò, secondo le cronache probabilmente legate alle credenze popolari, un piccolo vulcano di fango dal quale fuoriuscì un getto di circa 80 cm costituito da argille di colore piombo e fluidi cerulei scuri, caratterizzati da odore di bitume e zolfo. I materiali risultavano caldi e il fenomeno si esaurì nell'arco di circa due giorni. Fu inoltre registrata la temporanea scomparsa di gran parte delle sorgenti, protrattasi per circa tre giorni.

3.2 La frana del 1997

La frana del 12 ottobre 1997 interessò i versanti sud-est del paese di Niscemi, in destra e in sinistra idrografica al T. Benefizio, configurandosi come un unico movimento franoso di grandi dimensioni. Essa mobilizzò, con buona coincidenza geometrica, il corpo di frana preesistente del 1790 (Rizzo, 2004), provocando significativi danni alla viabilità provinciale, all'acquedotto, a scarichi fognari, alla linea elettrica, ad abitazioni rurali e manufatti vari, nonché a una parte del centro abitato (Castiglione *et al.*, 2000).

Secondo le testimonianze, il dissesto ebbe origine sul versante sinistro del T. Benefizio, dove si registravano le pendenze maggiori, propagandosi verso nord in direzione dell'abitato, che fu interessato per ultimo; l'evento ebbe durata di alcune ore. La massa coinvolta, fortemente asimmetrica, interessò due versanti tra loro ortogonali, accomunati da un unico movimento gravitativo esteso su una superficie di circa 2 km². La scarpata principale presentò uno sviluppo lineare di circa 2,5 km, sviluppandosi su un precedente ciglio di frana o poco più a valle di esso, con altezza inferiore a 3-4 m e valori massimi nel settore nord-ovest, cioè da località Poggio del Trappeto a località Banco (Toni *et al.*, 2004). Il fenomeno fu caratterizzato da una cinematica lenta e da un'entità moderata, con velocità massime stimate intorno a 1 m/h e spostamenti complessivi compresi tra 2 e 4 m.

La frana fu classificata come composta, con superficie di scivolamento sub-orizzontale alla base ed emersione sub-verticale in corrispondenza della scarpata principale. Gli spostamenti orizzontali determinarono la formazione di abbassamenti tipo *Graben* nella parte sommitale. Il movimento, di carattere regressivo, fu imputato all'azione erosiva del T. Benefizio (Castiglione *et al.*, 2000, 2000; Rizzo, 2004)

Il cinematismo dell'evento del 1997 si esprime attraverso un movimento traslativo verso sud, con un abbassamento massimo nel settore nord-est e manifestazioni di rottura gravitativa ai piedi dei versanti. Le dimensioni, la forma e la profondità del fenomeno suggerirono un rapporto diretto con la struttura geologica e tettonica dell'area.

Per valutare il ruolo delle precipitazioni nella riattivazione del fenomeno franoso, furono esaminati i dati pluviometrici giornalieri relativi all'ultimo secolo. L'analisi evidenziò che, in passato, si erano registrati numerosi eventi piovosi di intensità molto superiore rispetto a quelli immediatamente antecedenti alla frana.

Considerando l'assenza di terremoti significativi nello stesso periodo e tenendo conto che un corpo di frana di tali dimensioni non poteva essere modificato in maniera drastica da una singola precipitazione intensa, gli studi indicarono la presenza di un concorso di cause alla base della riattivazione. La frana si sviluppò, infatti, in assenza di un'evidente correlazione con fattori di innesco di particolare rilevanza e si manifestò al termine di un prolungato periodo siccitoso, a distanza di due o tre giorni da precipitazioni intense ma non eccezionali, pari a 71 mm registrati il 9 ottobre e 26 mm il 10 ottobre 1997 (Rizzo, 2004; Capilleri *et al.*, 2010).

La Commissione Tecnico Scientifica (Castiglione *et al.*, 2000) che studiò approfonditamente il fenomeno annovera tra le cause dell'evento del 12 ottobre *in primis* l'assetto geologico dell'area in esame, in secondo luogo, l'erosione torrentizia. Le profonde incisioni prodotte dal T. Benefizio, infatti, hanno reso cinematicamente possibili scivolamenti profondi. L'erosione è stata accelerata dall'immissione degli scarichi fognari e dalle acque bianche dell'abitato, che hanno aumentato significativamente la portata del torrente.

Si evidenzia inoltre come la rapidità dei processi erosivi nelle argille omogenee abbia determinato la generazione di pressioni interstiziali negative che, dissipandosi nel tempo, anche su intervalli prolungati, avrebbero comportato una progressiva riduzione del coefficiente di sicurezza fino al raggiungimento delle condizioni di rottura (Castiglione *et al.*, 2000).

È inoltre opportuno ricordare che la frana del 1997 rappresenta la riattivazione di un movimento gravitativo preesistente, già documentato nel 1790 (Figura 6).

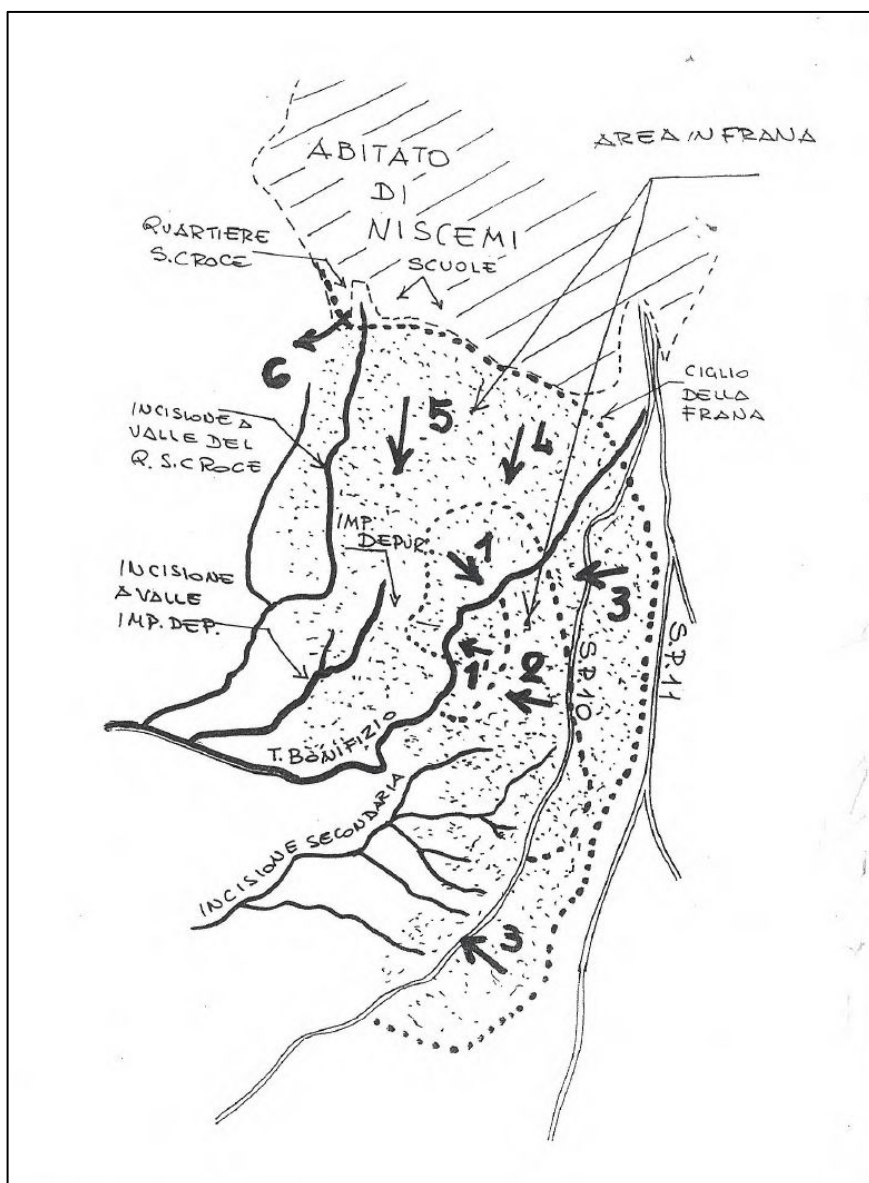


Figura 6 - Schema rappresentativo dell'evoluzione del fenomeno franoso del 12 ottobre 1997 tratto dalla relazione di Castiglione *et al.* (2000); i numeri indicano l'evoluzione del fenomeno franoso nel tempo.

3.3 Gli eventi franosi del 2026

3.3.1 Perimetrazione ed evoluzione

Gli eventi franosi del gennaio 2026 rappresentano la riattivazione e l'ampliamento di un sistema franoso profondo noto e storicamente documentato, che interessa i margini del terrazzo su cui sorge l'abitato.

Un primo evento si è verificato tra il 15 e 16 gennaio 2026 nel versante nord-occidentale. Ad esso è seguito l'episodio principale fra il 25 e il 26 gennaio nella parte centro-meridionale del versante che poi si è propagato rapidamente verso sud.

Tale successione di eventi si inserisce in un quadro di instabilità di lungo periodo, controllato dalla stratigrafia, dall'assetto idrogeologico e dai processi di erosione legati alle acque incanalate, configurando un sistema franoso articolato in più settori cinematicamente distinti che, nel loro insieme, costituiscono la riattivazione di movimenti pregressi.

Il fronte instabile attuale si sviluppa complessivamente per circa 4,7 km lungo il margine dell'abitato, coinvolgendo il settore Sante Croci - Belvedere, l'area del torrente Benefizio e i versanti compresi tra la SP10 e la SP12.

Le scarpate di distacco presentano altezze mediamente comprese tra 25-30 m, con valori massimi di oltre 40 m.

L'acquisizione di rilievi topografici da drone ad alta risoluzione da parte del Comune di Niscemi e della Regione Siciliana ha consentito, mediante confronto con dati ortofotografici e topografici pregressi (Figura 7), una caratterizzazione dei movimenti superficiali in termini di entità e direzione (Figura 8 e Figura 9).

Ciò ha altresì reso possibile la distinzione dell'area di frana in tre settori principali, coalescenti nel loro sviluppo complessivo, con una possibile propaggine di ulteriore espansione della frana sud (poligono tratteggiato).

- **Frana Nord:** interessata dalla prima fase parossistica del 15-16 gennaio, caratterizzata da spostamenti di oltre 12 m diretti prevalentemente verso ovest, guidata dall'erosione del reticolo idrografico minore; ha determinato il collasso della SP 12;
- **Frana Centrale:** rappresenta il corpo di frana principale coinvolto nell'evento del 25-26 gennaio, caratterizzata da spostamenti di oltre 50 m diretti prevalentemente verso sud-ovest, bordata a sud-est dal T. Benefizio in forte incisione; ha generato la grande scarpata che lambisce il margine urbano;
- **Frana Meridionale:** formatasi in rapida successione dopo la frana centrale nell'evento del 25-26 gennaio, separata dalla frana dal T. Benefizio, ha manifestato spostamenti di oltre 7 m in direzione W-SW, ha causato la parziale distruzione della SP10.

Nello specifico, i settori sono stati perimetrati in base alle evidenze ricavabili dai rilievi topografici (fratture, scarpate, etc.) e dalla mappa delle differenze di quota ricavata dal confronto fra modelli digitali del terreno pre- e post-evento (Figura 7).

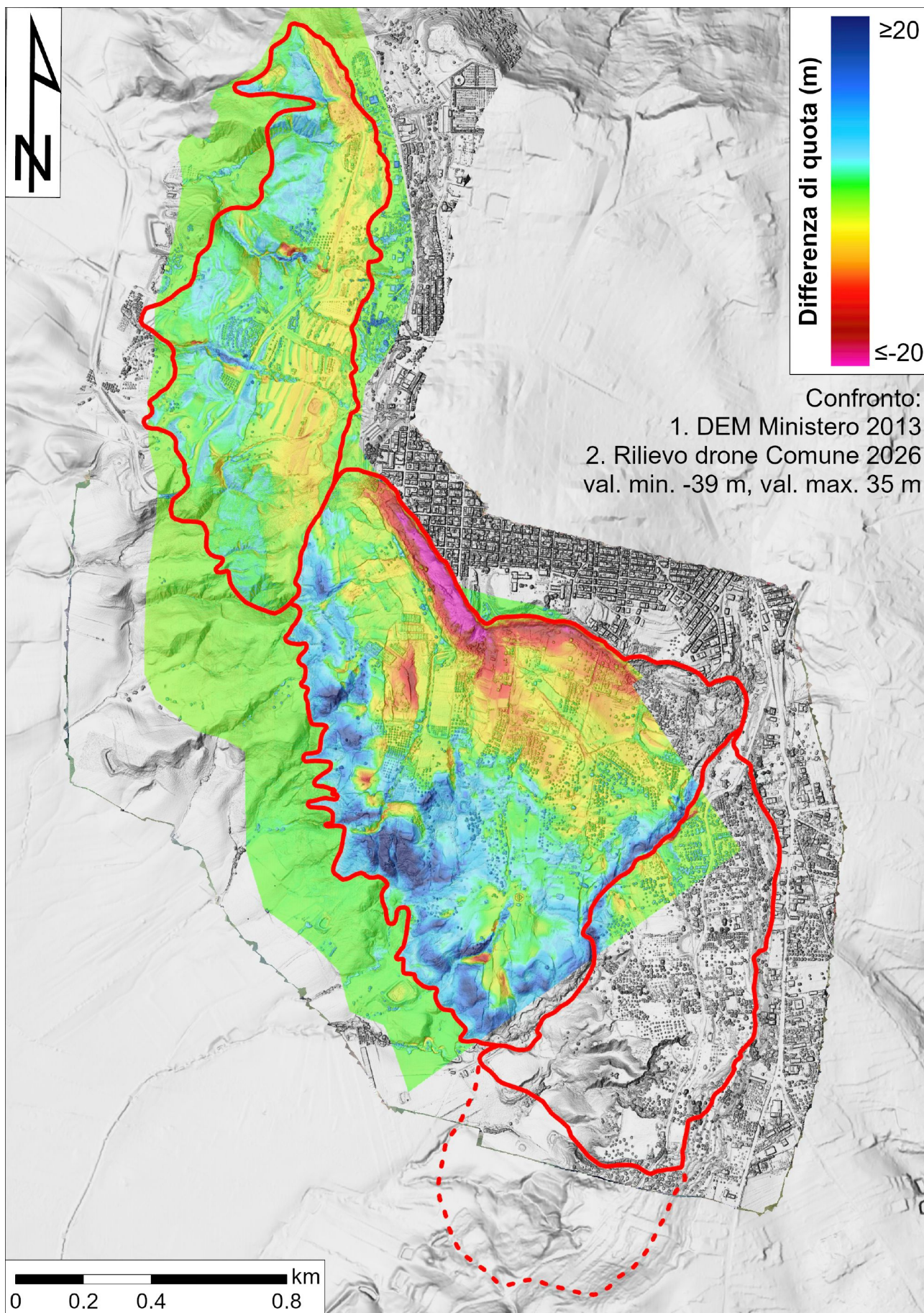


Figura 7 - Differenze di quota ricavati dal confronto del DTM 2013 (Ministero dell'Ambiente) con il DSM 2026 (Comune di Niscemi).

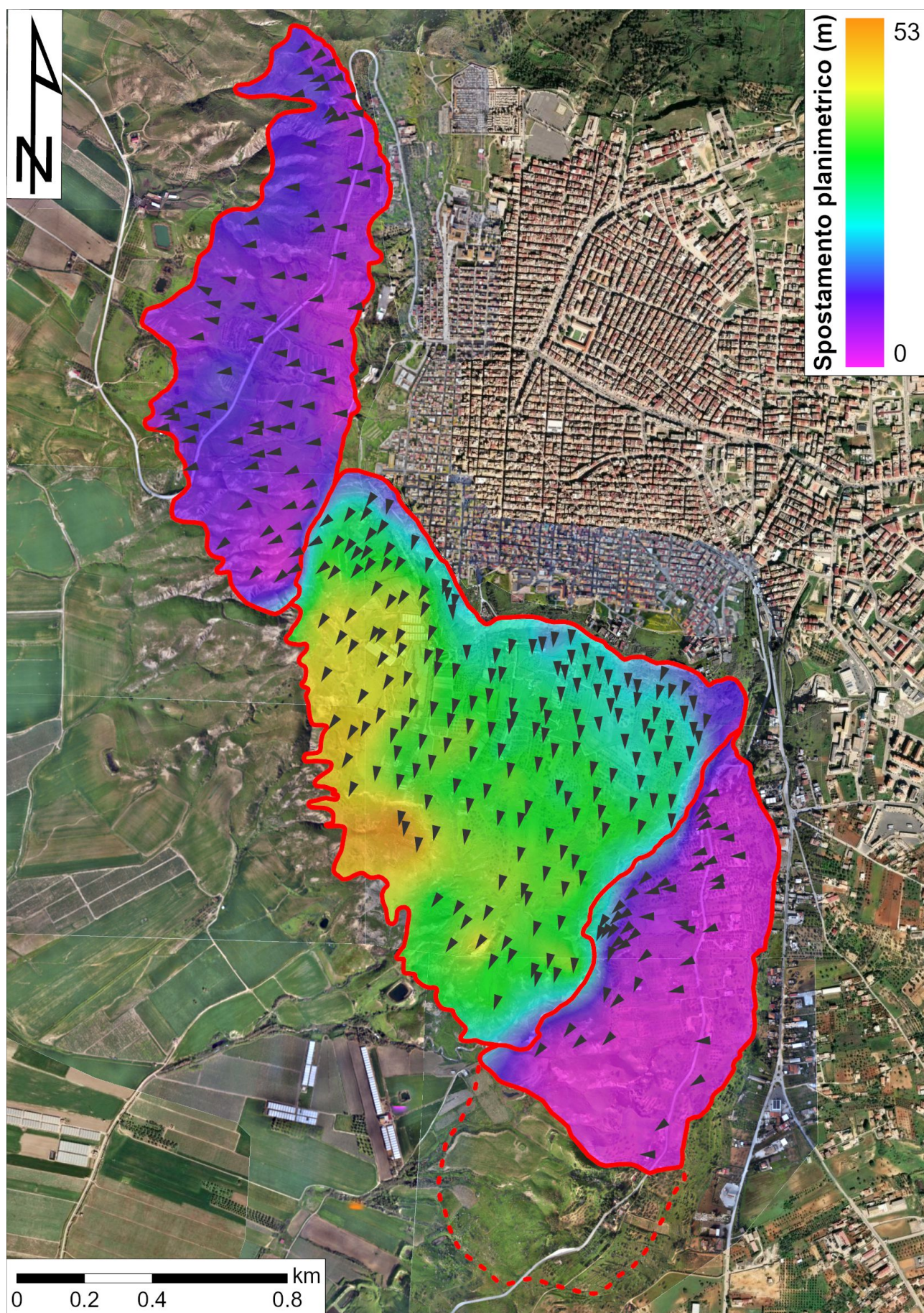


Figura 8 - Mappa degli spostamenti planimetrici ricavati dal confronto di dati ortofotografici e topografici pre- e post-evento.



Figura 9 - Suddivisione dell'area di frana in settori cinematicamente distinti.

Sono stati quindi individuati gli oggetti al suolo ben visibili sia in ortofoto pre-evento sia in ortofoto post-evento, determinandone approssimativamente lo spostamento (*shift*) planimetrico; queste informazioni puntuali sono state infine estese mediante interpolazione spaziale. Sebbene il margine di errore della procedura sia dell'ordine del metro, esso rimane comunque molto inferiore rispetto all'entità dei movimenti occorsi lungo la maggior parte dei versanti (specialmente nella frana centrale). A tal proposito, non è stata considerata nell'analisi l'estremità meridionale della frana sud (Figura 9), in quanto interessata da movimenti molto più ridotti e pertanto difficilmente percettibili dall'analisi dei rilievi topografici.

La Figura 10 e la Figura 11 mostrano come la frana centrale appaia cinematicamente svincolata, presentando spostamenti maggiori di quasi un ordine di grandezza e *azimut* di spostamento all'incirca ortogonali rispetto alle altre. Inoltre, si nota nuovamente come i limiti laterali e superiore della frana centrale siano all'incirca coincidenti con i lineamenti tettonici proposti da Rizzo (2004), facendo pertanto pensare che questi ultimi possano offrire delle superfici di svincolo preferenziale.

La mappa delle differenze di quota (Figura 11) denota una sostanziale equivalenza fra l'estensione delle zone in abbassamento e quella delle zone in innalzamento, suggerendo pertanto la prevalenza di movimenti traslativi pseudo-rigidi con sovrascorrimento al piede della superficie topografica originaria; quanto appena detto è ulteriormente supportato dalla Figura 12, la quale mette a confronto i profili pre- e post-evento lungo la sezione topografica utilizzata per la modellazione nella Figura 16 (longitudinale alla frana centrale).

La Figura 13 riporta infine la perimetrazione delle frane del 2026 di cui alla Figura 9 con sovrapposta la perimetrazione della frana del 1997 (Castiglione *et al.*, 2000) e la mappatura dei lineamenti gravitativi sul corpo di frana (*e.g.*, scarpate secondarie, fratture di taglio e trazione) realizzata sulla base del DSM post-frana della Regione Siciliana. A tal proposito, si sottolinea come sussista una forte concentrazione di lineamenti gravitativi nella porzione di versante compresa fra il margine nord-ovest della frana del 1997 e il confine tra le frane del 16 e 25 gennaio 2026.

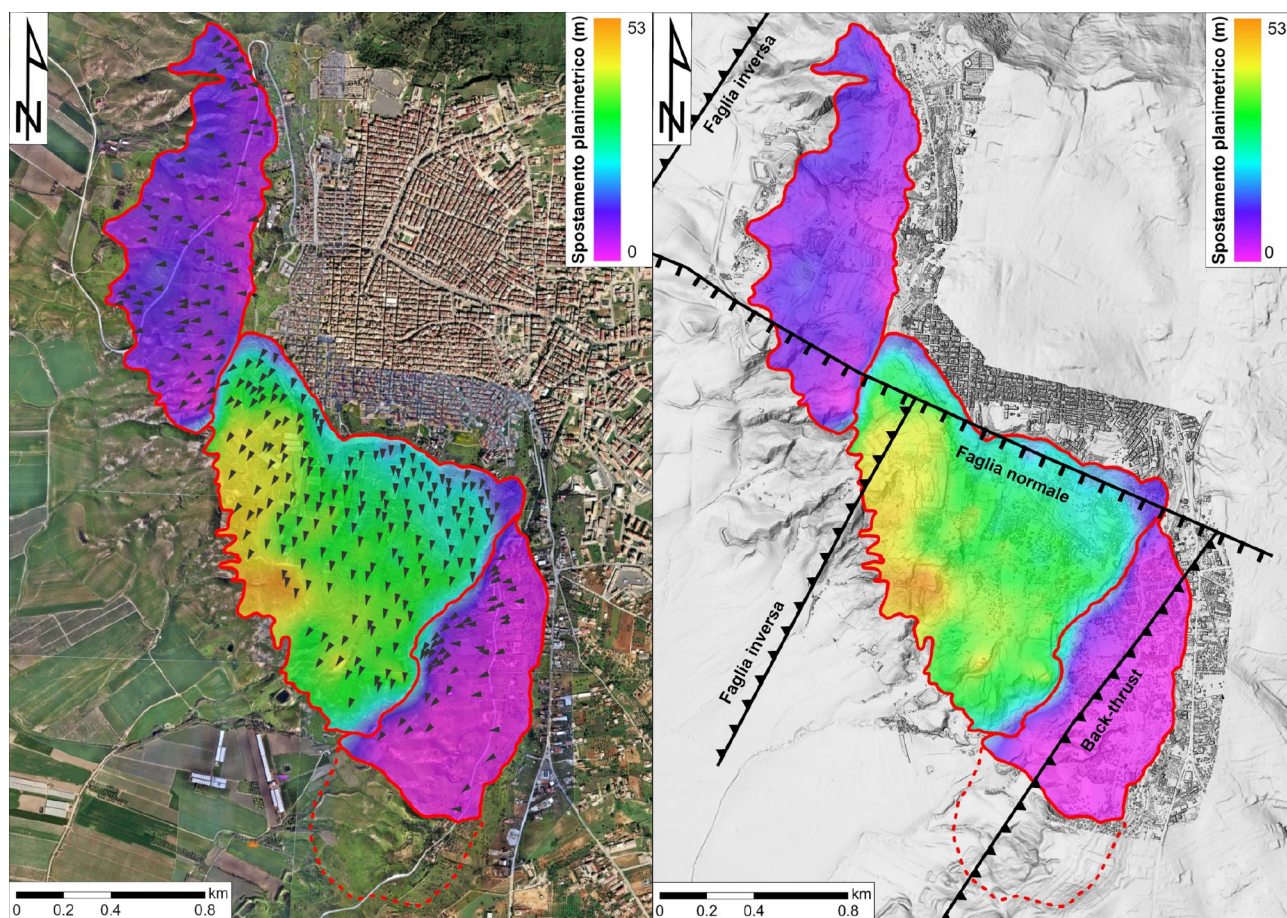


Figura 10 - Confronto fra la mappa degli spostamenti planimetrici ricavati dal confronto di dati ortofotografici e topografici pre- e post-evento (a sinistra) e l'ubicazione dei lineamenti tettonici tracciati da Rizzo (2004) (a destra).

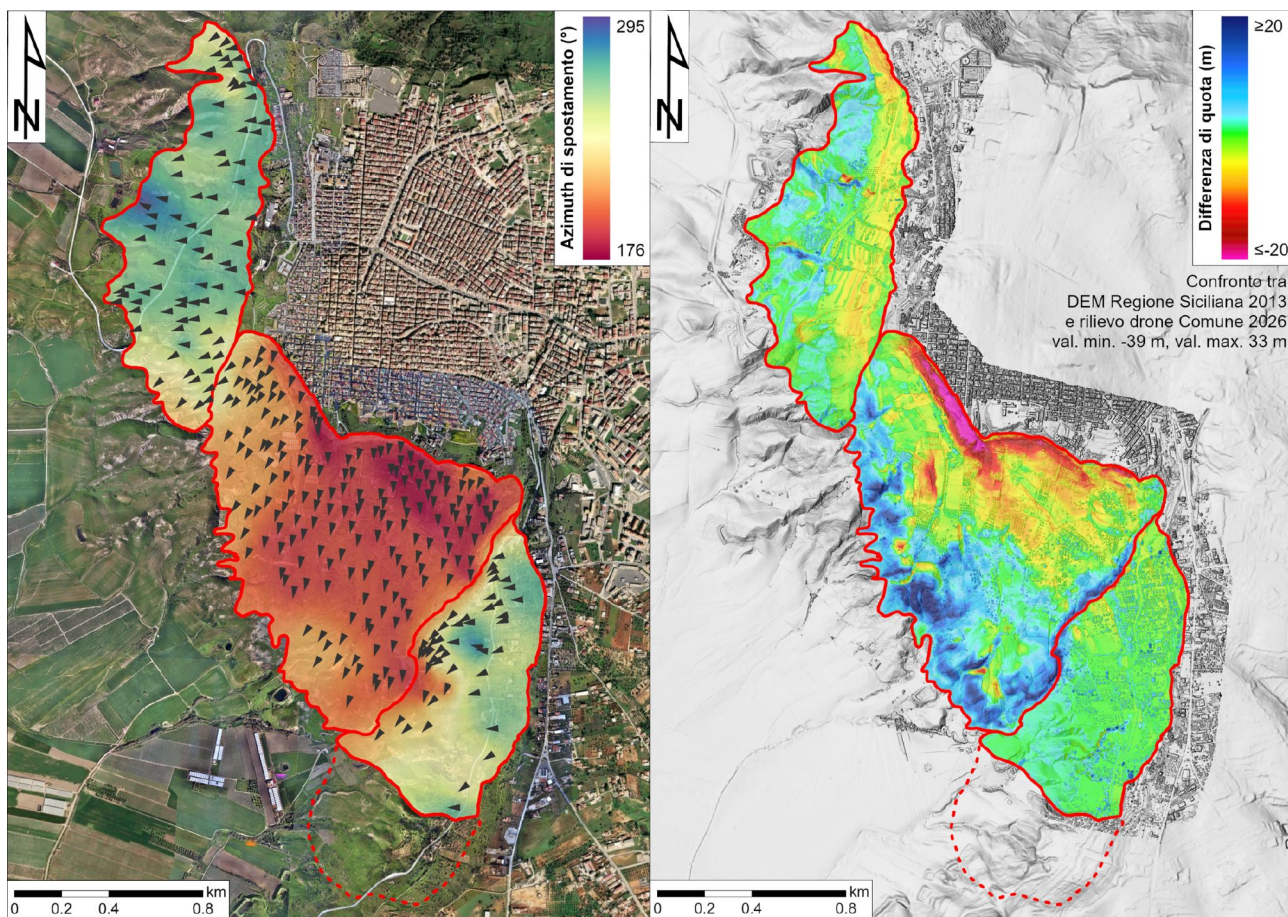


Figura 11 - Mappa degli *azimut* di spostamento (a sinistra) e delle differenze di quota (a destra) ricavati dal confronto di dati ortofotografici e topografici pre- e post-evento.

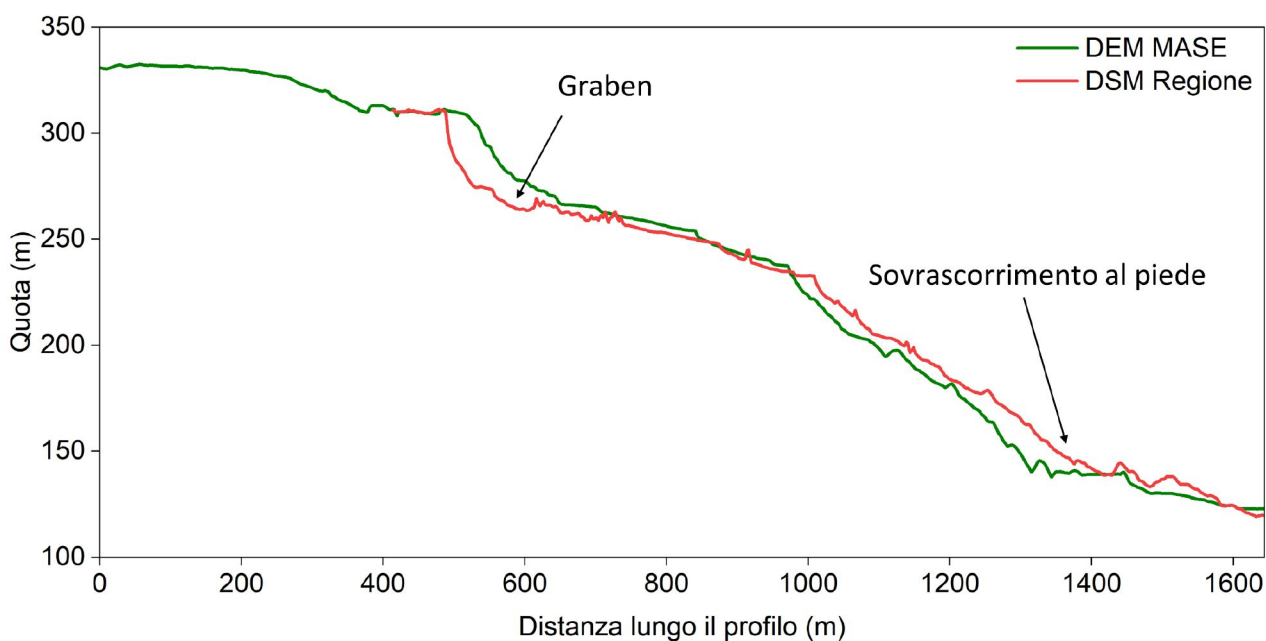


Figura 12 - Confronto tra profili topografici estratti longitudinalmente alla frana centrale dal rilievo LiDAR aereo acquisito nel 2013 dal MASE (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica) e dal DSM (Modello Digitale della Superficie) acquisito a fine gennaio 2026 dalla Regione Siciliana.

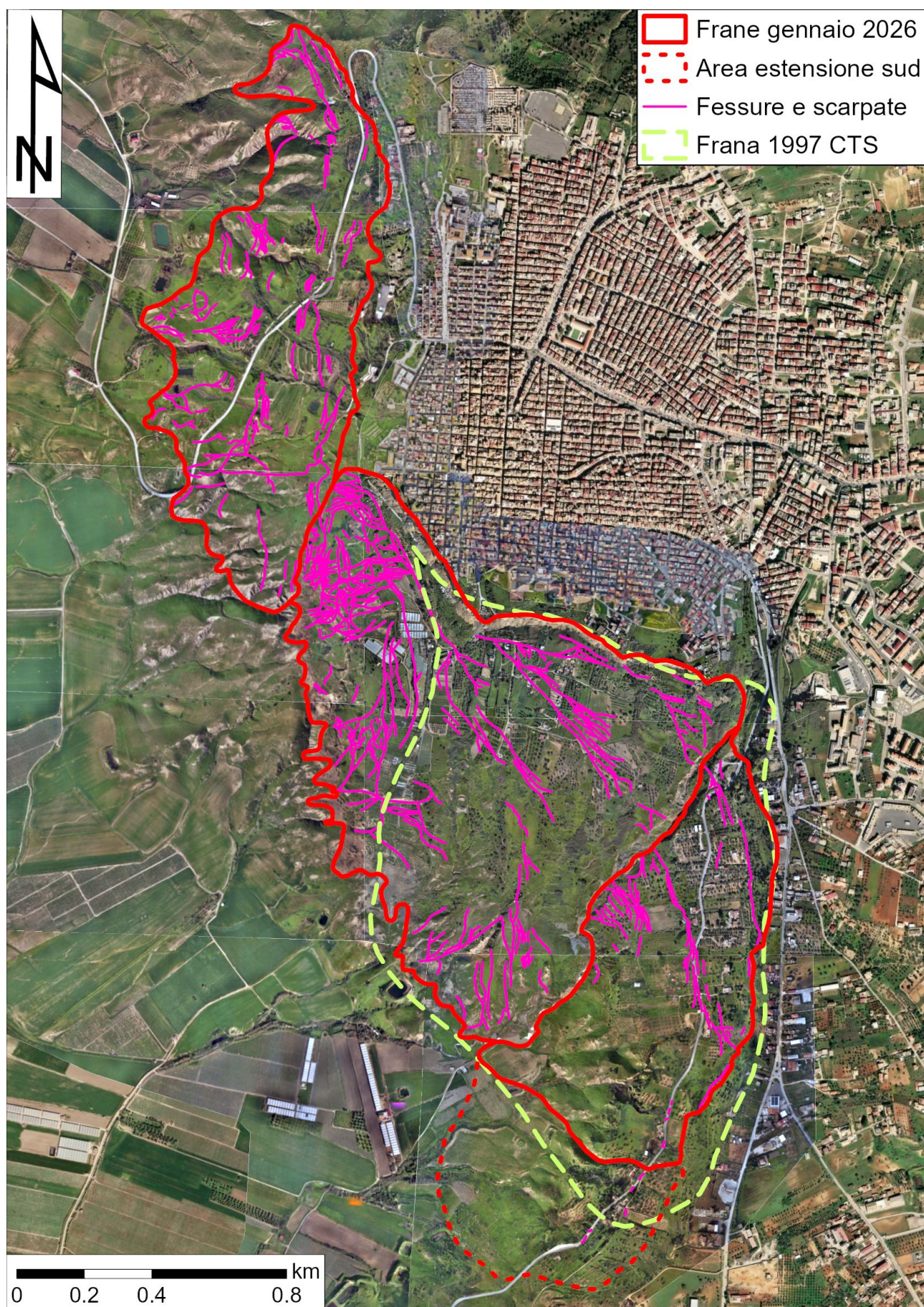


Figura 13 - Perimetrazione delle frane del 2026 (in rosso) confrontata con quella del 1997 (in giallo). In viola sono mostrate le principali fessure e scarpate causate dalle frane del 2026.

3.3.2 Meccanismo di movimento

Il movimento osservato della frana principale (frana centrale in Figura 9) è riconducibile a una frana di scivolamento composto (*compound slide* in Hutchinson, 1988) caratterizzata da una superficie di scivolamento marcatamente non circolare, costituita dalla combinazione di un segmento posteriore ripido, che può essere curvo o planare, e di una porzione basale debolmente inclinata (Figura 14).

A differenza degli scivolamenti puramente rotazionali o traslativi, nei quali il movimento iniziale può avvenire senza deformazioni interne significative del corpo in frana, gli scivolamenti composti risultano inizialmente cinematicamente vincolati dalla geometria della superficie di scivolamento e possono evolvere solo a seguito dello sviluppo di deformazioni interne e superfici di taglio che rendono cinematicamente ammissibile il movimento dell'intera massa (Hutchinson, 1988).

Tali fenomeni sono generalmente indicativi della presenza di eterogeneità litostratigrafiche nel sottosuolo, quali livelli meccanicamente più deboli o superfici di contatto tra materiali con proprietà geomeccaniche drasticamente differenti (Hutchinson, 1988).

Gli scivolamenti composti sono frequentemente innescati dallo sviluppo di superfici di taglio interne localizzate nella porzione posteriore della massa in frana, che consentono la mobilitazione del corpo instabile, spesso in un unico evento principale. La cinematica del fenomeno è fortemente influenzata dal grado di fragilità della rottura interna: in condizioni di fragilità bassa o moderata, la velocità di evoluzione del movimento è generalmente moderata (Hutchinson, 1988).

Le principali discontinuità interne sono rappresentate da una o più superfici di taglio inclinate verso monte, che si sviluppano a partire dalla zona in cui la superficie di scivolamento presenta il raggio di curvatura minimo. La porzione posteriore della massa franosa tende a subsidere tra tali superfici di taglio e la scarpata principale, spesso con rotazione retrogressiva limitata o assente, dando luogo alla formazione di una struttura tipo *Graben*, mentre la porzione centrale evolve prevalentemente mediante uno spostamento traslativo verso valle (Hutchinson, 1988).

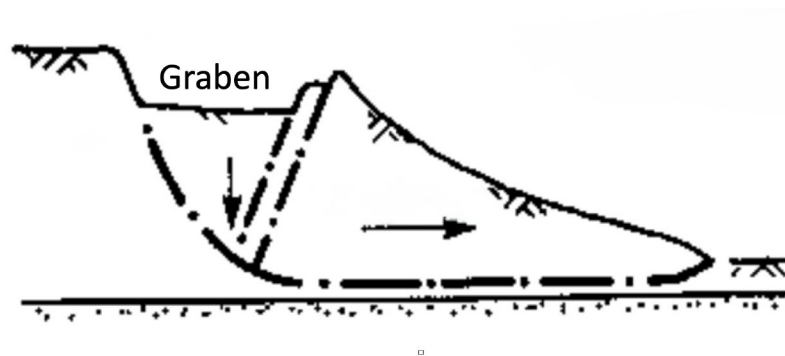
La Figura 15 mostra una sezione schematica della frana di Niscemi nella sua porzione centrale. La superficie di scivolamento è di tipo listrico, caratterizzata da una scarpata verticale che si raccorda con una curvatura in profondità a una superficie di scivolamento a bassa inclinazione al piede. Le superfici di taglio interne nella porzione posteriore della massa si manifestano come nette scarpate in contropendenza, che danno luogo alla formazione del *Graben*.

La componente traslativa del movimento risulta dominante rispetto a quella rotazionale, come confermato dalla tipica morfologia a blocchi scomposti, rialzati e ribassati (*Horst e Graben*), e dalla mancanza di significative strutture di compressione e rigonfiamento al piede.

La velocità del movimento nella fase parossistica fra il 25 e il 26 gennaio è stata dell'ordine del metro all'ora, corrispondente a una velocità "moderata" secondo Cruden & Varnes (1996), tipica di scivolamenti composti in condizioni di fragilità bassa o moderata (Hutchinson, 1988).

Tale stile deformativo può essere riprodotto può essere riprodotto mediante modellazione numerica agli elementi finiti, in modo coerente con i parametri geotecnici riportati nella Sezione 7.1.2 e ipotizzando la presenza di un orizzonte basale a bassa inclinazione in condizioni prossime a quelle residue (Figura 16).

Frane di questa tipologia hanno una tipica tendenza alla retrogressione: l'arretramento del ciglio di scarpata tende infatti a propagarsi progressivamente verso monte, in direzione del centro abitato, secondo un meccanismo già documentato negli eventi storici.



compound slide by release of internal shears in materials of moderate brittleness (Hutchinson, 1988)

Figura 14 - Scivolamento composto con attivazione di superfici di taglio interne in materiali a fragilità moderata e formazione di *Graben* (Hutchinson, 1988). A destra sono visibili due foto dell'ampio *Graben* formatosi sotto la scarpata principale della frana di Niscemi.

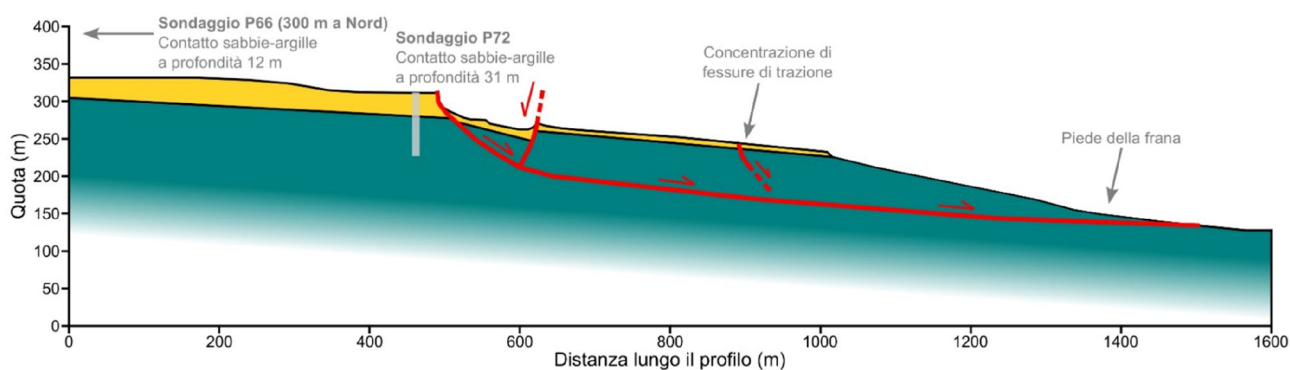


Figura 15 - Sezione schematica concettuale della frana principale di Niscemi.

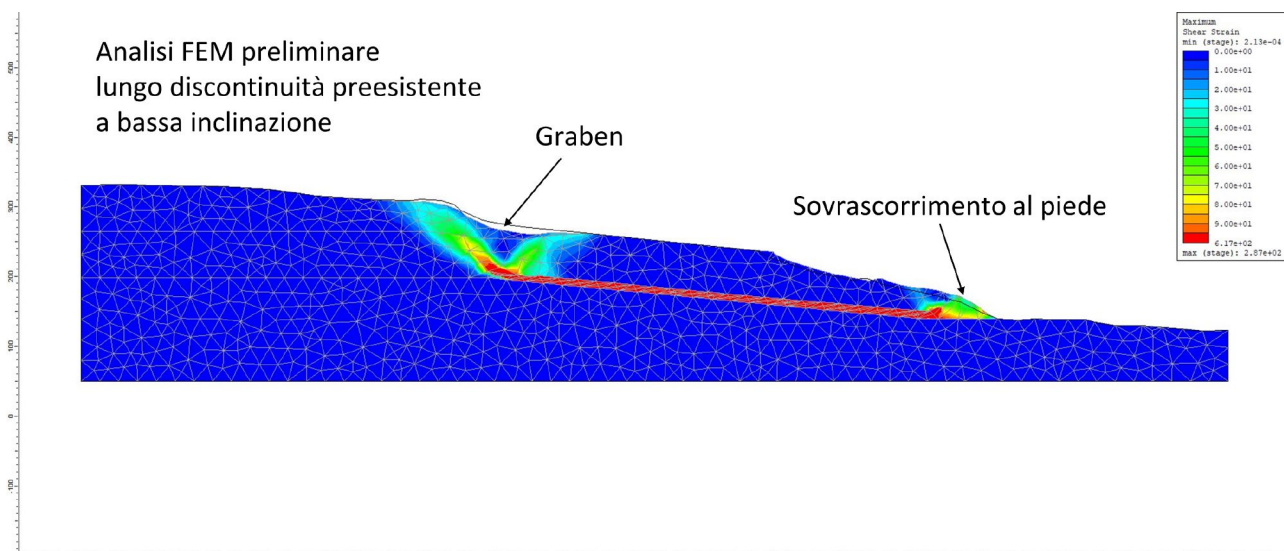


Figura 16 - Modello concettuale della frana principale mediante analisi numerica agli elementi finiti.

3.3.3 Morfometria

Sulla base della perimetrazione e dell'ipotesi sul meccanismo di movimento si possono ottenere i parametri morfometrici riportati nella Tabella 1:

Frana	Larghezza del fronte (m)	Lunghezza in direzione del movimento (m)	Profondità massima presunta (m)	Area (km ²)	Volume (10 ⁶ ·m ³)
Nord	1700	600	60	0,67	20
Centrale	1400	1200	80	1,2	50
Sud	1200	500	40	0,54	11

Tabella 1 - Parametri morfometrici delle tre frane coalescenti del gennaio 2026 a Niscemi.

Nel complesso il fronte di frana delle tre frane coalescenti si estende per circa 4,7 km con un volume totale di oltre 80 milioni di metri cubi.

Per quanto riguarda la mobilità della frana, l'angolo formato tra il punto sommitale della nicchia di distacco della frana e il punto più lontano raggiunto dal materiale depositato (*Fahrböschung* in Heim, 1932) risulta pari a 6,5°. Tale valore corrisponde a un'elevatissima mobilità della frana, compatibile con una significativa riduzione della resistenza lungo la superficie di scivolamento, potenzialmente associata a condizioni prossime alla resistenza residua o a fenomeni di liquefazione statica.

3.4 Cause predisponenti e di innesco

L'area oggetto di studio presenta una marcata suscettibilità ai fenomeni di instabilità gravitativa, determinata dall'interazione di fattori geologici, geomorfologici, idrogeologici e strutturali. Queste condizioni risultano ulteriormente influenzate dall'assetto tettonico regionale, connesso alla presenza del fronte della Falda di Gela, che contribuisce a definire un contesto morfostrutturale articolato e dinamicamente evolutivo, entro il quale i fenomeni di instabilità gravitativa possono manifestarsi con estensione significativa e con carattere policiclico, attraverso successive fasi di riattivazione.

3.4.1 Assetto litologico e contrasto di permeabilità e di competenza

L'assetto litologico su cui sorge l'abitato di Niscemi determina un marcato contrasto nelle proprietà idrogeologiche e geotecniche dei terreni. Le sabbie superficiali favoriscono l'infiltrazione delle acque meteoriche, che si accumulano al contatto con i livelli argillosi impermeabili, dando luogo a falde impostate al letto della formazione sabbioso-arenacea e a falde sospese in corrispondenza di livelli limosi intercalati.

L'innalzamento delle pressioni interstiziali lungo tali superfici riduce la resistenza al taglio dei materiali e favorisce la riattivazione di superfici di scivolamento profonde. Nelle immediatezze della frana del 25-26 gennaio, erano infatti evidenti copiose venute d'acqua in regime turbolento lungo la scarpata, al contatto fra le sabbie e le argille sottostanti (Figura 17).



Figura 17 - Venute d'acqua lungo la scarpata della frana del 25-26 gennaio, al contatto fra le sabbie e le argille.

3.4.2 Processi erosivi

All'assetto geologico locale, già di per sé fortemente predisponente per la presenza di argille plio-pleistoceniche alla base e di livelli sabbiosi poco cementati in copertura, si associa un ruolo determinante dei processi erosivi attivi nelle incisioni che solcano il versante a sud dell'abitato di Niscemi. L'analisi geomorfologica dell'area mostra come i dissesti siano strettamente connessi alla rete di incisioni, profonde anche alcune decine di metri, in particolare lungo il Torrente Benefizio e i suoi affluenti.

L'erosione fluviale agisce in primo luogo attraverso lo scalzamento al piede dei versanti. Lungo le incisioni principali, soprattutto nei tratti soggetti a maggiore concentrazione di deflusso, si osservano fenomeni di arretramento delle sponde e di approfondimento dell'alveo. Questo arretramento comporta la progressiva rimozione del sostegno alla base dei pendii argillosi, modificando le condizioni di equilibrio limite e rendendo cinematicamente possibili scivolamenti profondi. Le incisioni costituiscono quindi elementi di debolezza strutturale e morfologica che favoriscono l'innescò di movimenti gravitativi, inizialmente localizzati ma suscettibili di evoluzione verso forme più estese.

Dal punto di vista meccanico, l'approfondimento delle incisioni determina una ridistribuzione dello stato tensionale nei terreni di base e una riduzione delle tensioni efficaci al piede del versante. In presenza di argille a bassa permeabilità, le variazioni di carico e di confinamento indotte dall'erosione possono generare condizioni di sovrappressione interstiziale e una progressiva diminuzione del coefficiente di sicurezza. Si configura così un quadro di instabilità differita, in cui l'erosione rappresenta la causa predisponente e il dissesto costituisce la risposta meccanica, anche a distanza di tempo rispetto alla fase di massimo approfondimento dell'alveo.

Il carattere retrogressivo dei movimenti osservati trova spiegazione proprio in questo meccanismo: l'erosione al piede innesca scivolamenti nelle porzioni più basse del versante, che determinano un arretramento progressivo della superficie di rottura verso monte. Il risultato è l'evoluzione da fenomeni puntuali a un complesso franoso articolato, con superfici di scivolamento profonde impostate nelle argille di base e manifestazioni superficiali quali ribassamenti a gradoni, fratture sub-parallele e abbassamenti differenziali.

Alla luce delle condizioni attuali, caratterizzate da eventi meteorici più intensi e concentrati nel tempo, l'azione erosiva lungo gli impluvi può risultare ulteriormente amplificata. L'incremento dei picchi di deflusso superficiale, associato alla possibile impermeabilizzazione di porzioni del territorio e alla presenza di scarichi

concentrati, contribuisce ad accelerare i processi di incisione e di scalzamento. In questo contesto, il controllo dell'erosione, la regimazione delle acque superficiali e la limitazione degli apporti idrici concentrati assumono un ruolo centrale nella prevenzione della riattivazione o dell'evoluzione dei fenomeni franosi.

3.4.3 Precipitazioni

Le piogge cadute nelle settimane precedenti all'evento (120 mm da inizio dicembre alla stazione di Niscemi), sommate a quelle dei mesi antecedenti, possono aver agito come ulteriore fattore predisponente all'instabilità. Comunque si tratta di valori pluviometrici di poco superiori a quelli ordinari.

La situazione meteorologica antecedente alla frana è illustrata nella seguente comunicazione personale inviata al Prof. Casagli dal Dott. Luigi Pasotti del Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS):

La stazione SIAS Gela di C.da Badia Collegio, ubicata a circa 8 km dall'abitato di Niscemi, è la più vicina stazione pluviometrica per Niscemi ad avere una serie completa per gli ultimi anni e per gli ultimi mesi. Le precipitazioni totali registrate dalla stazione in occasione del ciclone Harry, tra 20 e 21 gennaio 2026, sono state relativamente modeste, arrivando ad un accumulo nei due giorni di 35,2 mm.

Analizzando la serie degli ultimi mesi, non risultano accumuli totali particolarmente anomali. L'accumulo pluviometrico complessivo di 365 mm dal 01/09/2025 al 21/01/2026 (Figura 18) è sì superiore alla norma della serie 2003-2025, pari a 265 mm; tuttavia, sono stati registrati negli anni scorsi, nello stesso periodo, accumuli superiori, come ad esempio era avvenuto nel 2019.

Un'anomalia importante è stata la registrazione il giorno 31 ottobre 2025 dell'intensità massima oraria dell'intera serie SIAS dal 2002: 56,6 mm/ora (54,2 in 30 minuti), un valore non eccezionale se comparato alle massime intensità orarie che si registrano spesso presso altre stazioni. Le immagini radar mostrano l'abitato di Niscemi interessato quel giorno dalla stessa linea temporalesca, di intensità probabilmente analoga a quella registrata dalla stazione SIAS.

Una relativa anomalia è anche quella che interessa il numero di giorni piovosi: dal 01/09/2025 al 21/01/2026 sono stati ben 35 i giorni piovosi, mentre la norma è di 30,5 giorni. Tuttavia, in passato sono stati registrati numeri ancora maggiori, ad esempio 40 giorni piovosi nel 2021. Un'osservazione certamente interessante è infine l'occorrenza di eventi piovosi in tutte le decadi a partire dall'ultima decade di ottobre.

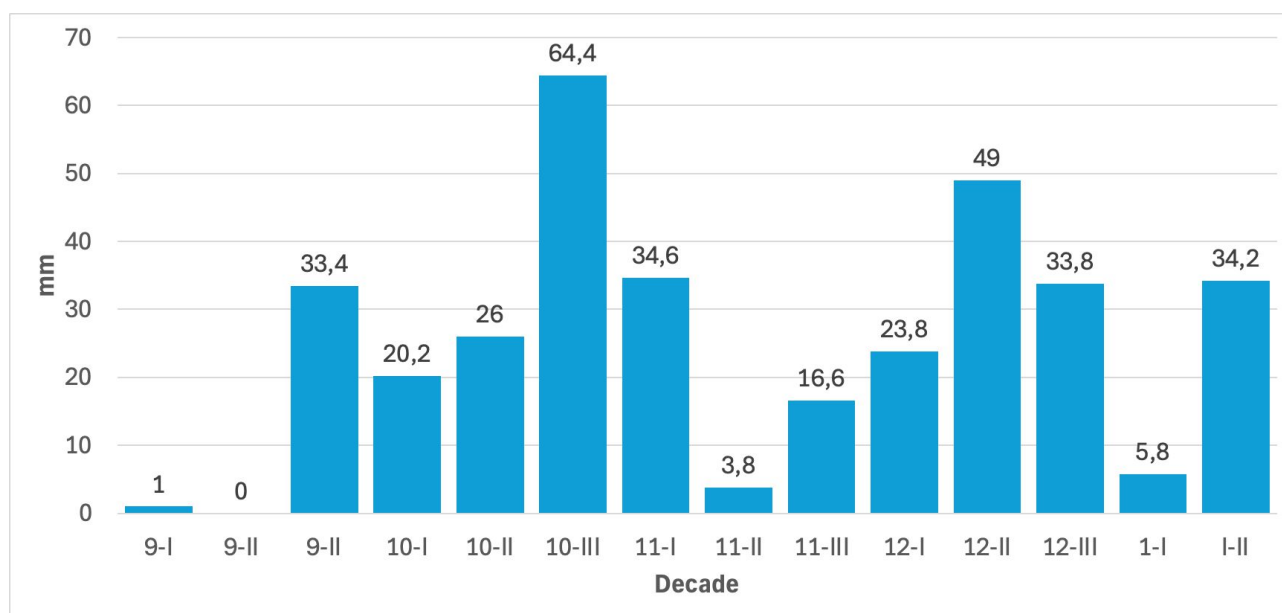


Figura 18 - Precipitazioni totali decadali registrate alla stazione SIAS Gela di C.da Badia Collegio dal 1/9/2025 al 20/1/2026 (gentile concessione Dott. Luigi Pasotti, SIAS).

3.4.4 Sismicità

Per quanto concerne la sismicità in prossimità del periodo dell'innescò della frana di Niscemi, il contesto regionale è stato caratterizzato dal verificarsi di eventi sismici di moderata magnitudo, localizzati prevalentemente lungo il margine ionico della Calabria e nel settore nord-orientale della Sicilia:

- il 10 gennaio 2026 si è verificato un terremoto di magnitudo M_w 5.1 al largo della costa calabra sud-orientale (provincia di Reggio Calabria), ampiamente risentito in Sicilia orientale, Calabria meridionale e Puglia; l'analisi della distribuzione della radiazione sismica evidenzia come l'area di Niscemi ricada in una zona interessata da significativa propagazione dell'energia sismica, con conseguente possibile sollecitazione dinamica dei versanti;
- il 15 gennaio 2026 un evento di magnitudo M_b 4.3 è stato registrato nel Mar Ionio settentrionale, a circa 100 km dalla costa calabrese (provincia di Crotone), seguito nelle ore successive da tre eventi di magnitudo compresa tra 3.4 e 3.8, indicativi di una fase di rilascio di energia sismica nella medesima area;
- il 18 gennaio 2026, nei pressi di Militello Rosmarino (provincia di Messina), è stato registrato un evento di magnitudo M_w 4.1 a una profondità di circa 8 km, inserito in una sequenza sismica più ampia che, nel corso del mese di gennaio, ha prodotto circa cento eventi, tra cui due terremoti di magnitudo M_w 3.8 e M_L 3.7 avvenuti il 19 gennaio 2026.

Sebbene tali eventi siano localizzati a distanze considerevoli dall'area di Niscemi, la loro magnitudo e la conseguente propagazione delle onde sismiche su scala regionale potrebbero forse aver determinato sollecitazioni dinamiche diffuse ancorché modeste, contribuendo, in via indiretta, alla perturbazione delle condizioni di equilibrio del versante già in stato di criticità, in concomitanza con altri fattori predisponenti.

Tale possibile influenza delle sollecitazioni dinamiche rappresenta un aspetto che richiede ulteriori approfondimenti mediante analisi specifiche, finalizzate a valutarne il potenziale ruolo come fattore predisponente o concausale.

3.4.5 Presenza di litotipi evaporitici

Un ulteriore elemento di interesse, meritevole di specifici approfondimenti, è rappresentato dalla presenza, al di sotto delle unità argillose, dei litotipi evaporitici, quali la formazione dei Gessi del Messiniano che affiora estesamente pochi chilometri a nord dell'abitato in corrispondenza del Monte Ursitto. Nell'area di Niscemi i gessi si dovrebbero trovare a profondità di oltre 300 m dal piano di campagna sulla base delle stratigrafie dei pozzi AGIP disponibili.

È noto come i gessi e, più in generale, le successioni evaporitiche siano suscettibili a fenomeni di instabilità quali diapirismo, deformazioni plastiche e processi carsici, legati alla loro peculiare risposta meccanica e alla loro elevata solubilità.

Tali processi, pur sviluppandosi spesso a profondità di alcune centinaia di metri, possono indurre modificazioni significative nell'assetto geomeccanico dei terreni sovrastanti, determinando redistribuzioni degli stati tensionali, sviluppo di discontinuità e variazioni delle condizioni idrogeologiche, con possibili ripercussioni sulla stabilità dei versanti e manifestazioni anche a scala superficiale.

3.4.6 Controllo tettonico

L'interpretazione proposta da Rizzo (2004) per la frana del 1997 evidenzia che le dimensioni del movimento, la sua articolata geometria e la stretta coerenza con l'assetto tettonico locale rimandano a un controllo profondo del fenomeno, riconducibile alla struttura del fronte della Falda di Gela.

Il movimento gravitativo si sviluppa infatti lungo il margine della Falda, in corrispondenza di sovrascorrimenti, strutture compressive e settori caratterizzati da configurazioni tipo *triangle zone* e *pop-up*. In questa prospettiva, le superfici di scivolamento non sono generate esclusivamente da processi gravitativi recenti, ma coincidono in parte con piani strutturali già impostati dalla deformazione compressiva. L'assetto tettonico

ha quindi predisposto il versante all'instabilità, mentre la deformazione gravitativa si sovrappone a un quadro strutturale attivo o comunque recente.

Nel modello evolutivo proposto da Rizzo (2004), la tettonica compressiva ha determinato la formazione di un rilievo strutturalmente instabile, con pendenze accentuate e livelli argillosi intensamente deformati. Le argille plioceniche, caratterizzate da plasticità costituiscono un livello meccanicamente debole. Le variazioni del livello piezometrico e l'incremento delle pressioni interstiziali riducono ulteriormente la resistenza al taglio, favorendo la riattivazione del movimento. Gli eventi del 1790 e del 1997 vengono pertanto interpretati come fasi di riattivazione innescate da condizioni idrologiche critiche, ma su un sistema già strutturalmente predisposto alla deformazione.

Nel complesso, il fenomeno è interpretato come un grande movimento gravitativo profondo, strettamente connesso alla dinamica della Falda di Gela. La frana non rappresenta dunque un episodio isolato, bensì l'espressione morfologica di un'interazione tra tettonica compressiva e processi gravitativi, in cui la struttura guida la geometria e l'evoluzione del movimento.

3.4.7 Concomitanza di cause

Alla luce delle evidenze attualmente disponibili, anche per l'evento franoso del 2026 possono ritenersi sostanzialmente valide le considerazioni formulate per la riattivazione del 1997 in merito ai fattori predisponenti e ai meccanismi di innesco. In particolare, l'evoluzione del fenomeno sembra riconducibile al concorso di più cause, piuttosto che all'azione di un singolo fattore scatenante chiaramente identificabile.

Analogamente a quanto osservato in occasione dell'evento del 1997, la riattivazione si è verificata in assenza di precipitazioni eccezionali immediatamente antecedenti e senza una correlazione univoca con eventi sismici locali di rilievo, suggerendo l'importanza di condizioni predisponenti sviluppatesi nel lungo periodo.

Tra queste, un ruolo primario è attribuibile all'assetto geologico e geomorfologico dell'area, caratterizzato dalla presenza di potenti successioni argillose e da un'evoluzione morfologica condizionata dall'erosione al piede del versante, in particolare lungo l'incisione del Torrente Benefizio. I processi erosivi, nel tempo accelerati anche dall'apporto di acque superficiali e reflue provenienti dall'area urbanizzata, hanno progressivamente ridotto le condizioni di confinamento al piede del versante, rendendo cinematicamente possibili movimenti gravitativi profondi.

Inoltre, la dinamica evolutiva dei terreni argillosi, soggetti a variazioni delle pressioni interstiziali anche su tempi lunghi, può aver determinato una progressiva riduzione della resistenza al taglio e, conseguentemente, del coefficiente di sicurezza, fino al raggiungimento delle condizioni critiche di instabilità.

In tale contesto, l'evento del 2026 appare configurarsi come una ulteriore riattivazione e ampliamento di un sistema franoso complesso e persistente, la cui attività è documentata storicamente e che ha già manifestato fasi di riattivazione significativa, tra cui quella del 1997, a sua volta riconducibile a un movimento gravitativo preesistente almeno dal 1790.

4 Analisi dei dati satellitari *radar* interferometrici

Il CPC-UNIFI ha effettuato l'analisi dei dati satellitari *radar* acquisiti da diversi sensori sull'area di interesse ed elaborati con diverse tecniche, per stimare gli spostamenti superficiali pregressi e in atto sul paese di Niscemi a seguito dei dissesti. In particolare, sono state analizzate immagini satellitari *radar* SAR (acronimo dell'inglese *Synthetic Aperture Radar*, Radar ad Apertura Sintetica) acquisite in diverse bande delle microonde:

- satelliti Sentinel-1 equipaggiati con sensori SAR in banda C (lunghezza d'onda di circa 5,6 cm)
- satelliti COSMO-SkyMed equipaggiati con sensori SAR in banda X (lunghezza d'onda di circa 3,1 cm)
- satelliti SAOCOM con sensori SAR in banda L (lunghezza d'onda di circa 23,5 cm)
- satelliti Capella *Space*, microsattelliti che anch'essi acquisiscono in banda X.

Le immagini SAR sono state elaborate con diverse tecniche di interferometria *radar* differenziale (DInSAR) e multi-temporale con differenti approcci di elaborazione: i.e. SBAS (*Small BAseline Subset*) e SqueeSAR, che considerano le differenze di fase del segnale in tempi successivi sulla stessa area. È stata inoltre effettuata un'elaborazione basata sulle variazioni di ampiezza del segnale elettromagnetico chiamata *Pixel Offset Tracking*.

I sistemi *radar* satellitari sono sensori di tipo attivo, ovvero inviano un segnale nelle frequenze d'onda delle microonde e ricevono la radiazione elettromagnetica di ritorno (*backscattering*) riflessa dalla superficie terrestre. Essi operano con continuità, sia di giorno che di notte, in ogni condizione meteorologica, anche in presenza di copertura nuvolosa. I dati *radar* satellitari consentono di misurare variazioni di distanza sensore-bersaglio nel tempo, attraverso particolari tecniche di interferometria. Le tecniche di interferometria *radar* satellitare sono tecniche di telerilevamento basate su analisi e confronto di immagini *radar* acquisite dal satellite sulla stessa area in tempi diversi, in modo da misurare spostamenti millimetrici del terreno e dei manufatti.

I risultati corrispondono ai prodotti delle elaborazioni interferometriche differenziali (interferogrammi) e multi-temporali (mappe e serie temporali di spostamento).

Per ogni punto di misura si dispone della velocità media annua nell'intervallo di osservazione satellitare misurata lungo la LOS e della serie temporale di spostamento che mostra per ogni data di acquisizione lo spostamento misurato.

I punti di misura sono visualizzati in funzione della velocità media annua registrata nel periodo coperto dalle acquisizioni satellitari, mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di velocità. Si definisce finestra di stabilità l'intervallo di velocità compreso tra -2 e +2 mm/anno, entro il quale i valori misurati non sono distinguibili dall'incertezza della tecnica interferometrica e sono pertanto considerati compatibili con condizioni di presunta stabilità.

A partire dai dati di velocità in entrambe le orbite di acquisizione del satellite, è stata effettuata la loro combinazione per ottenere la scomposizione del moto e ricostruire, attraverso l'applicazione di relazioni trigonometriche, la componente del vettore di spostamento sul piano orizzontale (est-ovest) e su quello verticale.

I risultati delle analisi interferometriche sono stati graficati in rappresentazioni territoriali delle velocità e degli spostamenti differenziali (mappe) e in grafici degli andamenti temporali di spostamento più esemplificativi. Per questi grafici sono state pertanto scelte e riportate alcune serie temporali che risultano essere affette da minor rumore del segnale *radar* e più rappresentative e rilevanti sull'area di interesse.

Ai fini di una migliore visualizzazione dei dati, sono state considerate due aree di attenzione corrispondenti alla zona nord e alla zona sud del centro abitato (Figura 19).

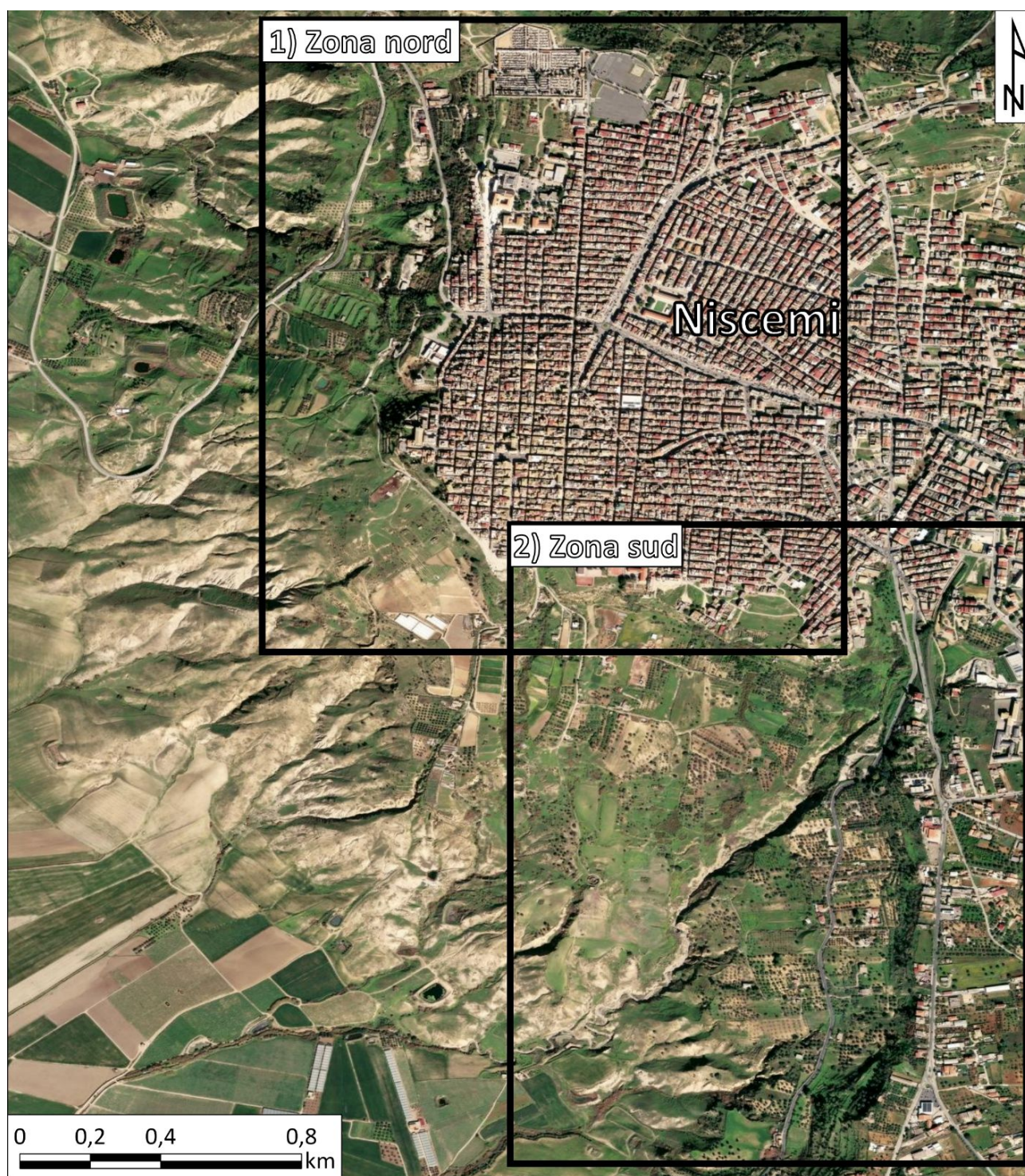


Figura 19 - Aree di attenzione individuate per le analisi di dettaglio nell'abitato di Niscemi.

4.1 Descrizione delle tecniche impiegate

Le elaborazioni effettuate sono tecniche di interferometria satellitare SAR. Ad ogni acquisizione satellitare, in forma di immagine SAR, viene sostanzialmente misurata la distanza intercorrente tra il sensore e il bersaglio al suolo. Il principio alla base consiste nell'analisi delle differenze di fase tra due o più immagini SAR della stessa area, acquisite in tempi diversi, da cui si derivano informazioni sulle variazioni di distanza sensore-bersaglio e quindi sugli spostamenti superficiali del terreno, come ad esempio movimenti causati da frane, cedimenti e sollevamenti del suolo.

In Figura 20 viene illustrato in maniera schematica questo principio. Il satellite passa su un punto acquisendo un segnale la cui fase è dipendente dalla distanza sensore-bersaglio in quel dato momento. In caso di

movimento del terreno la distanza sensore bersaglio aumenta o diminuisce e di conseguenza la fase subisce una variazione misurabile e quantificabile in termini di spostamento millimetrico.

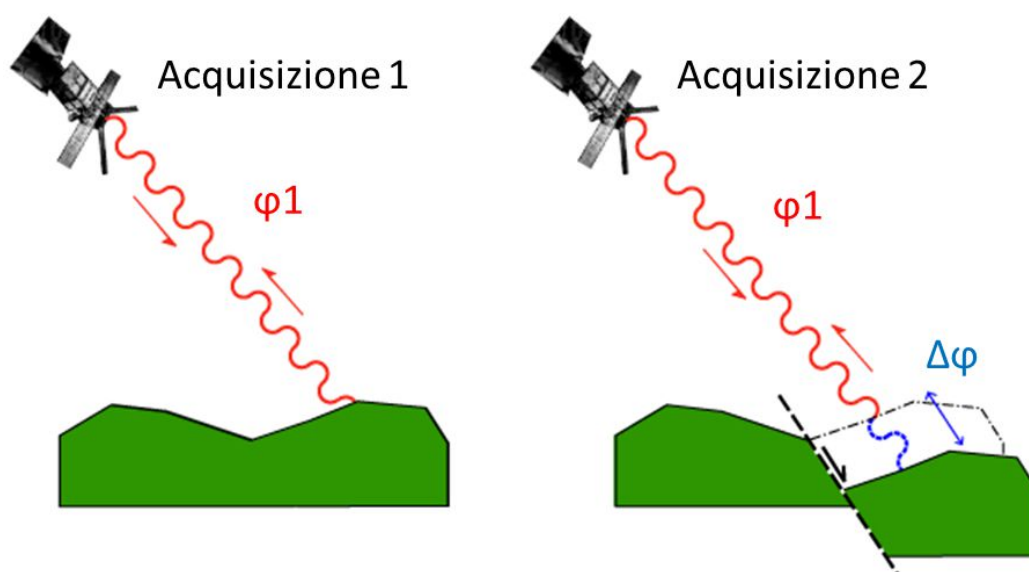


Figura 20 - Principio dell'interferometria: si misura la distanza tra il punto a terra e il sensore in successive acquisizioni. La variazione della distanza sensore-bersaglio produce una differenza di fase $\Delta\phi$ quantificabile in spostamento.

4.1.1 Interferometria *radar* satellitare differenziale - DInSAR

L'interferometria *radar* satellitare differenziale (DInSAR) si basa sul confronto di una coppia di immagini *radar* acquisite sulla stessa area in due momenti differenti, in modo da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione avvenuti tra le due acquisizioni.

In particolare, questa tecnica si basa sulla differenza di fase tra due successive immagini SAR e permette di rilevare fenomeni di deformazione che producono una variazione di distanza della superficie del terreno osservata dal sensore SAR, misurando la proiezione dello spostamento lungo la linea di vista del *radar* (detta LOS, acronimo dell'inglese *Line Of Sight*). Per ottenere questi risultati si analizza la differenza di fase (interferogramma) tra le due immagini SAR relative alla scena osservata e acquisite in istanti di tempo diversi (*baseline* temporale), da posizioni orbitali differenti (*baseline* spaziale) lungo due orbite sufficientemente vicine.

La precisione della tecnica è frazione della lunghezza d'onda alla quale opera il sistema *radar*, ovvero dell'ordine del centimetro e, in alcuni casi, anche di qualche millimetro. La tecnica DInSAR è stata largamente usata dalla fine degli anni '80 per individuare deformazioni del suolo su vaste aree, ma risulta limitata da rumori atmosferici ed effetti di decorrelazione.

4.1.2 Elaborazione SBAS

La tecnica SBAS (*Small Baseline Subset*) rappresenta una metodologia avanzata di interferometria satellitare multi-temporale messa a punto dal CNR-IREA (Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente).

Il suo principio consiste nell'utilizzare esclusivamente coppie di immagini SAR caratterizzate da piccole separazioni spaziali e temporali (*baselines*) tra le acquisizioni satellitari. Questa strategia permette di minimizzare i fenomeni di decorrelazione del segnale e di massimizzare la densità dei punti di misura analizzabili sul terreno.

Di seguito si fornisce una sintesi concisa dell'elaborazione SBAS, il cui diagramma a blocchi è illustrato in Figura 21. Una discussione dettagliata delle soluzioni algoritmiche adottate in ciascuna fase è disponibile in letteratura scientifica (Casu *et al.*, 2014; Manunta *et al.*, 2019; Lanari *et al.*, 2020; De Luca *et al.*, 2022).

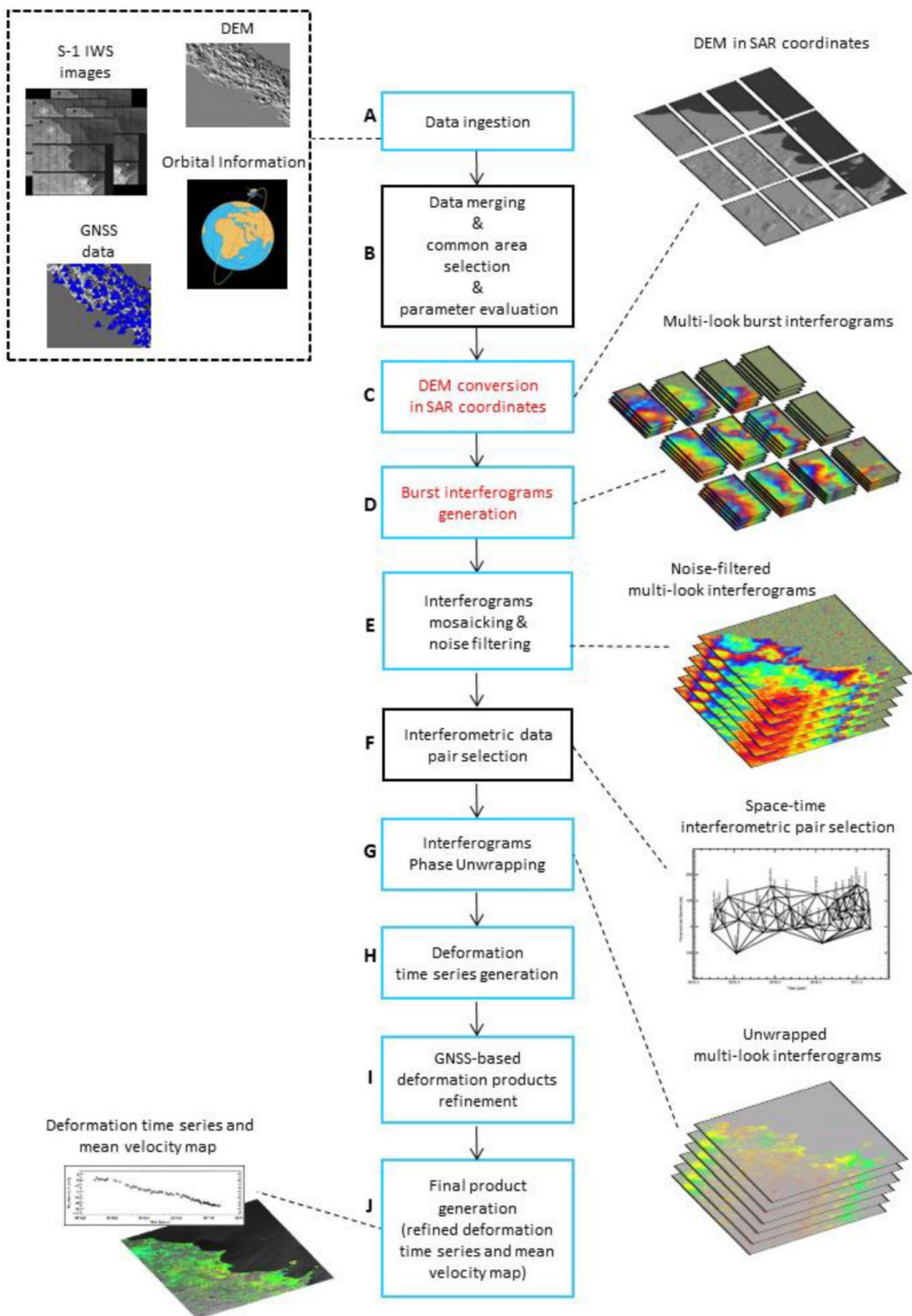


Figura 21 - Schema a blocchi della catena di elaborazione SBAS, tratto da Lanari *et al.* (2020).

Il segmento iniziale del diagramma in Figura 21, blocco A, incorpora le operazioni per la gestione e l'acquisizione dei dati di *input*, quali i *burst* delle immagini *Single-Look Complex* (SLC), le informazioni orbitali associate a ciascuna acquisizione SAR, il modello digitale di elevazione (DEM, acronimo dell'inglese *Digital Elevation Model*) e la serie temporale GNSS (*Global Navigation Satellite System*) disponibile dell'area di studio.

Successivamente, il blocco B esegue una serie di operazioni sequenziali, che includono la selezione della geometria SAR di riferimento per la registrazione dell'intero *dataset* SAR, l'identificazione dell'area specifica di interesse e dei *burst* da elaborare. Inoltre, viene generato un elenco preliminare di coppie interferometriche derivanti dalle acquisizioni SAR disponibili, che viene successivamente utilizzato nelle operazioni di generazione di interferogrammi e filtraggio del rumore (Pepe *et al.*, 2015).

Il blocco C esegue la conversione del DEM disponibile nelle coordinate *radar* (*azimut* e *range*), seguita dalla stima, per ciascun *pixel* di ciascuna scena SAR, delle distanze azimutali e di distanza rispetto alla posizione orbitale di riferimento.

L'oggetto del blocco D concerne la co-registrazione di ciascun *burst* rispetto all'acquisizione di riferimento, la generazione dell'interferogramma e la successiva correzione per compensare gli effetti di eventuali errori residui di registrazione azimutale. Inoltre, viene condotta un'operazione *multi-look* spaziale per mitigare gli effetti del rumore di decorrelazione all'interno degli interferogrammi generati, riducendo così la quantità di dati che richiedono l'elaborazione.

In questa fase del processo, blocco E, gli interferogrammi *multi-look* corretti (e le corrispondenti mappe di coerenza spaziale) dei *burst* adiacenti vengono meticolosamente assemblati per generare gli interferogrammi differenziali dell'intera area studiata, qui di seguito denominata "*frame*". Successivamente, blocco F, viene eseguito il calcolo di una rete triangolare ottimizzata tra le *baseline* spaziale e temporale, in particolare, per quanto riguarda le baseline temporali e spaziali, viene selezionato un valore massimo di 150 giorni per le prime e di 200 metri per le seconde.

La sequenza degli interferogrammi caratterizzati da piccola *baseline* con filtro antirumore *multi-look* identificati nel fotogramma viene quindi decompressa (blocco G). In un'analisi successiva, nel blocco H, viene recuperata una stima della serie temporale della deformazione mediante l'implementazione del metodo della Decomposizione in Valori Singolari (SVD) (Berardino *et al.*, 2002). Il blocco in questione è stato meticolosamente concepito per ottimizzare il processo di compensazione dei potenziali residui di fase topografici. Inoltre, la stima e la rimozione degli artefatti atmosferici vengono facilitate dal riconoscimento della loro tipica correlazione spaziale e della loro scarsa correlazione temporale (Berardino *et al.*, 2002), nonché dallo sfruttamento della loro correlazione con la topografia.

Infine, il blocco I rappresenta un ulteriore sviluppo implementato all'interno della catena di elaborazione SBAS, che utilizza le misurazioni GNSS disponibili per identificare e filtrare possibili artefatti atmosferici residui che potrebbero influenzare le misurazioni DInSAR.

Il prodotto della tecnica di elaborazione SBAS consiste in una griglia di punti di misura (MP - *Measurement Points*), per ognuno dei quali si dispone di posizione geografica opportunamente georiferita, velocità media annua (espressa in mm/anno) e serie temporale di spostamento.

4.1.3 Elaborazione SqueeSAR

A partire dai primi anni 2000 sono state sviluppate numerose tecniche multi-interferometriche (dette PSI, *Persistent Scatterers Interferometry*), ovvero basate su un'analisi multi-temporale di una lunga serie di immagini *radar* relative a una stessa area, che hanno permesso di superare i limiti intrinseci dell'interferometria differenziale, poiché consentono di contenere i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e stimare i contributi di fase legati ai cambiamenti subiti dall'atmosfera tra le diverse acquisizioni.

Queste tecniche si basano su analisi di tipo multi-interferogramma o multi-immagine, cioè utilizzano una lunga serie di immagini *radar* relative a una stessa area, all'interno delle quali vengono identificati alcuni bersagli che vengono utilizzati per la misura degli spostamenti.

Tali riflettori permanenti (PS, *Permanent Scatterers* in inglese) sono rappresentati da elementi già presenti al suolo che mantengono la stessa “firma elettromagnetica” in tutte le immagini al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando quindi l’informazione di fase nel tempo (Ferretti *et al.*, 2001). Questi punti, essendo praticamente immuni da effetti di decorrelazione temporale e spaziale, consentono di seguire gli spostamenti intercorsi tra multiple immagini *radar* (Figura 22).

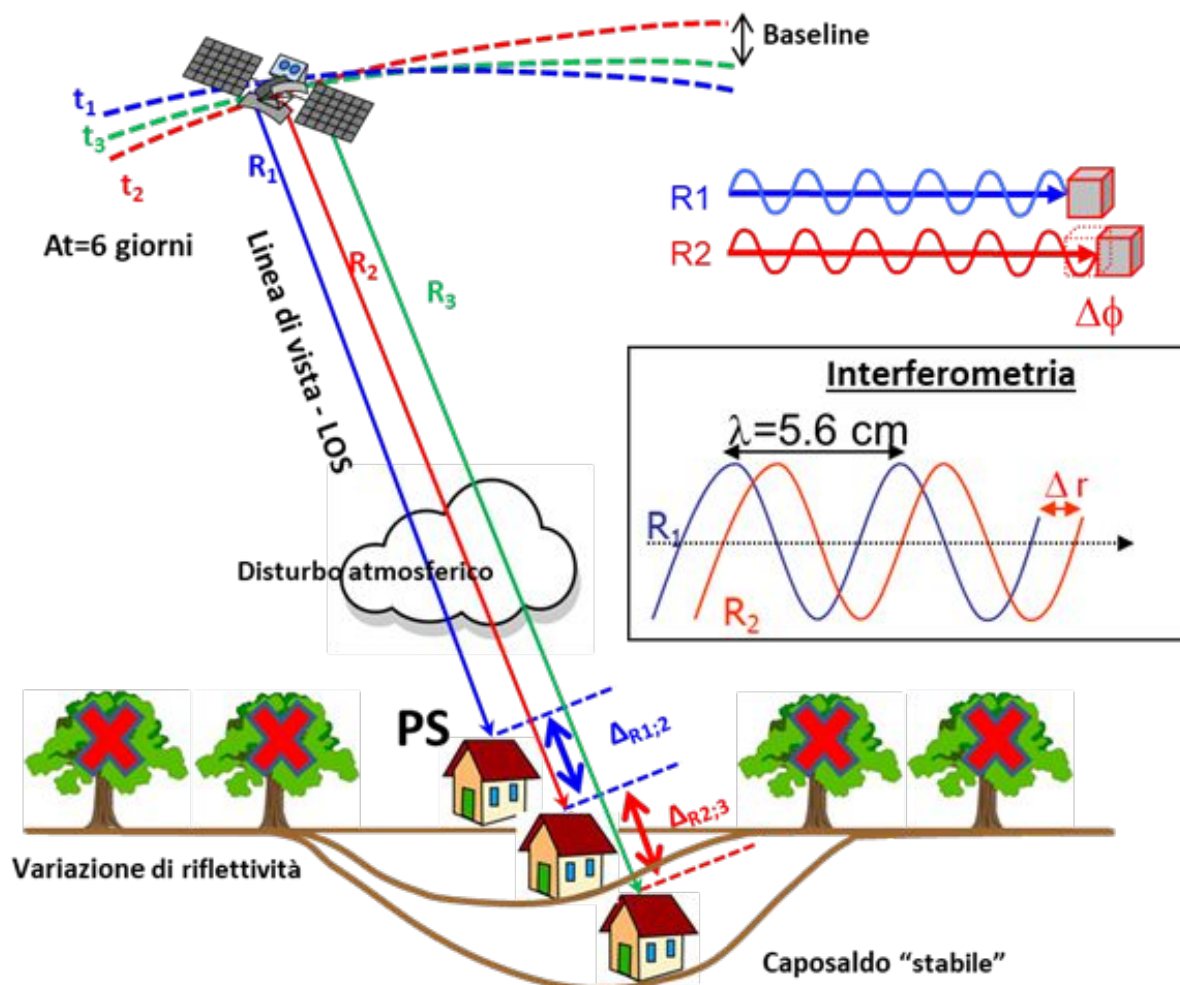


Figura 22 - Principio di funzionamento della tecnica interferometrica, basato sulla misura di variazione di distanze satellite-bersaglio a terra.

Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, le tecniche multi-interferometriche permettono di ottenere risultati migliori di quelli ricavabili con analisi interferometriche convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), sia per la capacità di seguire la loro evoluzione temporale. Infatti, mentre l’interferometria differenziale campiona il fenomeno di deformazione in esame tramite lo studio di due acquisizioni (la *master* M e la *slave* S), stimando soltanto la deformazione cumulata avvenuta tra le due acquisizioni, l’analisi multi-interferogramma è capace di fornire la descrizione completa dell’evoluzione temporale delle deformazioni.

I PS corrispondono ad elementi di origine antropica (edifici, monumenti, strade, ponti, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.), oppure naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito), per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione, mentre ciò non accade ad esempio per la vegetazione che muta di continuo.

L’insieme dei PS costituisce pertanto una sorta di “rete geodetica naturale” di bersagli *radar* che vengono utilizzati come capisaldi di riferimento per la misura degli spostamenti millimetrici del suolo, con una densità spaziale di punti di misura variabile a seconda del sensore utilizzato per l’analisi, dell’uso del suolo e della morfologia del terreno. In generale, i PS raggiungono una densità molto elevata in corrispondenza dei centri urbani e delle aree antropizzate, mentre sono pressoché assenti nelle zone vegetate o innevate.

Lo sviluppo, nel 2011, dell'algoritmo SqueeSAR da parte di TRE-Altamira (Ferretti *et al.*, 2011) ha rappresentato un notevole passo in avanti nella capacità di analisi delle deformazioni del terreno in area extra-urbana. La tecnica SqueeSAR rappresenta una delle soluzioni più avanzate per il monitoraggio non solo delle aree urbane ma anche di quelle extra-urbane, dove la densità delle misure PS può talvolta risultare non soddisfacente. L'innovazione consiste nell'aver individuato una nuova famiglia di "bersagli" monitorabili da satellite, i cosiddetti *Distributed Scatterers* (DS), che si vanno ad aggiungere ai PS.

La tecnica SqueeSAR sfrutta quindi sia bersagli puntiformi, PS, sia bersagli cosiddetti "riflettori spazialmente distribuiti", DS. Per semplicità, tuttavia, tutti i punti di misura derivanti dalla tecnica di elaborazione SqueeSAR che include il *processing* dei due tipi di bersagli, vengono genericamente chiamati PS (*Persistent Scatterers*).

A differenza di un *target* puntiforme, dove l'energia retro-diffusa verso il sensore risulta elevata e concentrata in un'area molto ridotta, l'intensità dell'eco *radar* per un *pixel* appartenente a un DS è solitamente meno forte, a causa dell'assenza di un bersaglio dominante. Su aree omogenee gli interferogrammi vengono filtrati spazialmente così da aumentare il rapporto segnale rumore: un singolo *pixel* è selezionato ed analizzato, poi i *pixel* circostanti sono analizzati per individuare eventuali vicini con firma interferometrica simile, *pixel* simili vengono classificati come "fratelli" (*brotherhood*) e viene creata una cosiddetta "famiglia" di *pixel*. A questo punto i segnali dei pixel fratelli vengono mediati per ottenere uno o più DS e il processo continua per ogni *pixel* dell'immagine *radar* (Figura 23).

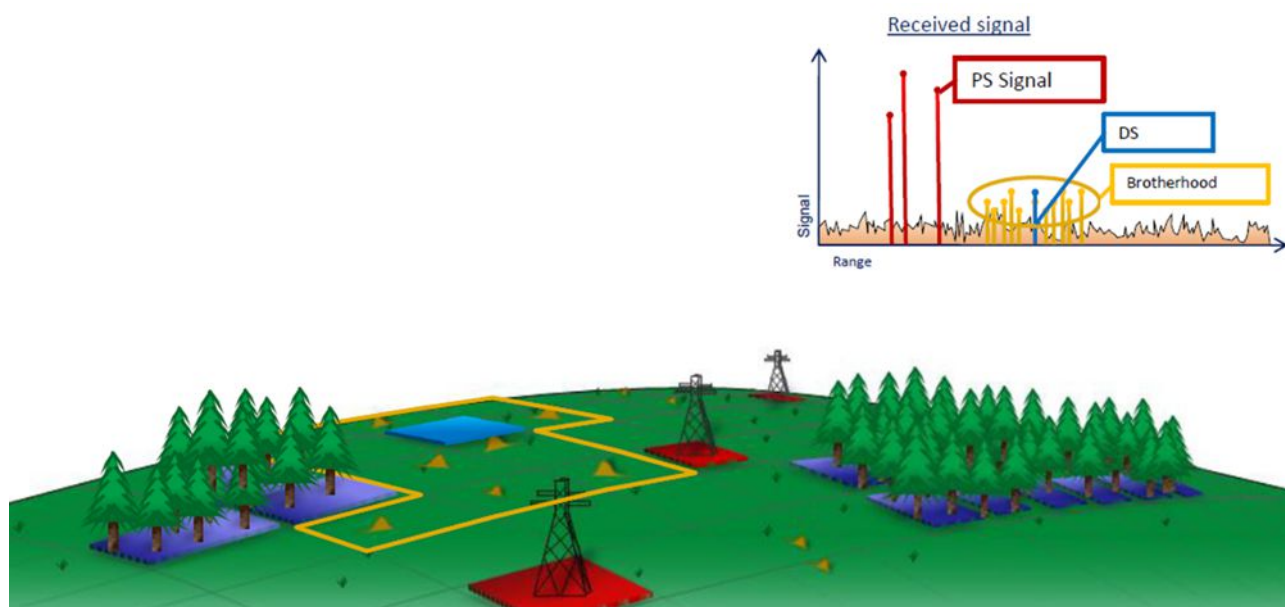


Figura 23 - Differenze tra DS (*Distributed Scatterer*) e PS (*Permanent Scatterer*).

L'utilizzo congiunto di tutti i *pixel* appartenenti al DS permette di ridurre il rumore presente nei dati, migliorando in modo significativo la qualità della stima, tanto che le serie temporali di spostamento di un DS appaiono meno rumorose. Le aree utilizzate come DS sono aree composte da punti che non hanno quindi la coerenza necessaria per diventare dei punti PS, ma sono comunque distinguibili dal rumore di fondo e i loro segnali *radar* riflessi, pur essendo meno forti, risultano statisticamente coerenti.

In corrispondenza di ciascun riflettore (PS o DS) individuato è possibile fare una stima del disturbo atmosferico e rimuoverlo, isolando quindi il contributo dovuto alle sole deformazioni del terreno. Più precisamente, una volta stimato il contributo atmosferico, vengono individuate tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminati i termini spuri ed isolato il termine che descrive la variazione di cammino ottico dell'onda elettromagnetica nelle varie acquisizioni, cioè il movimento del "bersaglio" nell'arco temporale tra il primo e l'ultimo dato disponibile.

4.1.4 Elaborazione *Pixel Offset Tracking*

La tecnica del *Pixel Offset Tracking* (POT), nota anche come *Sub-pixel Correlation*, è una metodologia di analisi dei dati SAR fondamentale per il monitoraggio di frane caratterizzate da dinamiche rapide dove la classica interferometria fallisce a causa della perdita di coerenza del segnale.

A differenza delle tecniche interferometriche, che misurano le variazioni di fase dell'onda elettromagnetica, il *Pixel Offset Tracking* lavora sull'intensità (ampiezza) delle immagini SAR.

Il processo si basa sul confronto tra due immagini SAR acquisite in tempi diversi (coppia *master* e *slave*). Invece di cercare differenze di fase, l'algoritmo cerca di identificare lo spostamento spaziale (*offset*) degli stessi oggetti o "firme" *radar* tra le due acquisizioni.

L'immagine viene suddivisa in piccole finestre di ricerca (*patch*). Tramite algoritmi di correlazione statistica, viene calcolato lo spostamento che massimizza la somiglianza tra le finestre nelle due date. L'analisi POT fornisce lo spostamento bidimensionale sul piano dell'immagine in *range* (lungo la linea di vista del satellite) e in *azimut* (lungo la direzione del volo del satellite).

Il prodotto che si ottiene dalle elaborazioni *Pixel Offset Tracking* è un campo bidimensionale di deformazione che mostra lo sfasamento lungo le direzioni di *range* e *azimut*, che corrispondono alle direzioni planari est-ovest e nord-sud. Avendo a disposizione due geometrie di acquisizione, ascendente e discendente, è possibile ricavare anche la componente verticale dello spostamento.

Pur non raggiungendo la precisione millimetrica delle tecniche InSAR, le tecniche POT permettono di stimare spostamenti con una precisione che va da 1/10 a 1/30 della dimensione del *pixel* (nell'ordine dei centimetri o decimetri, a seconda del sensore).

4.1.5 Dynamic InSAR

Dynamic InSAR è un recente prodotto di elaborazione InSAR concepito da TRE-Altamira, inizialmente progettato per il monitoraggio delle aree minerarie attive che subiscono frequenti cambiamenti superficiali. L'approccio Dynamic InSAR combina l'elaborazione SqueeSAR con tecniche di analisi DInSAR, *Change Detection* e RMT (*Rapid Motion Tracking*) basate sull'ampiezza per studiare deformazioni rapide del terreno (> 0,5 cm - 1,0 cm) e offrire misurazioni di spostamento ad alta risoluzione con dati temporali anche in aree con perdita temporanea di coerenza del segnale *radar*.

Questo approccio innovativo utilizza la fase di coppie di immagini satellitari acquisite in date diverse per generare mappe di spostamento di bersagli *radar* sia coerenti nel tempo sia solo "temporaneamente coerenti" ovvero caratterizzati da una coerenza del segnale *radar* discontinua nel tempo (Figura 24).

Unendo la precisione dell'elaborazione SqueeSAR e la copertura spaziale delle tecniche RMT, i dati Dynamic InSAR forniscono misurazioni dello spostamento sia in aree con coerenza persistente, sia in aree con cambiamenti morfologici a cinematica rapida e mancanza temporanea di coerenza in cui le tecniche PSI tradizionali incontrano difficoltà.

Dynamic InSAR permette di restituire la distribuzione spaziale delle misure di spostamento e i grafici temporali con informazioni sia sullo spostamento storico del terreno sia sulle barre di errore associate alla coerenza del segnale. L'approccio Dynamic InSAR utilizza algoritmi di *machine learning* per migliorare la copertura dei dati e potenziare il rilevamento dei cambiamenti per identificare bersagli *radar* e stimare le barre di errore.

I prodotti dell'elaborazione Dynamic InSAR consistono in mappe di spostamento differenziale delle ultime acquisizioni SAR satellitari e serie temporali di spostamento in cui sono distinti bersagli *radar* permanentemente coerenti e bersagli *radar* temporaneamente coerenti con perdita di informazione in specifici intervalli temporali. È inoltre indicata la precisione di ciascuna misurazione nella serie temporale tramite barre di errore che rappresenta l'incertezza associata ad ogni stima di singola acquisizione satellitare.

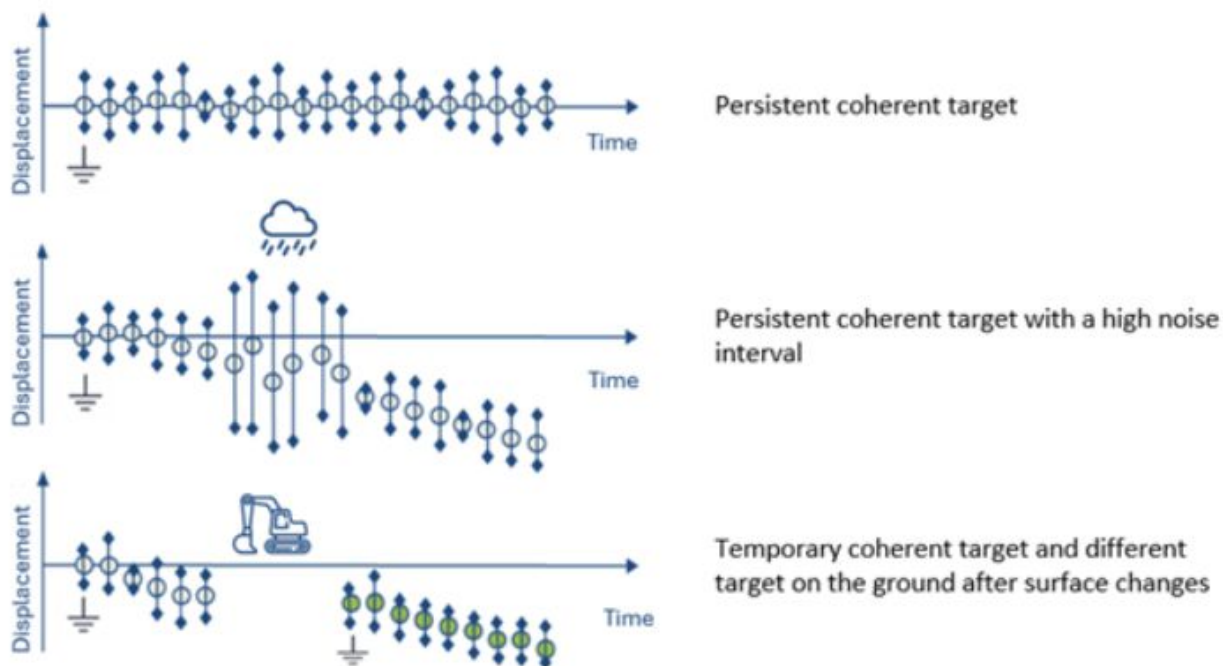


Figura 24 - Esempio di bersagli *radar* e serie temporali di spostamento con Dynamic InSAR. Le serie temporali vengono interrotte, riavviate o visualizzate solo per una finestra dell'intervallo di tempo osservazione satellitare a seconda dei cambiamenti del terreno.

4.2 Satelliti utilizzati

In questa sezione vengono dettagliate le caratteristiche tecniche delle costellazioni satellitari impiegate. La scelta di integrare sensori operanti in diverse porzioni dello spettro delle microonde risponde alla necessità di bilanciare capacità di penetrazione del segnale, risoluzione spaziale e tempi di rivisitazione.

Nello specifico, l'analisi si è avvalsa di un *dataset* di immagini SAR acquisite in diverse bande delle microonde:

- Banda C (Sentinel-1);
- Banda X (COSMO-SkyMed e Capella Space);
- Banda L (Saocom).

Di seguito sono riportate le specifiche tecniche per ciascuna piattaforma.

4.2.1 Sentinel-1

La missione Sentinel-1, progettata nell'ambito del progetto europeo *Copernicus* e finanziata dall'ESA (Agenzia Spaziale Europea), è composta da una costellazione di satelliti gemelli (inizialmente Sentinel-1A e Sentinel-1B) orbitanti su traiettorie eliosincrone ad una quota di 698 km.

Il primo satellite, Sentinel-1A, lanciato il 3 aprile 2014, è ancora operativo. Il secondo, Sentinel-1B, lanciato il 25 aprile 2016, è stato ritirato in anticipo nel 2021 in seguito ad un malfunzionamento a bordo. Nel dicembre 2024 è stato quindi lanciato un terzo satellite gemello, Sentinel-1C.

Tutti i satelliti sono equipaggiati con sensori SAR in banda C (frequenza 5.5 GHz e lunghezza d'onda di circa 5.6 cm) ed hanno tempi di rivisitazione di 12 giorni, ridotto a 6 giorni grazie alla contemporanea presenza in orbita di due satelliti posizionati a 180° di distanza angolare uno dall'altro sullo stesso piano orbitale.

La costellazione Sentinel-1, progettata per fornire informazioni sistematiche su vaste aree del pianeta per i prossimi decenni, ha aperto nuove opportunità per il monitoraggio continuo dei fenomeni di deformazione terrestre a scala regionale, grazie anche alla politica di accesso aperto e gratuito ai dati.

La costellazione di satelliti Sentinel-1 è ideata per fornire informazioni sempre aggiornate, in continuità con i dati provenienti dalle precedenti missioni ERS e ENVISAT, ma con un notevole miglioramento delle informazioni, soprattutto in termini di affidabilità e tempestività dei dati stessi.

La costellazione Sentinel-1 può acquisire in diverse modalità, con differenti risoluzioni e coperture spaziali. I dati che sono stati analizzati in questa analisi sono stati acquisiti in modalità STRIPMAP, con larghezza (*swath*) dell'immagine di 80 km e risoluzione nominale a terra di 20 x 5 m nelle direzioni di *azimut* e *range*.

4.2.2 COSMO-SkyMed

La costellazione COSMO-SkyMed (*Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation*) finanziata dall'ASI (Agenzia Spaziale Italiana) e dal Ministero della Difesa è un sistema duale, ovvero concepito come un programma per esigenze civili (ad es. monitoraggio ambientale, Protezione Civile) e militari, e include un sistema di satelliti equipaggiati con sensori *radar* in grado di operare in qualsiasi condizione atmosferica e di visibilità e con un'altissima frequenza di rivisitazione.

La costellazione COSMO-SkyMed iniziale (CSK) è composta da quattro satelliti SAR uguali tra loro, che orbitano ad una quota di 620 km e acquisiscono dati ad alta risoluzione in banda X, ovvero a una lunghezza d'onda di 3,1 cm, con una risoluzione al suolo di 3 x 3 m. Il tempo di rivisitazione nominale è di 16 giorni. Il primo satellite è stato lanciato nel giugno 2007, il secondo nel dicembre 2007, il terzo nell'ottobre 2008 e il quarto nel novembre 2010; tutti e quattro i satelliti sono tecnologicamente e costruttivamente identici, permettendo così l'interoperabilità delle immagini.

Il programma COSMO-SkyMed di Seconda Generazione (CSG) prevede altri quattro satelliti che affiancano i quattro di prima generazione. Attualmente, da gennaio 2021 è operativo il satellite COSMO-SkyMed CSG-FM3, pertanto la costellazione COSMO-SkyMed può vantare ad oggi cinque satelliti in orbita.

I satelliti COSMO-SkyMed possono acquisire in diverse modalità. I dati che sono stati utilizzati in questa analisi sono stati acquisiti in modalità STRIPMAP, con risoluzione nominale di 3 m. Sull'area di Niscemi, su richiesta del Dipartimento della Protezione Civile, l'Agenzia Spaziale Italiana ha reso disponibili circa 400 immagini di archivio COSMO-SkyMed, con copertura di un'area di 40 x 40 km e con una risoluzione spaziale di 3 x 3 metri, acquisite dal 2010 grazie al piano di acquisizioni *MapItaly* dedicato al monitoraggio del territorio nazionale. I dati sono stati trasferiti al Centro di Competenza individuato dal Dipartimento di Protezione Civile per l'analisi, ovvero il CPC-UNIFI.

4.2.3 SAOCOM

La missione SAOCOM (*Sarmiento de Argentina para la Observación con Microondas*), sviluppata dall'Agenzia spaziale argentina CONAE e composta dai satelliti gemelli SAOCOM 1A e 1B, è progettata per lavorare in sinergia con la costellazione italiana COSMO-SkyMed all'interno del sistema SIASGE (Sistema Italo-Argentino di Satelliti per la Gestione delle Emergenze).

La costellazione SAOCOM è costituita da satelliti che operano in banda L (lunghezza d'onda del segnale pari a 23,5 cm) e che quindi permettono una maggiore capacità di penetrazione attraverso la copertura vegetale e una ridotta sensibilità alla decorrelazione temporale. Tali caratteristiche permettono di mantenere un'elevata coerenza di fase anche in aree rurali o boschive e su intervalli temporali estesi, dove i sensori a lunghezza d'onda minore risultano spesso inefficaci.

La risoluzione spaziale nominale (in *azimut* e *range*) in modalità *Stripmap* è di 10 x 5 m. Il tempo di rivisitazione sulla stessa area è di 16 giorni con singolo satellite, riducibile a 8 giorni utilizzando entrambi i satelliti.

4.2.4 Capella Space

Capella Space, gestita da un'azienda statunitense operante nel settore aerospaziale, è una recente costellazione di satelliti SAR ad alta risoluzione. Il primo satellite di Capella è stato lanciato nel dicembre 2018.

Attualmente la costellazione Capella è composta da 36 satelliti SAR e fornisce immagini satellitari con cadenza oraria per l'intera superficie terrestre e intervalli di raccolta InSAR di 4 ore.

Ogni satellite della costellazione è equipaggiato con un *radar* in banda X a polarizzazione singola, in grado di acquisire immagini in modalità *stripmap*, *sliding spotlight* e *long-dwell spotlight* (Castelletti *et al.*, 2020).

I microsatelliti Capella operano in due configurazioni di acquisizione, ascendente e discendente su un'orbita inclinata a 45° rispetto alla direzione polare nord-sud, con puntamento *side-looking* (lateralmente rispetto alla direzione del volo) verso destra e capacità di rollio, ovvero di guardare anche verso sinistra. L'angolo di vista della LOS è variabile tra i 20° e i 40° e la risoluzione spaziale a terra è di 60-70 cm.

4.3 Analisi pre-evento

L'obiettivo principale di questa analisi è valutare l'eventuale presenza di segnali deformativi antecedenti agli eventi di gennaio 2026. A tal fine sono state utilizzate ed elaborate immagini SAR di archivio disponibili fino a date precedenti ai dissesti, interpretate in termini di velocità media annua e di serie temporali di spostamento dei punti di misura, per fornire un quadro dei movimenti del terreno pregressi nell'area di interesse.

In particolare, sono stati acquisiti *dataset* in geometria ascendente e discendente dei sensori Sentinel-1 e COSMO-SkyMed: le specifiche tecniche dei *dataset* analizzati sono riportate in Tabella 2.

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Intervallo temporale	Tipo di <i>Processing</i>
Sentinel-1	C	Discendente	03/02/2021 - 14/01/2026	SBAS
Sentinel-1	C	Ascendente	02/02/2021 - 13/01/2026	SBAS
COSMO-SkyMed	X	Discendente	12/11/2022 - 07/01/2026	SBAS
COSMO-SkyMed	X	Ascendente	13/01/2022 - 16/01/2026	SBAS
COSMO-SkyMed	X	Discendente	01/09/2015 - 23/01/2026	SqueeSAR
COSMO-SkyMed	X	Ascendente	17/08/2011 - 16/01/2026	SqueeSAR

Tabella 2 - Specifiche tecniche dei *dataset* utilizzati per l'analisi pre-eventi di gennaio 2026.

4.3.1 Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SBAS

In Figura 25 sono riportate le mappe di distribuzione delle velocità dei dati *radar* satellitari interferometrici in geometria ascendente (a) e discendente (b) ottenuti da algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale rispettivamente tra il 2 febbraio 2021 e il 12 gennaio 2026 e il 3 febbraio 2021 e il 13 gennaio 2026.

I punti di misura sono visualizzati in funzione della velocità media annua registrata nel periodo coperto dalle acquisizioni (2021-2026) mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di velocità. La finestra di stabilità è stata posta compresa tra -0,2 e +0,2 cm/anno tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione *standard* dell'intero *dataset*.

Le velocità sono espresse in cm/anno e sono misurate lungo la LOS del satellite. I dati Sentinel-1 processati con l'algoritmo SBAS sono ricampionati con cella quadrata di 30 m; pertanto, un Punto di Misura (MP, *Measurement Point*) è espressione di una misura su un'area di 900 m².

Dalla mappa si evince un quadro di sostanziale stabilità dell'area del centro abitato di Niscemi; nelle aree esterne al perimetro urbano, nei settori a nord-ovest e a sud si osservano alcuni MPs, soprattutto nelle aree calanchive, con velocità con segno positivo, con valori fino a 1,2 cm/anno. In prossimità del settore sud-orientale di Niscemi vi sono alcuni MPs con valori fino a 1,2 cm/anno.

Tutti questi punti di misura risultano in avvicinamento rispetto alla linea di vista del satellite, in accordo con la geometria ed esposizione del versante, verso ovest.

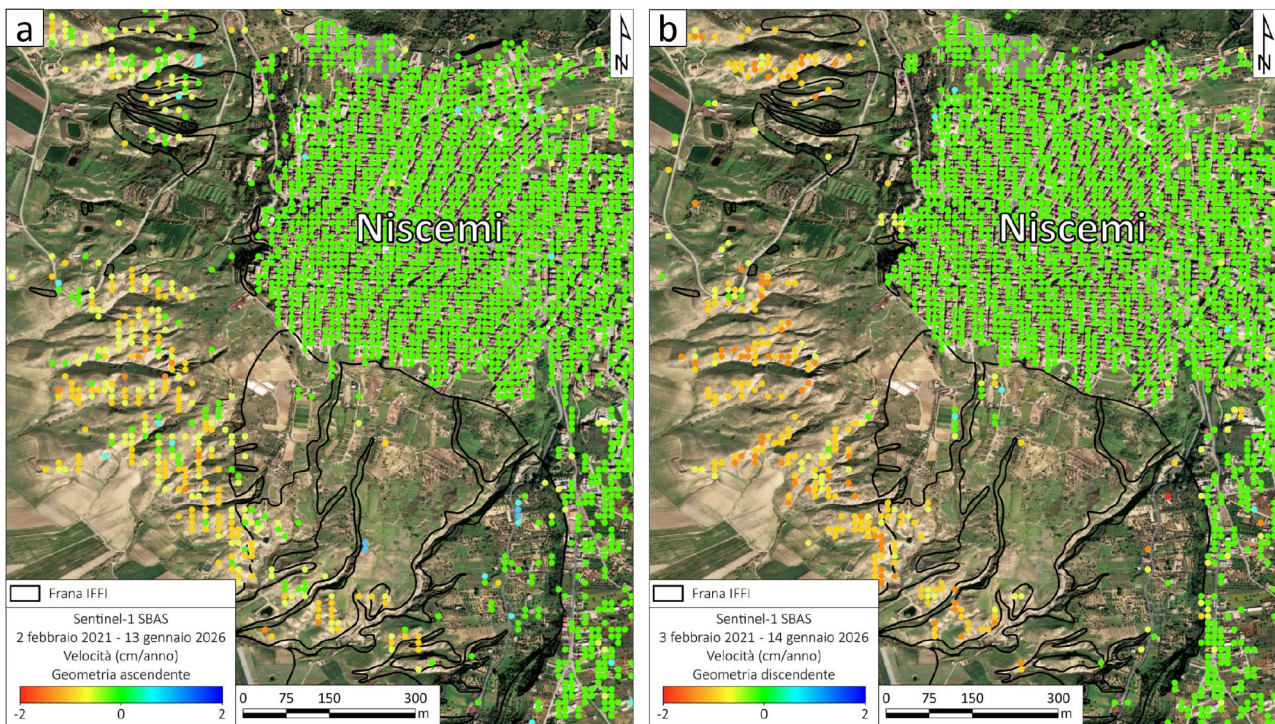


Figura 25 - Mappa delle velocità di deformazione dei dati Sentinel-1 nelle geometrie ascendente (a) e discendente (b) elaborati con algoritmo SBAS.

Nella zona nord del centro abitato di Niscemi, l'analisi dello scenario deformativo pregresso indica una sostanziale stabilità, sia in geometria ascendente (Figura 26) che discendente (Figura 28). In generale, le serie temporali degli MPs sia in geometria ascendente (Figura 27, punti B, C e D) che discendente (Figura 29, punti C e D), in corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo occidentale e meridionale, evidenziano spostamenti trascurabili che oscillano intorno allo zero nell'intero intervallo temporale esaminato.

Per quanto riguarda il punto B in geometria discendente (Figura 29) si osserva uno spostamento negativo di circa -1 cm durante l'intervallo temporale considerato (velocità media annua di -0,2 cm/anno). Nonostante lo spostamento registrato, i valori si mantengono all'interno della finestra di stabilità.

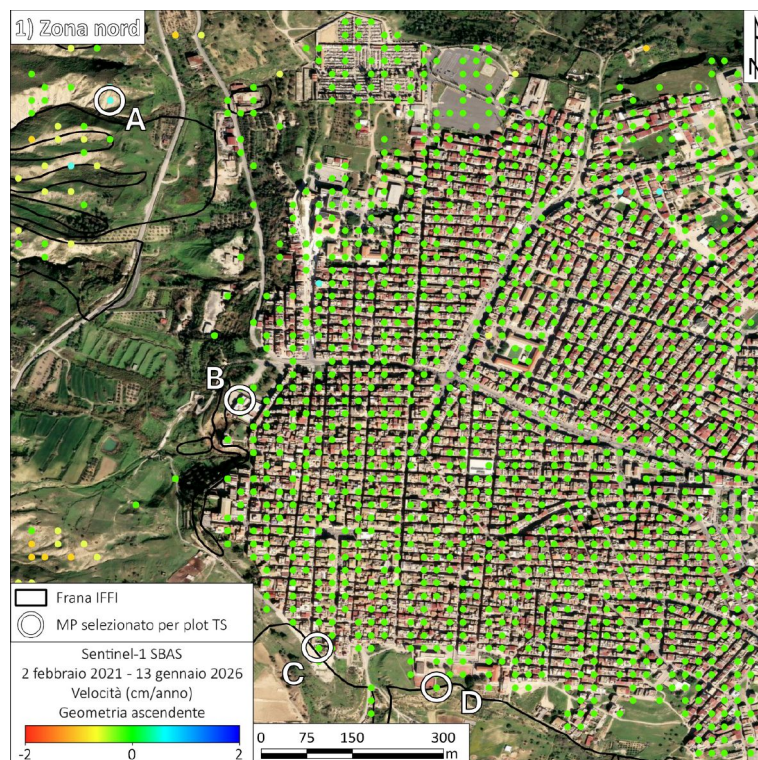


Figura 26 - Mappa delle velocità dei dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS in orbita ascendente sulla zona nord.

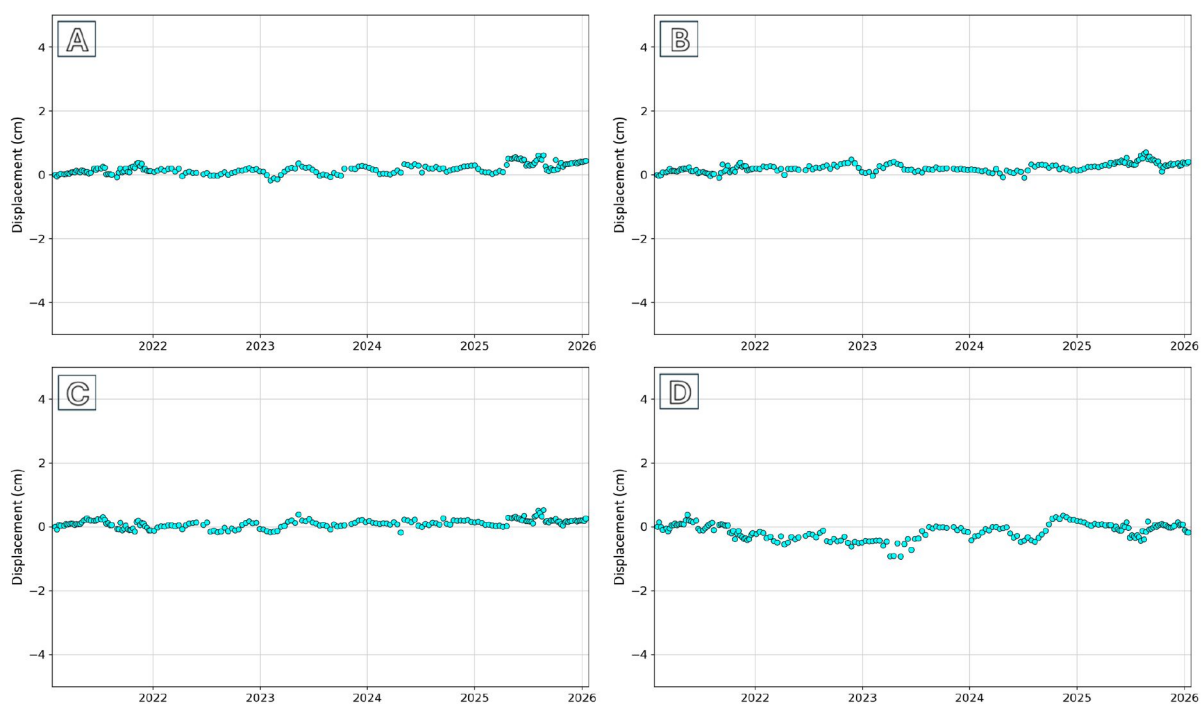


Figura 27 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 26.

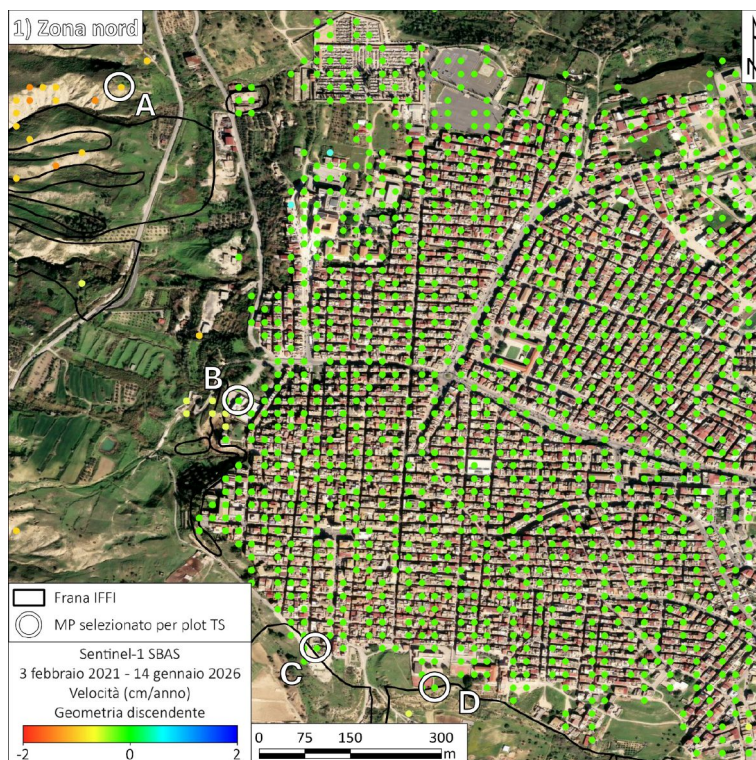


Figura 28 - Mappa delle velocità dei dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS in orbita discendente sulla zona nord.

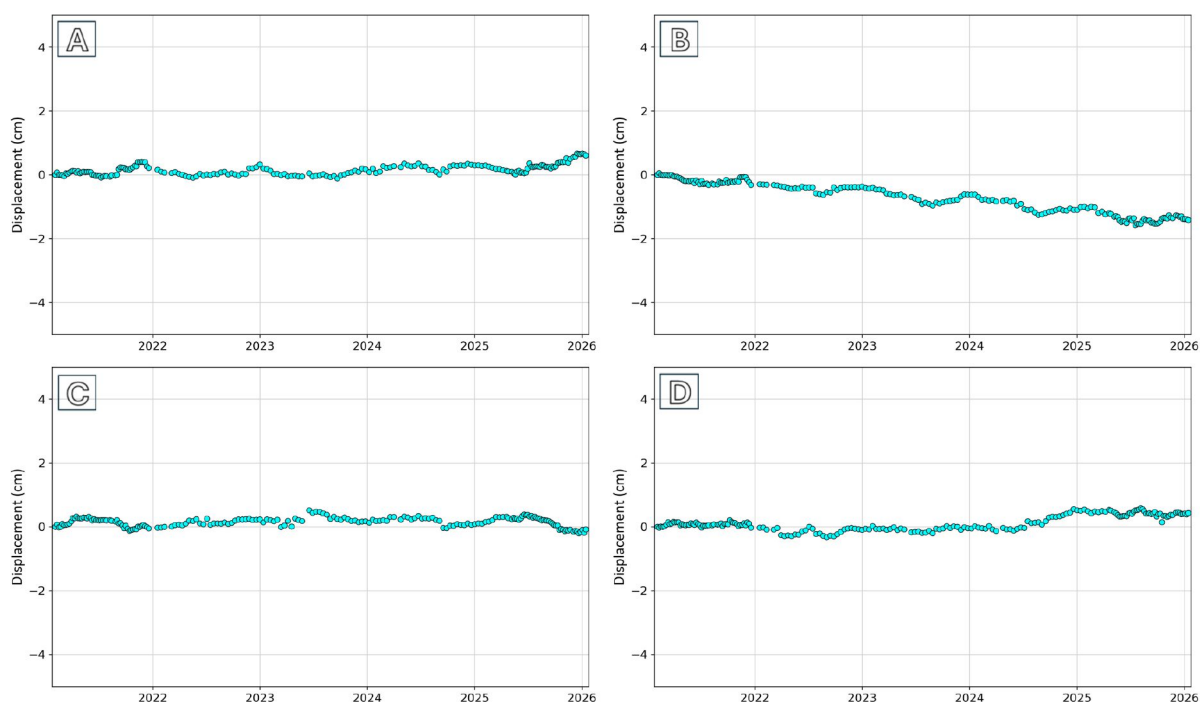


Figura 29 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 28.

Nella zona sud, l'analisi dello scenario deformativo pregresso indica valori di spostamento più elevati in corrispondenza del settore a valle del centro abitato, in particolare lungo la strada provinciale SP10, sia in geometria ascendente (Figura 30) che discendente (Figura 32).

In generale, le serie temporali degli MPs sia in geometria ascendente (Figura 31, punti E ed F) che discendente (Figura 33, punti E ed F), in corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo meridionale, evidenziano spostamenti trascurabili che oscillano intorno allo zero nell'intero intervallo temporale esaminato.

Nell'area sud-est del centro abitato di Niscemi, in corrispondenza dei punti G ed H, si evidenziano spostamenti in atto sin dall'inizio della serie temporale, caratterizzati da valori cumulati che raggiungono i 3,7 cm (Figura 31, punto H) e i -2 cm (Figura 33, punti G ed H). Le altre serie temporali esaminate non evidenziano deviazioni significative né indizi di accelerazione precedenti all'evento del 26 gennaio.

Infine, si evidenzia che in geometria ascendente i dati Sentinel-1 mostrano spostamenti di entità minore rispetto alla geometria discendente in quanto presumibilmente sottostimano la deformazione, a causa dell'esposizione verso ovest del pendio opposto alla direzione della LOS ascendente.

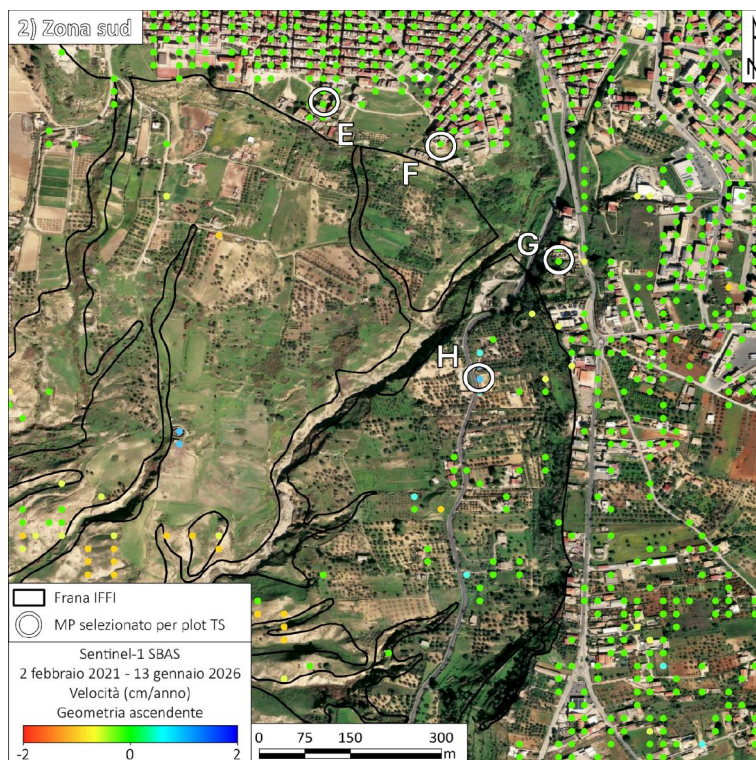


Figura 30 - Mappa delle velocità dei dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS in orbita ascendente sulla zona sud.

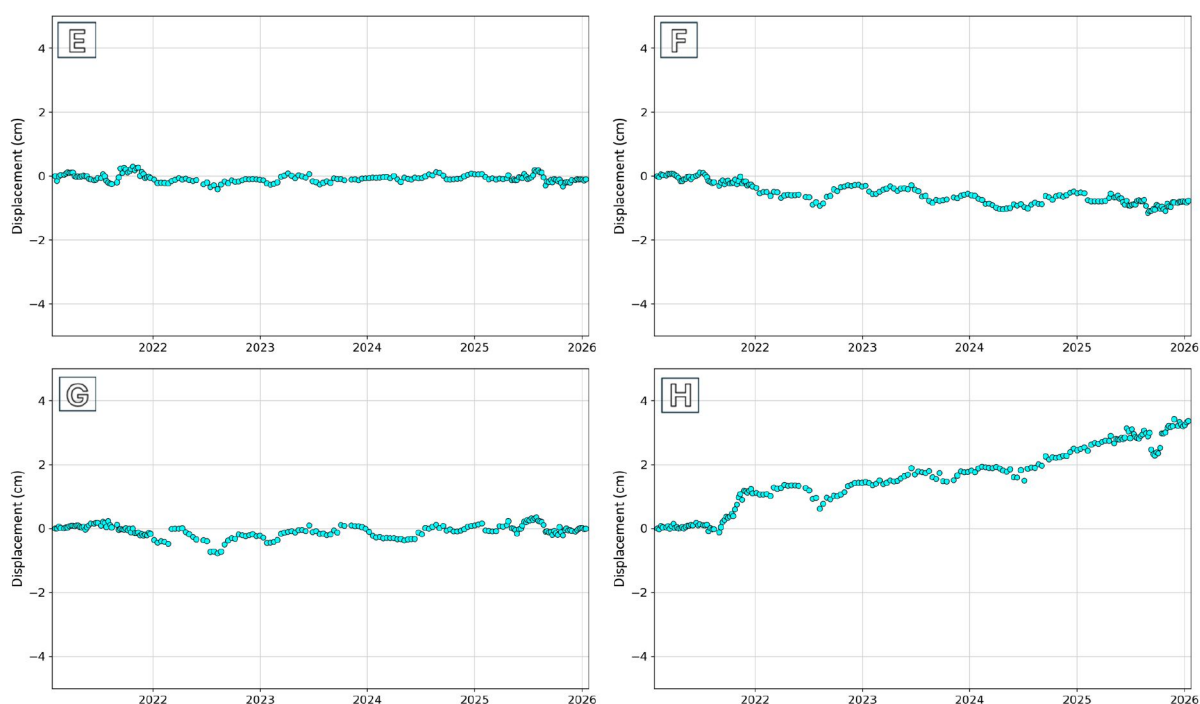


Figura 31 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 30.

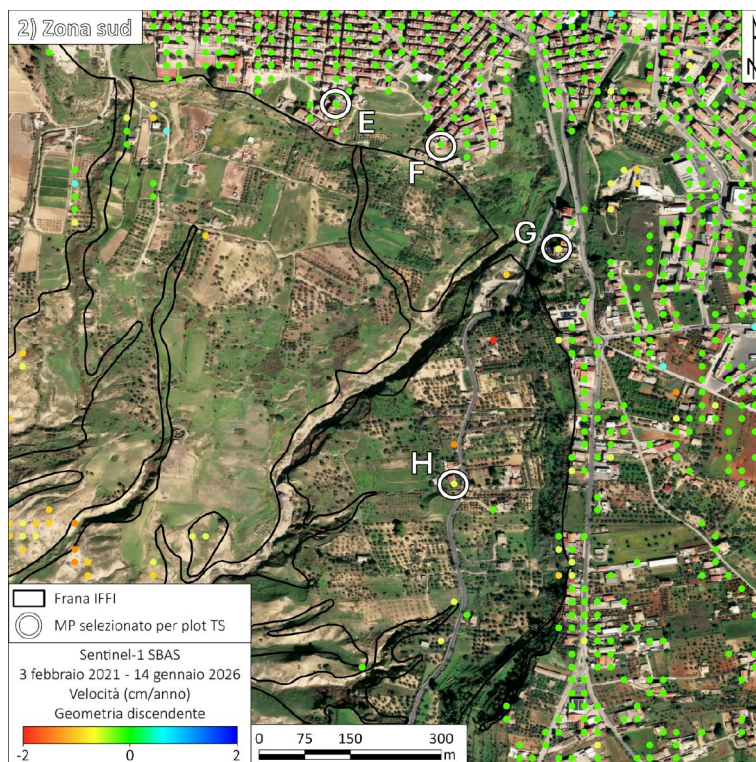


Figura 32 - Mappa delle velocità dei dati Sentinel-1 elaborati con tecnica SBAS in orbita discendente sulla zona sud.

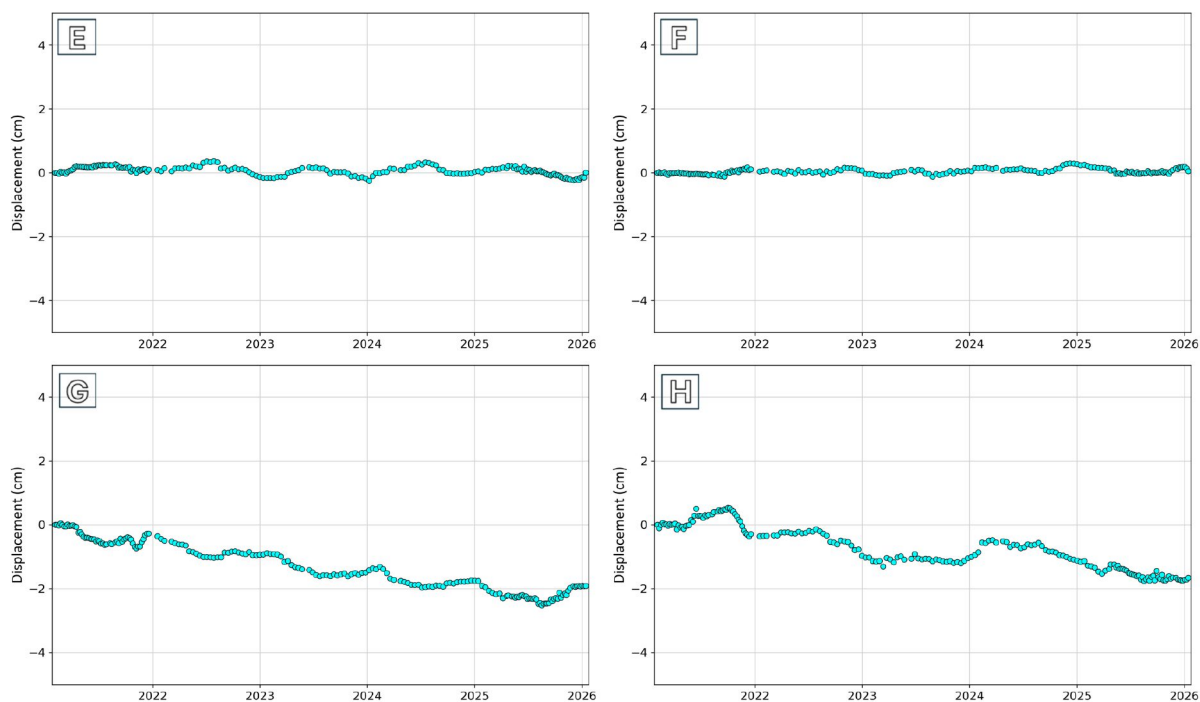


Figura 33 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 32.

4.3.2 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SBAS

La Figura 34 illustra la mappa di velocità dei dati interferometrici acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed Seconda Generazione e processati tramite algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra il 13 gennaio 2022 e il 16 gennaio 2026 per la geometria ascendente, e tra il 12 novembre 2022 e il 7 gennaio 2026 per la geometria discendente.

I punti di misura sono visualizzati in funzione della velocità media annua registrata nel periodo coperto dalle acquisizioni (2022-2026) mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di velocità. La

finestra di stabilità è stata posta pari a $\pm 0,2$ cm/anno tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione *standard* dell'intero *dataset* di MPs. Le velocità sono espresse in cm/anno e sono misurate lungo la LOS del satellite.

In generale, tutta l'area del centro abitato di Niscemi è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano velocità all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,2$ cm/anno. Lungo la strada SP12 emergono alcuni MPs che presentano velocità negative fino a -1 cm/anno in entrambe le geometrie di acquisizione, in corrispondenza di alcuni settori interessati da frane mappate all'interno dell'inventario IFFI.

Nel settore meridionale del paese sono presenti MPs con velocità generalmente poco superiori alla finestra di stabilità, circa 0,5 cm/anno. Mentre, a valle del centro abitato, all'interno del versante esposto a sud caratterizzato dalla presenza di una frana mappata in IFFI, vi è la presenza di numerosi MPs con velocità fino a 1 cm/anno in geometria ascendente e -1,6 cm/anno in geometria discendente.

Infine, nel settore meridionale del paese lungo la SP10, con versante esposto verso ovest, si rileva una concentrazione elevata di MPs con velocità fino a -3 cm/anno in geometria discendente. Tali punti risultano in allontanamento rispetto alla linea di vista del satellite, concordante con la geometria ed esposizione del versante, verso ovest.

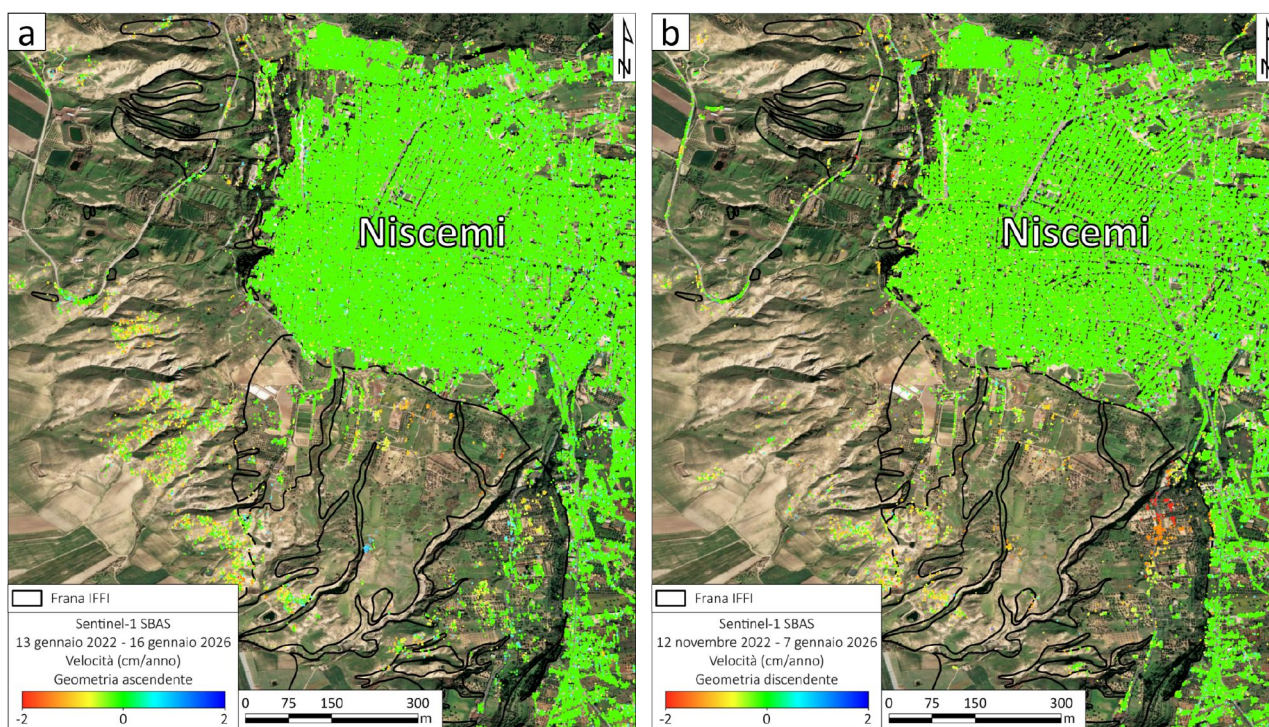


Figura 34 - Mappa delle velocità di deformazione dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione nelle geometrie ascendente (a) e discendente (b) elaborate con algoritmo SBAS.

La zona nord del centro abitato di Niscemi mostra uno scenario deformativo pregresso di sostanziale stabilità, sia in geometria ascendente (Figura 35) che discendente (Figura 37). In generale, le serie temporali degli MPs in geometria ascendente e discendente in corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo occidentale e meridionale (Figura 36, punti A, C, D) mostrano spostamenti che oscillano intorno allo zero in tutto l'intervallo temporale considerato.

Lungo la strada SP12, in corrispondenza di alcuni settori interessati da frane mappate all'interno dell'inventario IFFI, le serie temporali dei punti di misura mostrano movimenti lineari e costanti, coerenti con un movimento pregresso verso ovest, con uno spostamento cumulato con valori fino a -2 cm (Figura 38, punto B).

Inoltre, si evidenzia che in orbita ascendente i dati MPs mostrano movimenti di entità minore rispetto all'orbita discendente in quanto presumibilmente sottostimano la deformazione, a causa dell'esposizione verso ovest del pendio opposto alla direzione della LOS ascendente.

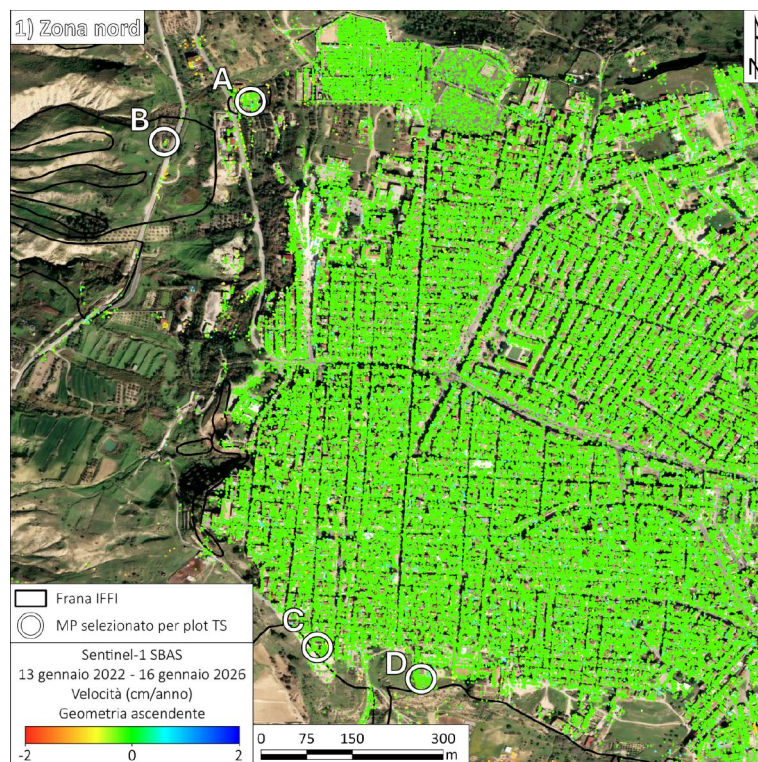


Figura 35 - Mappa delle velocità dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione elaborati con tecnica SBAS in orbita ascendente sulla zona nord.

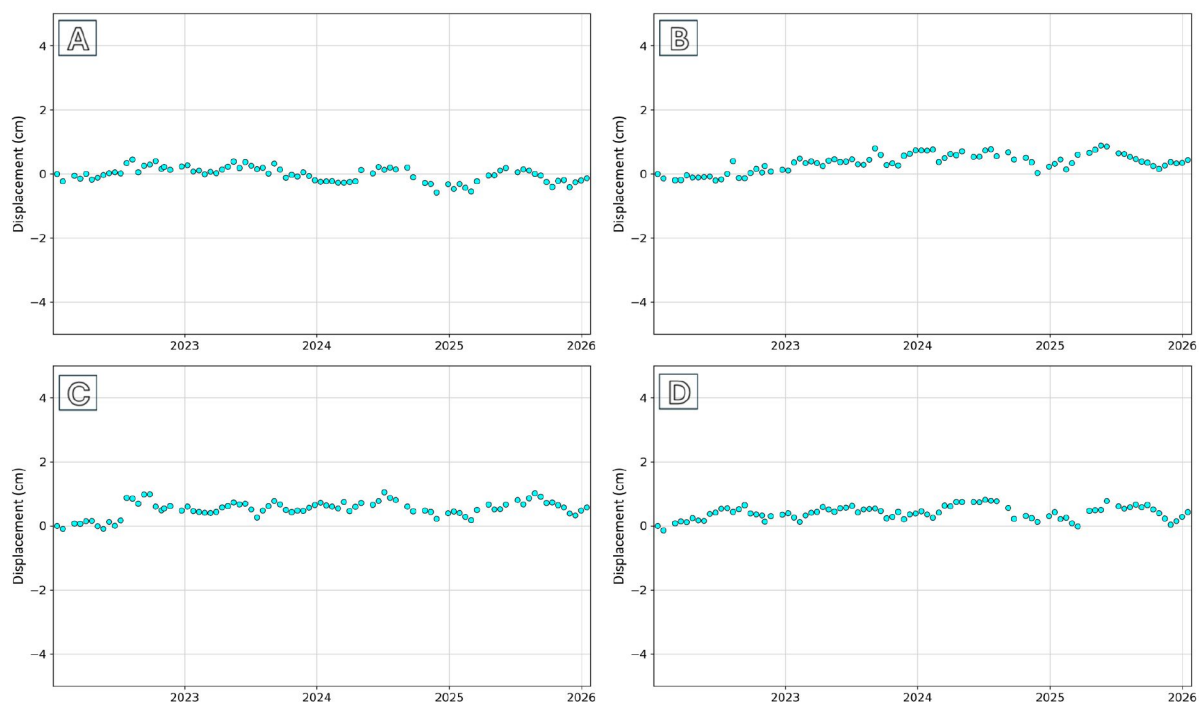


Figura 36 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 35.

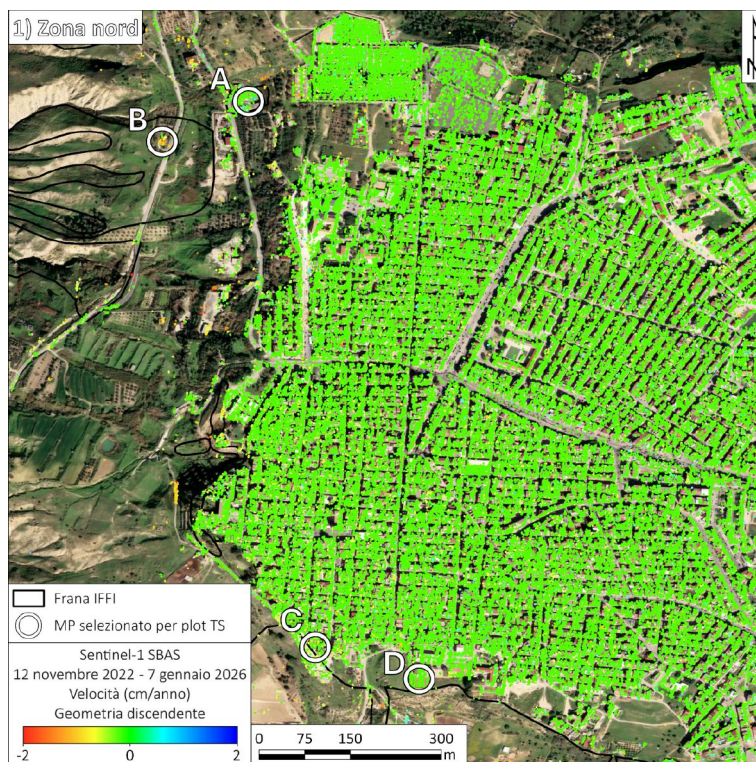


Figura 37 - Mappa delle velocità dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione elaborati con tecnica SBAS in orbita discendente sulla zona nord.

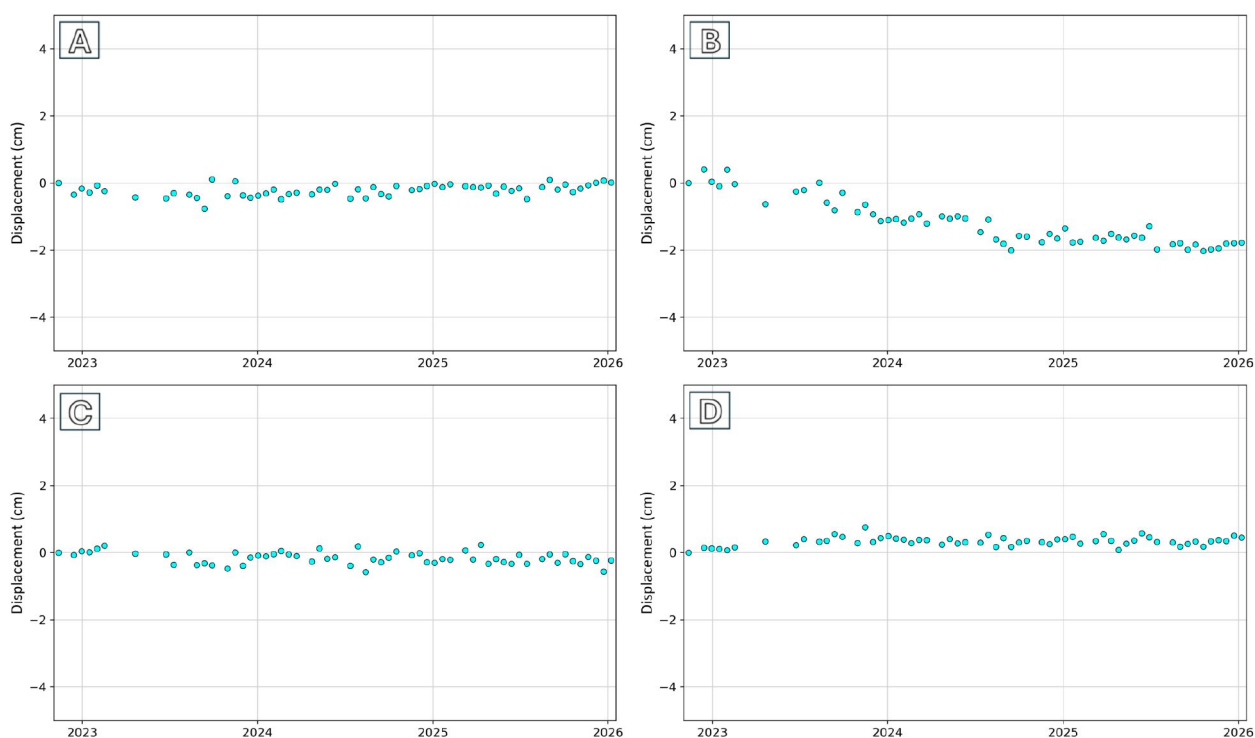


Figura 38 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 37.

Nella zona sud, sia nel settore meridionale del paese che a valle del centro abitato, l'analisi dello scenario deformativo pregresso indica valori di spostamento, sia in geometria ascendente (Figura 39) che in geometria discendente (Figura 41), che non mostrano deformazioni significative, né quantomeno segnali di accelerazione precedenti alla frana del 26 gennaio (Figura 40 e Figura 42, punti F, G, H). Mentre, a sud del paese di Niscemi, lungo la SP10, in geometria discendente (Figura 42, punto E) si osservano i punti di misura caratterizzati dai massimi valori di spostamento cumulato.

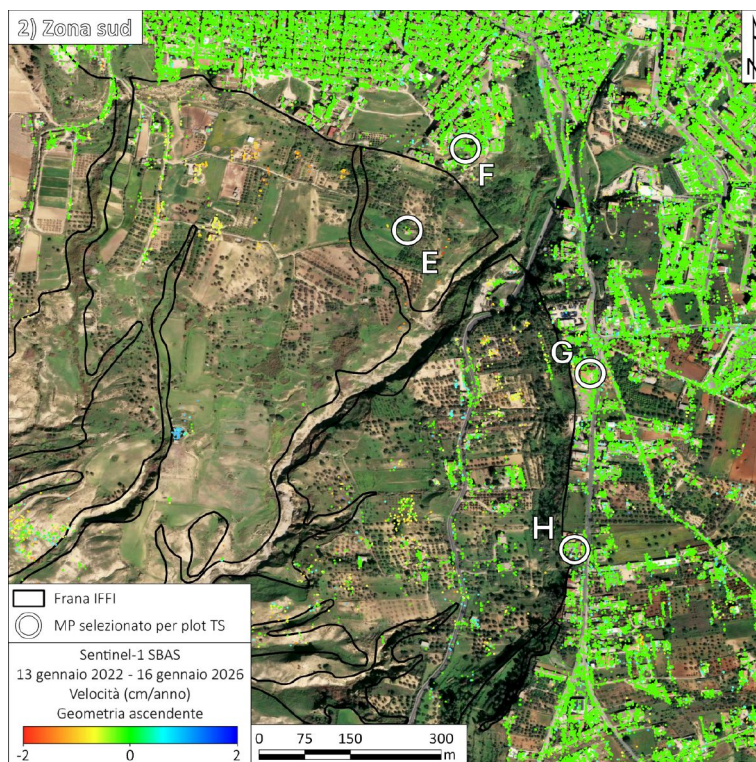


Figura 39 - Mappa delle velocità dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione elaborati con tecnica SBAS in orbita ascendente sulla zona sud.

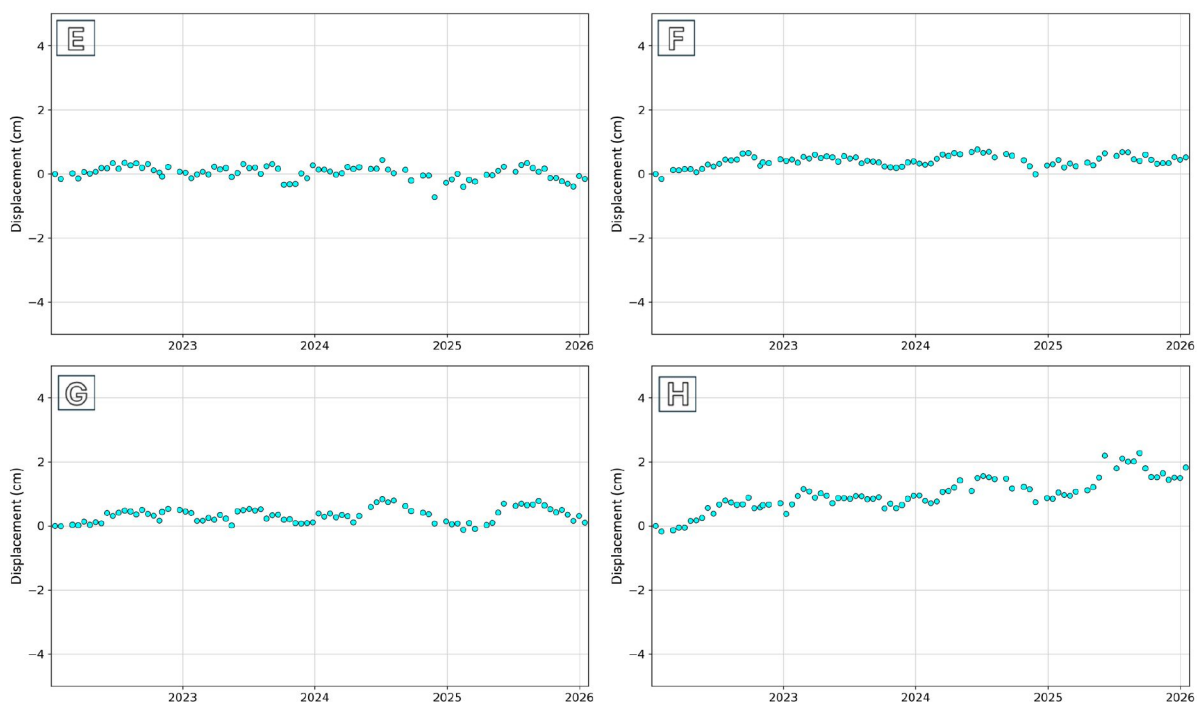


Figura 40 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 39.

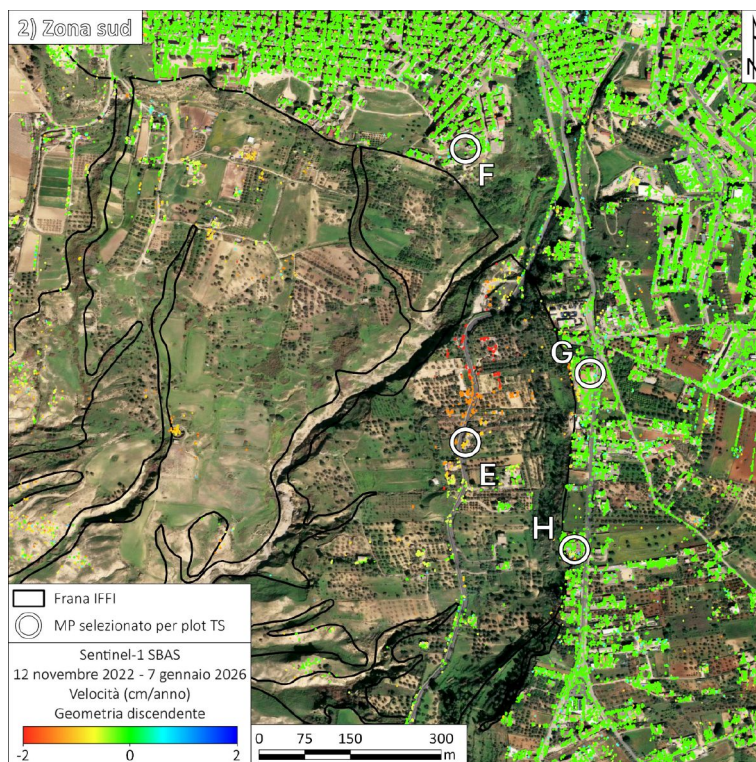


Figura 41 - Mappa delle velocità dei dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione elaborati con tecnica SBAS in orbita discendente sulla zona sud.

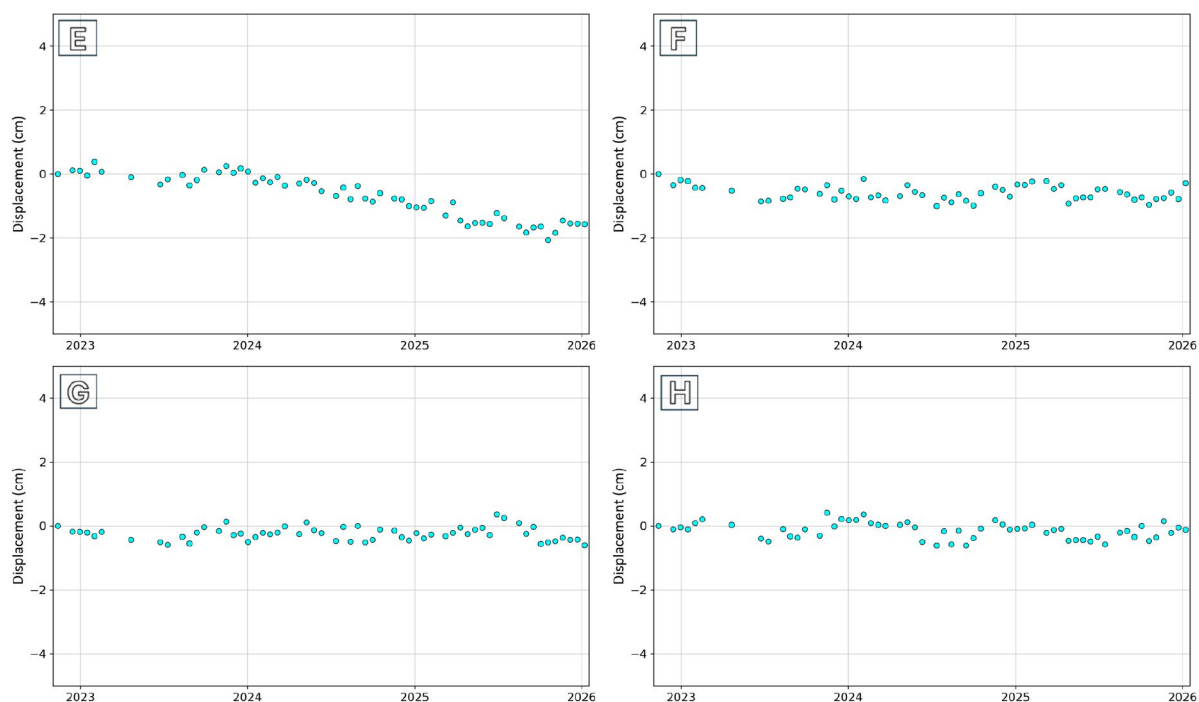


Figura 42 - Serie temporali dei punti di misura MPs localizzati in Figura 41.

4.3.3 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SqueeSAR

In Figura 43 sono riportate le mappe di distribuzione delle velocità dei dati *radar* satellitari interferometrici PS in orbita discendente e ascendente (Figura 43a,b), e lungo le direttrici orizzontale est-ovest e verticale (Figura 43c,d) elaborati tramite tecnica SqueeSAR.

I dati della velocità nelle sue componenti verticali e orizzontale est-ovest (Figura 43c,d) mostrano un numero più esiguo di bersagli stabili soprattutto nelle aree non urbanizzate, dovuto al ri-campionamento dei dati ascendenti e discendenti su una griglia spaziale comune di 15 x 15 m.

L'area del centro abitato di Niscemi risulta essere stabile in tutti i *datasets*, con PS classificati in colore verde che presentano velocità medie annue all'interno della soglia di stabilità.

A valle del centro abitato, in corrispondenza del settore occidentale e del settore meridionale, dove affiorano le argille, sono presenti alcuni PS caratterizzati da velocità medie al di sopra del *range* stabile, con segno negativo in entrambe le geometrie di acquisizione, indicante un movimento pregresso di allontanamento dal sensore coerentemente con un movimento verso il basso lungo il versante.

L'area caratterizzata dai più alti tassi di deformazione risulta essere il settore sud-est che mostra velocità medie annue fino a circa 35 mm/anno in geometria discendente, e componenti del movimento sia in direzione verticale che traslativa verso ovest.

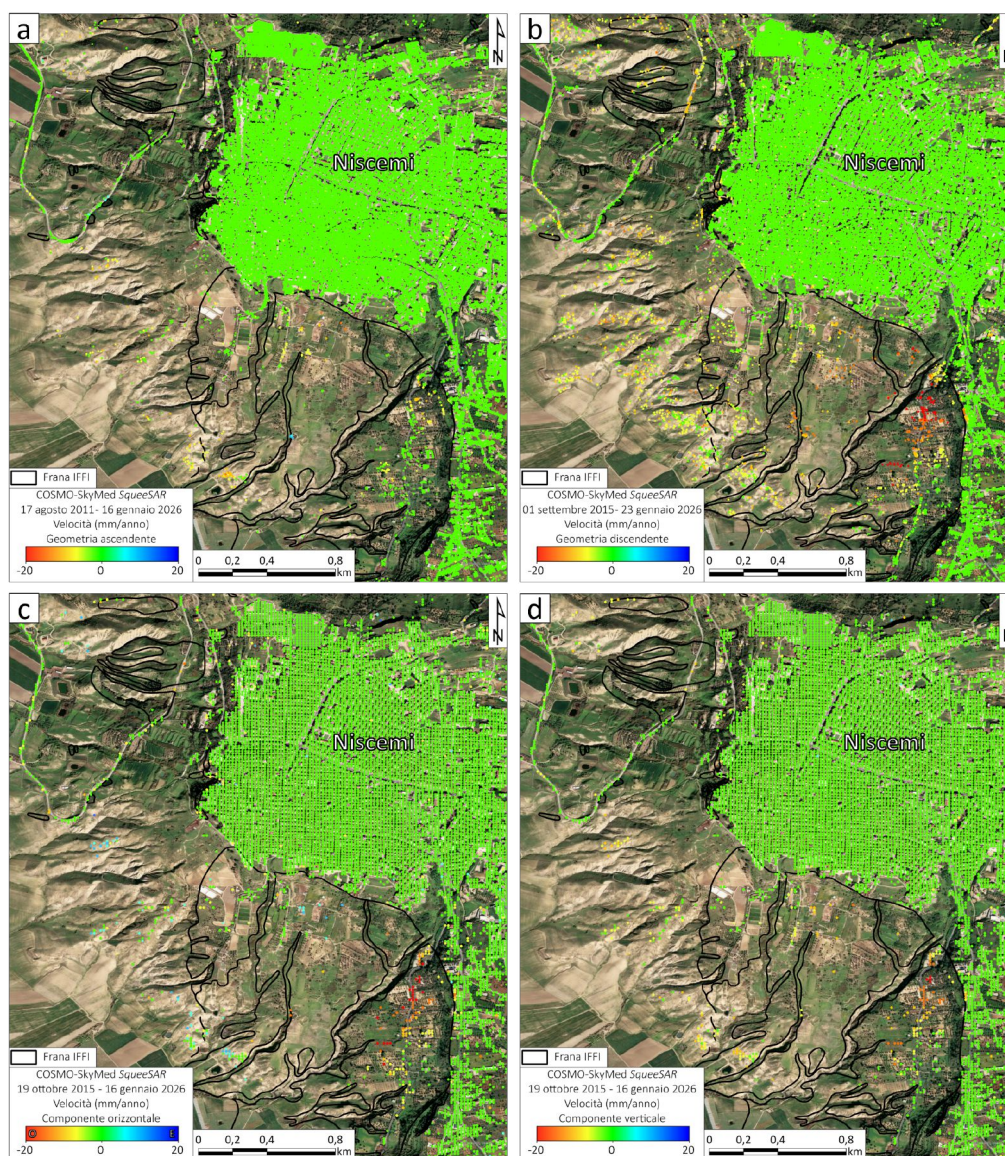


Figura 43 - Mappa della distribuzione delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR (a) lungo LOS in orbita ascendente, (b) lungo LOS in orbita discendente, (c) lungo la direzione orizzontale est-ovest, (d) lungo la direzione verticale.

Nella zona nord, l'analisi dello scenario deformativo pregresso mostra una sostanziale stabilità del centro abitato, in orbita ascendente (Figura 44) e discendente (Figura 46). In generale, le serie temporali dei PS in geometria ascendente in corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo

occidentale e meridionale (Figura 45, punti A, B, C) mostrano spostamenti trascurabili che oscillano intorno allo zero in tutto l'intervallo temporale considerato dal 17 agosto 2011 al 16 gennaio 2026. Sono presenti alcuni punti di misura PS che mostrano un movimento in allontanamento dal sensore con un andamento lineare di movimento a partire dal 2014 (Figura 45, punto C).

Si evidenzia che in orbita ascendente i dati PS mostrano movimenti di entità minore rispetto all'orbita discendente in quanto presumibilmente sottostimano la deformazione, a causa dell'esposizione verso ovest del pendio opposto alla direzione della LOS ascendente.

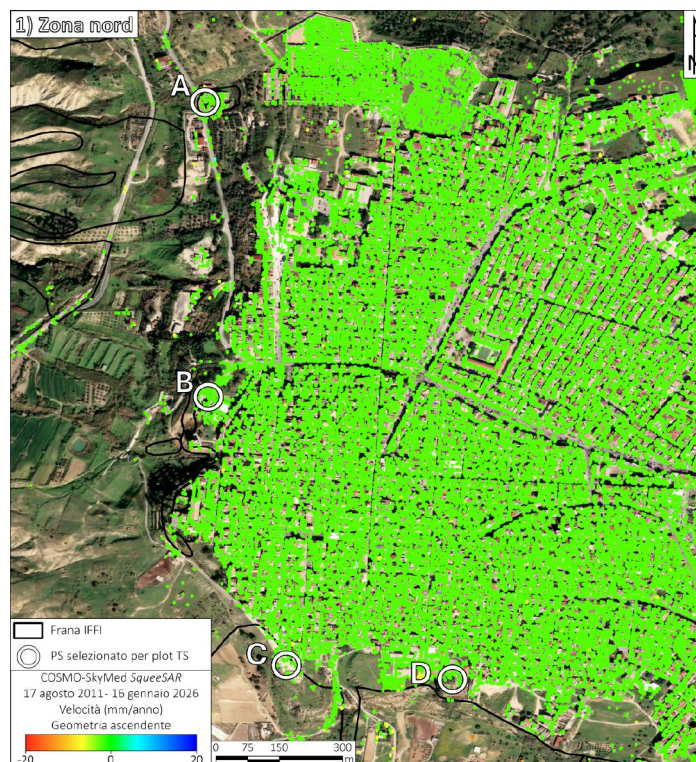


Figura 44 - Mappa delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR su immagini COSMO-SkyMed in orbita ascendente sulla zona nord.

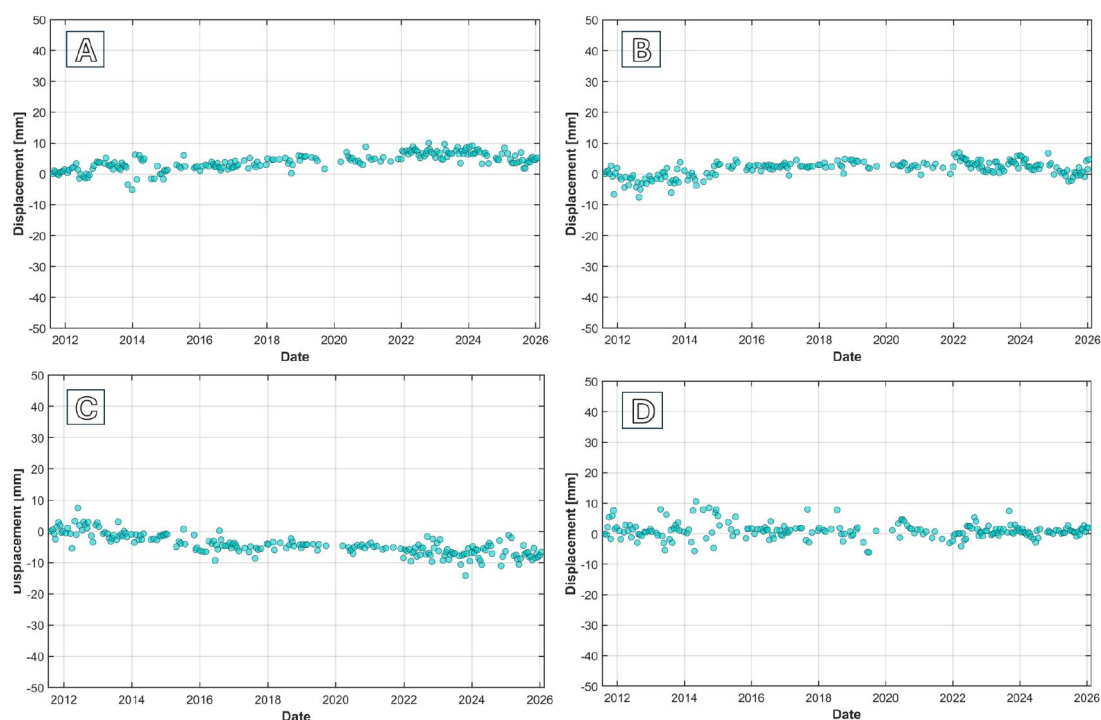


Figura 45 - Serie temporali dei punti di misura PS localizzati in Figura 44.

Sul versante occidentale a valle del centro abitato, in corrispondenza delle strade e di aree con suolo esposto dove sono rilevati i bersagli riflettenti, i dati in geometria discendente registrano tassi di velocità di deformazione più alti di quelli in orbita ascendente, in quanto la geometria di acquisizione con LOS verso ovest risulta essere più favorevole a stimare correttamente i movimenti del terreno lungo il pendio, data l'esposizione morfologica del versante. Le serie temporali dei punti di misura localizzati in quest'area lungo il versante occidentale mostrano movimenti lineari e costanti, coerenti con un movimento pregresso verso ovest e spostamento cumulato con valori fino a 50 mm (Figura 47, punto B). In corrispondenza degli edifici situati a ridosso della scarpata lungo il bordo occidentale e meridionale (Figura 47, punti A, C, D) le serie temporali dei dati PS presentano spostamenti trascurabili che oscillano intorno allo zero.

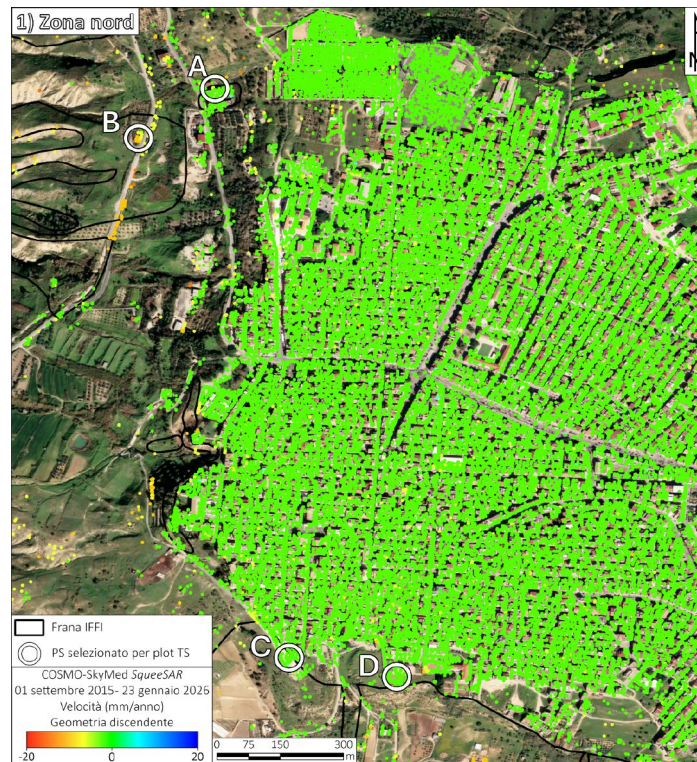


Figura 46 - Mappa delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR su immagini COSMO-SkyMed in orbita discendente sulla zona nord.

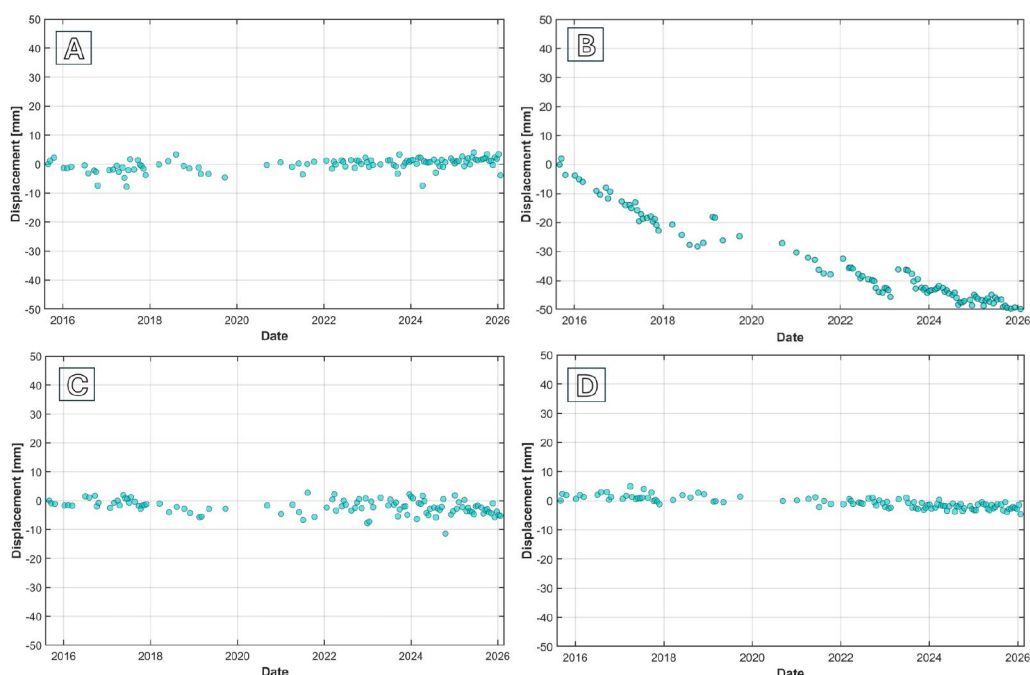


Figura 47 - Serie temporali dei punti di misura PS localizzati in Figura 46.

Nella zona sud, l'analisi dello scenario deformativo pregresso mostra i più alti tassi di velocità in corrispondenza del settore a valle del centro abitato, in particolare lungo lo sviluppo della SP10, sia in orbita ascendente (Figura 48) che discendente (Figura 50). Le velocità medie annue dei dati PS in queste aree mostrano valori elevati fino a 9 mm/anno in orbita ascendente e fino a 35 mm/anno in orbita discendente.

Le serie temporali dei PS nelle aree rurali a valle del paese presentano *trend* deformativi lineari e costanti con spostamenti cumulati dal 2011 al 2026 fino a 8-10 cm in orbita ascendente (Figura 48, punto E) e fino a valori di 30-40 cm nell'orbita discendente (Figura 50, punto E), che è l'acquisizione che meglio stima i movimenti in quest'area, data l'esposizione verso ovest del pendio. I punti di misura PS ascendenti e discendenti sull'edificio del nucleo abitato mostrano una sostanziale stabilità nel periodo di osservazione satellitare antecedente ai dissesti di gennaio 2026 (Figura 48 punti F, G, H e Figura 50 punti F, G, H).

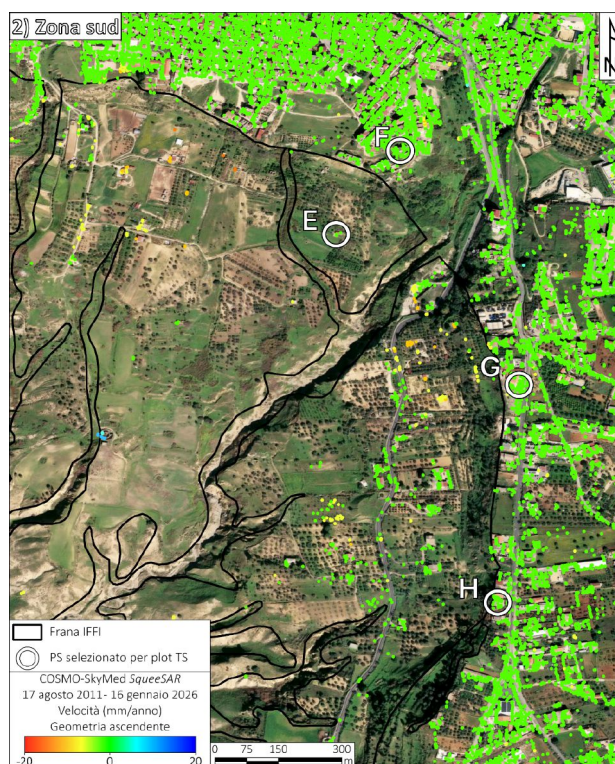


Figura 48 - Mappa delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR su immagini COSMO-SkyMed in orbita ascendente sulla zona sud.

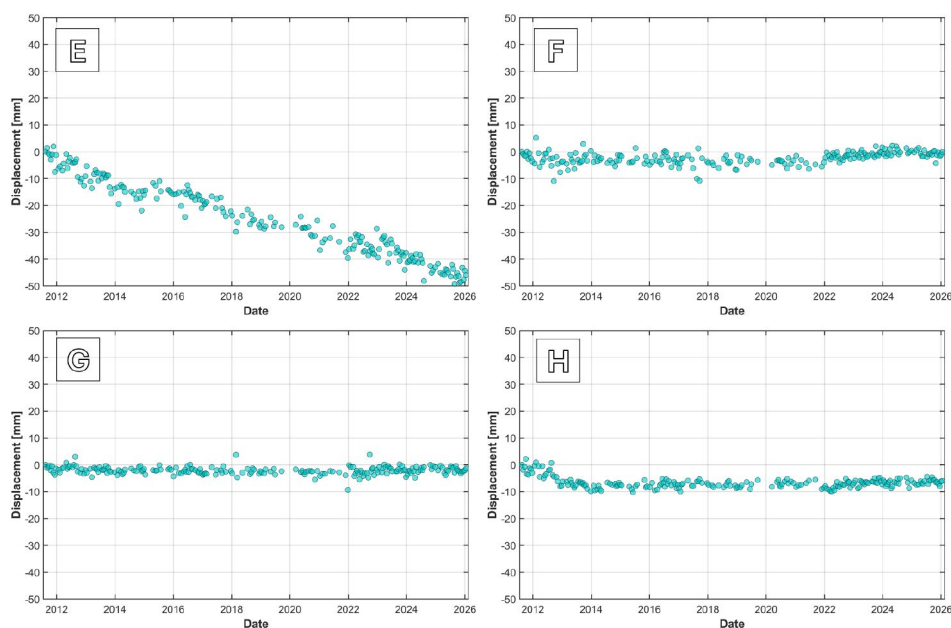


Figura 49 - Serie temporali dei punti di misura PS localizzati in Figura 48.

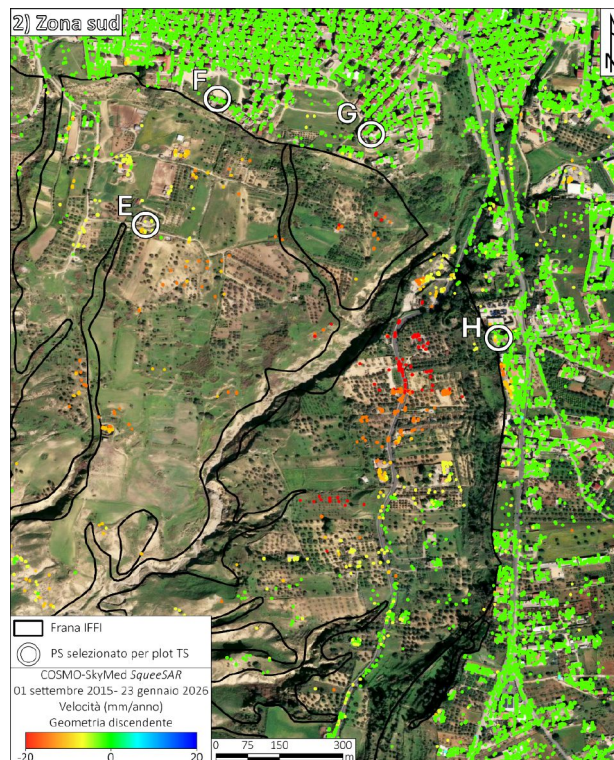


Figura 50 - Mappa delle velocità dei dati PS elaborati con tecnica SqueeSAR su immagini COSMO-SkyMed in orbita discendente sulla zona sud.

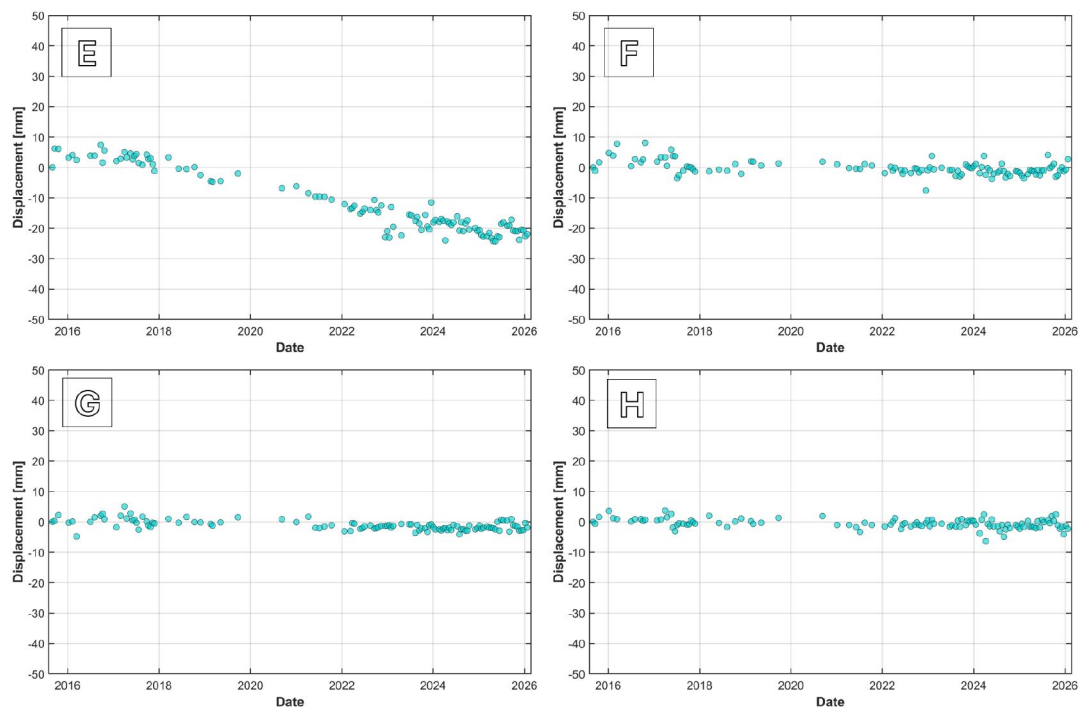


Figura 51 - Serie temporali dei punti di misura PS localizzati in Figura 50.

4.4 Analisi co-evento

L'analisi co-evento si è basata, in primo luogo, sul confronto tra coppie di immagini SAR acquisite una prima e una dopo il fenomeno di frana, al fine di stimare e quantificare il campo di deformazione indotto dall'evento.

Sono stati effettuati due tipi di elaborazione: una elaborazione DInSAR basata sul confronto della fase interferometrica (Tabella 3) e una elaborazione *Pixel Offset Tracking* basata sull'analisi di ampiezza di coppie di immagini SAR (Tabella 4).

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Data Acquisizione	Tipo di Processing
COSMO-SkyMed	X	Discendente	23/01/2026	DInSAR
COSMO-SkyMed	X	Discendente	08/02/2026	

Tabella 3 - Specifiche tecniche della coppia interferometrica utilizzata per l'analisi interferometrica DInSAR.

L'elaborazione *Pixel Offset Tracking* è stata effettuata a partire da più coppie di immagini COSMO-SkyMed e SAOCOM acquisite ad intervalli diversi, ma sempre con la prima acquisizione pre-evento e la seconda acquisizione post-evento (Tabella 4).

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Intervallo temporale
COSMO-SkyMed	X	Ascendente	16/01/2026 - 01/02/2026
COSMO-SkyMed	X	Discendente	07/01/2026 - 08/02/2026
SAOCOM	L	Ascendente	05/01/2026 - 29/01/2026
SAOCOM	L	Discendente	06/01/2026 - 30/01/2026

Tabella 4 - Specifiche tecniche dei datasets utilizzati per l'analisi *Pixel Offset Tracking* degli eventi di gennaio 2026.

4.4.1 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica DInSAR

L'analisi co-evento si basa sul confronto tra una coppia di immagini SAR acquisite prima e dopo il fenomeno di frana. La tecnica utilizzata si configura come una interferometria differenziale DInSAR basata sul confronto della fase del segnale elettromagnetico tra le due acquisizioni satellitari *radar* coerenti per generare un interferogramma.

L'obiettivo di questa analisi è la visualizzazione e la determinazione spaziale del campo di spostamento superficiale indotto dall'evento cinematico. Lo spostamento ottenuto nell'interferogramma è monodimensionale e rappresenta la proiezione del vettore di spostamento reale sulla LOS del satellite nelle due geometrie di acquisizione, ascendente e discendente.

Si selezionano due acquisizioni con il minor intervallo temporale (*temporal baseline*) possibile a cavallo dell'evento per massimizzare la coerenza elettromagnetica. Inoltre, è opportuno che la *baseline perpendicolare*, cioè la proiezione della distanza spaziale tra le due posizioni orbitali del satellite al momento delle due diverse acquisizioni lungo la direzione ortogonale alla LOS del sensore, sia sufficientemente piccola al fine di ottenere una buona sensibilità dell'interferogramma alla topografia e una alta qualità del segnale in termini di coerenza.

In particolare, per l'evento franoso su Niscemi verificatosi tra il 25 e il 26 gennaio 2026, è stata scelta la coppia interferometrica di immagini SAR del 23 gennaio 2026 e del 8 febbraio 2026 acquisite dal sensore COSMO-SkyMed in orbita discendente, ed è stata effettuata un'analisi interferometrica standard DInSAR a piena risoluzione. La *baseline* perpendicolare tra le due traiettorie satellitari è di 272 m.

L'interferogramma (Figura 52) mostra al bordo sud del paese di Niscemi una frangia interferometrica di deformazione, probabilmente connessa ai marcati spostamenti della frana. La frangia interferometrica appare infatti localizzata a partire dal ciglio della scarpata meridionale verso valle, nell'area dove è avvenuta la frana del 25-26 gennaio 2026.

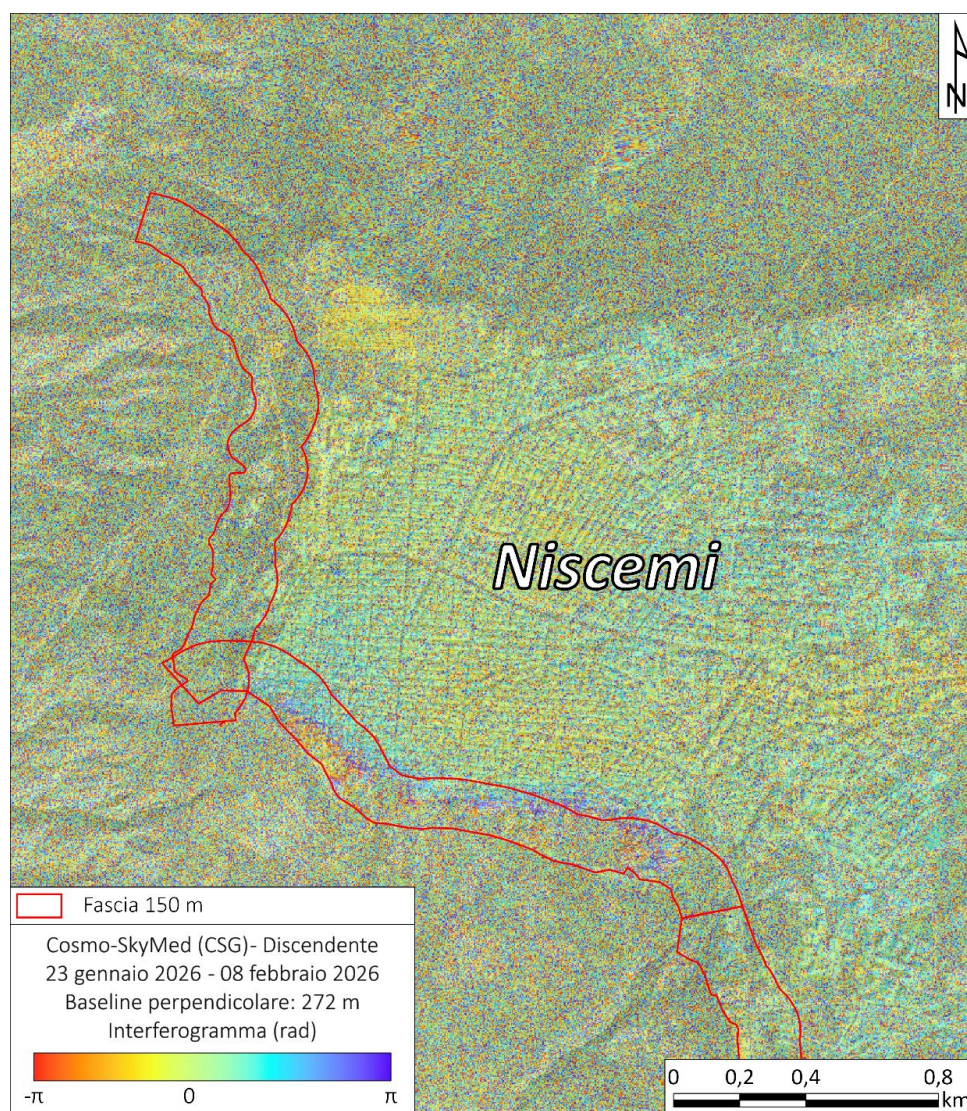


Figura 52 - Interferogramma ottenuto da due immagini SAR acquisite dal sensore COSMO-SkyMed in orbita discendente nelle date 23 gennaio 2026 e 8 febbraio 2026.

4.4.2 COSMO-SkyMed e SAOCOM - elaborazione con tecnica Pixel Offset Tracking

Le elaborazioni “*Pixel Offset Tracking*” sono ottenute mediante analisi di ampiezza del segnale elettromagnetico, al fine di stimare il campo di deformazione. Questo tipo di analisi si basa sull’identificare finestre mobili all’interno delle immagini SAR e guardare come i *pixel* contenuti all’interno di queste finestre mobili si muovono tra il pre- e il post-evento, al fine di quantificare lo spostamento (l’*offset*) in *range* e in *azimut* che subisce l’immagine post-evento rispetto all’immagine pre-evento.

Il prodotto che si ottiene è un campo bi-dimensionale di deformazione che mostra lo sfasamento lungo le direzioni di *range* e *azimut*, che corrispondono alle direzioni planari est-ovest e nord-sud. Avendo a disposizione due geometrie di acquisizione, ascendente e discendente, è possibile ricavare anche la componente verticale dello spostamento.

In Figura 53 si riportano i risultati modulo dello spostamento dato dalla somma delle componenti est-ovest, nord-sud e verticale per entrambe le aree di interesse, realizzate a partire dalle immagini COSMO-SkyMed e SAOCOM. I vari segnali di ampiezza sono poi stati combinati tra loro per ottenere una ricostruzione 3D della deformazione, che copre il periodo temporale di entrambi gli eventi franosi del 15-16 gennaio e del 25-26 gennaio 2026.

Per entrambe le aree interessate dagli eventi, l’analisi *Pixel Offset Tracking* mostra una direzione chiara verso ovest della frana a nord di Niscemi, mentre la frana a sud rivela spostamenti fino a 40 m sia in direzione sud-ovest.

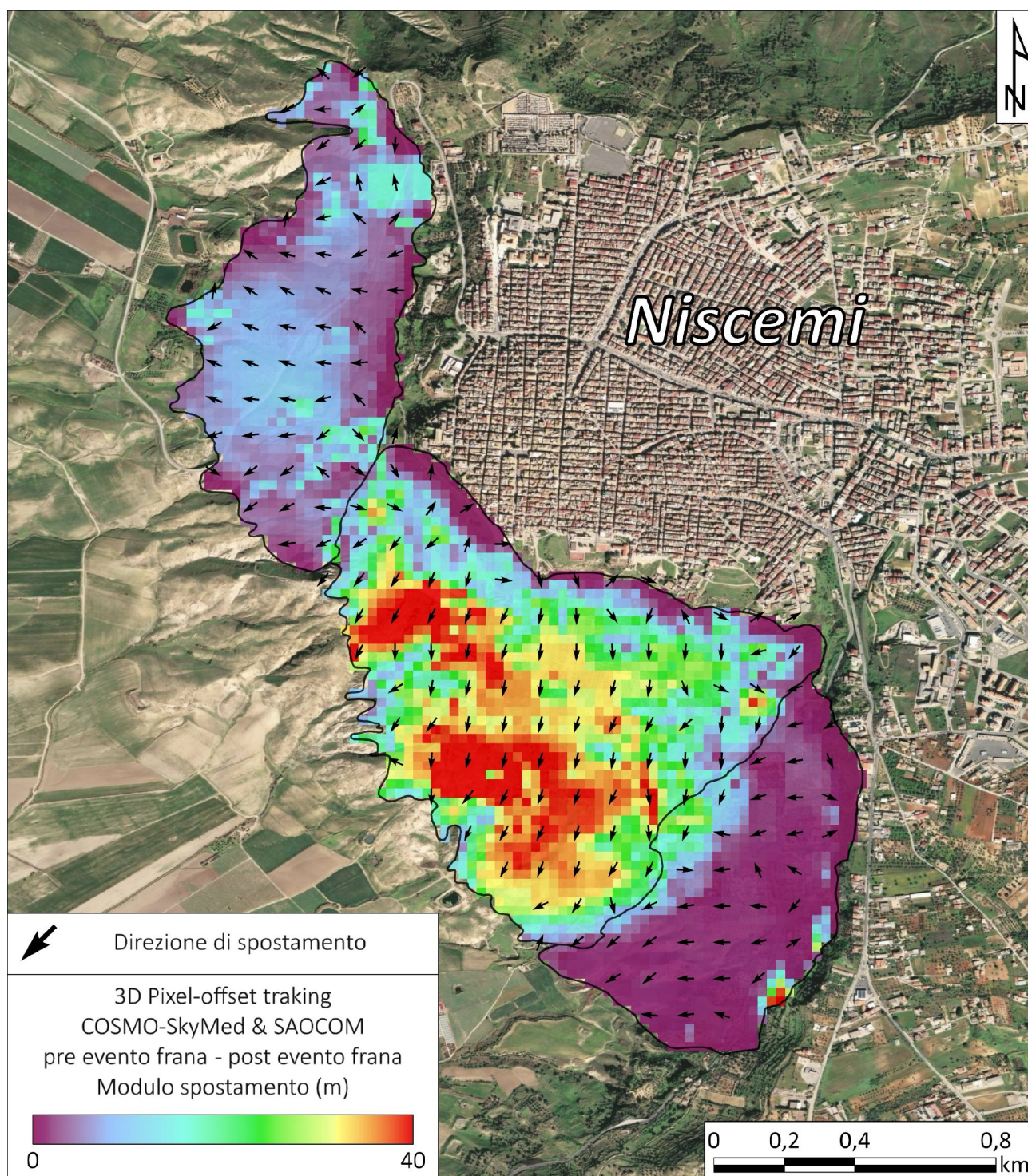


Figura 53 - Modulo dello spostamento dell'area di Niscemi ottenuto tramite l'analisi *Pixel Offset Tracking* sfruttando la combinazione di più immagini COSMO-SkyMed e SAOCOM pre- e post-evento.

4.5 Analisi post-evento

L'obiettivo principale di questa analisi è valutare l'eventuale presenza di segnali deformativi successivi alle frane di gennaio 2026, in particolare sul centro abitato nella fascia di interdizione di 150 metri dal ciglio della scarpata verso il nucleo urbano.

A tal fine è stata effettuata un'elaborazione di interferometria differenziale DInSAR sulla coppia interferometrica di immagini acquisite il 01 e 04 febbraio 2026 dalla missione Capella Space in geometria discendente con LOS *left-looking*. Congiuntamente, sono state effettuate le analisi multi-temporali, focalizzate esclusivamente sullo scenario post-evento, con nuove immagini post-evento acquisite dalle

costellazioni Sentinel-1 e COSMO-SkyMed. In particolare, sono state utilizzate sia per Sentinel-1 che per COSMO-SkyMed la prima acquisizione post-evento del 26 gennaio 2026 e l'ultima acquisizione disponibile. Il dettaglio sulle acquisizioni utilizzate è riportato in Tabella 5.

Satellite	Banda	Geometria di acquisizione	Intervallo temporale
Capella Space	X	Discendente	01/02/2026 - 04/02/2026
Sentinel-1	C	Ascendente	31/01/2026 - 24/02/2026
Sentinel-1	C	Discendente	07/02/2026 - 19/02/2026
COSMO-SkyMed	X	Ascendente	01/02/2026 - 17/02/2026
COSMO-SkyMed	X	Discendente	08/02/2026 - 16/02/2026

Tabella 5 - Specifiche tecniche dei *dataset* utilizzati per l'analisi interferometrica post-eventi di gennaio 2026.

4.5.1 Capella Space - elaborazione con tecnica DInSAR

Ai fini di analizzare lo scenario deformativo post-evento, è stata effettuata un'analisi interferometrica standard DInSAR utilizzando coppie interferometriche da immagini SAR acquisite dalla missione Capella Space. Le acquisizioni sull'area di Niscemi sono avvenute nelle date 3, 4 e 7 febbraio 2026, due in modalità ascendente e una in discendente.

A partire da queste immagini SAR sono stati elaborati tutti i possibili interferogrammi. In Figura 54 si riporta l'interferogramma realizzato tra le acquisizioni del 1 e del 4 febbraio in orbita discendente *left-looking*. La *baseline* perpendicolare tra le due traiettorie satellitari è di 319 m.

L'interferogramma mostra al bordo sud del paese di Niscemi frange interferometriche di deformazione, localizzate a partire dal ciglio della scarpata meridionale verso valle, nell'area dove è avvenuta la frana del 25-26 gennaio 2026.

Si nota la presenza di ulteriori frange interferometriche nel settore più a sud interessato dall'evento del 25-26 gennaio 2026. Queste frange potrebbero essere dovute ad artefatti topografici legati all'utilizzo nell'elaborazione di un DEM antecedente all'evento stesso. Il centro abitato di Niscemi e la fascia di 150 m non risultano affetti da movimenti apprezzabili.

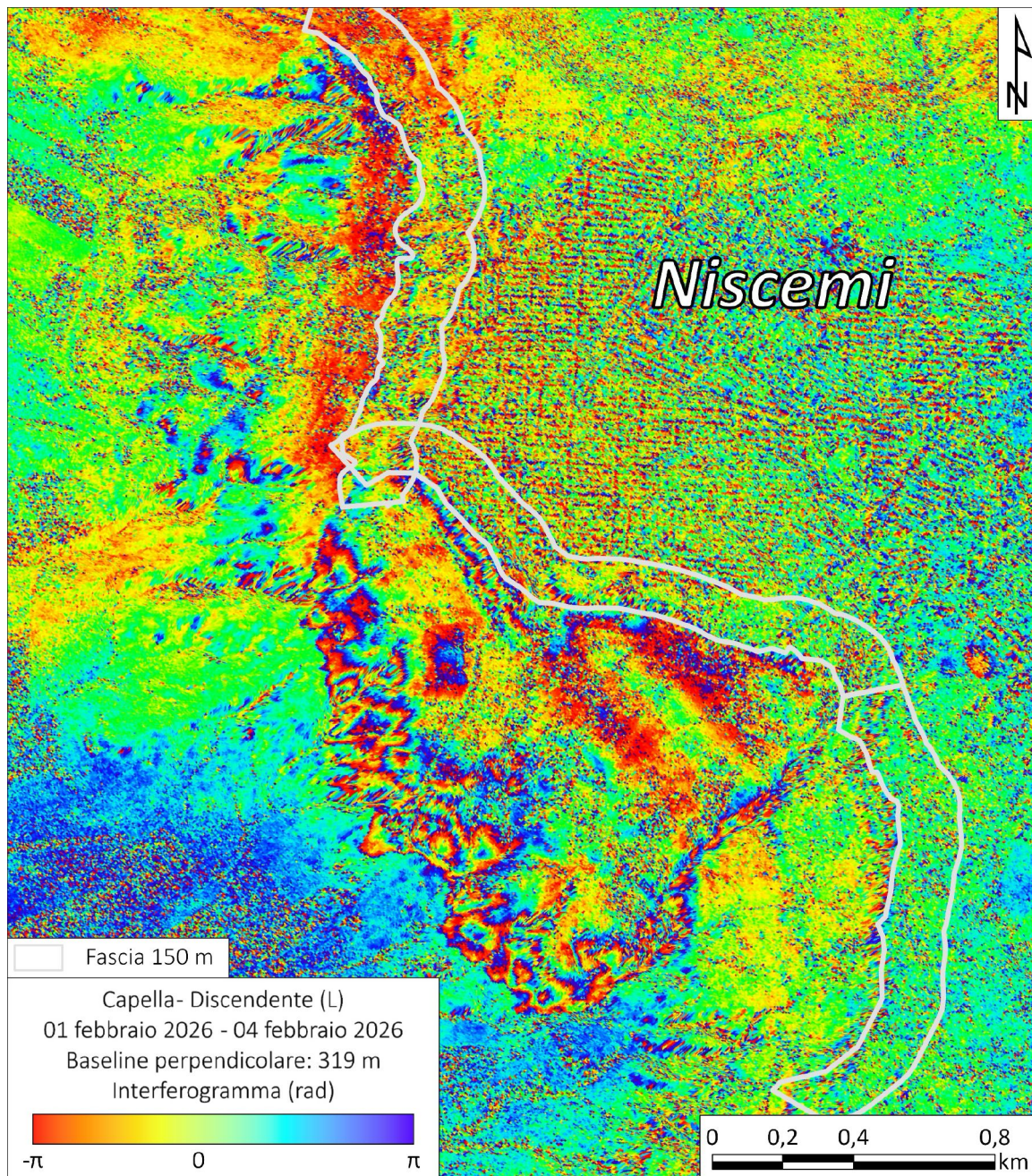


Figura 54 - Interferogramma ottenuto dalla coppia di immagini SAR acquisite da Capella Space in orbita discendente *left-looking* nelle date del 1 febbraio e del 4 febbraio 2026. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee bianche.

4.5.2 Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SBAS

La Figura 55 illustra la mappa di spostamento, osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione Sentinel-1 e processati tramite l'algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra il 31 gennaio e il 18 febbraio 2026, per la geometria ascendente, nel settore nord di Niscemi. I punti di misura sono visualizzati secondo lo spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di spostamento.

La finestra di stabilità è stata posta pari a $\pm 0,5$ cm tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione standard dell'intero *dataset*. Si precisa che la robustezza della stima interferometrica è strettamente correlata all'estensione temporale della serie di acquisizioni: per intervalli temporali più brevi, caratterizzati da un numero inferiore di immagini disponibili, aumenta l'incidenza del rumore residuo e, conseguentemente, la deviazione standard delle misure. In tali condizioni, la finestra di stabilità deve essere opportunamente ricalibrata, in modo coerente con il livello di incertezza associato al *dataset* considerato.

In generale, tutta l'area nord di Niscemi, incluso l'abitato all'interno della fascia di 150 m, è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,5$ cm. L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 56), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (gennaio 2021 - 18 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, mette in luce, in alcuni punti (A e D), una variazione brusca del segnale interferometrico in corrispondenza dell'evento, interpretabile come discontinuità tra l'ultima acquisizione pre-frana e la prima post-frana. Nel mese successivo (febbraio 2026), tali punti mostrano un progressivo assestamento del segnale, con andamento tendenzialmente stabile nel periodo post-evento. Nei punti B e C non si notano variazioni sulla tendenza generale.

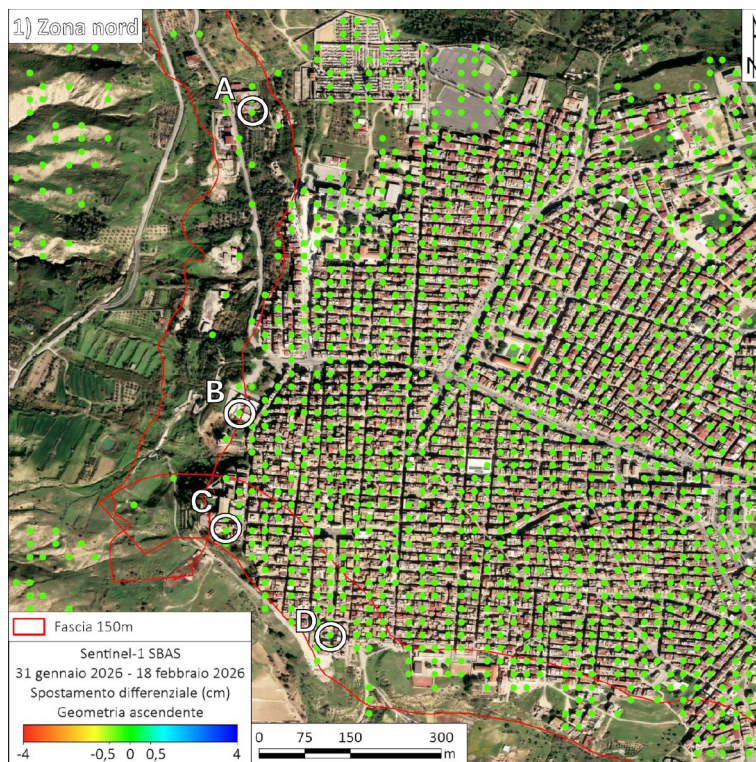


Figura 55 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria ascendente nell'intervallo temporale 31 gennaio-18 febbraio 2026. In Figura 56 le serie temporali dei punti considerati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

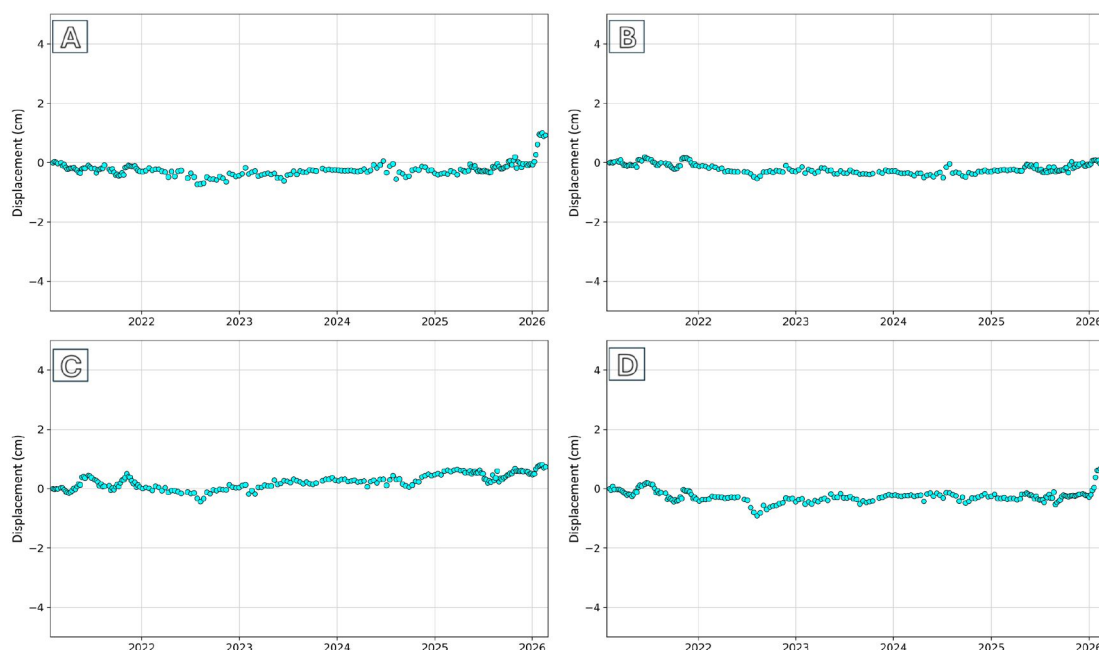


Figura 56 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 55.

In maniera speculare, tutta l'area sud di Niscemi è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,5$ cm (Figura 57). Le serie temporali dei punti selezionati (Figura 58), situati all'interno della fascia di 150 m, mostrano un *trend* stazionario nella fase di post-evento (ultime quattro acquisizioni).

Nel caso del punto E si osserva un cambio brusco nella tendenza tra le acquisizioni pre- e post-evento, seguito da una fase di sostanziale stabilità. Nel caso dei restanti punti il *trend* post-evento è sostanzialmente stazionario.

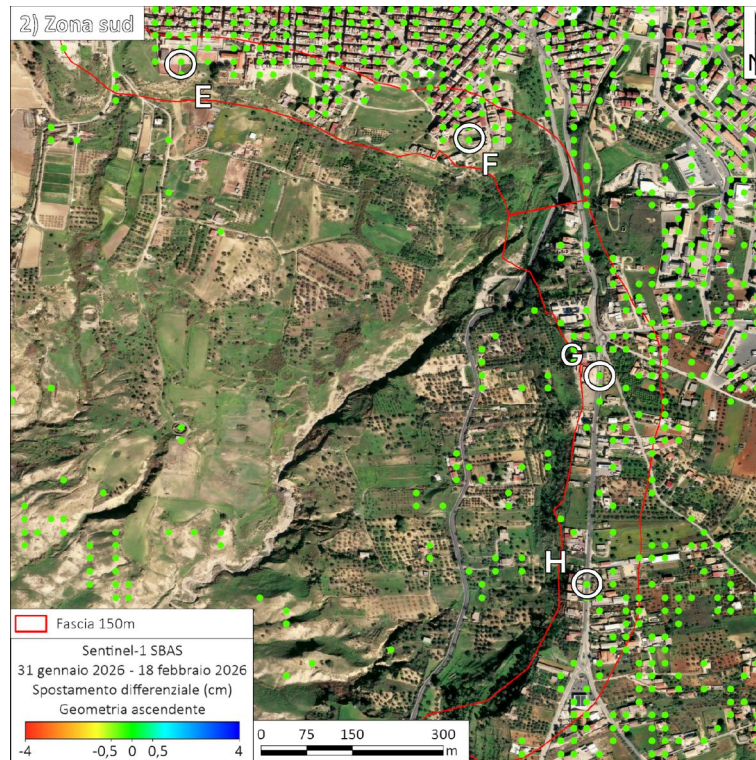


Figura 57 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria ascendente nell'intervallo temporale 31 gennaio - 18 febbraio 2026. In Figura 58 le serie temporali dei punti considerati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

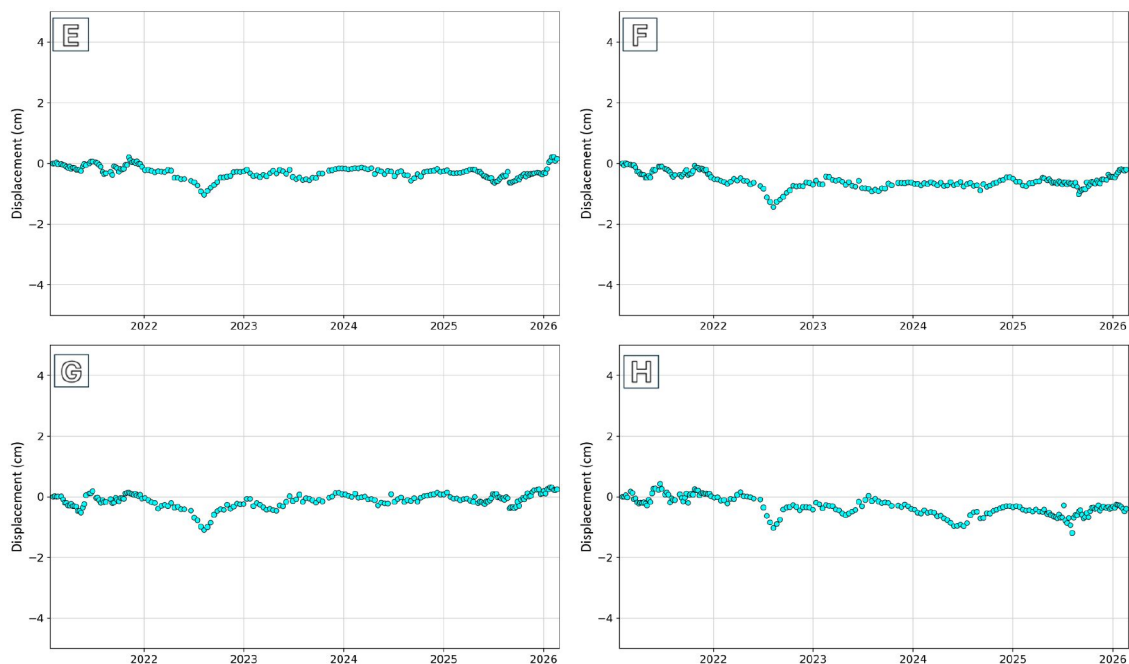


Figura 58 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 57.

La Figura 59 illustra la mappa di spostamento, osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione Sentinel-1 e processati tramite l'algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra il 7 e il 19 febbraio 2026, per la geometria discendente, nel settore nord di Niscemi. I punti di misura sono visualizzati secondo lo spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di spostamento.

La finestra di stabilità è stata posta pari a $\pm 0,5$ cm tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione standard dell'intero *dataset*. Anche in questo caso, tutta l'area nord di Niscemi, incluso l'abitato all'interno della fascia di 150 m, è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,5$ cm. L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 60), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (gennaio 2021 - 19 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, mette in luce in alcuni punti (A e D) una variazione brusca del segnale interferometrico in corrispondenza dell'evento, interpretabile come discontinuità tra l'ultima acquisizione pre-frana e la prima post-frana.

Nel mese successivo (febbraio 2026), tali punti mostrano un progressivo assestamento del segnale, con andamento tendenzialmente stabile nel periodo post-evento. Nei punti B e C non si notano variazioni sulla tendenza generale.

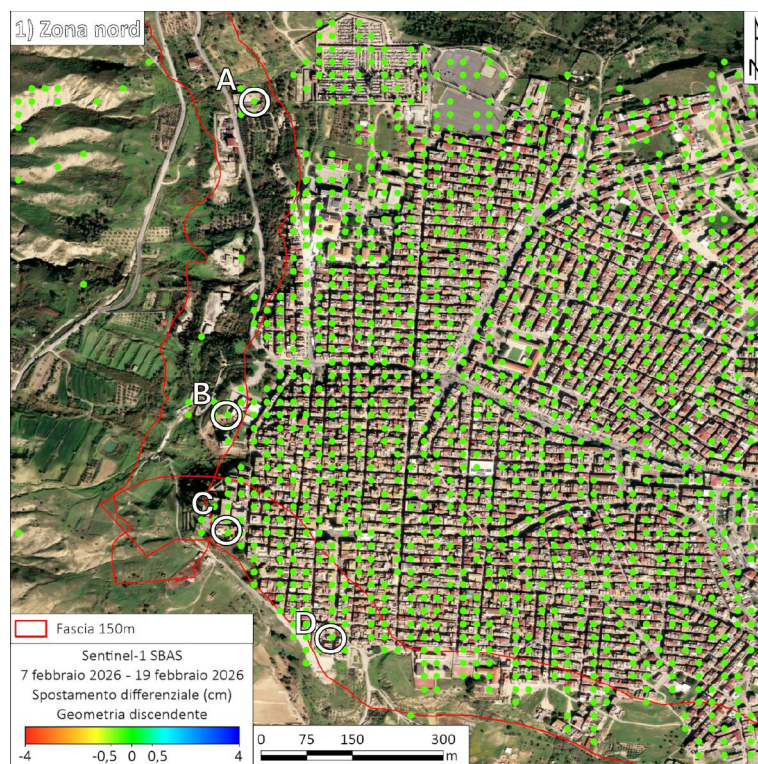


Figura 59 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria discendente nell'intervallo temporale 7-19 febbraio 2026. In Figura 60 le serie temporali dei punti considerati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

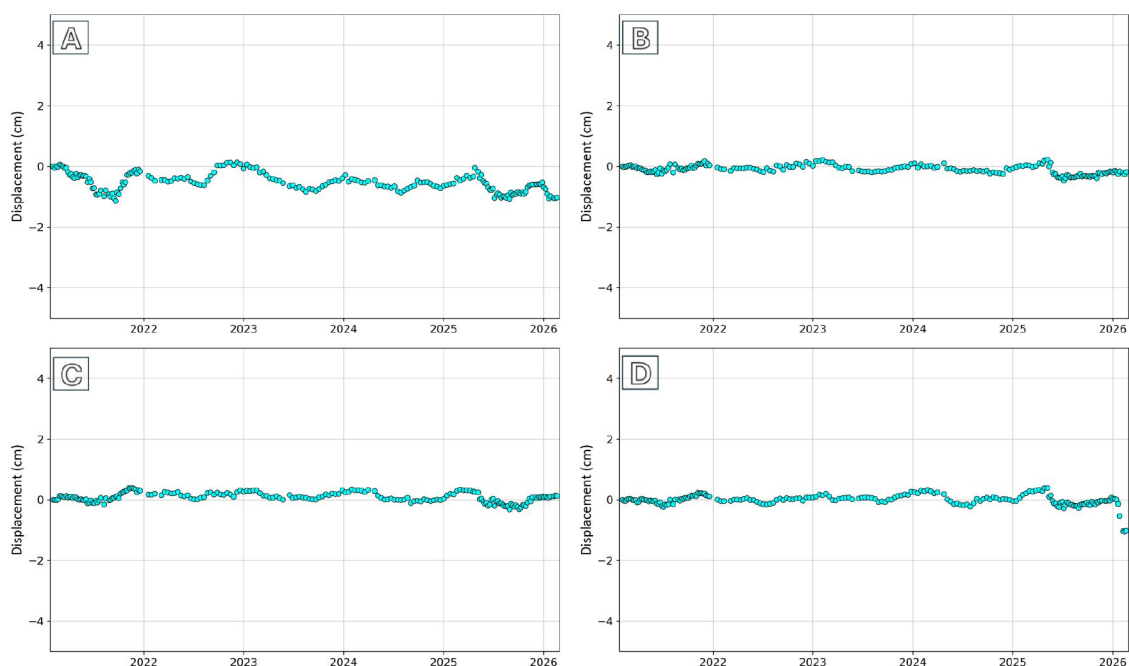


Figura 60 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 59.

Analogamente, anche per il dato discendente, tutta l'area sud di Niscemi è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,5$ cm (Figura 61). Le serie temporali dei punti selezionati (Figura 62), situati all'interno della fascia di 150 m, mostrano un *trend* stazionario nella fase di post-evento (ultime quattro acquisizioni).

Nel caso dei punti E e F si osserva un cambio brusco nella tendenza tra le acquisizioni pre- e post-evento, seguito da una fase di sostanziale stabilità. Nei punti G e H il *trend* si mantiene piuttosto stazionario.

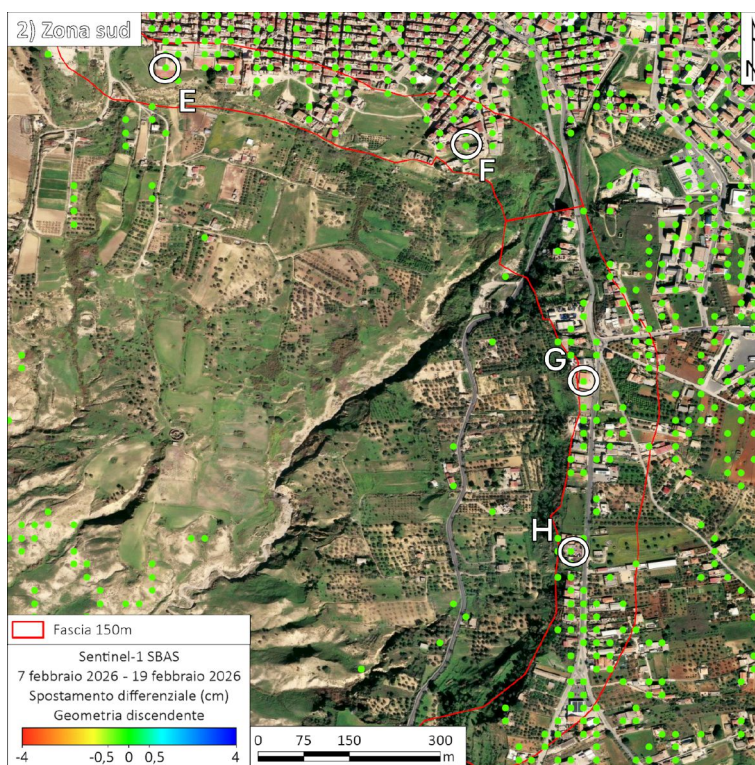


Figura 61 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria discendente nell'intervallo temporale 31 gennaio-18 febbraio 2026. In Figura 62 le serie temporali dei punti considerati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

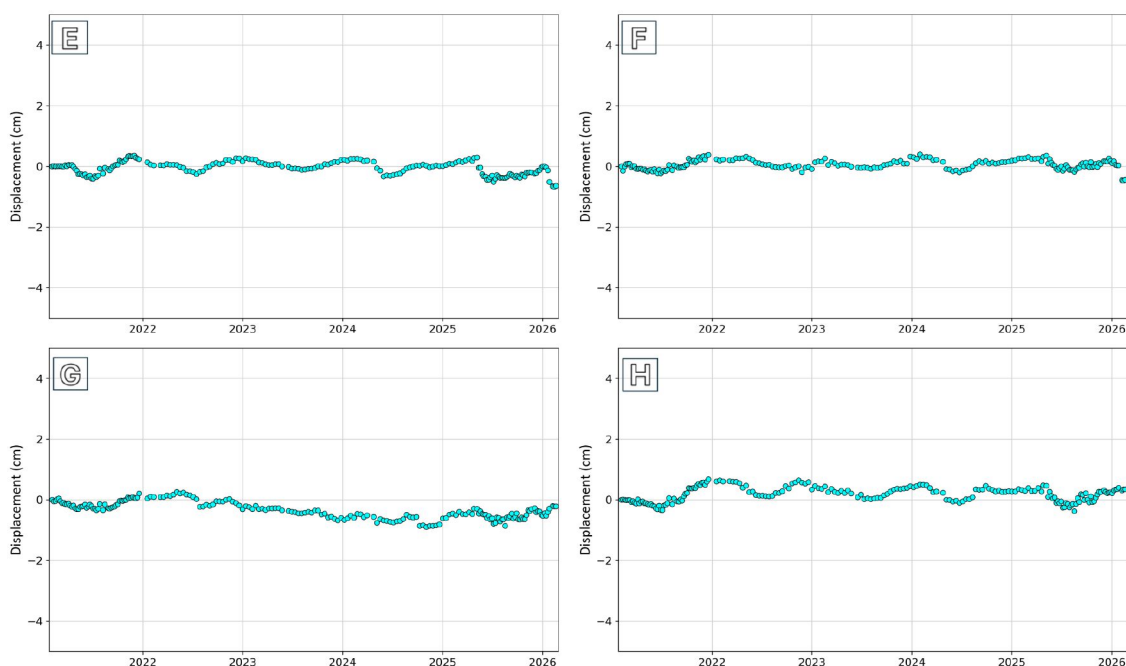


Figura 62 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 61.

4.5.3 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SBAS

La Figura 63 illustra la mappa di spostamento osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed Seconda Generazione e processati tramite algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale compreso tra il 1 e il 17 febbraio 2026 per la geometria ascendente, nel settore nord di Niscemi.

I punti di misura sono visualizzati in funzione dello spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di spostamento.

La finestra di stabilità è stata posta $\pm 0,5$ cm tenendo conto della precisione della tecnica interferometrica e della deviazione standard dell'intero *dataset*. Si precisa che la robustezza della stima interferometrica è strettamente correlata all'estensione temporale della serie di acquisizioni: per intervalli temporali più brevi, caratterizzati da un numero inferiore di immagini disponibili, aumenta l'incidenza del rumore residuo e, conseguentemente, la deviazione standard delle misure. In tali condizioni, la finestra di stabilità deve essere opportunamente ricalibrata, in modo coerente con il livello di incertezza associato al dataset considerato.

In generale, tutta l'area nord di Niscemi è caratterizzata da MPs che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,5$ cm.

Le serie temporali dei punti selezionati (Figura 63), situati all'interno della fascia di 150 m, mostrano andamenti stabili nella fase di post-evento (ultime due acquisizioni). In alcuni casi (Figura 64, punti C e D) si osserva un salto nei *trends* di spostamento tra le acquisizioni pre- e post-evento, seguito da una fase di sostanziale stabilità.

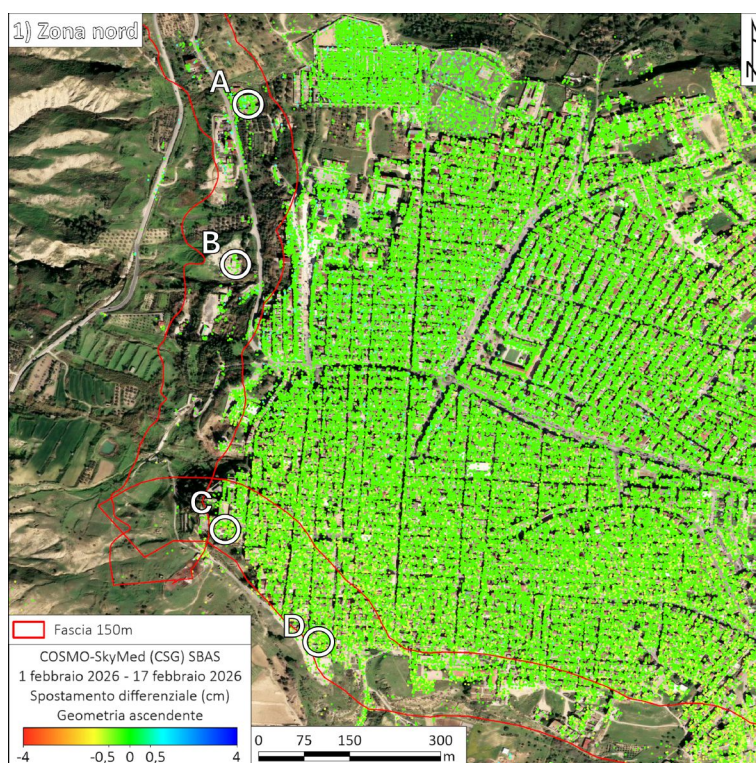


Figura 63 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria ascendente nell'intervallo temporale 1-17 febbraio 2026. In Figura 64 le serie temporali dei punti considerati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

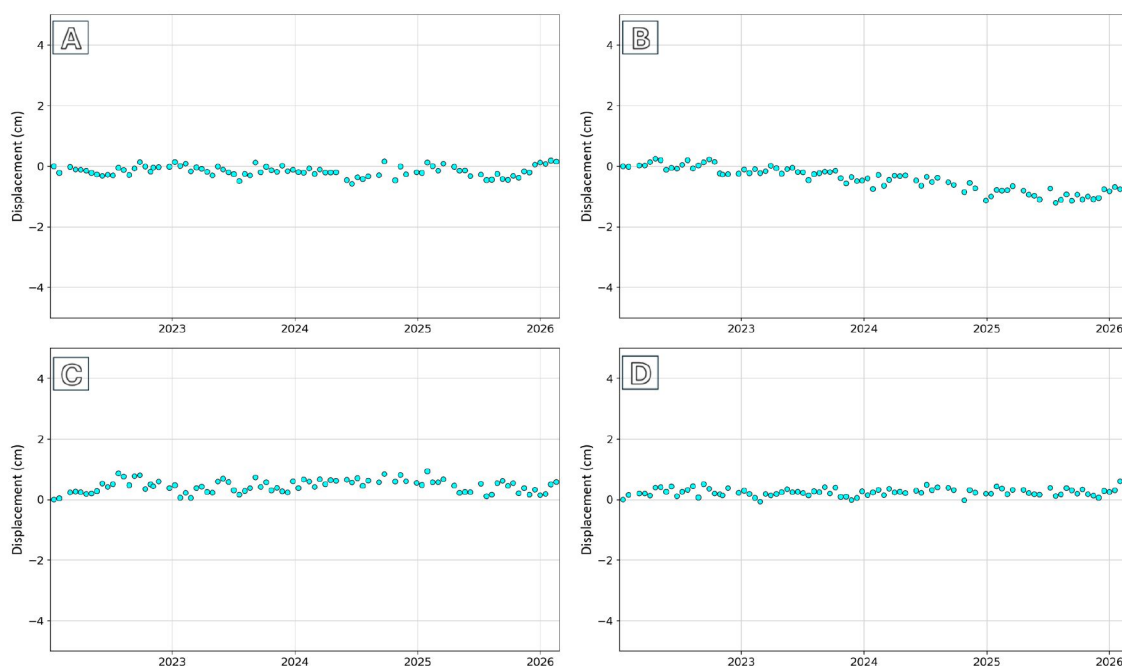


Figura 64 - Serie temporali dei punti di misura evidenziati in Figura 63.

Analogamente anche l'area sud del centro abitato di Niscemi è caratterizzata dalla maggioranza di MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,5$ cm (Figura 65). Alcuni MPs classificati con colore giallo sono da considerarsi misure affette da

rumore piuttosto che da misure effettive di spostamento. Gli MPs classificati in colore celeste che indicano movimento sono localizzati a sud della fascia di 150 m a valle della scarpata di frana.

Le serie temporali di spostamento dei punti di misura selezionati entro la fascia di 150 m mostrano una sostanziale stabilità nelle ultime due acquisizioni riferite all'intervallo temporale post-evento (Figura 66).

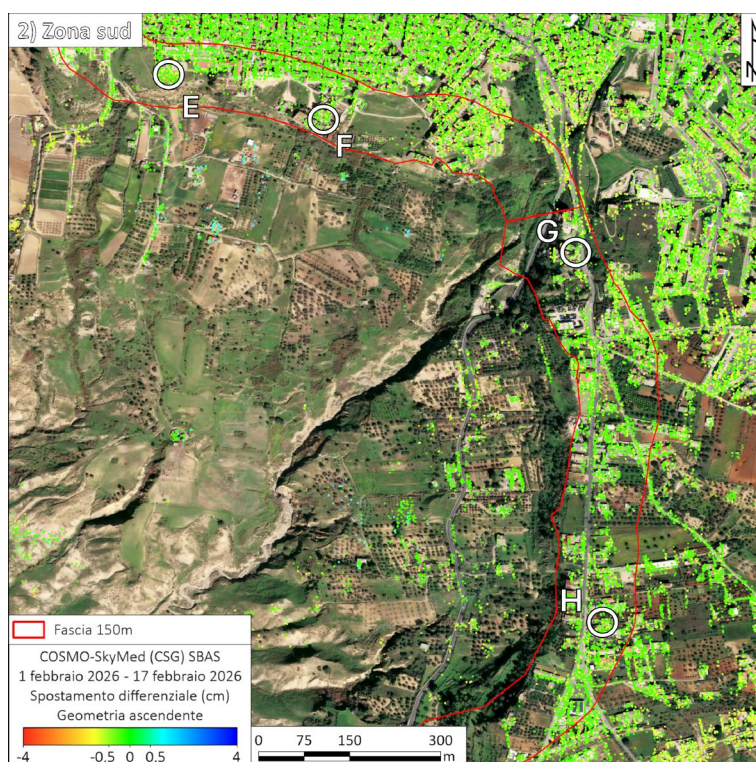


Figura 65 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria ascendente nell'intervallo temporale 1-17 febbraio 2026. In Figura 66 le serie temporali dei punti considerati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

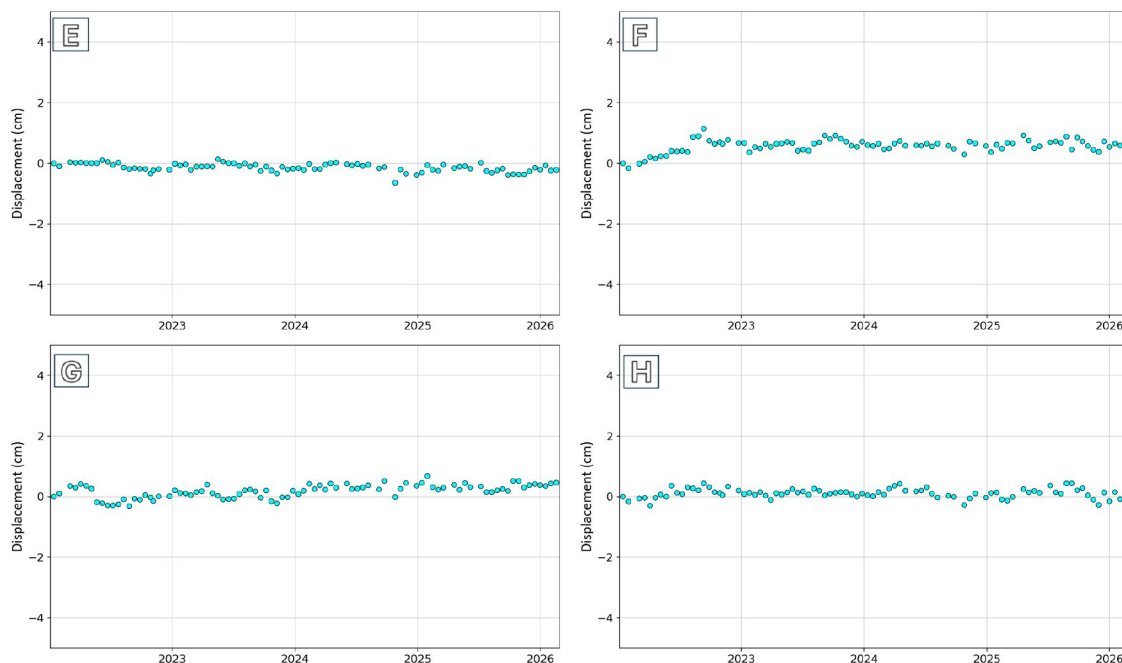


Figura 66 - Serie temporali dei punti di misura evidenziati in Figura 65.

La Figura 67 illustra la mappa di spostamento osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed Seconda Generazione e processati tramite l'algoritmo SBAS, nell'intervallo temporale

compreso tra l'8 e il 16 febbraio 2026, per la geometria discendente, nel settore nord di Niscemi. Anche in questo caso, i punti di misura sono visualizzati in funzione dello spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni, con finestra di stabilità posta a $\pm 0,5$ cm. In generale, si conferma la valutazione effettuata con i dati ascendenti, cioè tutta l'area nord di Niscemi è caratterizzata da MPs classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,5$ cm.

Le serie temporali di spostamento dei punti di misura selezionati situati all'interno della fascia di 150 m (Figura 68) mostrano andamenti stazionari nella fase di post-evento, anche se affetti da rumore che rende il *trend* poco lineare.

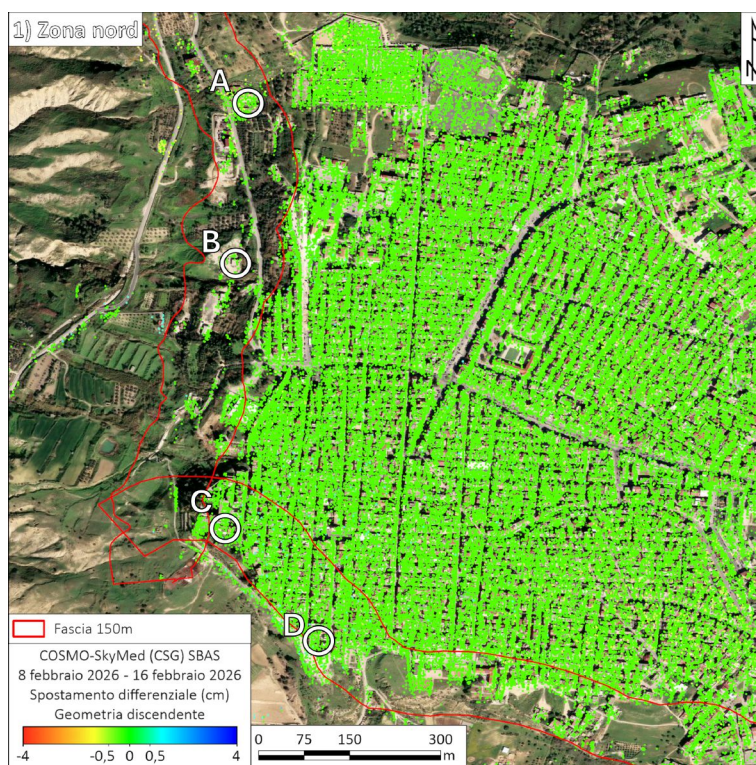


Figura 67 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione, elaborati con tecnica SBAS, nella zona nord in geometria discendente nell'intervallo temporale 8-16 febbraio 2026. In Figura 68 le serie temporali dei punti considerati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

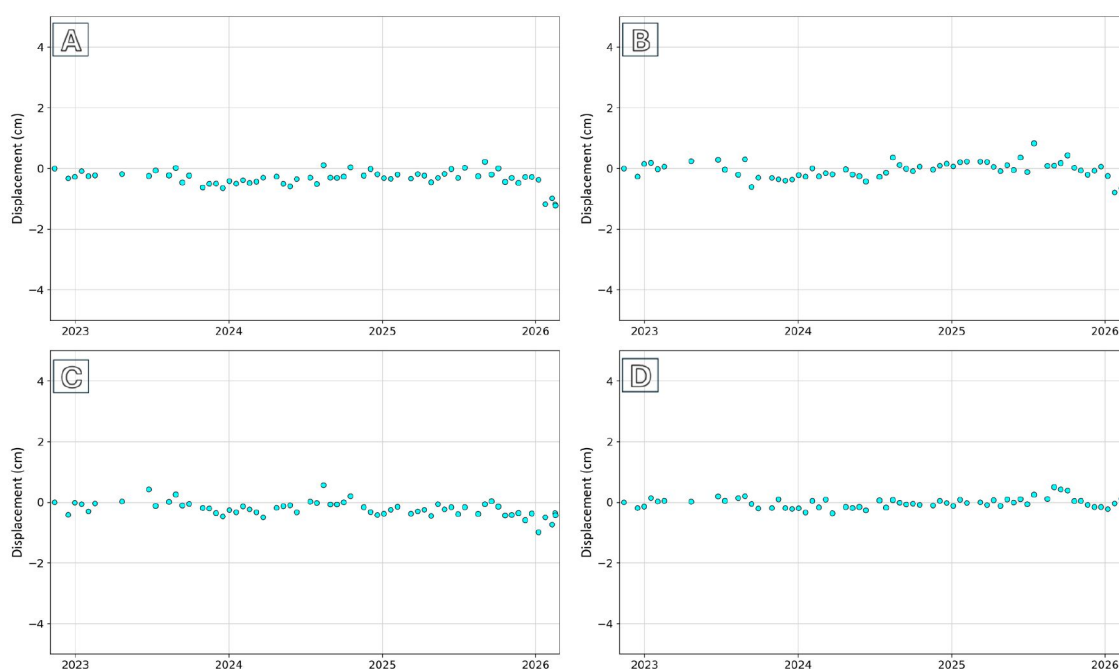


Figura 68 - Serie temporali dei punti di misura evidenziati in Figura 67.

Similmente, anche l'area sud di Niscemi è caratterizzata dalla maggioranza di MPs in geometria discendente classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di $\pm 0,5$ cm (Figura 69) e le serie temporali dei punti di misura (Figura 70) mostrano andamenti affetti da rumore ma sostanzialmente stazionari nella fase post-evento, pur trattandosi però di sole due acquisizioni (1 febbraio e 17 febbraio 2026).

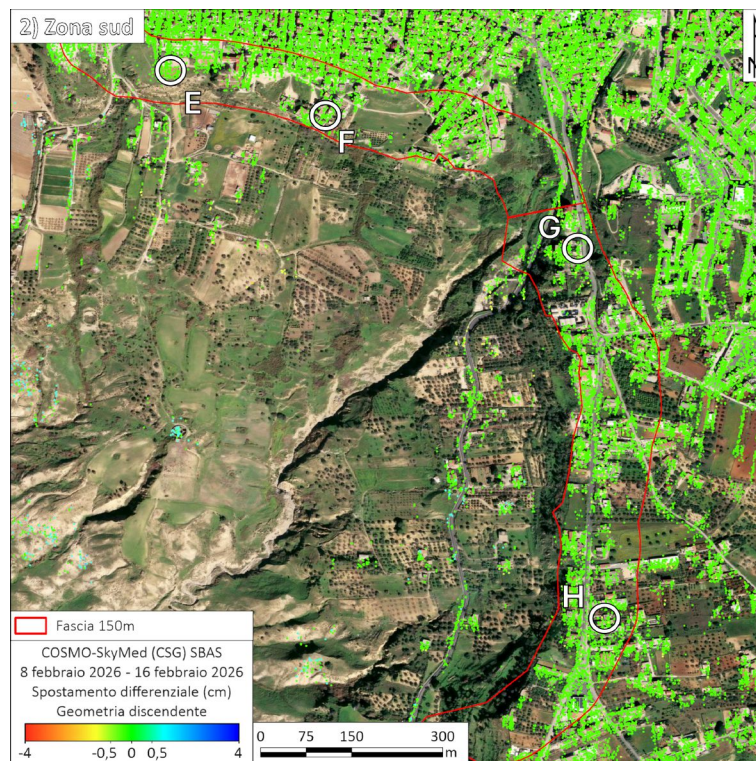


Figura 69 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed Seconda Generazione, elaborati con tecnica SBAS, nella zona sud in geometria discendente nell'intervallo temporale 8-16 febbraio 2026. In Figura 70 le serie temporali dei punti considerati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

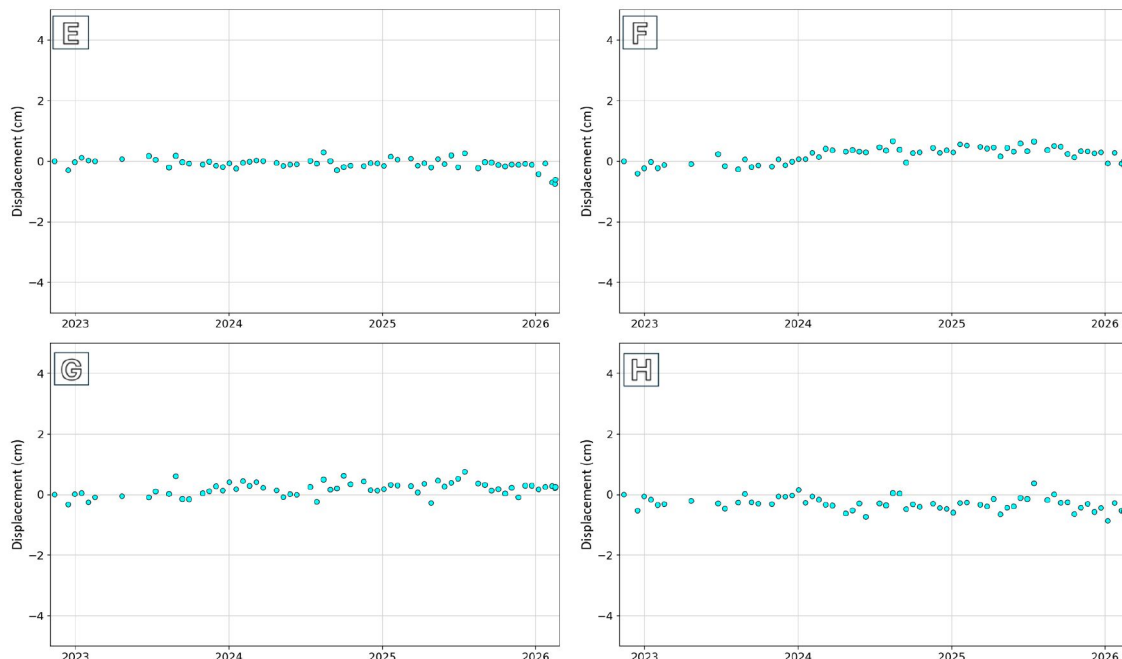


Figura 70 - Serie temporali dei punti di misura evidenziati in Figura 69.

4.5.4 Sentinel-1 - elaborazione con tecnica SqueeSAR

La Figura 71 illustra la mappa di spostamento osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione Sentinel-1 e processati tramite algoritmo SqueeSAR, nell'intervallo temporale compreso tra il 31 gennaio 2026 e il 24 febbraio 2026 per la geometria ascendente e tra il 7 febbraio 2026 e il 19 febbraio 2026 per la geometria discendente, nel settore nord di Niscemi.

I punti di misura sono visualizzati in funzione dello spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di spostamento. La finestra di stabilità è stata posta pari a ± 5 mm anche per il presente *dataset* elaborato con tecnica SqueeSAR, per la serie di considerazioni menzionate precedentemente. In generale, tutta l'area di Niscemi è caratterizzata da un gran numero di PS classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di ± 5 m.

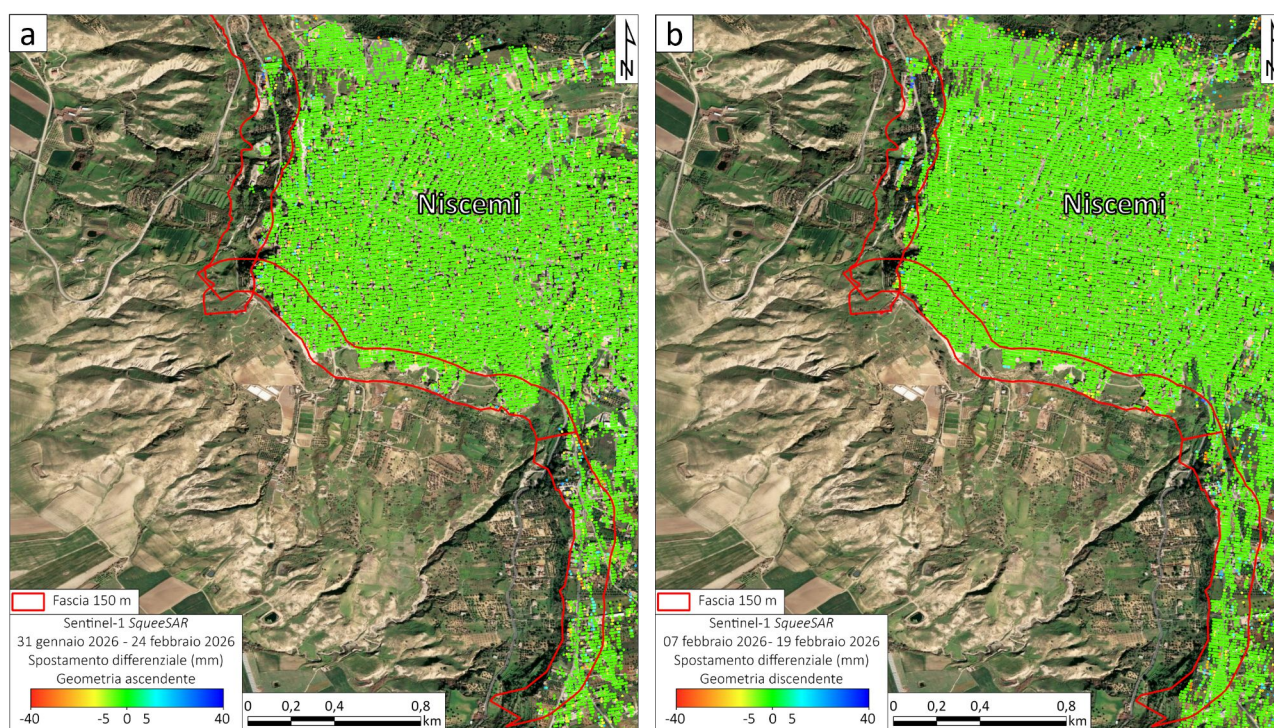


Figura 71 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 nell'intervallo temporale 31 gennaio 2026 - 24 febbraio 2026 in geometria ascendente (a) e nell'intervallo temporale 7 febbraio 2026 - 19 febbraio 2026 in geometria discendente (b) elaborati con tecnica SqueeSAR. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

L'analisi di dettaglio del settore settentrionale in geometria ascendente (Figura 72) evidenzia, nella fase successiva all'evento, un quadro sostanzialmente stabile all'interno della fascia di 150 m a monte della scarpata principale di frana. Sono presenti alcuni punti isolati al di fuori della finestra di stabilità, che pertanto non possono essere attribuibili a uno spostamento effettivo.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 73), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (4 gennaio 2022 - 24 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, mette in luce, in alcuni punti (A e D), una variazione brusca del segnale interferometrico in corrispondenza dell'evento, interpretabile come discontinuità tra l'ultima acquisizione pre-frana e la prima post-frana.

Nel mese successivo (febbraio 2026), tali punti mostrano un progressivo assestamento del segnale, con andamento tendenzialmente stabile nel periodo post-evento. Nei punti B e C non si notano variazioni significative sulla tendenza generale.

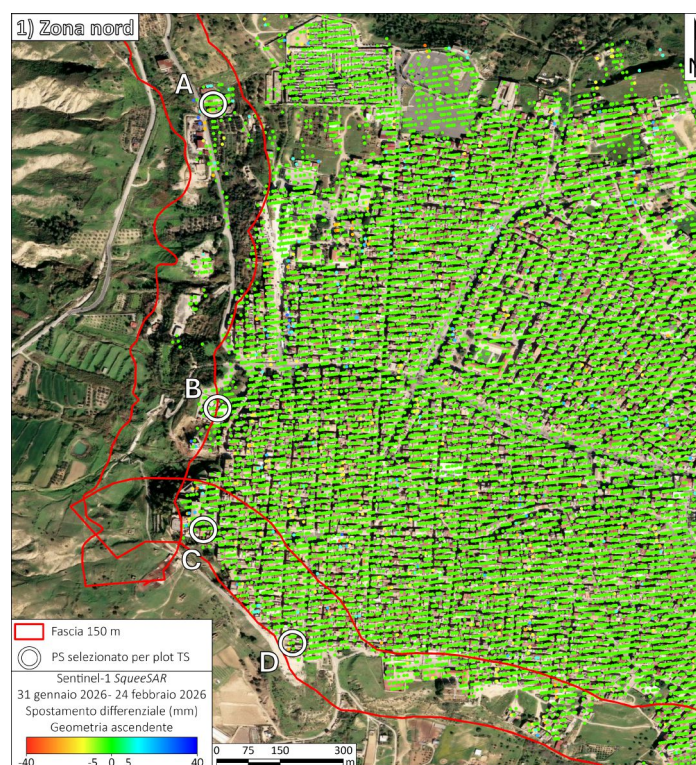


Figura 72 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria ascendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore nord di Niscemi. In Figura 73 le serie temporali dei PS qui evidenziati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

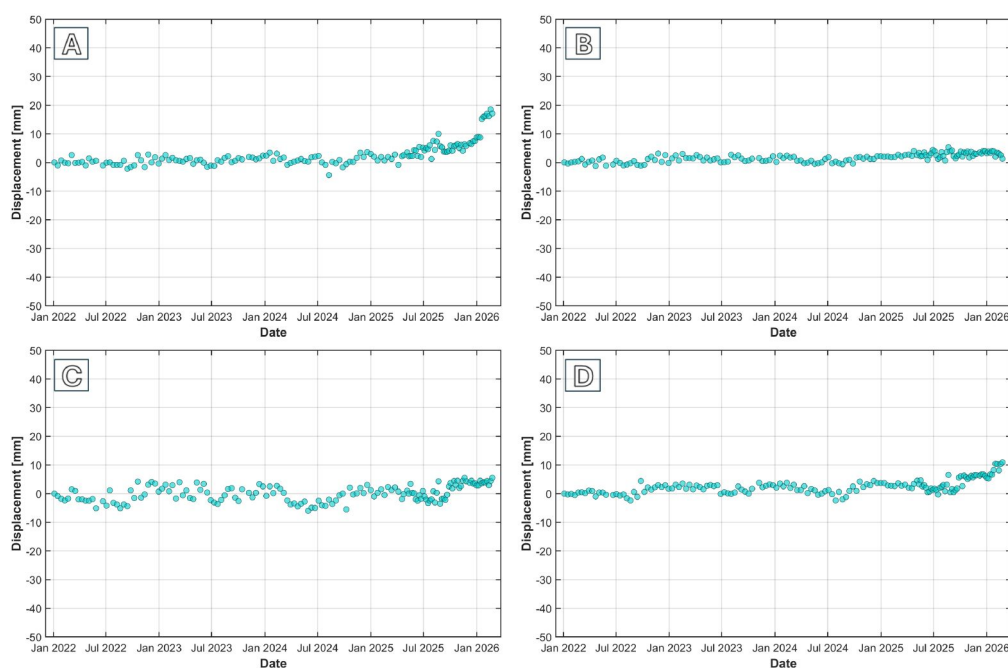


Figura 73 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 72.

L'analisi di dettaglio del settore meridionale in geometria ascendente (Figura 74) conferma che nella fase post-evento, non ci siano significativi spostamenti all'interno della fascia di 150 m a monte della scarpata principale di frana. Nella zona a sud-est, lungo la SP11, si evidenziano PS con valori di spostamento al di fuori della finestra di stabilità. Tale tendenza sarà oggetto di ulteriori valutazioni mediante le successive acquisizioni.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 75), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (4 gennaio 2022 - 24 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, non evidenzia nei punti E ed F la presenza di sostanziali variazioni della tendenza

generale nella fase post-evento. Il punto G, situato lungo la SP11, mostra un andamento generale caratterizzato da un lieve movimento lineare, senza alcuna variazione in corrispondenza o successivamente all'evento. Il punto H, anch'esso situato lungo la SP11, evidenzia, nelle ultime due acquisizioni, un principio di cambio di tendenza successivo all'evento che sarà oggetto di ulteriori valutazioni.

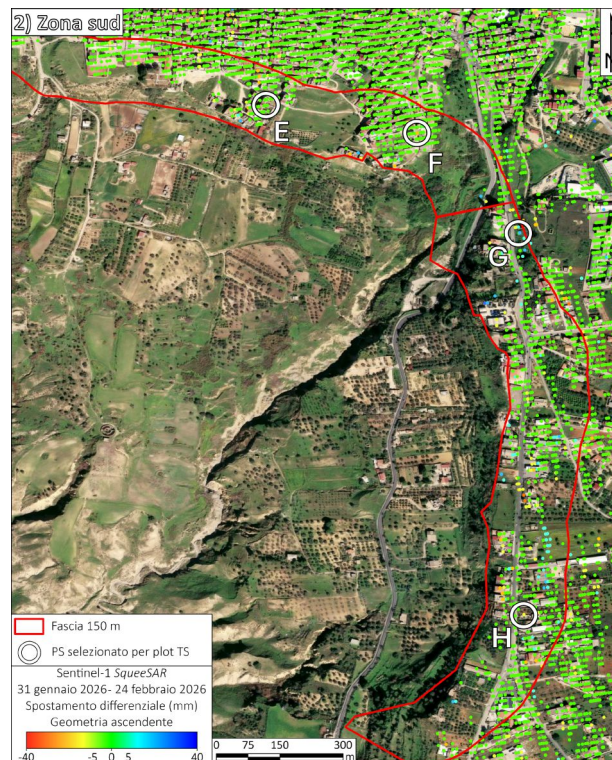


Figura 74 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria ascendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore sud di Niscemi. In Figura 75 le serie temporali dei PS qui evidenziati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

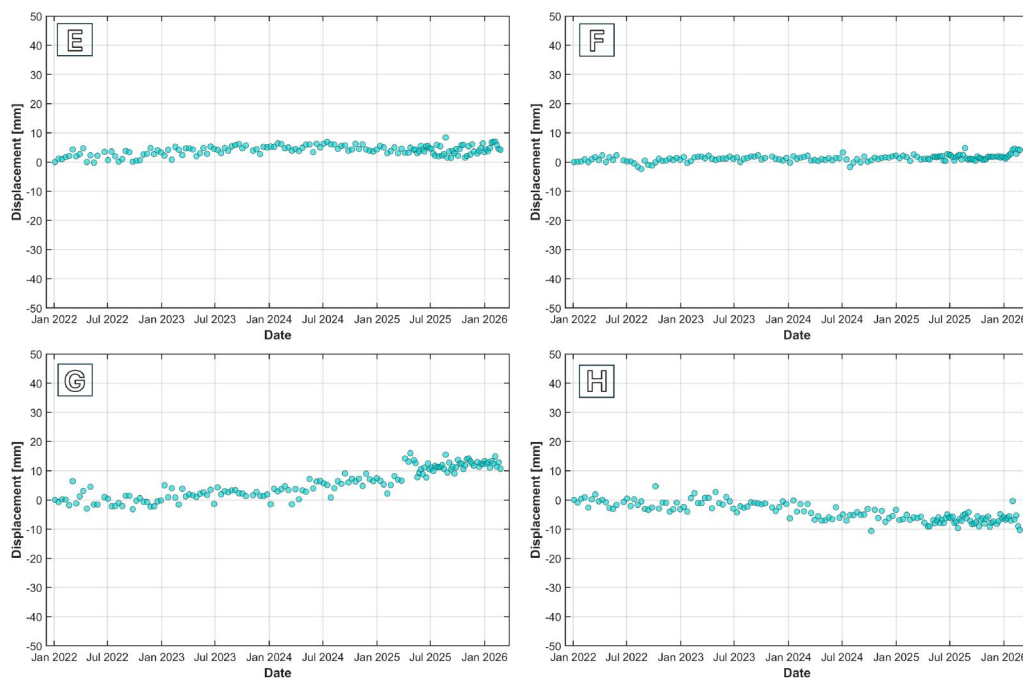


Figura 75 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 74.

L'analisi di dettaglio in geometria discendente dell'area a nord del centro abitato di Niscemi (Figura 76) conferma quanto rilevato dai dati in geometria ascendente. Si evidenzia infatti un quadro sostanzialmente stabile nella fase successiva all'evento. Le serie temporali di spostamento (Figura 77), riferite all'intero

intervallo di acquisizione disponibile (17 gennaio 2022 - 19 febbraio 2026) e quindi comprensive degli eventi di gennaio 2026, mostrano un andamento lineare, seppur evidenziando una variazione in corrispondenza dell'evento. Tuttavia, è opportuno considerare che le acquisizioni post-evento disponibili sono solo tre.

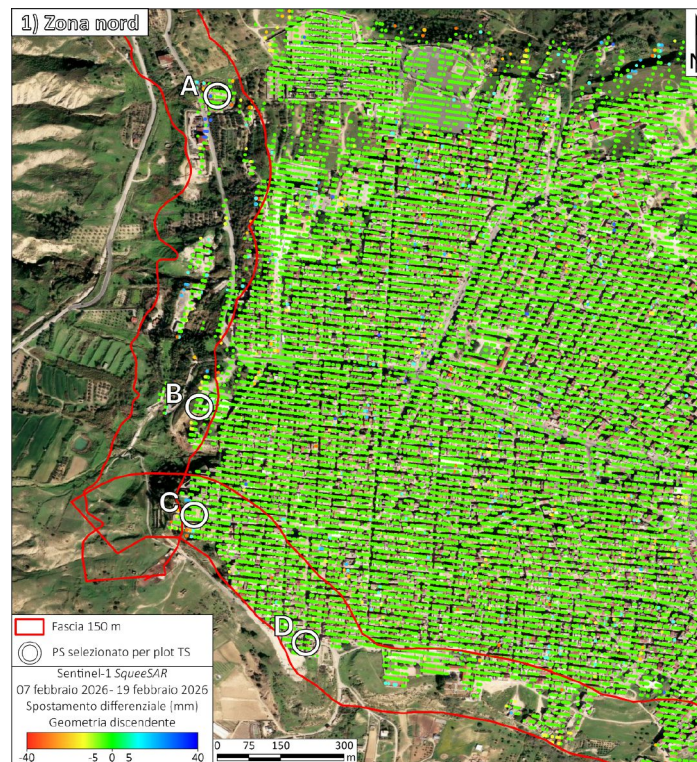


Figura 76 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria discendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore nord di Niscemi. In Figura 77 le serie temporali dei PS qui evidenziati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

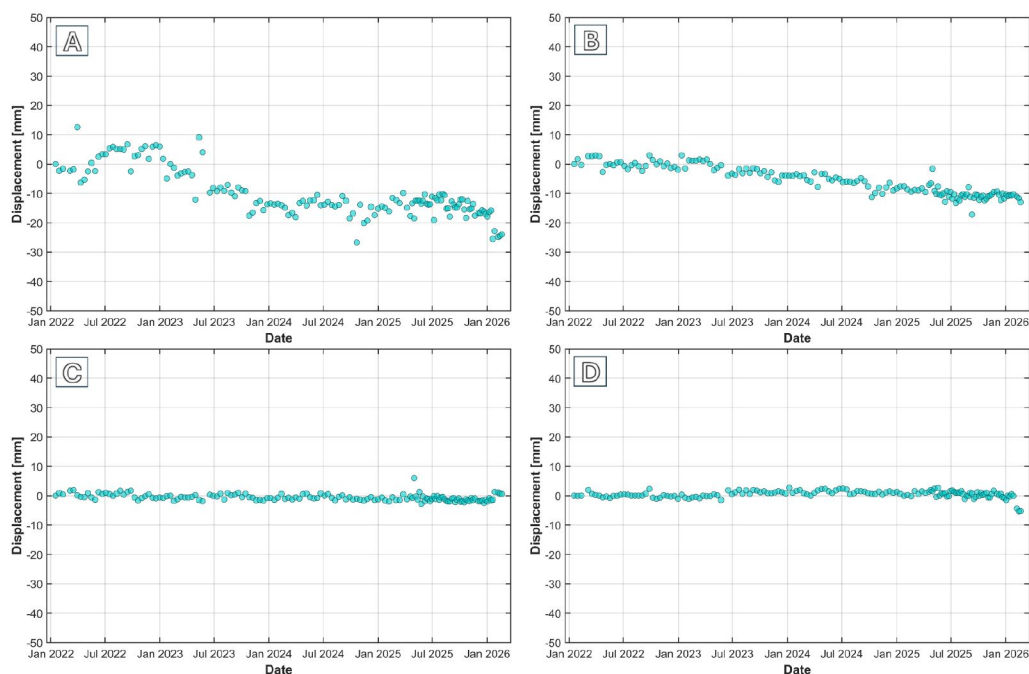


Figura 77 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 76.

In Figura 78 è riportata la mappa degli spostamenti differenziali in corrispondenza del settore meridionale del centro abitato di Niscemi. Gli spostamenti misurati tra il 7 febbraio 2026 e il 19 febbraio 2026 in geometria

discendente confermano l'assenza di spostamenti significativi all'interno della fascia di 150 m a monte della scarpata principale di frana, con valori all'interno della finestra di stabilità.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 79), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (17 gennaio 2022 - 19 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e dell'evento stesso di gennaio 2026, mostra come i punti E ed F, nella zona della scarpata di frana, siano affetti da un'accelerazione in corrispondenza dell'evento di gennaio 2026. Tale evidenza va tuttavia interpretata con cautela, considerando che il dataset post-evento dispone attualmente di sole tre acquisizioni. Analizzando i settori più interni della fascia di 150 m (punti G ed H) non si evidenziano variazioni sulla tendenza generale.

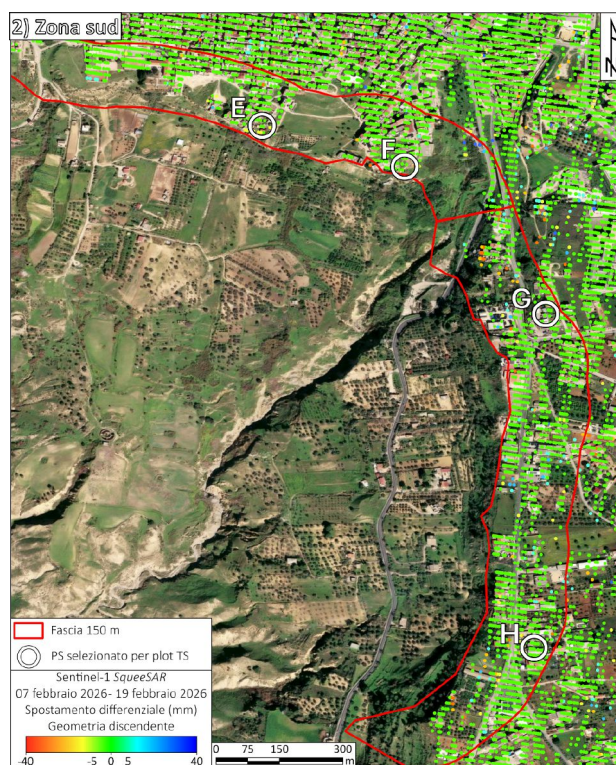


Figura 78 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria discendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore sud di Niscemi. In Figura 79 le serie temporali dei PS qui evidenziati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

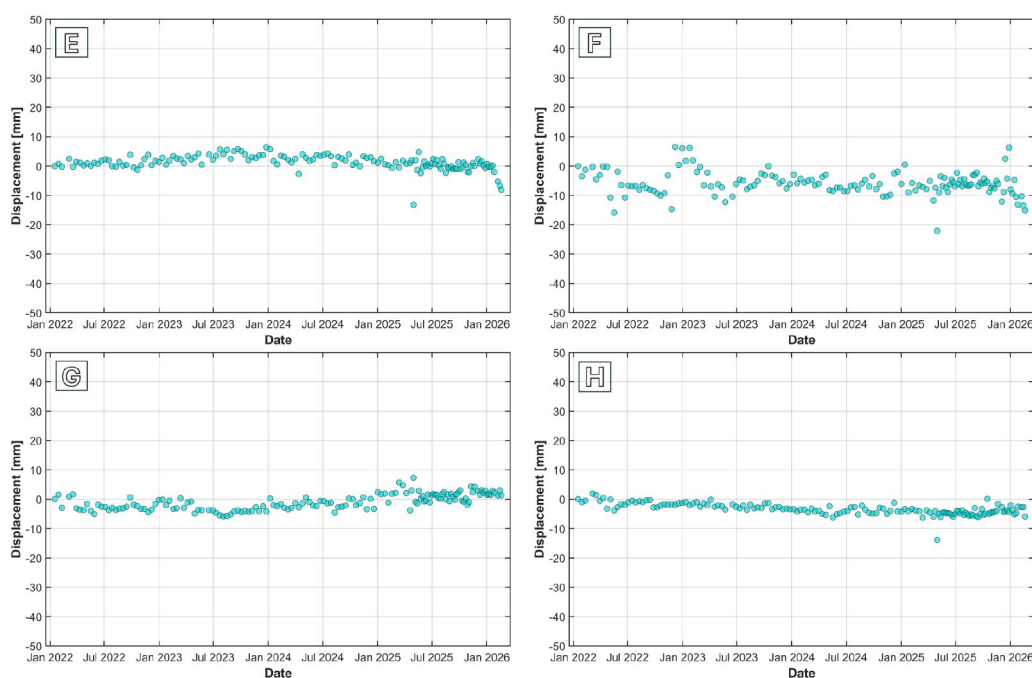


Figura 79 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 78.

4.5.5 COSMO-SkyMed - elaborazione con tecnica SqueeSAR

La Figura 80 illustra la mappa di spostamento differenziale osservata dai dati interferometrici acquisiti dalla costellazione COSMO-SkyMed e processati tramite algoritmo SqueeSAR, nel periodo di febbraio 2026, in geometria ascendente e discendente.

I punti di misura sono visualizzati in funzione dello spostamento registrato nel periodo coperto dalle acquisizioni (1 febbraio 2026 - 17 febbraio 2026 per la geometria ascendente e 8 febbraio 2026 - 16 febbraio 2026 per la geometria discendente) mediante l'uso della scala di colori graduati, centrata sul valore zero di spostamento. La finestra di stabilità è stata posta ± 5 mm anche per il presente *dataset* elaborato con tecnica SqueeSAR, per la serie di considerazioni menzionate precedentemente. In generale, tutta l'area di Niscemi è caratterizzata da un gran numero di PS classificati in colore verde che presentano valori di spostamento all'interno della finestra di stabilità di ± 5 mm.

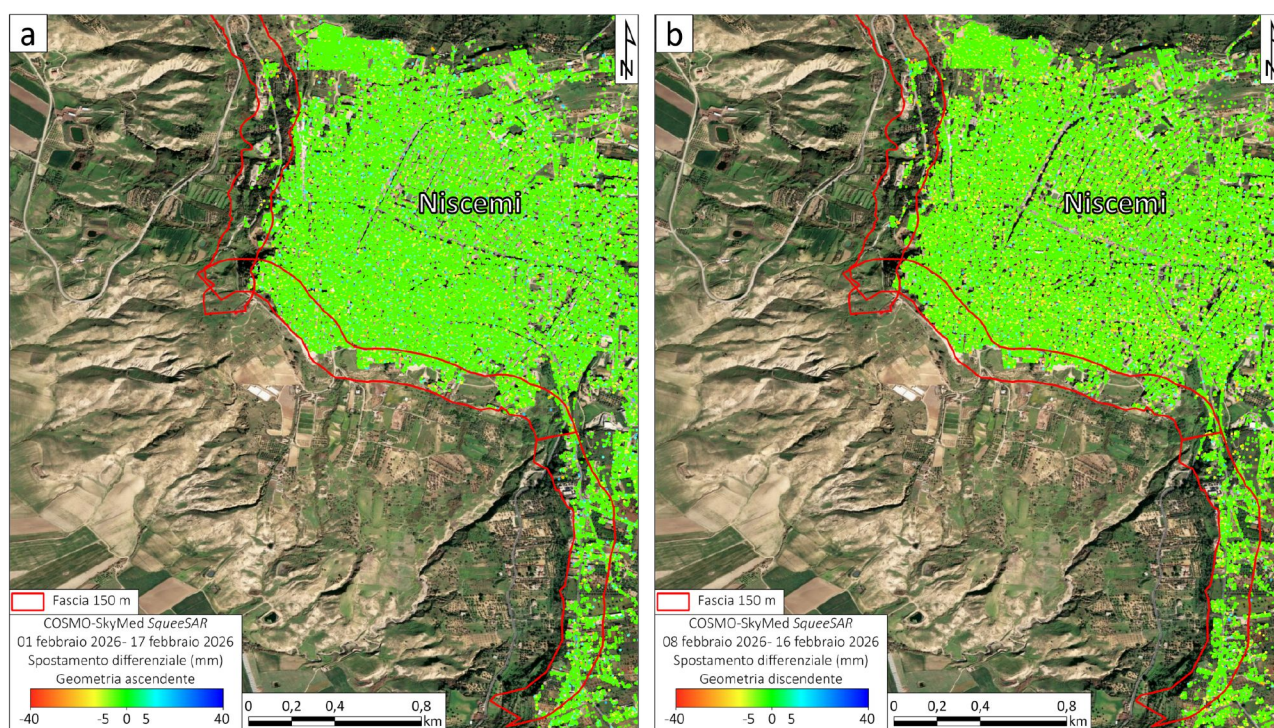


Figura 80 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed nell'intervallo temporale 1 febbraio 2026 - 17 febbraio 2026 in geometria ascendente (a) e nell'intervallo temporale 8 febbraio 2026 - 16 febbraio 2026 in geometria discendente (b) elaborati con tecnica SqueeSAR. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

L'analisi di dettaglio del settore settentrionale (Figura 81) evidenzia, nella fase successiva all'evento, un quadro sostanzialmente stabile all'interno della fascia di 150 m a monte della scarpata principale di frana. L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 82), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (agosto 2011 - 17 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, mette in luce, in alcuni punti (A e C), una lieve variazione del segnale interferometrico in corrispondenza dell'evento, interpretabile come discontinuità tra l'ultima acquisizione pre-frana e la prima post-frana.

Nel mese successivo (febbraio 2026), tali punti mostrano un progressivo assestamento del segnale, con andamento tendenzialmente stabile nel periodo post-evento. Nei punti B e D non si notano variazioni sulla tendenza generale. Si ricorda che le acquisizioni COSMO-SkyMed nel periodo post-frana sono solo 2, con la prima immagine acquisita il 1 febbraio 2026 e la seconda il 17 febbraio 2026.

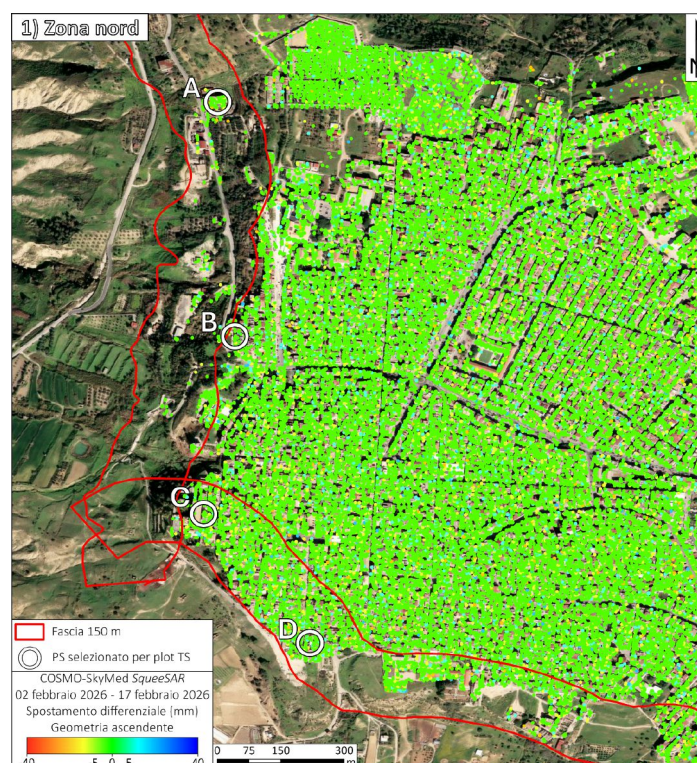


Figura 81 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed in geometria ascendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore nord di Niscemi. In Figura 82 le serie temporali dei PS qui evidenziati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

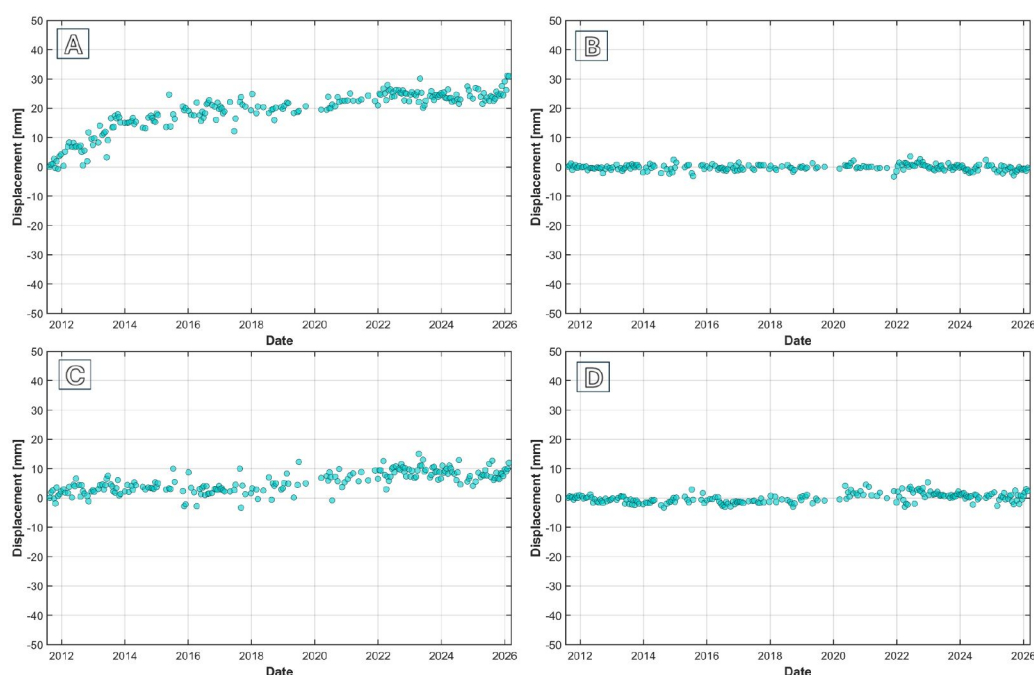


Figura 82 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 81.

L'analisi di dettaglio del settore meridionale (Figura 83) conferma che nella fase post-evento, non ci siano grossi spostamenti all'interno della fascia di 150 m a monte della scarpata principale di frana, con valori all'interno della finestra di stabilità.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 84), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (agosto 2011 - 18 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, ribadisce come tutti i punti considerati non abbiano sostanziali variazioni sulla tendenza generale.

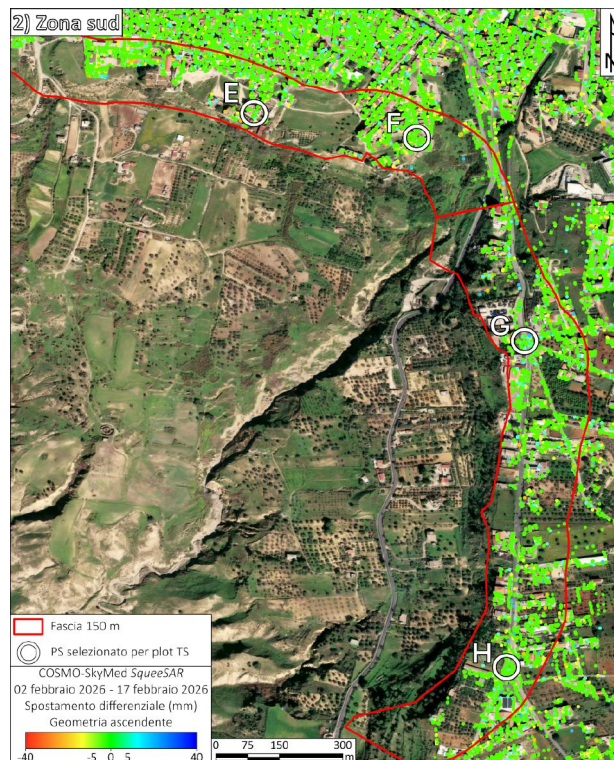


Figura 83 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed in geometria ascendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore sud di Niscemi. In Figura 84 le serie temporali dei PS qui evidenziati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

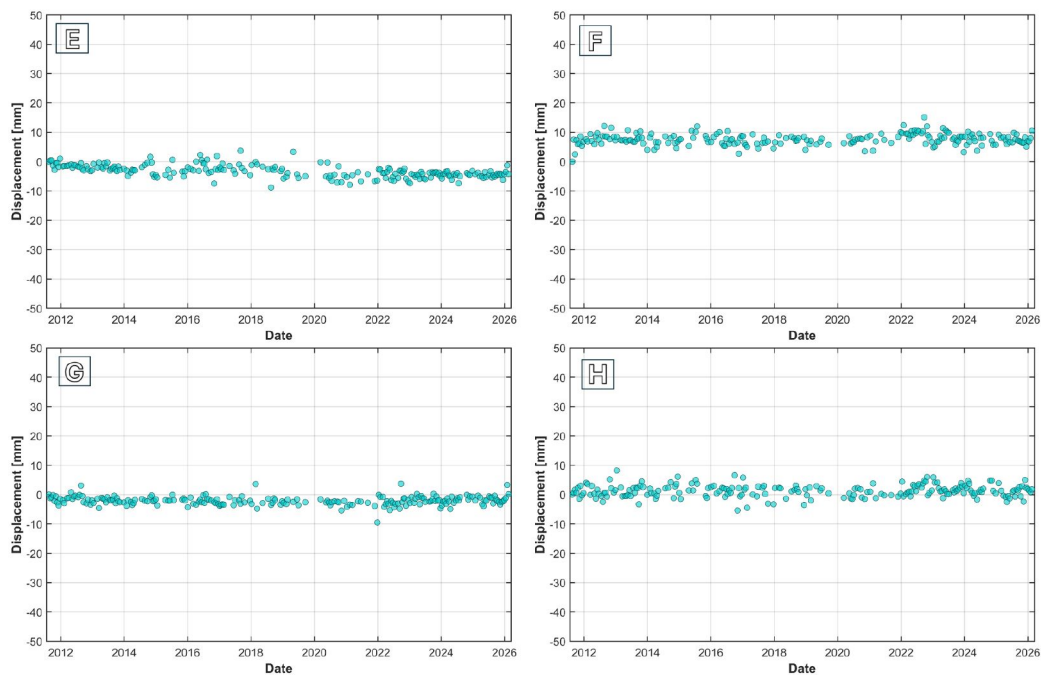


Figura 84 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 83.

L'analisi di dettaglio del settore settentrionale (Figura 85) coi dati COSMO-SkyMed discendenti conferma, nella fase successiva all'evento, una situazione di sostanziale stabilità all'interno della fascia di 150 m a monte della scarpata principale di frana.

L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 86), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (settembre 2015 - 17 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, evidenzia, in alcuni punti (A e D), una brusca variazione del segnale

interferometrico in corrispondenza dell'evento, interpretabile come discontinuità tra l'ultima acquisizione pre-frana e la prima post-frana.

Nel mese successivo (febbraio 2026), tali punti mostrano un progressivo assestamento del segnale, con un andamento non interpretabile come instabile nel periodo post-evento. Nei punti B e C non si notano variazioni sulla tendenza generale. Si ricorda che le acquisizioni COSMO-SkyMed nel periodo post-frana sono solo 2, con la prima immagine acquisita l'8 febbraio 2026 e la seconda il 16 febbraio 2026.

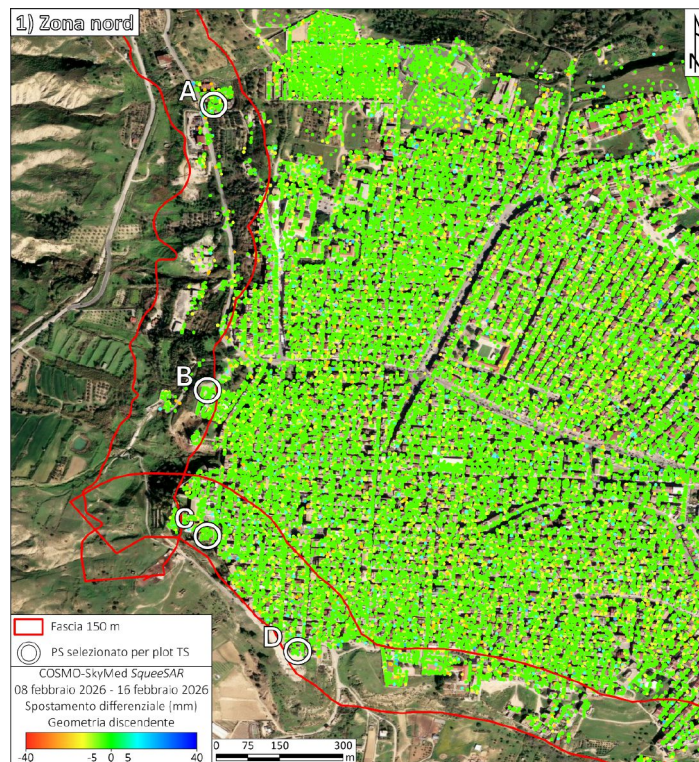


Figura 85 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed in geometria discendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore nord di Niscemi. In Figura 86 le serie temporali dei PS qui evidenziati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

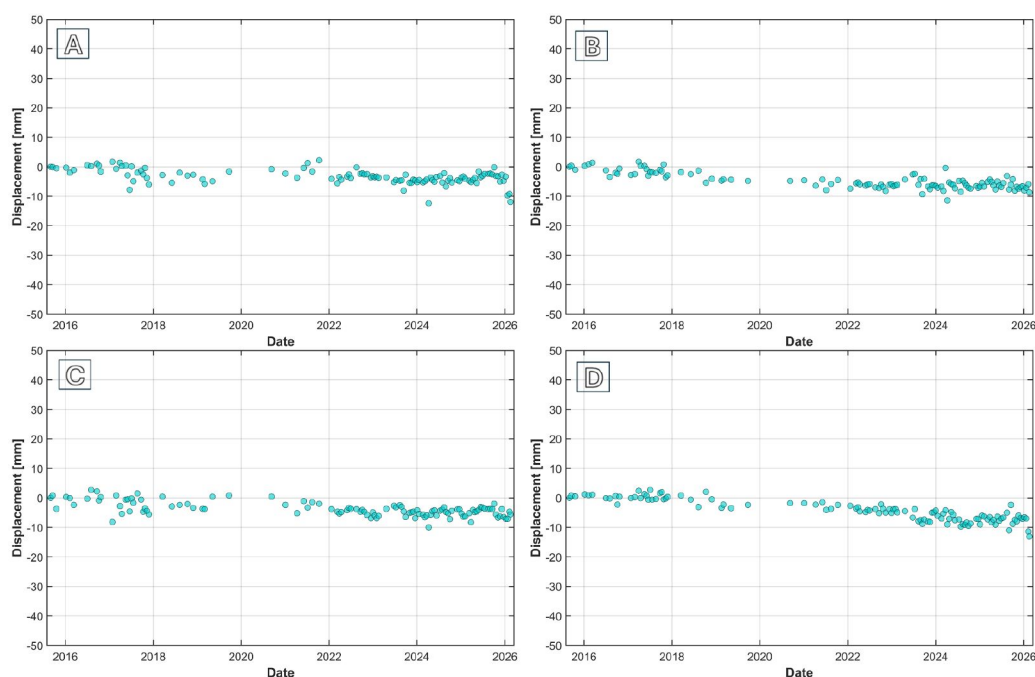


Figura 86 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 85.

L'analisi di dettaglio del settore meridionale (Figura 87) conferma che nella fase post-evento, non ci siano grossi spostamenti all'interno della fascia di 150 m a monte della scarpata principale di frana, con valori all'interno della finestra di stabilità. L'esame delle serie temporali di spostamento (Figura 88), riferite all'intero intervallo di acquisizione disponibile (settembre 2015 - 18 febbraio 2026) e quindi comprensive delle fasi antecedenti e successive all'evento di gennaio 2026, mostra variazioni brusche a cavallo del periodo intercorso tra le due frane, tuttavia la tendenza post-frana, sebbene preliminare in quanto consta di due sole acquisizioni, non sembrerebbe mostrare ulteriori variazioni.

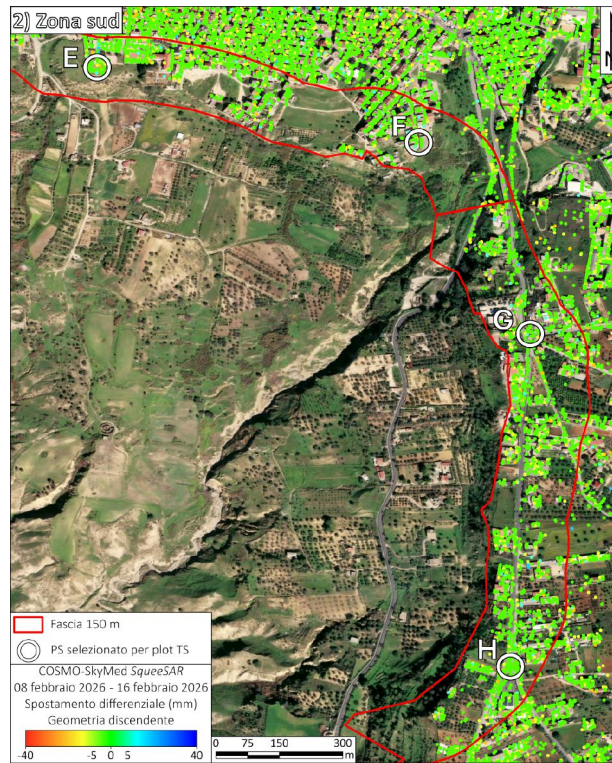


Figura 87 - Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati COSMO-SkyMed in geometria discendente, elaborati con tecnica SqueeSAR, nel settore sud di Niscemi. In Figura 88 le serie temporali dei PS qui evidenziati. La fascia di interdizione è delimitata dalle linee rosse.

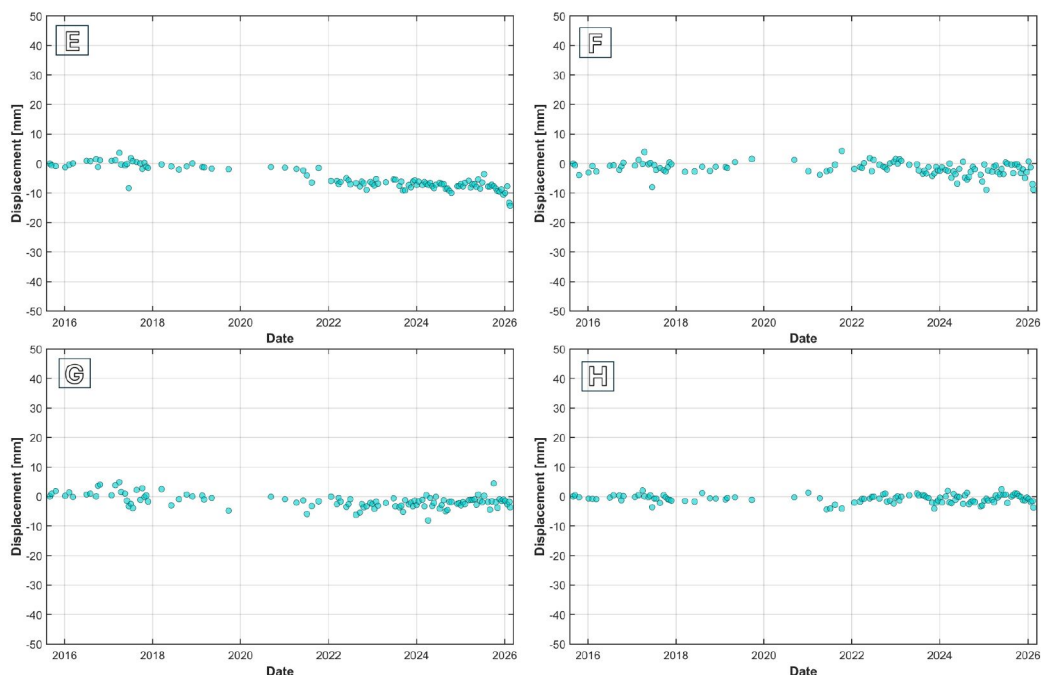


Figura 88 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 87.

4.5.6 Sentinel-1 - elaborazione con tecnica Dynamic InSAR

L'analisi dei dati Sentinel-1, elaborati mediante la tecnica Dynamic InSAR, è stata focalizzata sui settori ubicati a valle del centro abitato di Niscemi, con particolare riferimento ai corpi di frana attivati nel gennaio 2026.

I punti di misura riportati in Figura 89 evidenziano una netta differenziazione tra il settore settentrionale, caratterizzato da un quadro complessivamente stabile, e quello meridionale, dove si rilevano ancora movimenti residui distribuiti in diversi comparti del corpo di frana.

I punti sono rappresentati in funzione dello spostamento registrato nell'intervallo temporale 31 gennaio 2026 - 24 febbraio 2026, attraverso una scala cromatica graduata centrata sul valore nullo di spostamento lungo la linea di vista (LOS) del satellite.

Nel dettaglio, il settore nord non mostra variazioni significative nel periodo post-evento considerato, con valori compresi tra -8 mm e +8 mm lungo la LOS. I valori positivi (avvicinamento al sensore) risultano prevalentemente localizzati nella porzione sommitale del pendio, mentre nel settore centrale si osservano valori negativi (allontanamento).

Tali entità di spostamento rientrano tuttavia nell'ordine di grandezza dell'incertezza associata alla tecnica Dynamic InSAR, che in intervalli temporali brevi può raggiungere alcuni millimetri (fino a circa 5 mm), rendendo necessaria una valutazione preliminare del dato puntuale.

Diversamente, il settore meridionale evidenzia aree con deformazioni ancora apprezzabili. In particolare, si riconoscono porzioni con spostamenti fino a -25 mm immediatamente a valle del quartiere Sante Croci e lungo il versante in corrispondenza di aree a morfologia calanchiva.

Ulteriori comparti, situati a valle delle SP11 e SP10, mostrano valori fino a -10 mm nel medesimo intervallo temporale. Si precisa che tali spostamenti risultano localizzati al di fuori della fascia di interdizione di 150 m e interessano prevalentemente settori non urbanizzati.

L'analisi delle serie temporali evidenzia una tendenza generalmente lineare di movimento in tutti i punti considerati (Figura 90), esclusi i punti C e D dove si nota un *trend* di rallentamento a partire dalla terza acquisizione post-frana (12 febbraio 2026).

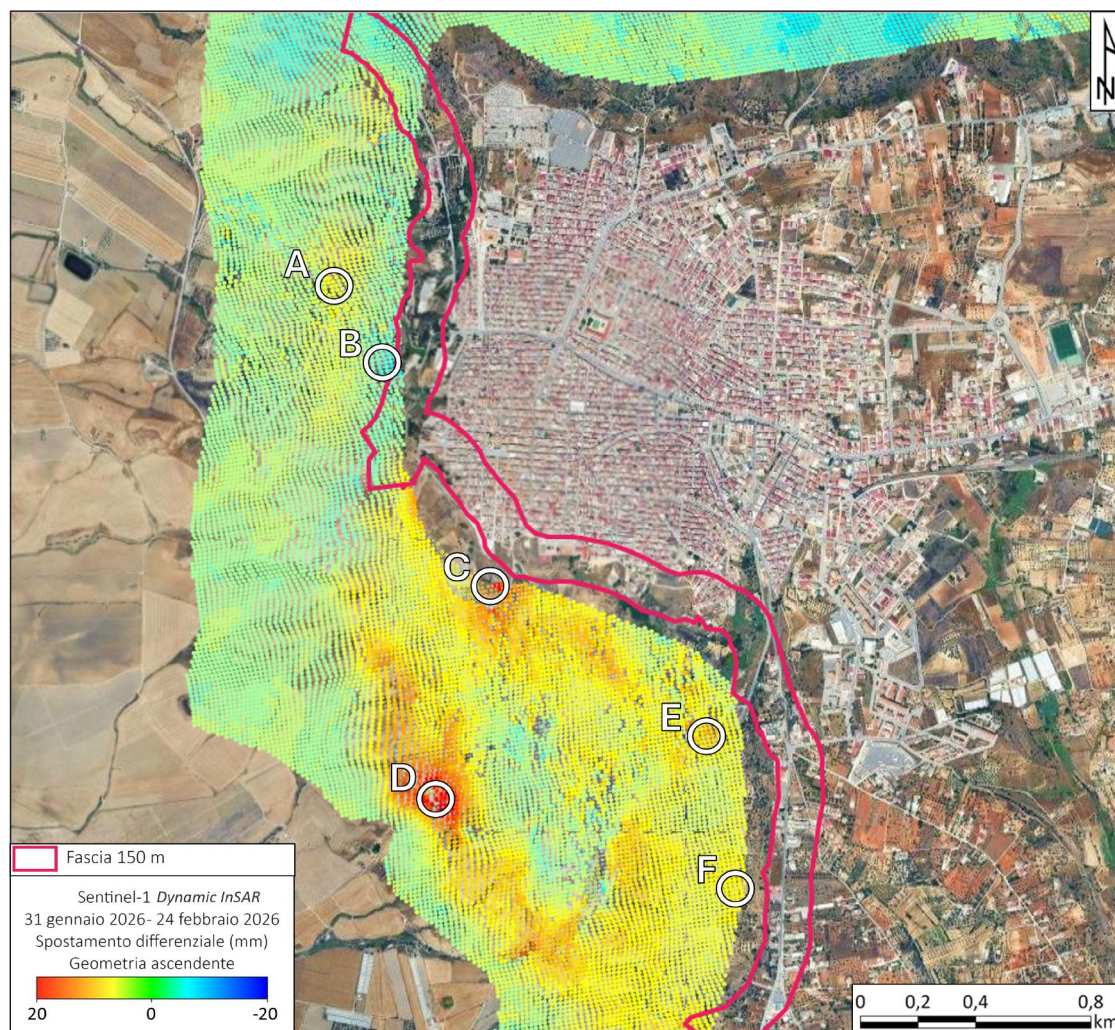


Figura 89 – Mappa degli spostamenti differenziali registrati dai dati Sentinel-1 in geometria ascendente tra il 31 gennaio e il 24 febbraio 2026, elaborati con tecnica Dynamic InSAR.



Figura 90 - Serie temporali dei punti evidenziati in Figura 89.

5 Analisi dei dati satellitari ottici

Il CPC-UNIFI ha effettuato l'analisi dei dati satellitari ottici acquisiti da diversi sensori sull'area di interesse elaborandoli con diverse tecniche, per stimare gli spostamenti superficiali pregressi e in atto sul paese di Niscemi a seguito dei dissesti.

A tal fine, sono state analizzate coppie di immagini ottiche satellitari *PlanetScope* pre-evento e post-evento per valutare il campo di deformazione verificatosi e caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale degli spostamenti durante e dopo le fasi principali dei dissesti.

Sono stati considerati diversi intervalli temporali, in modo da distinguere un'analisi dei dati pre-evento, un'analisi co-evento e un'analisi post-evento.

L'analisi dei dati satellitari ottici si basa sull'utilizzo di sensori passivi installati su piattaforme spaziali. Tali sensori, per poter operare, necessitano di una sorgente di energia esterna, che principalmente è rappresentata dalla radiazione solare.

A differenza dei sensori attivi, non emettono una propria radiazione, ma registrano l'energia solare riflessa o emessa dalla superficie terrestre nelle diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico. Proprio per la loro natura passiva, la qualità e l'utilizzabilità delle immagini acquisite dipendono dalle condizioni di illuminazione (quindi dalla presenza di luce diurna) e dall'assenza di copertura nuvolosa o di altri fattori atmosferici che possano ostacolare la radiazione.

Per l'analisi delle immagini ottiche è stata adottata la tecnica COSI-Corr, utilizzando dati ad alta risoluzione forniti dal satellite *PlanetScope*. Tale approccio ha consentito di stimare gli spostamenti superficiali attraverso il confronto multitemporale delle immagini acquisite.

5.1 Tecnica di elaborazione COSI-Corr

COSI-Corr (*Coregistration of Optical Sensed Images and Correlation*) è un modulo integrato in ENVI progettato per ottenere un'elaborazione geometrica accurata di immagini ottiche satellitari e aeree tramite ortorettifica, co-registrazione e correlazione, ed è stato sviluppato per identificare deformazioni del suolo a partire da acquisizioni multitemporali. In particolare, viene utilizzato per lo studio di frane, flussi glaciali e deformazioni cosismiche, ma può essere applicato anche alle analisi di cambiamento che richiedono una registrazione molto accurata delle immagini.

Il metodo COSI-Corr è una tecnica di telerilevamento che produce un'osservazione automatica dei cambiamenti a livello di *pixel* confrontando due immagini co-registrate, una acquisita prima e una dopo l'evento di deformazione. Attraverso un algoritmo di rilevamento dei cambiamenti tra pixel che opera nel dominio della frequenza, il COSI-Corr analizza lo spostamento relativo dei *pixel* all'interno di finestre di correlazione, in modo tale da stimare le traslazioni e i movimenti presenti, anche molto piccoli, fino a livello di sub-*pixel*.

Il primo passo della tecnica riguarda l'identificazione di aree stabili tramite i punti di controllo a terra (*Ground Control Points*, GCP), e sulla base di questi, si ottengono due livelli di spostamento per ogni coppia di immagini: uno in direzione nord-sud (N/S) e uno in direzione est-ovest (E/W).

Viene inoltre prodotto un parametro di qualità, ovvero il rapporto segnale/rumore (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) che fornisce informazioni in merito all'accuratezza del risultato pixel per pixel. Per quanto riguarda lo spostamento N/S, valori positivi indicano uno spostamento verso nord, mentre valori negativi indicano la direzione sud; per lo spostamento E/W, valori positivi rappresentano la direzione di spostamento verso est e valori negativi la direzione ovest.

Per correlare le immagini e fornire gli spostamenti, esistono due tipi di correlatori: di frequenza e statistico. Il primo si basa sull'algoritmo di Fourier, è più preciso e accurato ma anche più sensibile al rumore, ed è quindi adatto alla produzione di risultati su immagini di buona qualità. Il correlatore statistico, invece, è più

grossolano ed è applicato a immagini rumorose che sono già state analizzate con il correlatore in frequenza ma che hanno prodotto risultati insoddisfacenti.

In questo caso è stata applicata la correlazione in frequenza che si articola in due fasi principali. La prima fase prevede una stima preliminare e grossolana dello spostamento *pixel-per-pixel* tra due porzioni di immagine corrispondenti.

La dimensione della finestra di correlazione dovrebbe essere almeno doppia rispetto allo spostamento atteso; tuttavia, nella pratica, è raccomandato un rapporto maggiore, poiché l'aumento della dimensione della finestra consente di ridurre il rumore e le incertezze associate alla misura.

Successivamente alla stima dello spostamento iniziale, viene eseguita una seconda e conclusiva correlazione finalizzata al recupero dello spostamento a livello *sub-pixel*. L'elaborazione delle immagini è stata condotta utilizzando diverse combinazioni di dimensioni delle finestre iniziali e finali, espresse in *pixel*, comprese tra 8-8 *pixel* e 128-128 *pixel* per identificare la finestra migliore.

La scelta della dimensione della finestra influenza in modo significativo la qualità delle misure ottenute. L'utilizzo di finestre di dimensioni ridotte, come la configurazione 8-8 *pixel*, produce valori di qualità più bassi, introducendo un maggiore grado di incertezza nell'analisi dello spostamento della frana a causa della presenza casuale di misure di scarsa qualità; tuttavia, tale configurazione consente di ottenere informazioni più dettagliate ed è pertanto più indicata per aree di estensione limitata o per frane di piccola scala, in quanto il rumore di fondo influisce in misura minore sulla analisi.

Al contrario, l'incremento delle dimensioni delle finestre, fino alla configurazione iniziale-finale di 128-128 *pixel*, è perfetto per individuare pattern spaziali più chiari e coerenti, grazie alla significativa riduzione del rumore di fondo.

La combinazione di finestre di grandi dimensioni e aree estese risulta ampiamente documentata in letteratura, poiché è particolarmente adatta allo studio di spostamenti di grande entità. Tale configurazione ha consentito una rappresentazione più accurata del profilo e della geometria della frana. Inoltre, la possibilità di definire la dimensione del *pixel* contribuisce a migliorare la risoluzione spaziale dei risultati finali.

5.2 Satelliti *PlanetScope*

La costellazione di satelliti *PlanetScope* è composta da oltre 200 satelliti DOVE (DOVE e SuperDOVE) che dal 2016 consentono l'acquisizione di immagini ottiche ad alta risoluzione (3 m) orbitando intorno alla Terra ogni giorno.

Ogni *cubesat* DOVE opera in quattro bande: rosso, verde, blu e infrarosso vicino mentre i SuperDOVE di ultima generazione operano in otto bande spettrali (blu costiero, blu, verde I, verde, giallo, rosso, rosso limite e vicino infrarosso).

I prodotti *PlanetScope* sono disponibili a diversi livelli di processamento:

- *Basic Scene Product* (Livello 1-B) che forniscono radianza scalata e corretta radiometricamente e a livello di sensore, che richiede elaborazioni e correzioni geometriche. Questo prodotto ha un inquadramento basato sulla scena e non è proiettato cartograficamente.
- *Ortho Scene Product* (Livello 3-A) che fornisce un prodotto ortorettificato, una radianza scalata o un'immagine di riflettanza superficiale adatta ad applicazioni analitiche e visive ed è proiettato cartograficamente.
- *Ortho Tile Product* (Livello 3-B), ortorettificato e proiettato nel sistema UTM in cui le correzioni radiometriche e del sensore sono applicate direttamente ai dati.

La metodologia è stata applicata a cinque immagini *PlanetScope*, acquisite tra il 1 gennaio 2026 e il 2 febbraio 2026 al fine di ottenere una panoramica dell'area di studio nelle fasi precedenti e successive all'evento analizzato. I dettagli e le caratteristiche delle immagini utilizzate sono riportati in Tabella 6.

La procedura di identificazione dei GCPs, finalizzata al riconoscimento dei punti stabili all'interno delle immagini per evidenziare le aree in movimento, è stata effettuata utilizzando i dati EGMS (*European Ground*

Motion Service) e le relative serie temporali. In particolare, sono stati selezionati i punti che non presentavano variazioni significative di spostamento nel periodo più recente.

L'analisi è stata inizialmente condotta applicando la metodologia alla coppia di immagini acquisite il 01 gennaio 2026 e il 08 gennaio 2026, entrambe precedenti all'evento. Tale confronto non ha evidenziato spostamenti e movimenti significativi sull'intera area di studio. Successivamente la stessa procedura è stata applicata alle coppie di immagini acquisite l'8 gennaio 2026 e il 17 gennaio 2026, poi 17 gennaio 2026 e 27 gennaio 2026 e 27 gennaio 2026 e 2 febbraio 2026. In questi casi sono stati osservati movimenti significativi in prossimità del paese di Niscemi, inizialmente localizzati nell'area nord e successivamente estesi all'area sud.

I risultati dettagliati delle analisi, comprensivi dei relativi tassi di spostamento, sono mostrati nei prossimi paragrafi.

Immagine	Data di acquisizione	Risoluzione	Bande
20260101_102026_13_24fa	01/01/2026	3 m	RGB
20260108_094959_74_255c	08/01/2026	3 m	RGB
20260117_103850_76_24ed	17/01/2026	3 m	RGB
20260127_101715_07_253a	27/01/2026	3 m	RGB
20260202_102119_87_2506	02/02/2026	3 m	RGB

Tabella 6 - Caratteristiche delle immagini *PlanetScope*, con relativa data di acquisizione, risoluzione e bande.

5.3 Analisi degli spostamenti tra l'8 gennaio 2026 e il 17 gennaio 2026

In Figura 91 sono riportati i risultati dell'analisi dell'area di Niscemi, ottenuti dall'elaborazione di due immagini acquisite in data 08 gennaio 2026 e 17 gennaio 2026. La mappa mostra il modulo dello spostamento dato dalla somma delle componenti est-ovest e nord-sud per entrambe le aree di interesse.

Per quanto riguarda la zona nord, i risultati evidenziano un'area interessata da spostamenti verso ovest, evidenziato dalle frecce, fino a 10 m in 11 giorni (velocità massima di circa 0,9 m/giorno) come mostrato in Figura 91. L'area sud, invece, evidenzia uno spostamento minimo, in direzione sud-sudest con valori fino a 3-4 m in 11 giorni (velocità di circa 0,2 m/giorno).

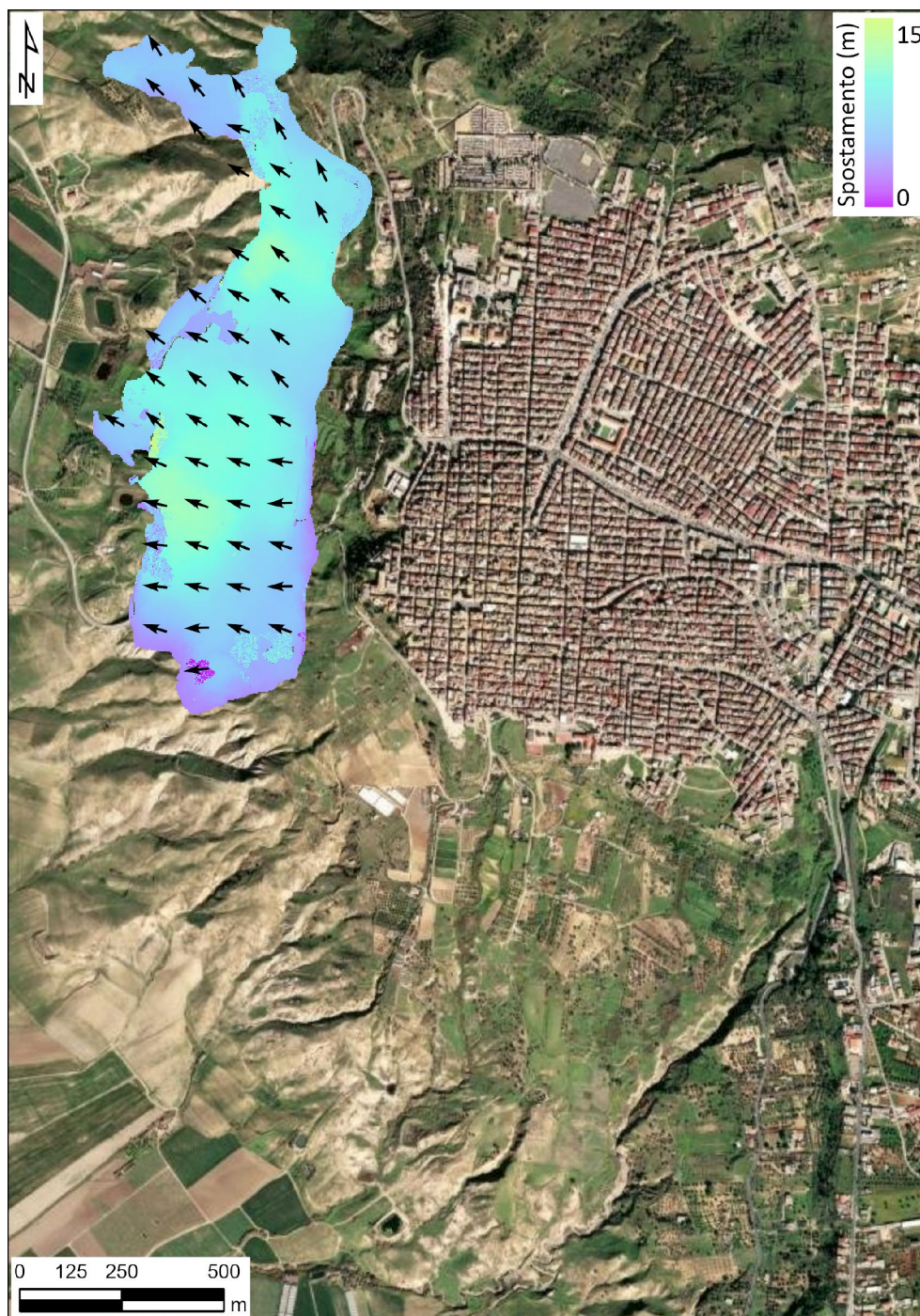


Figura 91 - Modulo dello spostamento dell'area di Niscemi ottenuto tramite il COSI-Corr con immagini satellitari acquisite in data 8 gennaio 2026 e 17 gennaio 2026 sia per l'area nord che per l'area sud.

5.4 Analisi degli spostamenti tra il 17 gennaio 2026 e il 27 gennaio 2026

In Figura 92 sono riportati i risultati ottenuti dall'analisi COSI-Corr relativi al confronto di due immagini acquisite rispettivamente il 17 gennaio 2026 e il 27 gennaio 2026, che evidenziano spostamenti significativi nell'area di studio. La mappa mostra il modulo dello spostamento dato dalla somma delle componenti est-ovest e nord-sud per entrambe le aree di interesse.

Nell'area nord si osserva ancora un leggero spostamento con valori massimi fino a 6 m in 11 giorni (velocità di circa 0,5 m/giorno) in direzione ovest, come indicato dalle frecce. Tale andamento risulta essere coerente con il movimento evidenziato nel periodo precedente.

Nell'area sud, invece, l'analisi evidenzia spostamenti più rilevanti prevalentemente in direzione sud, con alcune porzioni caratterizzate da componenti verso sud-ovest. Lo spostamento verso sud-ovest raggiunge valori massimi di circa 22 m in 11 giorni (con una velocità di circa 2 m/giorno) localizzati nella zona settentrionale del corpo di frana, mentre nella porzione centrale si registrano valori più contenuti, fino a circa 6 m in 11 giorni (velocità di circa 0,5 m/giorno).

Lo spostamento verso sud risulta complessivamente più marcato e significativo, con valori massimi fino a 37 m in 11 giorni (con una velocità di circa 3,3 m/giorno) nella porzione settentrionale del movimento. Nella zona centrale si osservano valori leggermente inferiori, fino a 34 m in 11 giorni (con velocità di circa 3,1 m/giorno). Nei settori nord-orientali adiacenti al centro abitato e in quello meridionale, gli spostamenti risultano leggermente inferiori, con valori compresi tra 26 e 29 m in 11 giorni (con velocità di circa 2,6 m/giorno).

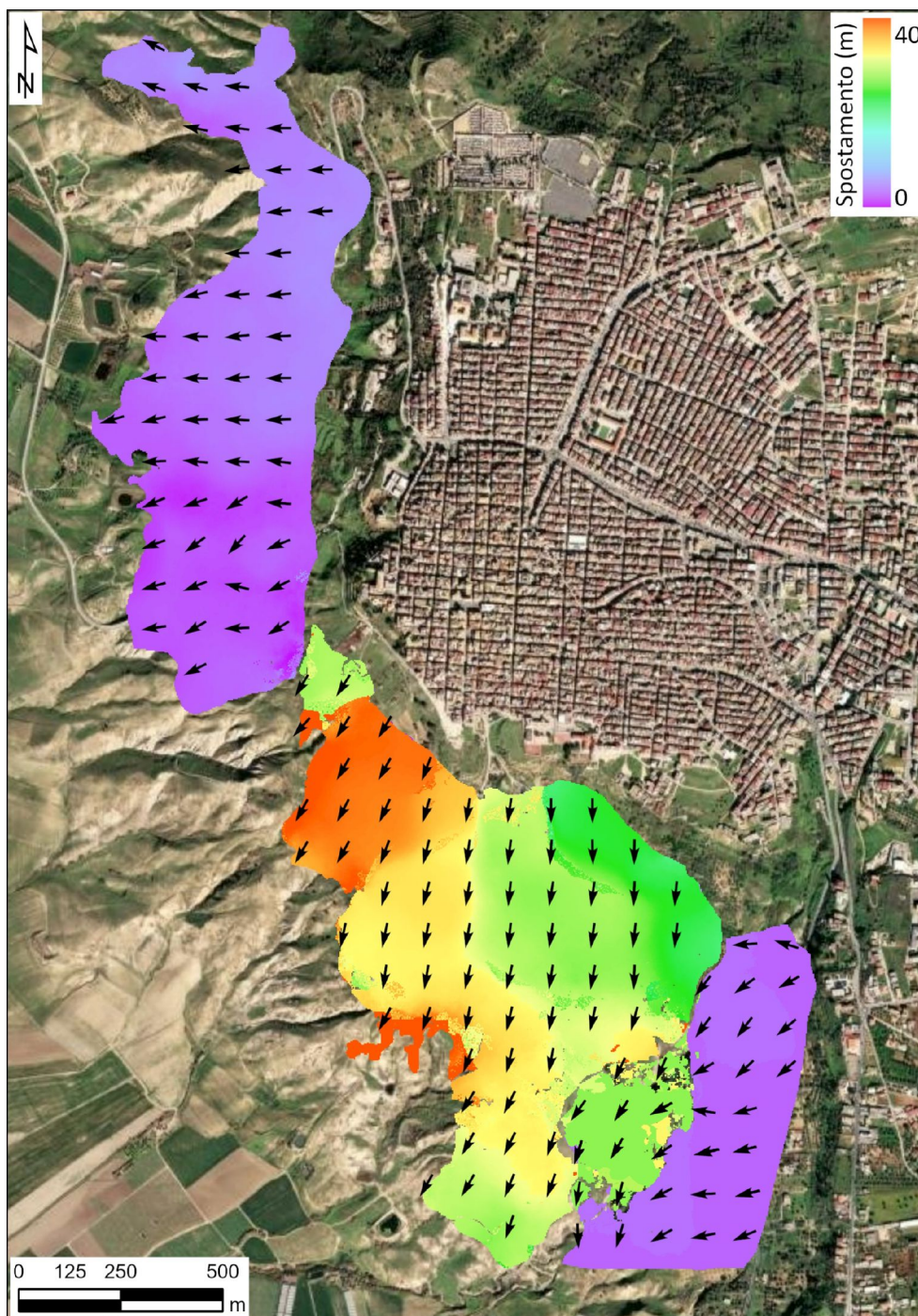


Figura 92 - Modulo dello spostamento del suolo tramite il COSI-Corr con immagini satellitari acquisite in data 17 gennaio 2026 e 27 gennaio 2026 sia per l'area nord che per l'area sud.

5.5 Analisi degli spostamenti tra il 27 gennaio 2026 e il 2 febbraio 2026

In Figura 93 sono illustrati i risultati dall'analisi condotta sul confronto di due immagini acquisite il 27 gennaio 2026 e il 2 febbraio 2026, entrambe successive all'evento principale. A causa di un diverso ritaglio delle immagini utilizzate, l'area a nord risulta essere incompleta.

La mappa mostra il modulo dello spostamento dato dalla somma delle componenti est-ovest e nord-sud. Sia per l'area a nord che per l'area quella a sud si osservano spostamenti verso ovest o sud-ovest, nettamente inferiori rispetto a quelli mostrati nel periodo precedente. I valori massimi risultano compresi tra 1 e 3 m in 7 giorni (velocità di circa 0,1 - 0,4 m/giorno).

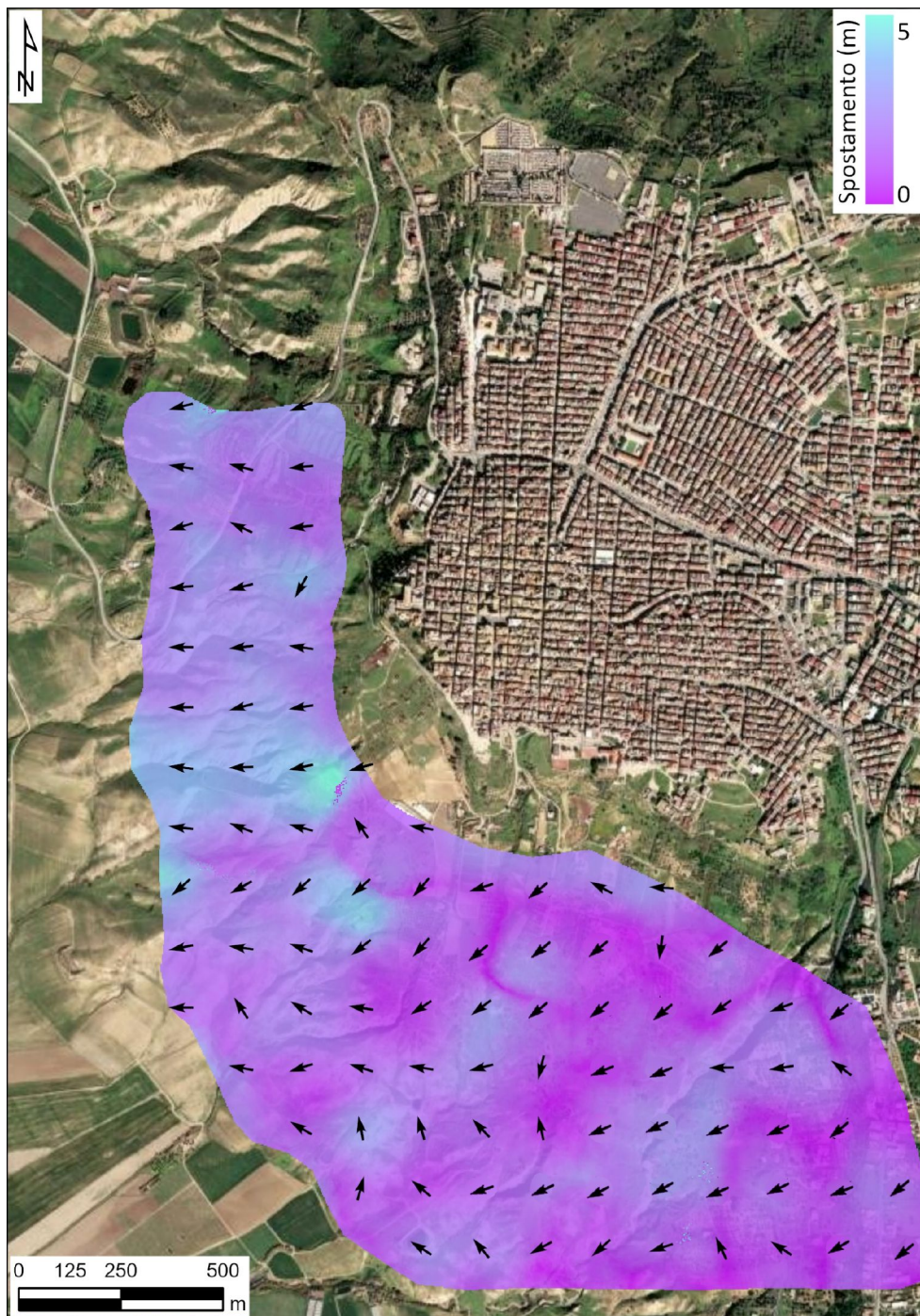


Figura 93 - Modulo dello spostamento dell'area di Niscemi ottenuto tramite il confronto di due immagini acquisite in data 27 gennaio 2026 e 2 febbraio 2026 tramite COSI-Corr.

6 Indagini geofisiche

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 Sicilia - Dipartimento della Protezione Civile (DRPC Sicilia) richiesto all'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS una prospezione geoelettrica 3D ed 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 rigidità dei materiali), i dati ERT forniscono informazioni sulla distribuzione della resistività elettrica, legata alla porosità, alla saturazione di fluido e alla composizione litologica delle unità geologiche.

Valutare la sensibilità del sottosuolo ai due tipi di segnale fisico utilizzati da questi metodi permette di far emergere caratteristiche diverse nello stesso volume di sottosuolo. Inoltre, ciascun tipo di dato può evidenziare aspetti complementari della struttura investigata.

Ad esempio, un cambiamento significativo nella velocità sismica può essere associato a un contrasto di resistività elettrica, come accade nella transizione da materiali sabbiosi a livelli argillosi saturi, permettendo una più robusta interpretazione litostratigrafica. L'integrazione è inoltre preziosa in presenza di anomalie complesse o in situazioni di alta eterogeneità laterale, poiché consente di ridurre l'ambiguità.

Nel presente rapporto vengono presentati i risultati preliminari di entrambe le indagini.

I contenuti di questa sezione si basano sul rapporto in corso di preparazione dell'OGS a cura di:

- **per l'indagine geoelettrica:** Antonio Bratus, Massimo Giorgi, Michele Potleca, Matthia Ugo Potleca, Stefano Picotti, Stefano Maffione, Oziel Souza de Araujo, Andrea Travan, Francesca Bearzot;
- **per l'indagine sismica:** Flavio Accaino, Federico Da Col, Gaia Travan, Luca Baradello, Luigi Lucerna, Fabio Meneghini, Matthia Ugo Potleca, Edy Forlin.

6.1 Tomografie elettriche 3D con *Fullwaver*

I metodi geoelettrici sono metodi di esplorazione non invasiva tra i più comunemente impiegati per problemi ambientali, ingegneristici, idrogeologici, archeologici e di esplorazione mineraria. Sono impiegati per individuare *target* con dimensioni variabili da qualche millimetro a qualche chilometro (Loke *et al.*, 2013, Pazzi *et al.*, 2019).

Il metodo geoelettrico, e in particolare la Tomografia di Resistività Elettrica (ERT), è una tecnica molto efficace per la costruzione di modelli geologici e per il monitoraggio delle frane, perché consente di investigare il sottosuolo in modo non invasivo e di ripetere le misure nel tempo.

Il principio fisico su cui si basa è la misura della resistività elettrica del sottosuolo, ovvero la sua capacità di opporsi al passaggio della corrente elettrica, una proprietà che varia in funzione della litologia, del grado di fratturazione e soprattutto del contenuto d'acqua, fattori strettamente legati ai processi di instabilità dei versanti.

Durante le indagini una serie di elettrodi viene disposta sulla superficie del terreno e le acquisizioni avvengono mediante una sequenza preimpostata, preparata dall'operatore, che di volta in volta seleziona sia la coppia di elettrodi che induce corrente nel terreno che la coppia che misura il potenziale.

L'immissione di corrente elettrica nel terreno e la misura delle differenze di potenziale, unite all'informazione sulla geometria di acquisizione (cioè la posizione dei quattro elettrodi utilizzati) consentono di ottenere dati che, una volta elaborati tramite algoritmi di inversione, vengono trasformati in immagini 2D o 3D della distribuzione di resistività nel sottosuolo.

Queste immagini costituiscono la base per la costruzione di modelli geologici, nei quali è possibile riconoscere le principali unità litologiche e i loro rapporti strutturali.

L'interpretazione dei modelli geoelettrici, integrata con informazioni geologiche e geotecniche indipendenti, permette di individuare elementi chiave per la comprensione della frana, come la geometria del corpo instabile, la posizione della superficie di scivolamento e la presenza di livelli argillosi o zone fortemente saturate. In molti casi, i contrasti di resistività evidenziano il passaggio tra materiali rimaneggiati e il substrato più competente, fornendo indicazioni fondamentali per la ricostruzione del modello geologico del versante.

Il sistema *FullWaver* della Iris Instruments (Figura 94) è stato progettato per la misura di resistività, polarizzazione indotta e potenziale spontaneo su grandi superfici 2D e 3D con topografia complessa.

Il tipo di misura, pur conservando i principi base della prospezione geoelettrica, costituisce un approccio innovativo nell'acquisizione del dato, aumentando le potenzialità del metodo anche rispetto ai tradizionali sistemi multielettrodi, ormai in uso da decine di anni.

La strumentazione si compone di un sistema di trasmissione ad alta potenza (TIP 6000, Figura 94b) posto in serie ad una unità *box I-FullWaver* (*box* arancione in Figura 94a,b) per la generazione e la misura della corrente immessa, e di almeno 30 sistemi indipendenti di registrazione del potenziale (*box* verdi in Figura 94a, denominati *V-FullWaver*), ognuno dei quali gestisce 3 elettrodi (P1,P2 e P3) che formano 2 coppie di elettrodi di potenziale (P1-P2 e P3-P3) in continua misurazione, così da poter registrare sia il Potenziale Spontaneo che quello indotto dall'energizzazione.

Ciascun *box* ha un'autonomia di funzionamento continuativo di 8 h, con un tempo di campionamento di 10 ms. L'apertura dei dipoli di potenziale (cioè la distanza tra P1 e P2 e quella tra P2 e P3) può arrivare fino a 50-100 m. Il sistema offre una grande flessibilità nella disposizione dei ricevitori, limitando le interazioni dei cavi con le infrastrutture (strade, edifici, proprietà private), e la spaziatura tra le triplette di elettrodi definisce la profondità di indagine (oltre i 200 m), utilizzando una configurazione di acquisizione con i poli di energizzazioni remoti.

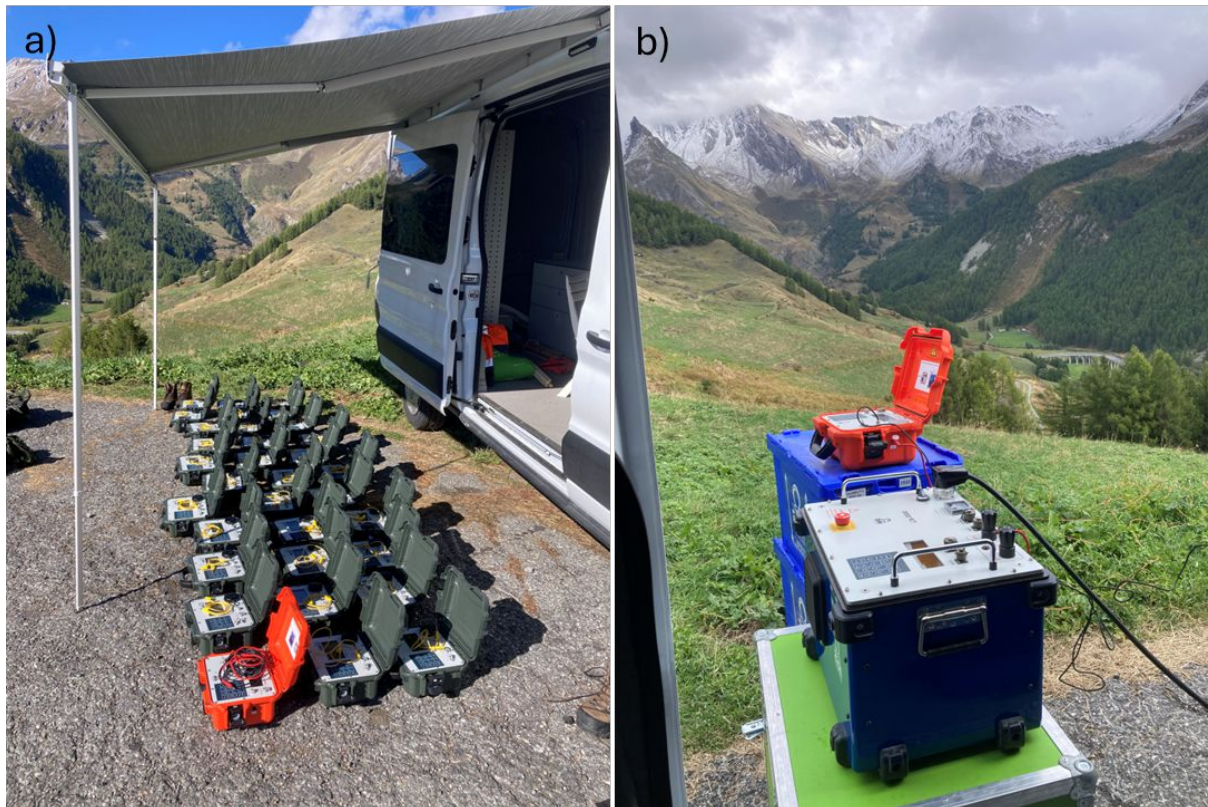


Figura 94 - a) I gruppi di registrazione del sistema FullWaver: il box arancione è l'*I-FullWaver* che, posto in serie al trasmettitore, registra la corrente generata nel terreno, i box verdi sono i *V-FullWaver* che misurano le differenze di potenziale del campo elettrico generato dalla corrente immessa. b) Unità di trasmissione ad alta potenza TIP 6000 collegata in serie l'unità *I-FullWaver* per la registrazione della corrente immessa.

Tale configurazione è finalizzata ad avere un buon dettaglio dei primi metri del sottosuolo, unitamente ad una misura profonda. Ciascun *V-FullWaver* è dotato di una unità GNSS per la sincronizzazione PPS e la localizzazione, così come il TIP 6000 è il dispositivo GNSS integrato che permette la sincronizzazione dei segnali di corrente *I* e di potenziale *V* misurati (Figura 95), in modo da ricavare i tradizionali valori essenziali al calcolo della resistività secondo la legge di Ohm, ed eventualmente della caricabilità qualora sia richiesta l'analisi della polarizzazione indotta.

Mediante ogni campagna geoelettrica con *FullWaver* prevede più di 5000 punti di misura nel sottosuolo e la progettazione dei punti di misura richiede un importante lavoro pianificatorio solitamente eseguito sfruttando le potenzialità dei pacchetti *GoogleEarth*, in modalità *StreetView*, unite ad un sopralluogo, laddove possibile.

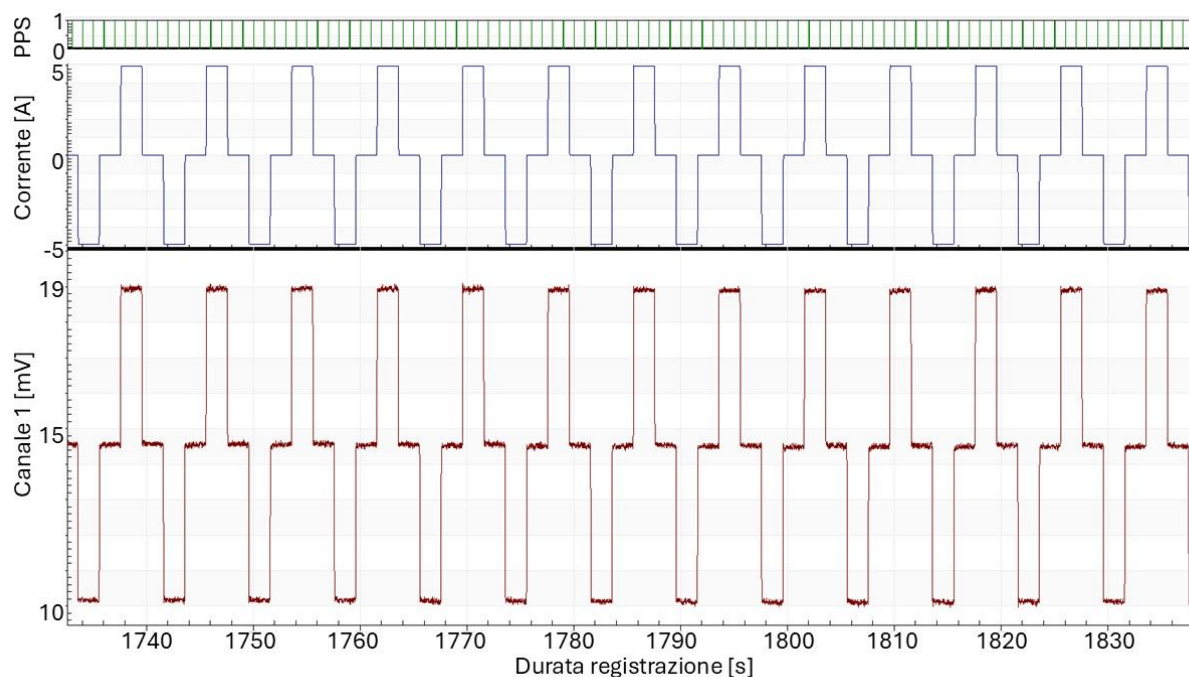


Figura 95 - Esempio di sincronizzazione dei segnali registrati dal GNSS (barre verde in alto), dall'unità *I-FullWaver* (grafico blu) e dall'unità *V-FullWaver* (grafico rosso).

6.1.1 Campagna di acquisizione

La campagna di indagine 3D aveva l'obiettivo di caratterizzare il contesto geologico profondo al di sotto dell'abitato di Niscemi. In Figura 96 è riportata l'ubicazione del rilievo così come progettato sfruttando le potenzialità dei pacchetti *GoogleEarth*, in modalità *StreetView*, unite ad un modello morfologico differenziale ottenuto utilizzando i rilievi aerofotogrammetrici pre- e post-frana realizzato dal Comune di Niscemi e forniti dal DRPC.

La scelta dell'area, sebbene in una zona interdetta e accessibile solo previa scorta di personale abilitato, è stata dettata dalla presenza di un centro abitato pressoché privo di superfici non coperte (spazi verdi pubblici, aiuole, giardini).

Il livello di dettaglio della progettazione è stato elevato, anche per ottimizzare al massimo la logistica sul terreno, considerando i vincoli legati all'operatività in un ambiente urbanizzato in stato di emergenza con pesanti limitazioni di accessibilità. Il disegno del progetto sfrutta l'app *Google Earth*, in modo da poter essere facilmente consultato dai componenti delle squadre di acquisizione durante le operazioni di campagna.

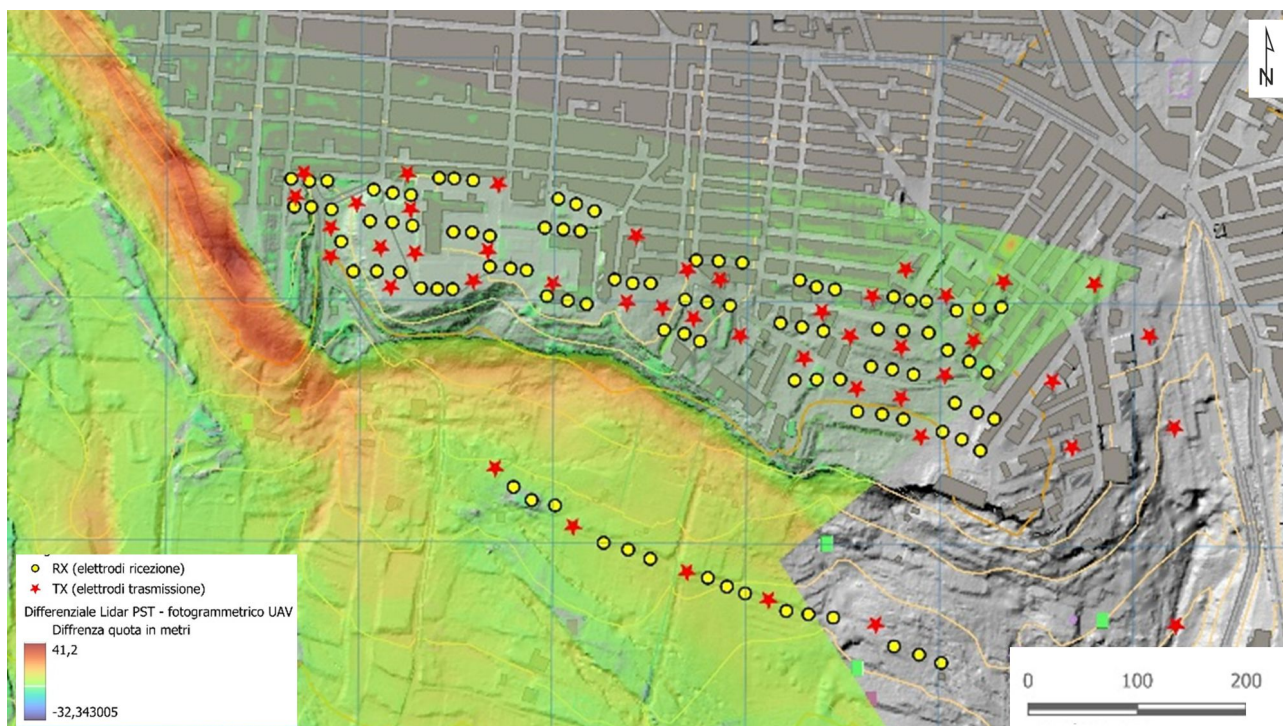


Figura 96 - Progettazione preliminare del rilievo geoelettrico utilizzando come base il modello differenziale di spostamento ottenuto confrontando dati morfologici pre e post frana.

Per l'esecuzione delle misure di resistività, caricabilità e potenziale spontaneo è stato utilizzato esclusivamente il sistema *FullWaver* della Iris Instruments.

La campagna di prospezione geoelettrica 3D è stata condotta nei giorni 9-11 febbraio 2026. Per l'acquisizione del potenziale sono stati impiegati 32 *box*, 27 dei quali con gli elettrodi P1 e P3 (pallini gialli - RX in Figura 97) posti a 20 m rispetto all'elettrodo centrale P2 (rombo verde - Box in Figura 97) e distribuiti come da progetto e come indicato in Figura 97 in modo da investigare un'area di ca. 170x700 m (area delimitata dalla linea tratteggiata blu in Figura 97), e 5 con gli elettrodi P1 e P3 (pallini gialli in Figura 97) posti a 10 m rispetto all'elettrodo centrale P2 (box in Figura 97) e distribuiti in modo da risultare sovrapposti alla linea di acquisizione della prospezione sismica.

Questi ultimi sono stati così posizionati, constatata l'impossibilità, per motivi di sicurezza, di posizionarli al piede della frana nel luogo di progetto.

Per l'energizzazione sono stati posizionati due poli positivi remoti (TX1 e TX2 all'esterno dell'area raffigurata in Figura 97) che sono rimasti fissi nel corso di tutta l'acquisizione e che venivano alternativamente collegati ad uno dei 36 poli negativi distribuiti all'interno dell'area di indagine (pallini rossi - TX in Figura 97).

Tutti i punti di misura TX, così come tutti gli elettrodi, sono stati georiferiti con un rilievo GNSS dedicato al fine di ottenere il corretto valore del fattore geometrico.

In totale sono quindi state effettuate 107 energizzazioni con valori di corrente nel *range* di 5-7 A e sono stati acquisiti quadripoli sia in modalità dipolo-dipolo che gradiente (così da combinare i vantaggi di entrambi gli *array* di misura e ridurre i limiti) per un totale di 6639 acquisizioni distribuite fino a più di 200 m di profondità.

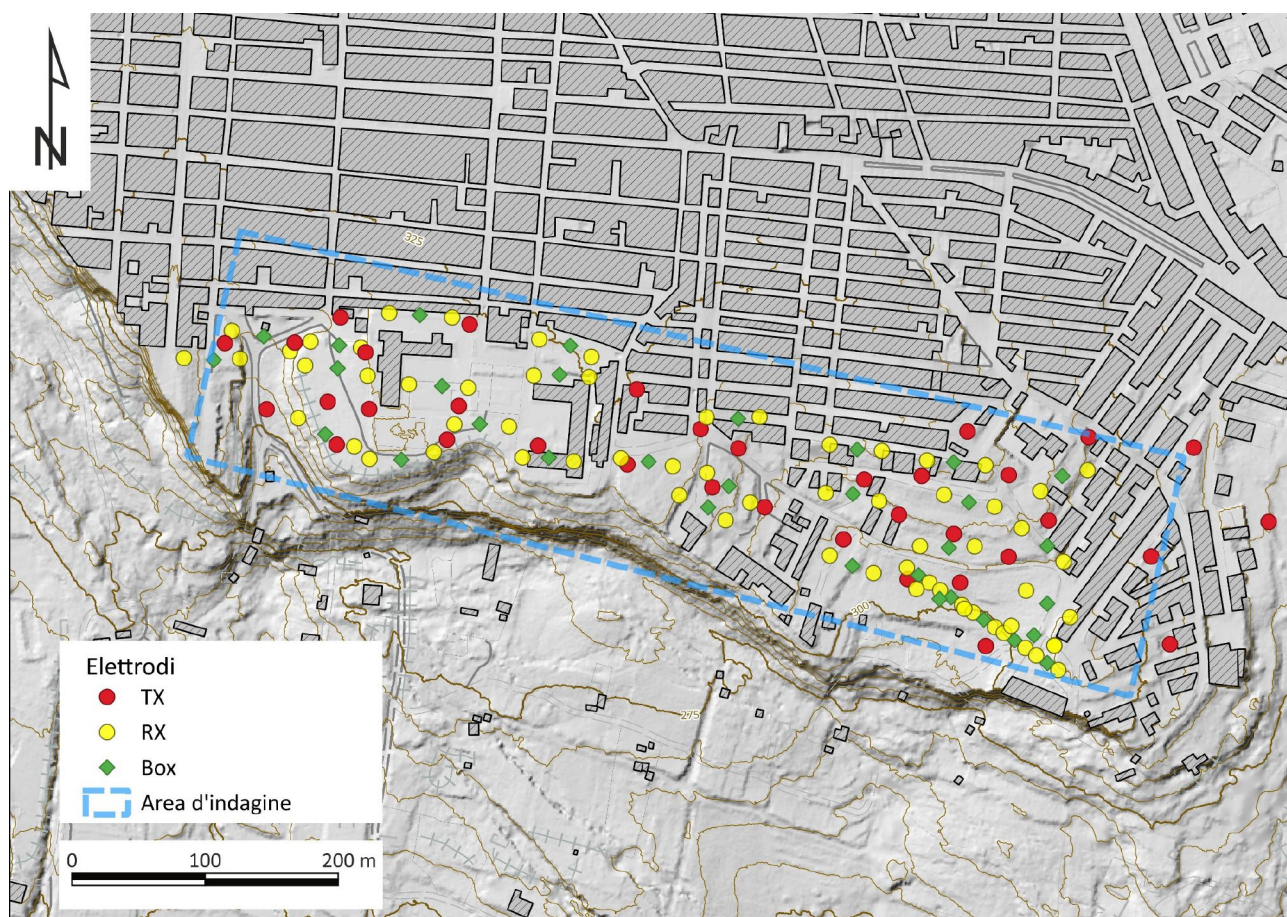


Figura 97 - Distribuzione dei *box*-P2 (rombi in verde) e degli elettrodi (P1 e P3) di acquisizione del potenziale (RX, in giallo). Si ricorda che, per ciascun *box*, la misura del potenziale avviene tra la coppia P1-P2 e la coppia P3-P2. In rosso sono indicate le posizioni dei poli negativi usati per la trasmissione della corrente (TX, in rosso). In blu è indicata la pianta dell'area indagata.

6.1.2 Risultati

Il contesto ambientale in cui si è svolta l'indagine, pur presentando una potenziale complessità data dall'abitato stesso, mostra valori di resistività praticamente privi di rumore antropico. Le misure sono quindi risultate di ottima qualità.

A titolo di esempio in Figura 98 è riportato il dettaglio del segnale registrato al primo canale del *box* V-FW n. 9 (ricevitore RX9) in corrispondenza dell'evento di trasmissione tra gli elettrodi TX307 e TX108. Si può distintamente riconoscere il segnale dovuto al campo elettrico generato dal dipolo di trasmissione.

La presenza di circa 10 *stack* di misura, registrati nel corso di quasi 90 s di iniezione della corrente, consente di individuare un segnale medio decisamente buono (grafico in basso a sinistra nella Figura 98) con ampiezza dell'ordine di 50 mV.

Le misure di caricabilità (grafico in basso a destra) identificano chiaramente una curva di scarica. Questa tendenza è confermata anche nella misura dipolo-dipolo, riportata in Figura 99, dove si osserva un andamento analogo della curva di scarico, misurata in 8 momenti, considerato il tempo di 2000 ms impostato per questo tipo di misura.

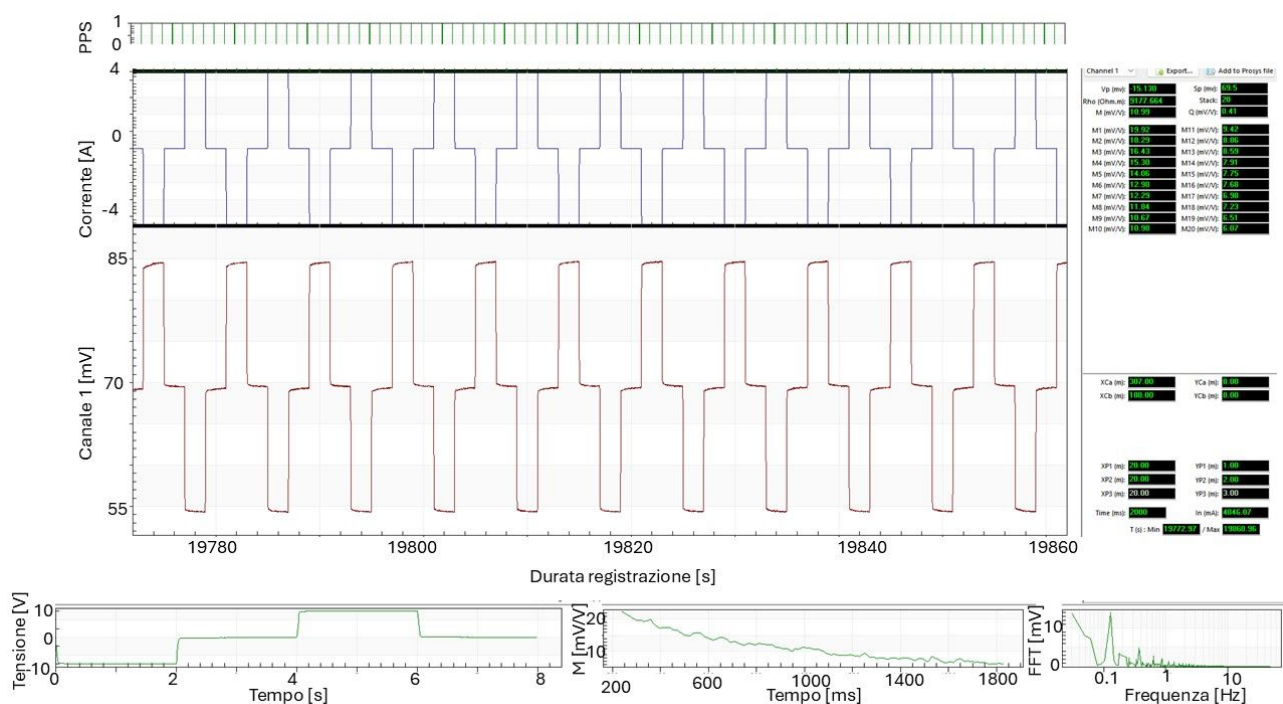


Figura 98 - In blu il grafico dell'andamento temporale dell'intensità di corrente (mA) iniettata in corrispondenza del dipolo di trasmissione TX307-TX108 (quadripolo di tipo gradiente). In rosso il grafico dell'andamento temporale del corrispondente segnale di potenziale (mV) registrato dal primo canale del box V-FW n. 9. In basso a destra il segnale mediato sui diversi *stack* di misura. In basso al centro la curva di scarico della caricabilità.

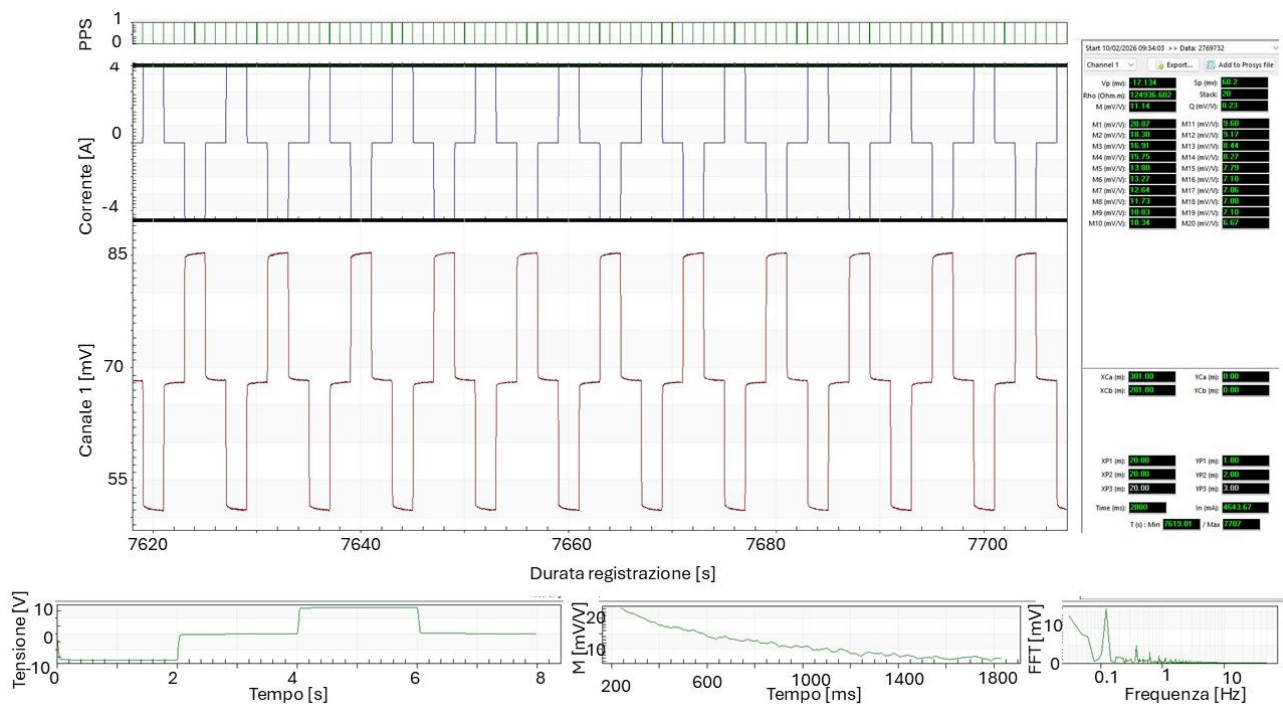


Figura 99 - In blu il grafico dell'andamento temporale dell'intensità di corrente (mA) iniettata in corrispondenza del dipolo di trasmissione TX301-TX201 (quadripolo di tipo dipolo-dipolo). In rosso il grafico dell'andamento temporale del corrispondente segnale di potenziale (mV) registrato dal primo canale del box V-FW n. 20. In basso a destra il segnale mediato sui diversi *stack* di misura. In basso al centro la curva di scarico della caricabilità.

La fase di *pre-processing* del dato, oltre che alla consuete verifiche sulla qualità del dato, richiede l'analisi del segnale per ogni singola stazione di misura ed il suo abbinamento con le trasmissioni. Tale passaggio è indispensabile, altrimenti il software di inversione non è in grado di leggere le misure in maniera corretta, e viene effettuato mediante il programma *FullWaver Viewer*, la cui schermata è riportata in Figura 100.

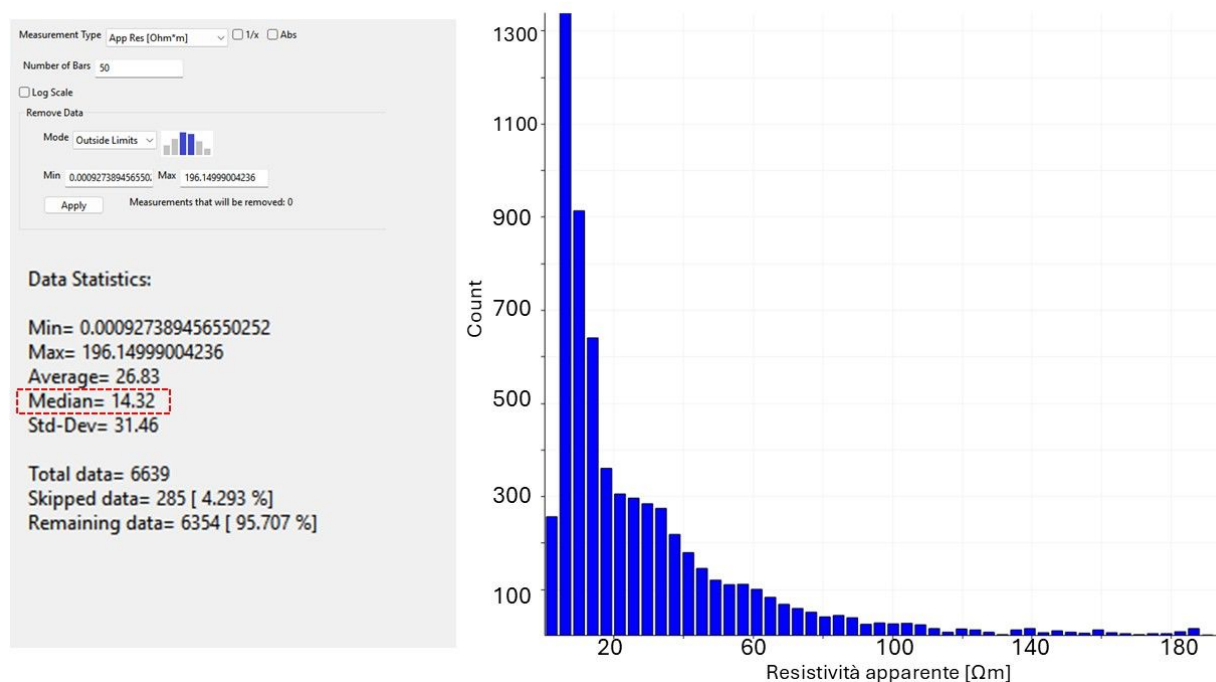


Figura 100 - Istogramma dei valori di resistività apparente misurati che evidenzia valori di resistività apparente misurati nel sito molto bassi.

L'elaborazione dei dati ERT è stata effettuata utilizzando il software ViewLab 3D della Geostudi Astier, versione 3.8, attraverso il classico processo dell'inversione geofisica 3D con l'applicazione della seguente configurazione:

- aggregazione delle singole acquisizioni;
- importazione della topografia in quote ortometriche (coordinate UTM33 - WGS84);
- generazione, sulla base dell'ubicazione dei punti di misura del sottosuolo e alla loro estensione areale, della *mesh* 3D, con celle cubiche con il lato pari a circa un terzo della distanza elettrodo (7.5 m) e una profondità totale ottenuta dalla distribuzione dei punti di misura (Figura 101), previa verifica di quanto ipotizzato in fase di simulazione. Questo accorgimento limita la creazione di artefatti in fase di inversione, creando un modello, certamente meno esteso in termini di dimensioni, ma sicuramente più robusto ed affidabile in termini di risultati. La base di partenza per la realizzazione delle maglie 3D per l'inversione dei dati è stato il DTM fornito dal DRPC, che è stato decampionato adeguando la dimensione delle celle a quella delle maglie di progetto;
- rototraslazione della maglia per minimizzare la regione di *background*;
- definizione del modello di resistività di partenza per l'inversione pari a 18 Ωm (valore leggermente maggiore della mediana dei valori di resistività apparente come si vede in Figura 100);
- applicazione del 1% di rumore ai dati per la resistività;
- applicazione di un tipo di inversione con ricalcolo del parametro *roughness* a ciascuna iterata con un massimo di 4 *trial* (*full inversion*).

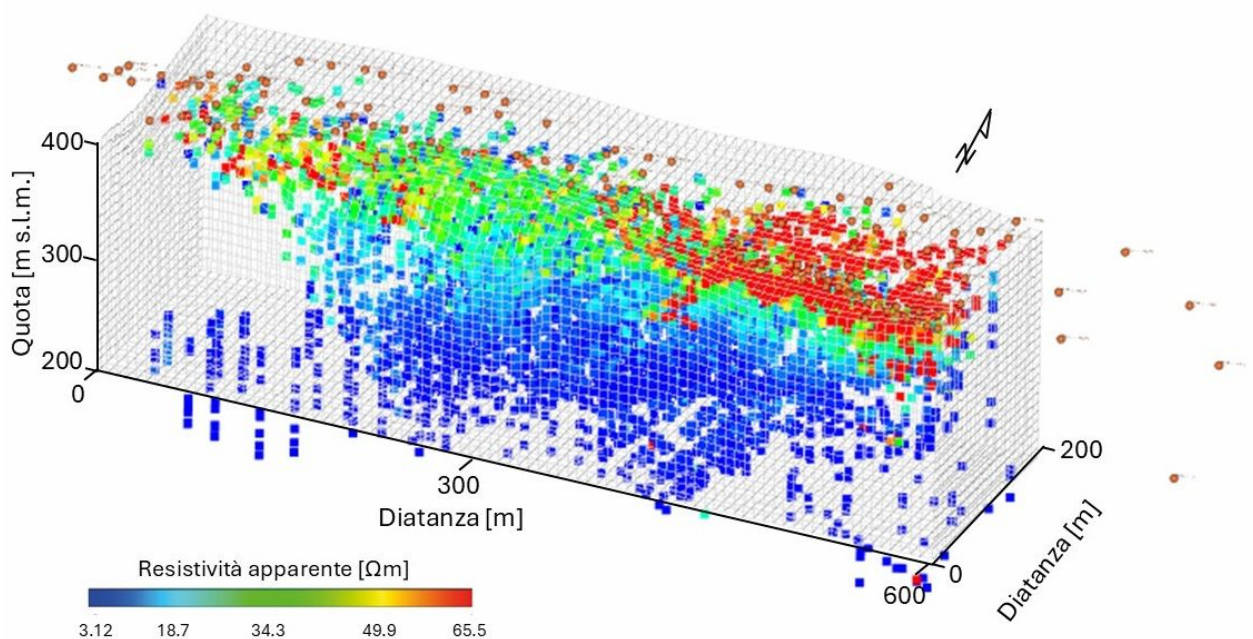


Figura 101 - Ubicazione nel sottosuolo dei punti di misura utilizzati nell'inversione e derivano dal filtraggio del dato di campagna (pallini colorati) e *mesh* 3D per l'inversione dei valori di resistività apparente.

Il tool di processing *ViewLab* 3D realizza l'inversione minimizzando gli scarti tra pseudosezione calcolata e pseudosezione misurata con l'applicazione matematica del metodo dei minimi quadrati associato a regolarizzazione, nota in letteratura come Inversione "Occam".

Le inversioni di resistività, mediamente, sono andate a convergenza in 6 iterazioni con una ottima concordanza fra modello calcolato e modello misurato come evidenziato in Figura 102: a sinistra è riportato il numero totale delle iterazioni nel processo di inversione e a destra il *cross-plot* dei dati misurati confrontati con i dati modellati al termine della inversione.

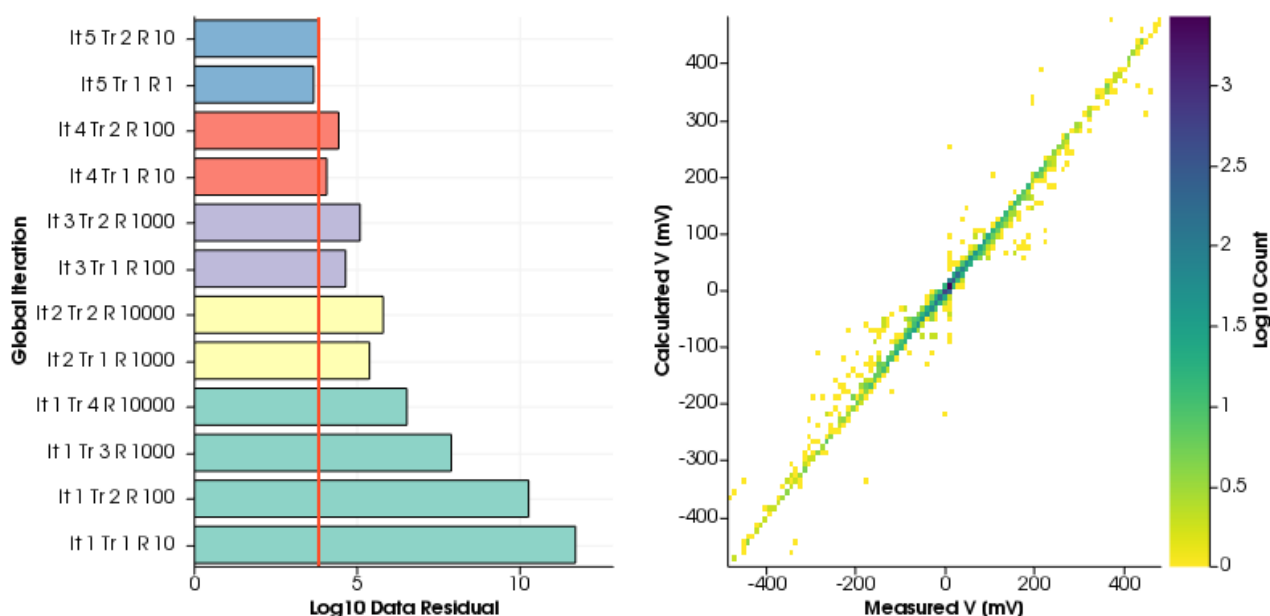


Figura 102 - Grafici finali di controllo del processo di inversione della resistività: a sinistra l'andamento del *misfit* fra i dati modellati e quelli misurati. A destra *cross-plot* della *V* (mV) fra dati calcolati da modello al termine dell'inversione e quelli misurati sul campo.

Il modello 3D di resistività ottenuto è riportato in Figura 103 e mostra chiaramente la presenza di un importante volume basso resistivo profondo che si sviluppa generalmente a partire da 50 m di profondità. Esso è descrivibile come il pacco di argille noto dalla letteratura dell'area.

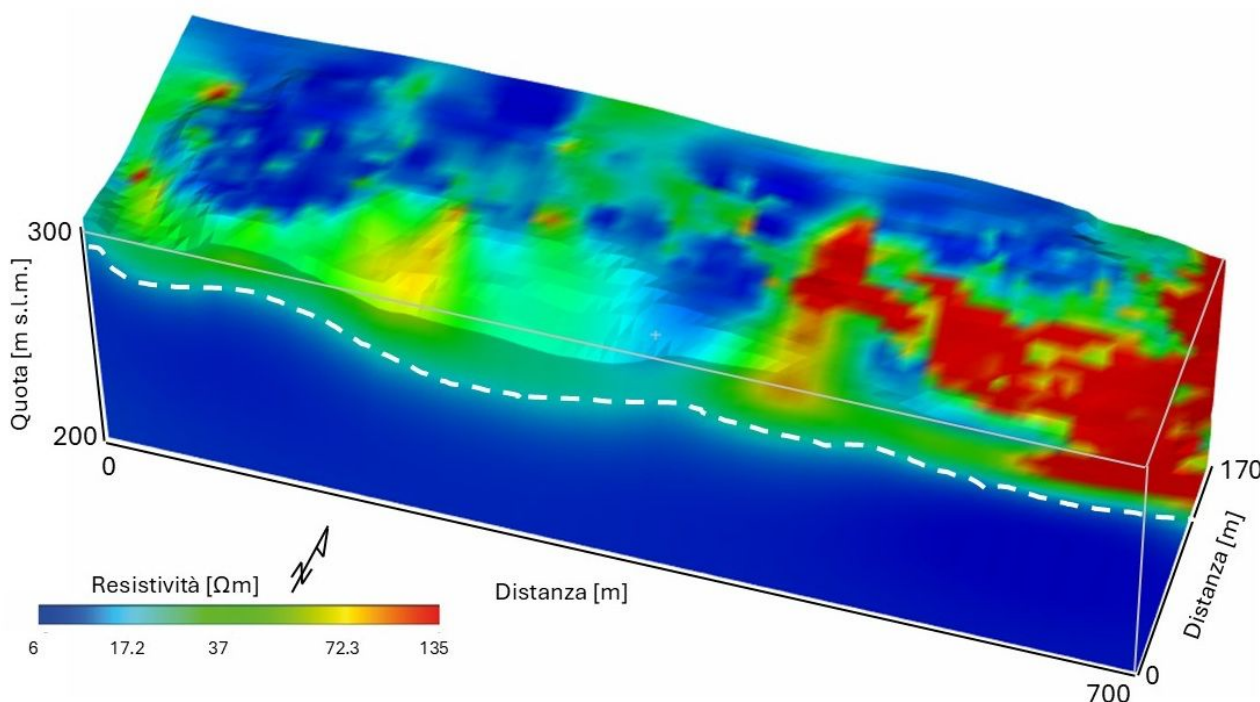


Figura 103 - Volume di resistività, con evidenziato (linea bianca tratteggiata) il presunto contatto tra le argille profonde e le sabbie su cui sorge l'abitato di Niscemi. In trasparenza è sovrapposto il DTM aggiornato alla situazione morfologica attuale.

In Figura 104 e Figura 105 sono riportate rispettivamente alcune sezioni trasversali (orientate sud-nord) e longitudinali (orientate ovest-est) che mettono in luce degli allineamenti concordi con quanto riportato in Rizzo (2004) e mostrano come il tetto del corpo argilloso sia irregolare e presenti degli elementi con resistività inferiore.

Il sovrastante volume con resistività di fondo di 40 Ωm presenta volumi più alto resistivi concentrati nella parte orientale del modello. In Figura 106 sono riportate tre sezioni orizzontali a diversa profondità (300 m, 260 m e 200 m s.l.m.) che confermano, soprattutto in profondità, un allineamento concorde a quanto riportato da Rizzo (2004).

Il modello di resistività ottenuto dalle indagini geoelettriche è stato utilizzato quale vincolo stratigrafico e geometrico per la definizione del modello numerico agli elementi distinti presentato nella Sezione 7.2, contribuendo alla ricostruzione delle superfici di contatto litologico e alla calibrazione della geometria del sottosuolo adottata nelle simulazioni.

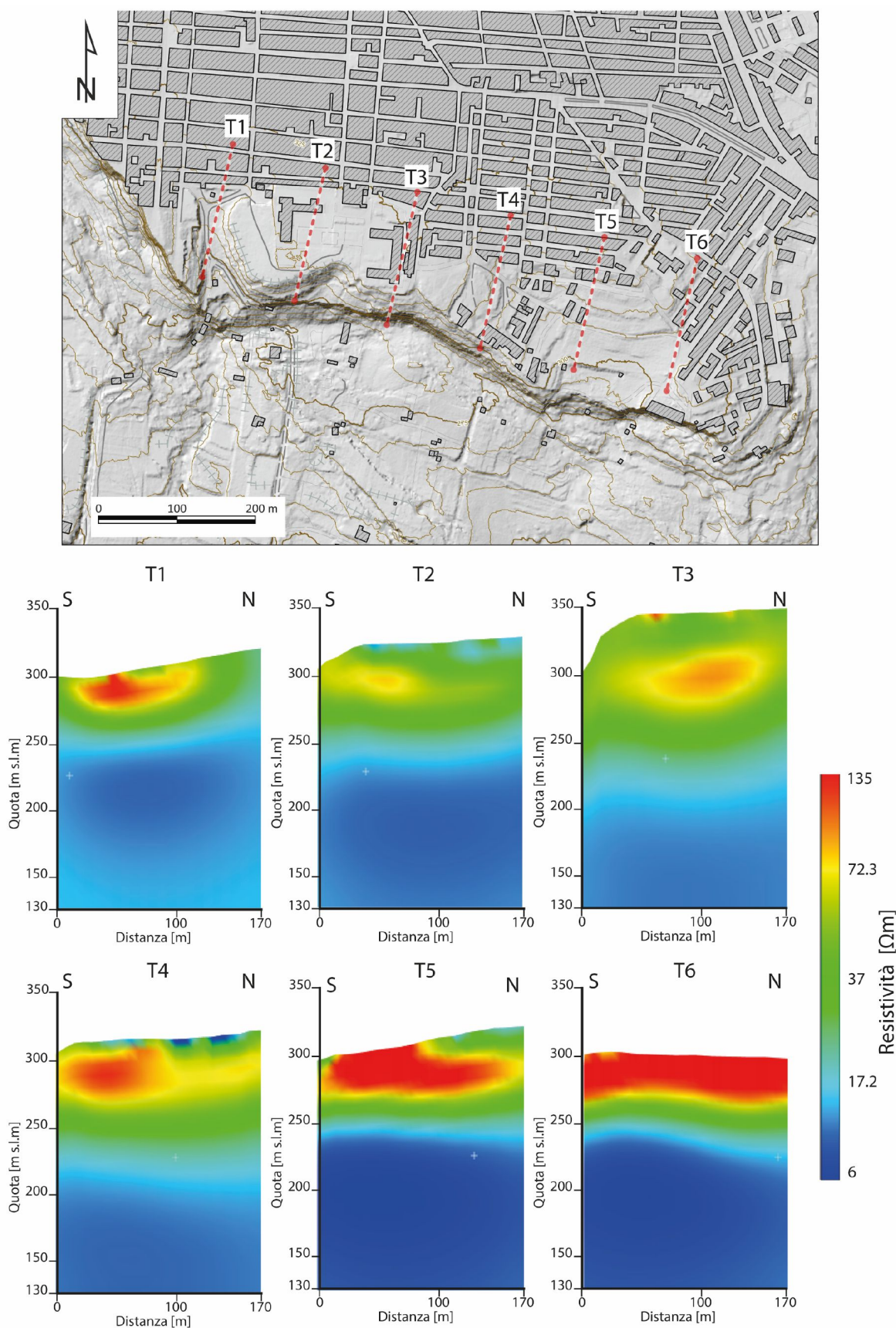


Figura 104 - Sezioni trasversali al corpo di frana (T1-T6) estratte dall'intero volume indagato. La loro localizzazione in pianta è mostrata nel pannello in alto. Tutte e sei le sezioni sono orientate da sud a nord. Colori freddi indicano valori di resistività bassi (alta conducibilità), mentre i colori caldi indicano alti valori di resistività (bassa conducibilità).

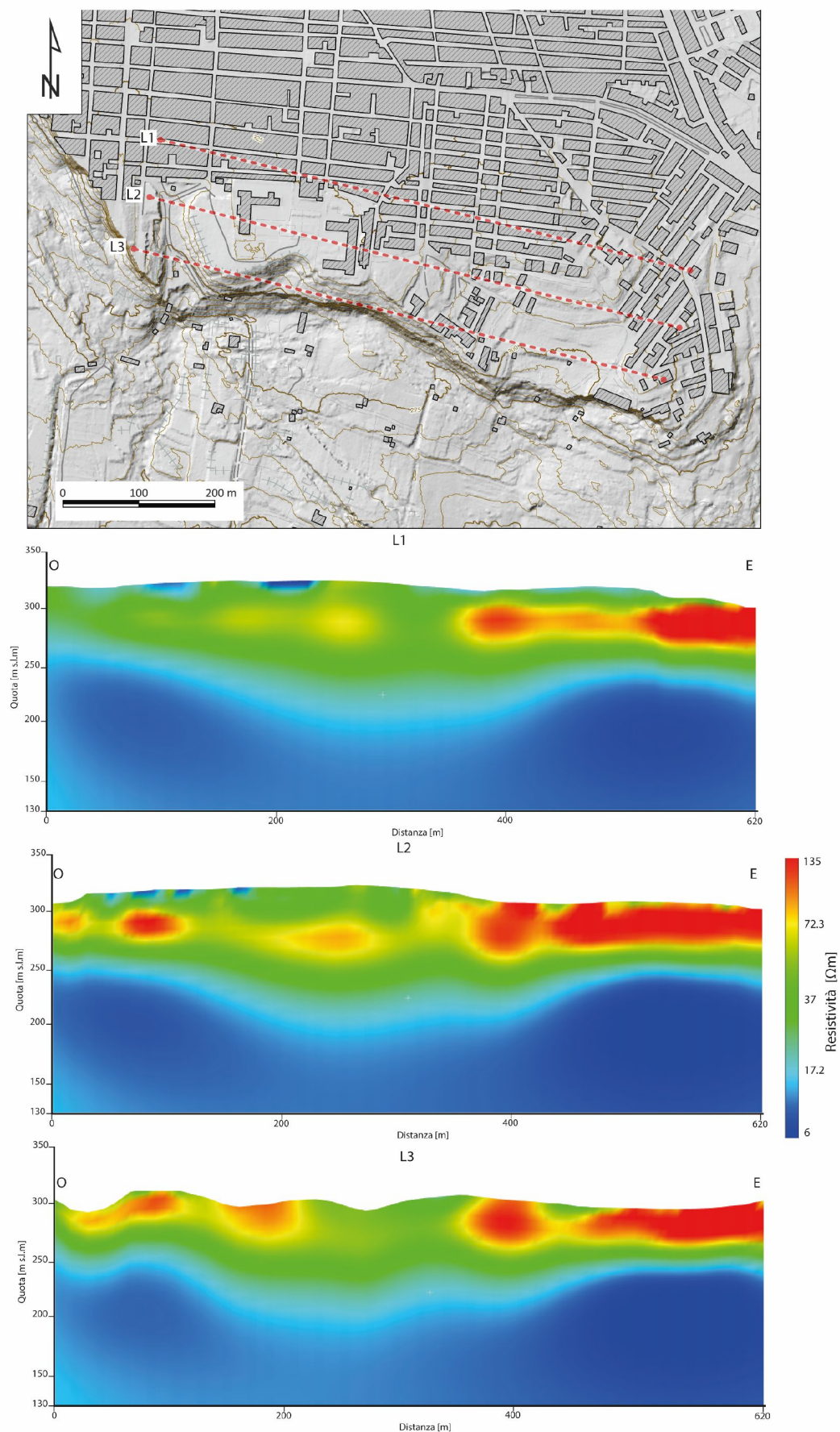


Figura 105 - Sezioni longitudinali al corpo di frana (L1-L6) estratte dall'intero volume indagato. La loro localizzazione in pianta è mostrata nel pannello in alto. Tutte e sei le sezioni sono orientate da sud a nord. Colori freddi indicano valori di resistività bassi (alta conducibilità), mentre i colori caldi indicano alti valori di resistività (bassa conducibilità).

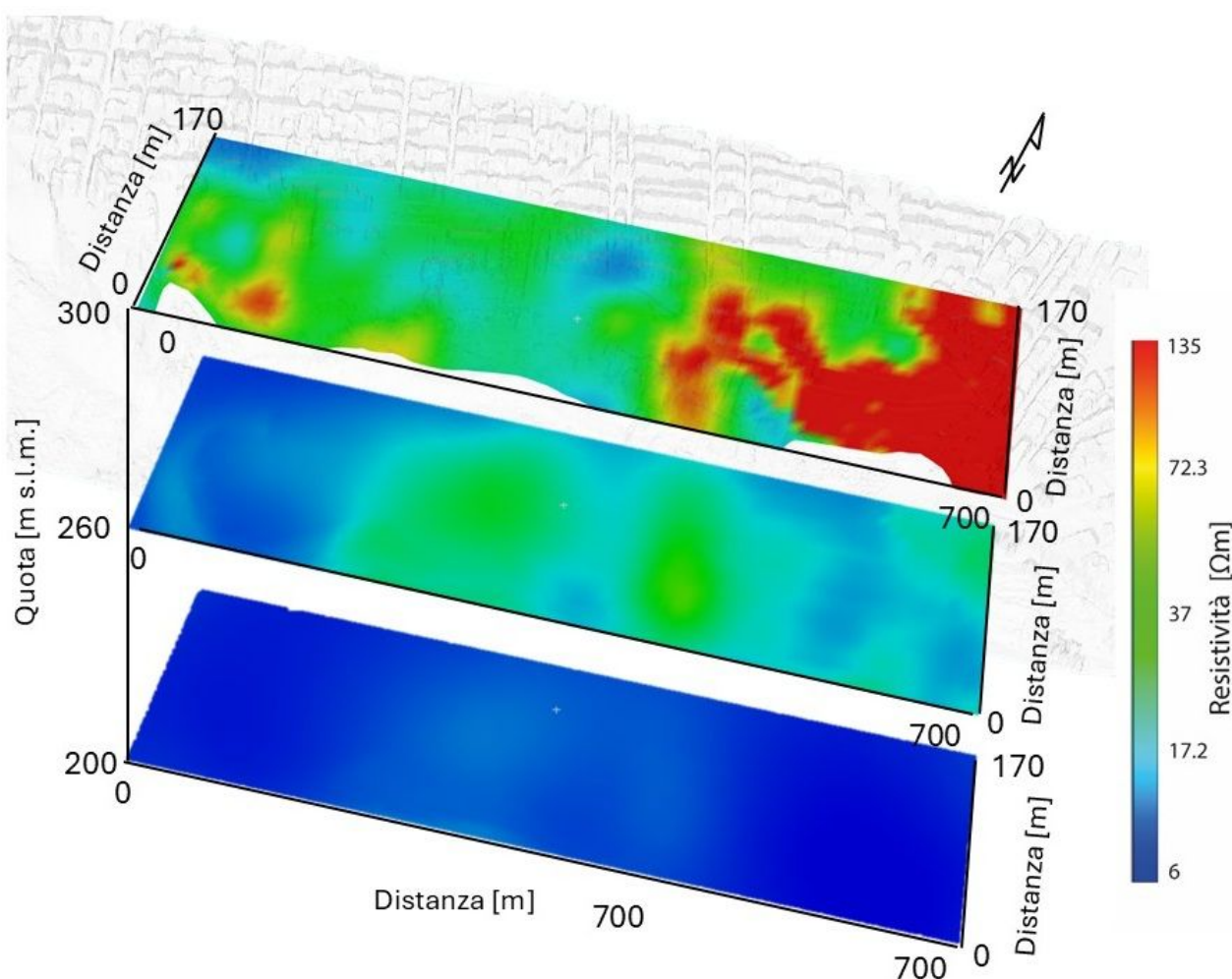


Figura 106 - Sezioni in pianta estratte dall'intero volume indagato a tre diverse profondità (300 m, 260 m e 200 m s.l.m.). Colori freddi indicano valori di resistività bassi (alta conducibilità), mentre i colori caldi indicano alti valori di resistività (bassa conducibilità).

6.2 Indagine sismica ad alta risoluzione in onde P e SH

6.2.1 I metodi di sismica attiva

I metodi di sismica attiva sono tecniche geofisiche non invasive ampiamente adottate per investigare le proprietà elastiche e strutturali del sottosuolo attraverso l'immissione controllata di energia meccanica e la registrazione della risposta del terreno, sotto forma di onde di superficie, riflesse o rifratte. A differenza delle indagini passive, nella sismica attiva il segnale di origine è generato artificialmente, con sorgenti controllate, la cui tipologia dipende dagli obiettivi di indagine, dalla profondità di interesse e dalle caratteristiche del sito.

La risposta del terreno a tale sollecitazione viene registrata da dei sensori, detti geofoni, posti equispaziati sulla superficie. Sui sismogrammi così ottenuti è possibile identificare principalmente tre tipi di onde, le cui modalità di propagazione sono schematizzate in Figura 107. Il *Ground roll* (in grigio in Figura 107), o onda di superficie, si propaga all'interfaccia tra il terreno e la superficie libera. L'energia che penetra all'interno del terreno ad un certo punto incontrerà un'interfaccia con uno strato avente velocità di propagazione più alta e maggiore densità, ovvero maggiore impedenza acustica. A quel punto, a seconda dell'angolo di incidenza, si avrà una riflessione di parte dell'energia verso la superficie (in blu in Figura 107) oppure una rifrazione (in verde in Figura 107).

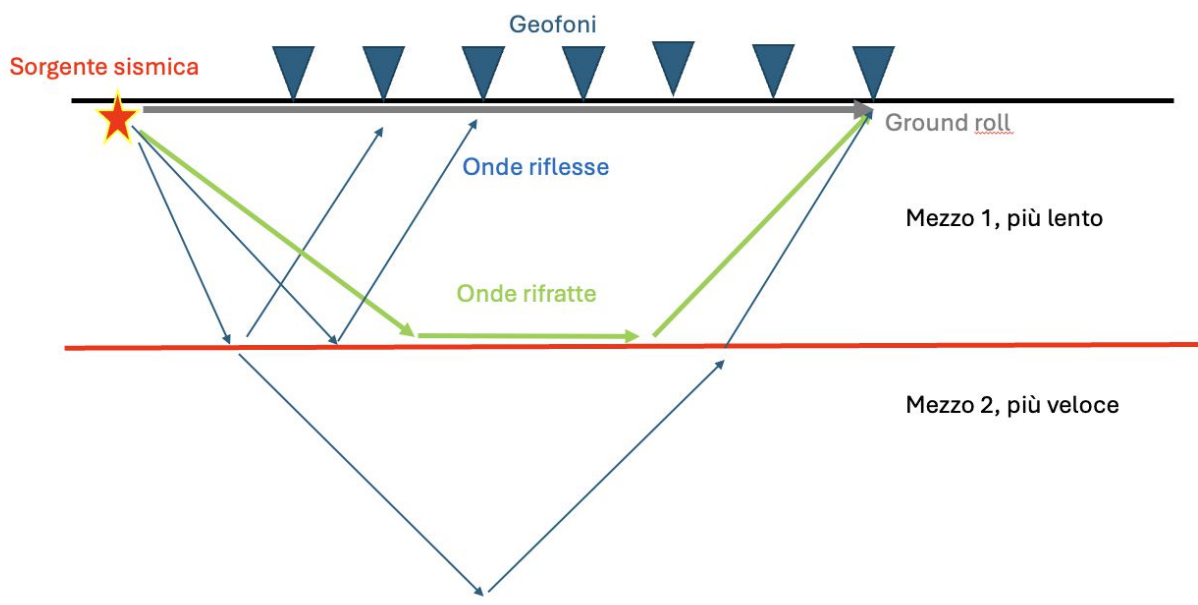


Figura 107 - Schema del metodo sismico, in cui sono evidenziati i principali tipi di onde generate dalla sorgente sismica controllata: in grigio il *Ground roll*, in verde le onde rifratte e in blu le onde riflesse e trasmesse dal mezzo 1 al mezzo 2.

L'elaborazione dei dati sismici richiede una sequenza complessa di passaggi, tra cui la correlazione con il segnale sorgente e l'applicazione di filtri per aumentare il rapporto segnale/rumore. In seguito a questa fase di *preprocessing*, è possibile "separare" i tre tipi di onda qui sopra descritti e procedere ad estrarre informazioni da ciascuna di esse. In particolare, dalle onde rifratte, tramite un processo d'inversione, è possibile ottenere un profilo bidimensionale di velocità sismica.

Dalle onde di superficie, sempre tramite un processo d'inversione, è possibile ottenere un profilo monodimensionale di velocità delle onde di taglio. Infine, dalle onde riflesse è possibile ottenere un'immagine in profondità delle geometrie presenti nel sottosuolo, in cui ai riflettori possono corrispondere contatti litologici, superfici di scorrimento, strati a diverso grado di fratturazione e saturazione in fluidi, ecc. L'elaborazione dei dati sismici risulta particolarmente complessa e richiede un cospicuo investimento in termini di tempo e risorse computazionali per ottenere dei risultati affidabili e quindi geologicamente interpretabili.

6.2.2 Campagna di acquisizione

L'indagine sismica prevedeva l'acquisizione in zona di frana di un profilo ad alta risoluzione in onde P e SH.

Con il supporto dei VVFF del comando di Caltanissetta e della Protezione Civile, in data 6 febbraio è stato effettuato uno *scouting* delle possibili aree dove posizionare la linea. I criteri di scelta sono stati vincolati dall'accessibilità (rischiosità causata dall'evento franoso in atto), dalla lunghezza (le dimensioni del profilo devono essere compatibili con la profondità del target), dalla presenza di eventuali rumori ambientali (traffico, sorgenti di rumore antropiche, ecc.) e dalla mancanza di sottoservizi (dispersione di energia immessa, segnali ghost, ecc.).

Date le condizioni ambientali, delle possibili aree individuare tramite l'analisi delle immagini satellitari *Google Earth*, la scelta è ricaduta sull'area A in Figura 108. Tale area, infatti, si presentava come un falso piano leggermente inclinato a più terrazzi o gradoni, con manto erboso, di facile accesso sia per il personale che per i mezzi di appoggio. La parte più ad est della zona A (50 m), ritenuta ad alta pericolosità, è stata occupata dal personale esclusivamente per il tempo necessario al posizionamento dei sensori.



Figura 108 - Aree visionate durante lo *scouting*. La scelta è ricaduta sull'area A visto che permetteva un maggiore sviluppo del profilo rispetto l'area B [immagine tratta da Google Earth].

Il profilo (Figura 109) ha seguito un orientamento SE-NO. Dapprima sono stati posizionati i geofoni orizzontali (LGT a 14 Hz) orientati ortogonalmente alla linea (SH) e spazati ogni 2 metri. Il profilo sismico, iniziato il più vicino possibile al fronte della frana del 1997 (stazione 101) terminava in via Pantelleria (stazione 226), su asfalto. In totale il profilo era coperto da 126 canali per una lunghezza totale dello stendimento di 250 m. In Figura 110 è riportata una foto della fase di allestimento dello stendimento, ed in particolare del posizionamento del primo geofono della linea.

Tutti i dati sismici sono stati acquisiti con *SUMMIT X One DMT*, un sistema telemetrico multicanale, progettato per rilievi flessibili 2D e 3D. Il sistema include delle unità, dette “*Box*”, che possono essere collegate in qualunque punto di un cavo a due fili grazie alla tecnologia *Snap On*, consentendo una geometria del ricevitore (geofono) completamente libera e svincolata da rigidi vincoli spaziali. All'interno di ciascuna unità *Box* è presente un convertitore A/D a 24 bit con frequenze di campionamento fino a 16 kHz.

I dati digitalizzati sono trasmessi alla *console* centrale, dove è possibile visualizzare ciascun *common shot gather* acquisito per il controllo di qualità in tempo reale nella postazione di registrazione. Dalla stessa *console* centrale è possibile effettuare dei test automatici integrati che aiutano a verificare le prestazioni dell'apparecchiatura e permettono di intervenire immediatamente in caso di malfunzionamenti sulla sensoristica. Il controllo di qualità permette anche di monitorare all'istante le eventuali distorsioni della sorgente dovute a scarso accoppiamento.

Il sistema è utilizzato per rilievi a rifrazione e riflessione, indagini ingegneristiche e geotecniche e monitoraggio microsismico (*noise*) in ambienti difficili. Il sistema telemetrico è composto da cavi che si connettono tra loro tramite *Data Collector*, i quali alimentano anche la linea utilizzando batterie esterne.

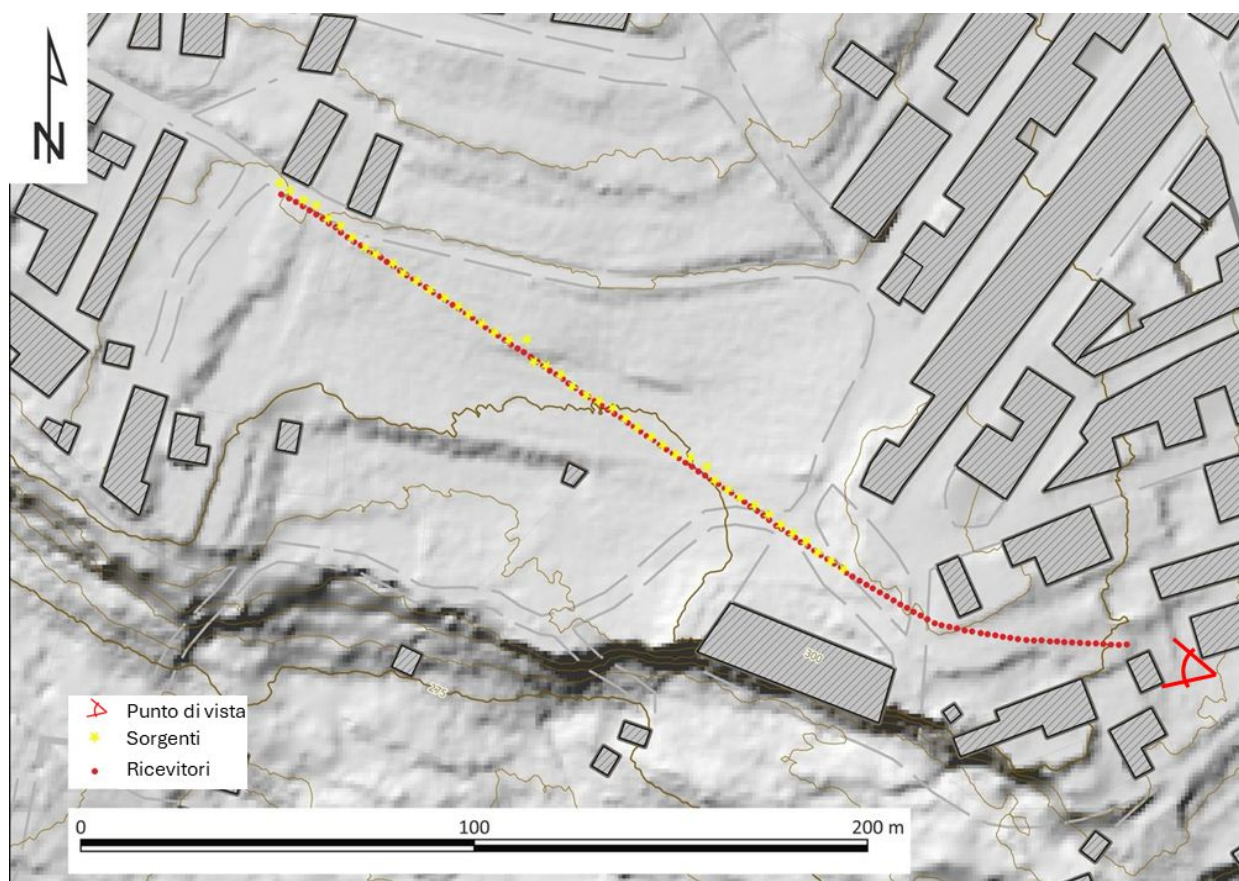


Figura 109 - Posizioni di sorgenti (in giallo) e ricevitori (in rosso) lungo la linea sismica. A SE è inoltre indicato il punto di vista di Figura 110.



Figura 110 – Foto delle fasi di stesura della linea sismica verso NO. Per il punto di vista della foto si faccia riferimento al simbolo in Figura 109.

In Tabella 7 sono riportate le specifiche tecniche del'X One DMT.

Sampling Interval	1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8 ms
Pre-Amplified Gain	0 dB, 20 dB or 40 dB
Gain Accuracy	Typical 1% (tra tutti i canali)
Sample resolution	32 bits
Input Signal range	$\pm 5 \text{ V}$ 10 V peak to peak
Input Impedance	20 kOhm
Instantaneous Dynamic Range	$\geq 132 \text{ dB}$ @ 2 ms sampling interval
Passband	DC (0 Hz) to 0.8 x Nyquist
Digital Anti-Alias Filter	3 dB @ 0.8 x Nyquist
Rejection at Nyquist Frequencies	-120 dB
System Dynamic Range	$\geq 145 \text{ dB}$
Analogue Anti-Alias Filter	7.2 kHz 6 dB/octave
Data Format	SEG 2-Y

Tabella 7 - Specifiche X One DMT.

Per energizzare, è stata impiegata una sorgente vibrazionale elettrodinamica *ELVIS VII* (costruita dalla ditta *GeoSym GmbH*), di cui riportiamo le caratteristiche in Tabella 8. La scelta è stata motivata dalla portabilità e versatilità del sistema *ELVIS*, nonché dalla possibilità di configurarlo per la generazione sia di onde compressionali (P) sia di taglio (S).

Rispetto alle sorgenti impulsive, le sorgenti vibrazionali presentano il vantaggio di trasferire al terreno energia distribuita nel tempo, evitando picchi di ampiezza istantanea che potrebbero determinare criticità operative. Inoltre, le sorgenti vibrazionali garantiscono una maggiore ripetibilità del segnale immesso ad ogni punto scoppio. Di contro, l'utilizzo e la registrazione di *sweep* della durata di diversi secondi comportano una maggiore esposizione all'acquisizione di rumori ambientali o antropici. Lo *sweep* impiegato per tutte le acquisizioni aveva un range di frequenze tra 20 Hz e 240 Hz, per una durata di 16 s. Il tempo di ascolto è stato fissato a 17 s, risultando quindi in un tempo netto di ascolto pari a 1 s.

Produttore	Geosym GmbH
Modello	ELVIS VII (P/S)
Drive system	Cascaded linear motor
Power supply	24 V DC
Peak force	$\sim 1100 \text{ N}$
Frequency range (P)	20 – 350 Hz
Frequency range (S)	20-320 Hz
Source weight	$\sim 35 \text{ kg}$
Total weight	$\sim 130 \text{ kg}$
Trigger signal output voltage	0.1 Vpp
Sweep signal output voltage	20 Vpp

Tabella 8 - Specifiche ELVIS VII.

Le energizzazioni sono state eseguite ogni due stazioni di geofoni (4 m), a partire dalla stazione 225 fino alla 139 (posizioni dispari), più la 226. L'area compresa tra le stazioni 101 e 138 non è stata energizzata poiché interdetta dai VVFF, in quanto ritenuta troppo prossima al bordo della frana. Successivamente all'acquisizione in modalità SH, si è proceduto all'acquisizione del medesimo profilo in modalità P (Figura 1a), installando nel terreno geofoni verticali SM-24 a 10 Hz. L'energizzazione con *ELVIS VII* in modalità compressionale, anche in questo caso ogni due stazioni di geofoni, è stata avviata dalla stazione 139 fino alla 225 (+226). Al termine dell'acquisizione con onde P, la strumentazione *ELVIS* è stata nuovamente configurata in modalità S e, riutilizzando i geofoni orizzontali (ruotati di 90° in senso antiorario), è stato acquisito un ulteriore profilo in modalità SV, non previsto nella proposta di accordo attuativo. L'acquisizione del profilo SV è stata avviata dalla stazione 225 (+226).

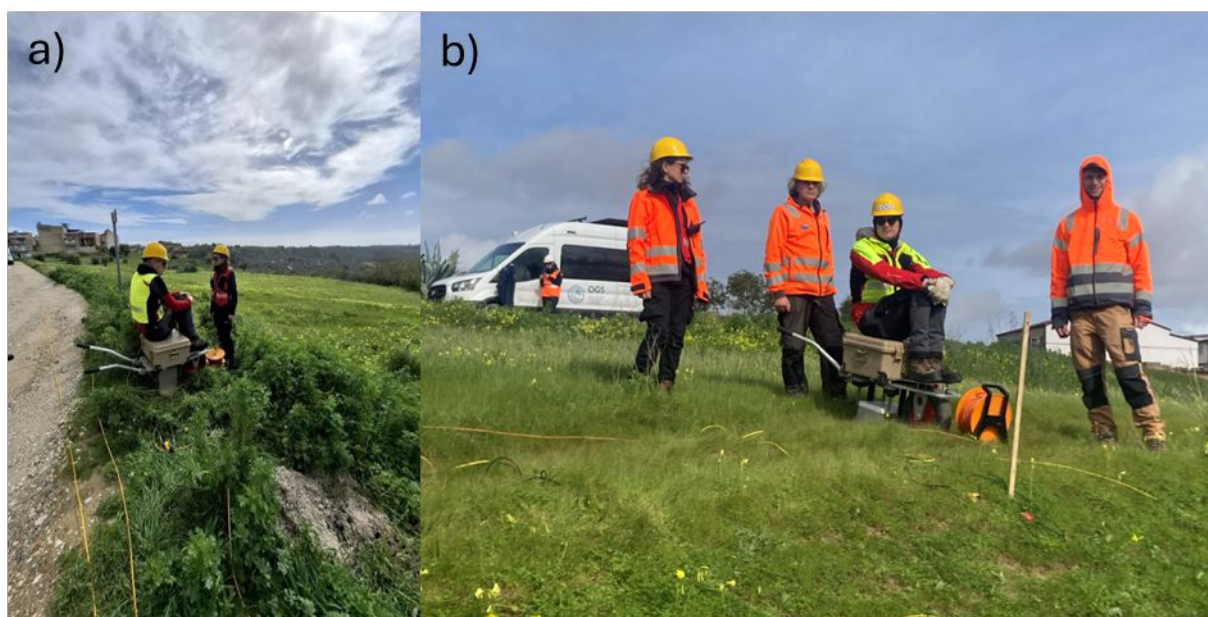


Figura 111 - a) Fase di energizzazione con ELVIS in modalità compressionale. b) Fase di energizzazione con ELVIS in modalità SV.

In Tabella 9 sono riportate le specifiche dei geofoni utilizzati per l'acquisizione delle onde P e S.

	SM-24 10 HZ verticale	LGT-14 HZ orizzontale
Natural Frequency (Hz)	10	14
Open Circuit Damping	0.25	0.2
Damping with Shunt Resistance	0.65	0.6
Intrinsic Voltage Sensitivity (V/m/s)	61.2	28.8
Sensitivity with Shunt Resistance (V/m/s)	32	18.2
Coil Resistance (Ohm)	1004	375
Shunt Resistance (Ohm)	1100	-

Tabella 9 - Specifiche dei geofoni utilizzati.

In tutte le modalità di acquisizione sono state effettuate due energizzazioni per ciascun punto di *shot*. I sismogrammi relativi a ciascun punto di energizzazione sono stati poi sommati, al fine di migliorare il rapporto segnale/rumore.

I parametri e geometria di acquisizione sono riportati in Tabella 10.

Profilo [stazioni]	Inizio energ.	Fine energ.	Shots points	Sweep [Hz]/[S]*	Tempo di registrazione [s]	Sampling interval [ms]
P [101-226]	139	226	88	20-240/16	17	0.5
SH [101-226]	226	139	88	20-240/16	17	0.5
SV [101-226]	226	139	88	20-240/16	17	0.5

Tabella 10 - Specifiche ELVIS VII. *Taper iniziale e finale dello sweep pari a 0.1 s

I dati acquisiti sono stati elaborati separatamente per le onde rifratte (primi arrivi), riflesse e di superficie, per poi essere integrati sia quantitativamente che qualitativamente in sede di interpretazione, specie i profili tomografici e le sezioni a riflessione.

6.2.3 Risultati: tomografia dei primi arrivi

La tomografia dei primi arrivi è una tecnica che consiste nell'inversione dei tempi di arrivo (*traveltime inversion*) delle onde rifratte (primi arrivi). Essa consiste nella ricerca iterativa del modello di velocità $v(x, z)$ tale che i tempi calcolati (o sintetici) T_{calc} riproducano al meglio i tempi osservati T_{obs} . Per calcolare i tempi sintetici, ad ogni iterazione il software effettua il cosiddetto *ray tracing*, ovvero i raggi relativi a ciascun punto di scoppio vengono deviati all'interno di ciascuna cella della griglia di inversione secondo la legge di *Snell*. Il risultato è un profilo di velocità sismiche, ovvero un'immagine di come la velocità sismica è distribuita nel sottosuolo.

Poiché il metodo si basa sulla misurazione accurata dei tempi di arrivo dei fronti d'onda, il primo passo consiste nel *picking* dei primi arrivi sui *common shot gathers*, ovvero l'identificazione, per ciascun geofono, del tempo in cui l'energia coerente del segnale raggiunge i sensori, superando il livello di rumore di fondo (linee rosse in Figura 112). Questo rappresenta la prima energia utile registrata, e costituisce la base dei dati per la fase di inversione.

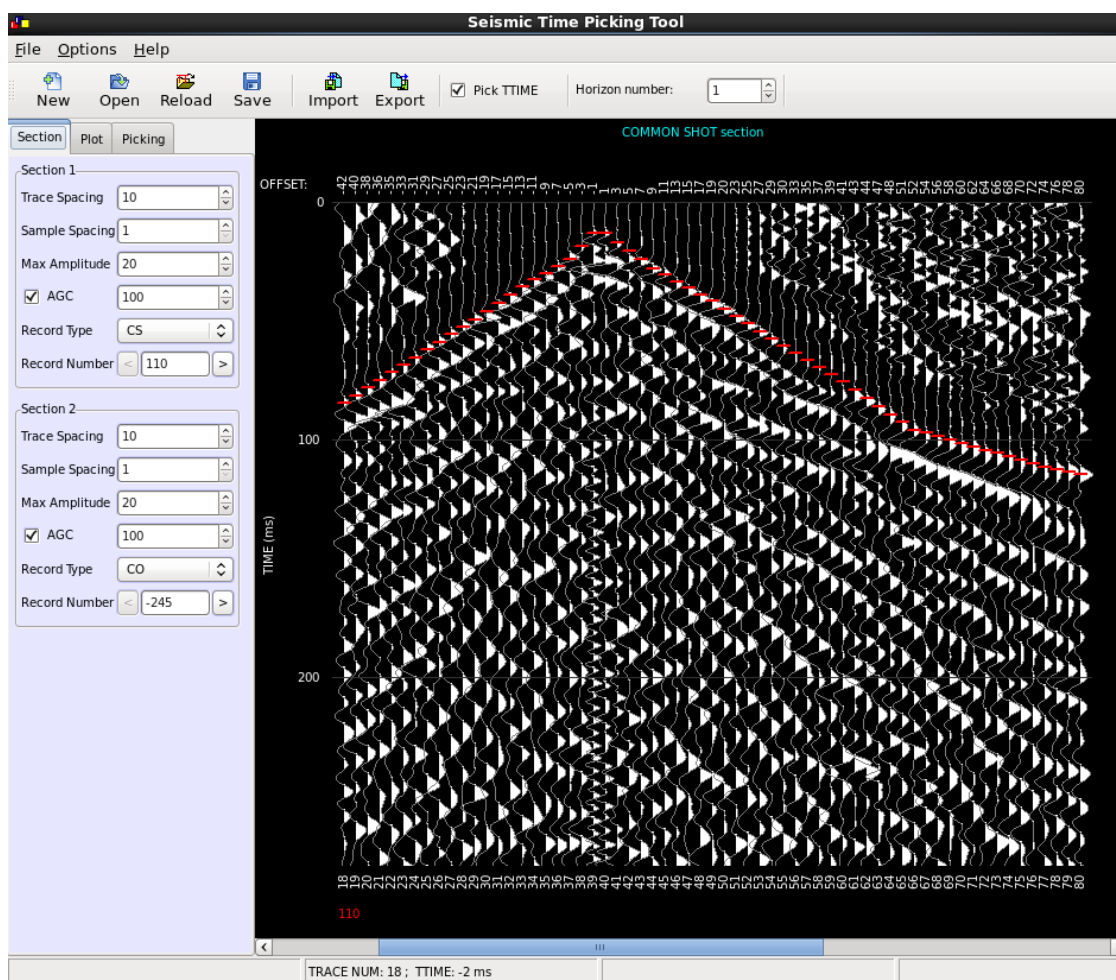


Figura 112 - *Picking* dei primi arrivi delle onde P, all'interno del software *TravelTimePick*.

Successivamente, si impone che la distribuzione di velocità nel modello sia coerente con i tempi di percorrenza osservati e con la geometria dei raggi sismici nel mezzo. Ciò conduce alla formulazione di un sistema di equazioni lineari simultanee, risolto in modo iterativo. A partire da un modello iniziale, il software procede a linearizzare la relazione tra tempi di percorrenza e velocità attorno al modello corrente, risolvere

il sistema lineare risultante, aggiornare il modello, e ripetere questa procedura in modo iterativo fino a convergenza.

La base del modello è definita da una griglia di celle nelle quali vengono assegnati i valori di velocità, entro un range prestabilito di possibili velocità sismiche, nel quale il processo di inversione ricerca il minimo della funzione obiettivo.

La tomografia dei primi arrivi rappresenta una tecnica estremamente efficace per inferire la struttura di velocità del sottosuolo a partire da misure di *traveltime*. Il successo dell'inversione dipende fortemente dall'accuratezza del *picking* dei primi arrivi (a sua volta determinata dalla qualità del dato acquisito) e da una corretta parametrizzazione del modello, che deve garantire un equilibrio tra risoluzione e stabilità numerica.

Per la tomografia dei primi arrivi è stato utilizzato il software Cat3D (Böhm et al., 2014), prodotto all'interno di OGS.

In Figura 113 viene mostrato un profilo di velocità con sovrapposti i raggi così come sono stati calcolati nell'ultima iterazione prima della convergenza. La densità di raggi è un buon indicatore dell'affidabilità del modello; infatti, più raggi intersecano una singola cella, maggiore sarà l'affidabilità del valore di velocità trovato dall'inversione in quella cella.

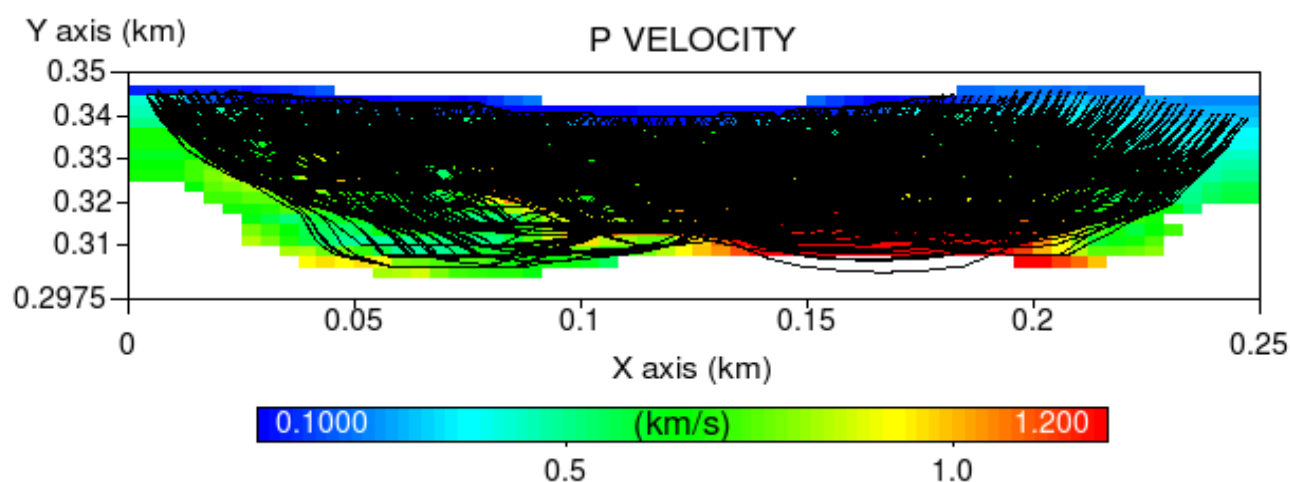
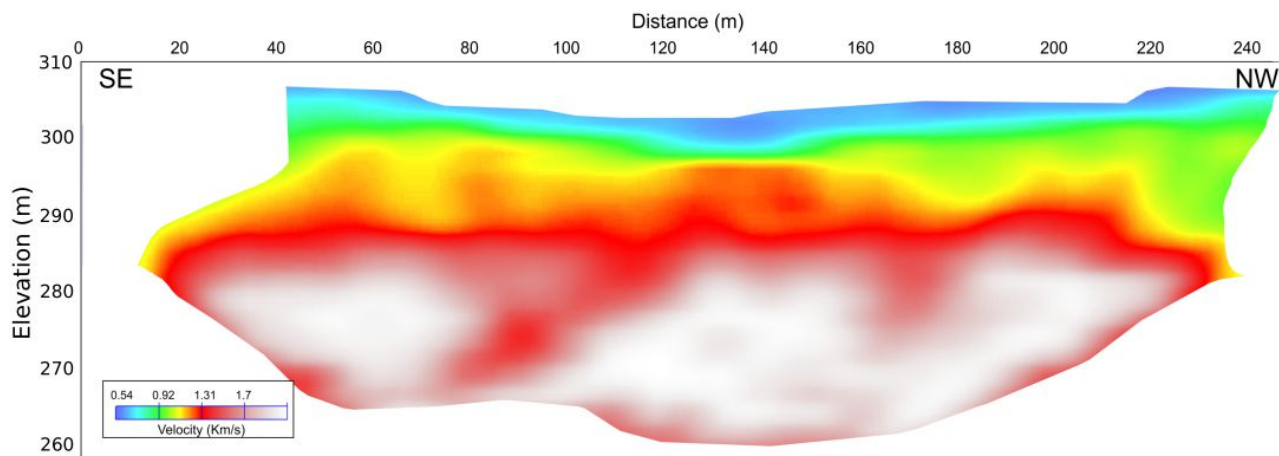


Figura 113 - Plot della densità di raggi, maggiore la densità di raggi, maggiore è l'affidabilità del modello.

Di seguito vengono illustrati i risultati relativi alla tomografia delle onde P ed SH ed il corrispondente profilo del rapporto V_P/V_{SH} .

La tomografia delle onde P (profilo mostrato in Figura 114) fornisce la distribuzione della velocità delle onde di compressione (P), sensibile alle variazioni di densità, litologia e grado di consolidazione dei materiali, oltre che alla presenza di acqua nei pori. È utile per delineare discontinuità stratigrafiche, strutturali e variazioni di compattezza nel sottosuolo. Il campo di velocità P evidenzia una stratificazione verticale ben definita. Nella porzione più superficiale si osservano valori di V_P relativamente bassi, compatibili con sabbie sciolte o poco addensate, verosimilmente caratterizzate da elevata porosità.

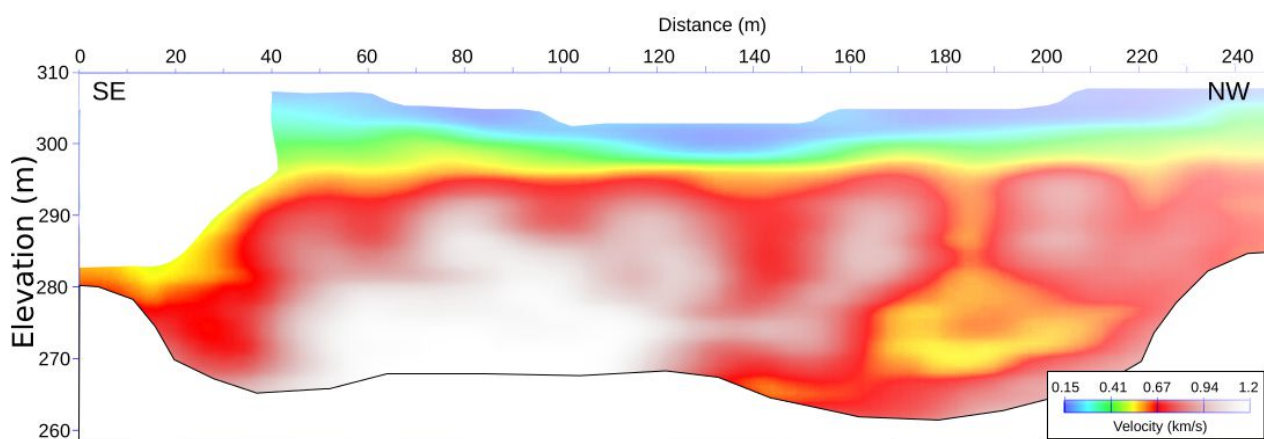
Al di sotto di questo livello, si registra un progressivo incremento delle velocità, interpretabile come passaggio a sabbie maggiormente compattate. Il contrasto più significativo si osserva in corrispondenza del passaggio verso il livello argilloso. In tale intervallo, la variazione di velocità non è solo legata alla compattazione, ma soprattutto alla differente natura litologica e al comportamento elastico del materiale. La tomografia fornisce quindi una buona ricostruzione della zonazione verticale, con risoluzione ottimale nelle prime decine di metri, mentre tende a perdere dettaglio alle maggiori profondità per limiti intrinseci della geometria dei raggi e dell'inversione.



Velocity Field P

Figura 114 - Profilo tomografico di velocità P.

La tomografia delle onde SH (profilo in Figura 115) restituisce la distribuzione della velocità delle onde di taglio polarizzate ortogonalmente alla linea sismica (SH), strettamente legata alla rigidità e alla risposta sismica dei terreni. Questo modello consente di individuare zone a bassa velocità potenzialmente riconducibili a materiali incoerenti o deformabili.



Velocity Field S

Figura 115 - Profilo tomografico di velocità SH.

Il rapporto V_P/V_S (profilo in Figura 116) rappresenta un parametro diagnostico fondamentale per distinguere materiali con differenti gradi di saturazione e coesione. Valori elevati del rapporto indicano generalmente presenza di fluidi o livelli saturi, mentre valori più bassi sono tipici di terreni asciutti o coerenti. L'analisi spaziale di questo rapporto permette quindi di individuare zone potenzialmente interessate dalla falda freatica o da variazioni nel contenuto d'acqua.

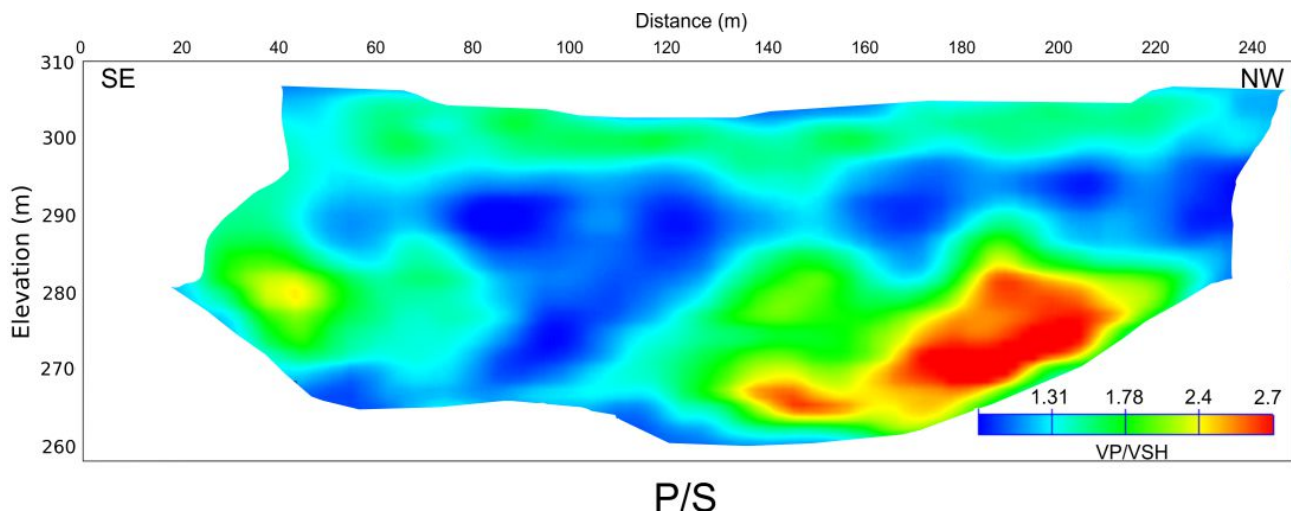


Figura 116 - Profilo del rapporto V_p/V_s .

6.2.4 Risultati: *imaging* a riflessione

In Figura 117 è illustrato il risultato dell'*imaging* del profilo delle onde P riflesse. Si osserva una riflessione caratterizzata da un marcato contrasto di impedenza acustica a circa 30–35 m di profondità dal piano campagna, in coerenza con i profili di velocità ottenuti mediante tomografia, nonché con l'*imaging* delle onde SH e con i risultati dell'inversione delle onde di superficie.

Poiché i *common mid point* (CMP in Figura 118) sono distribuiti a un passo regolare di 1 m, i valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

La limitata estensione dello stendimento ha tuttavia condizionato la possibilità di individuare eventuali ulteriori riflettori a profondità maggiori.

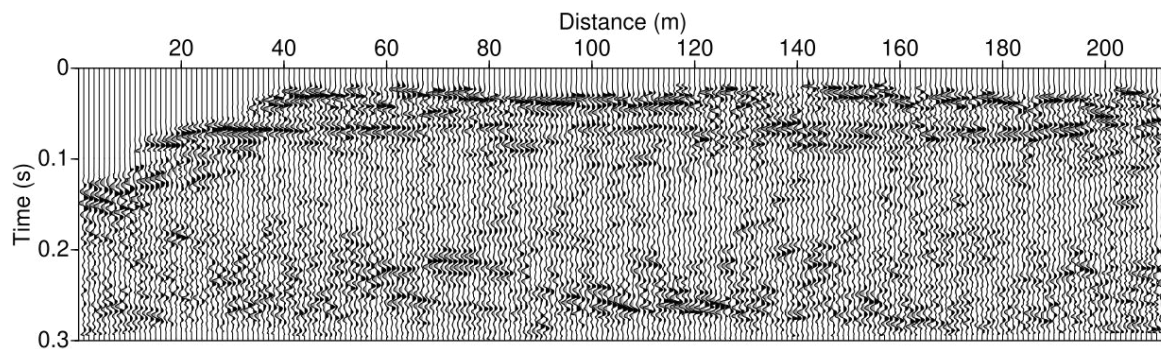


Figura 117 - Profilo onde P (in tempo). I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio.

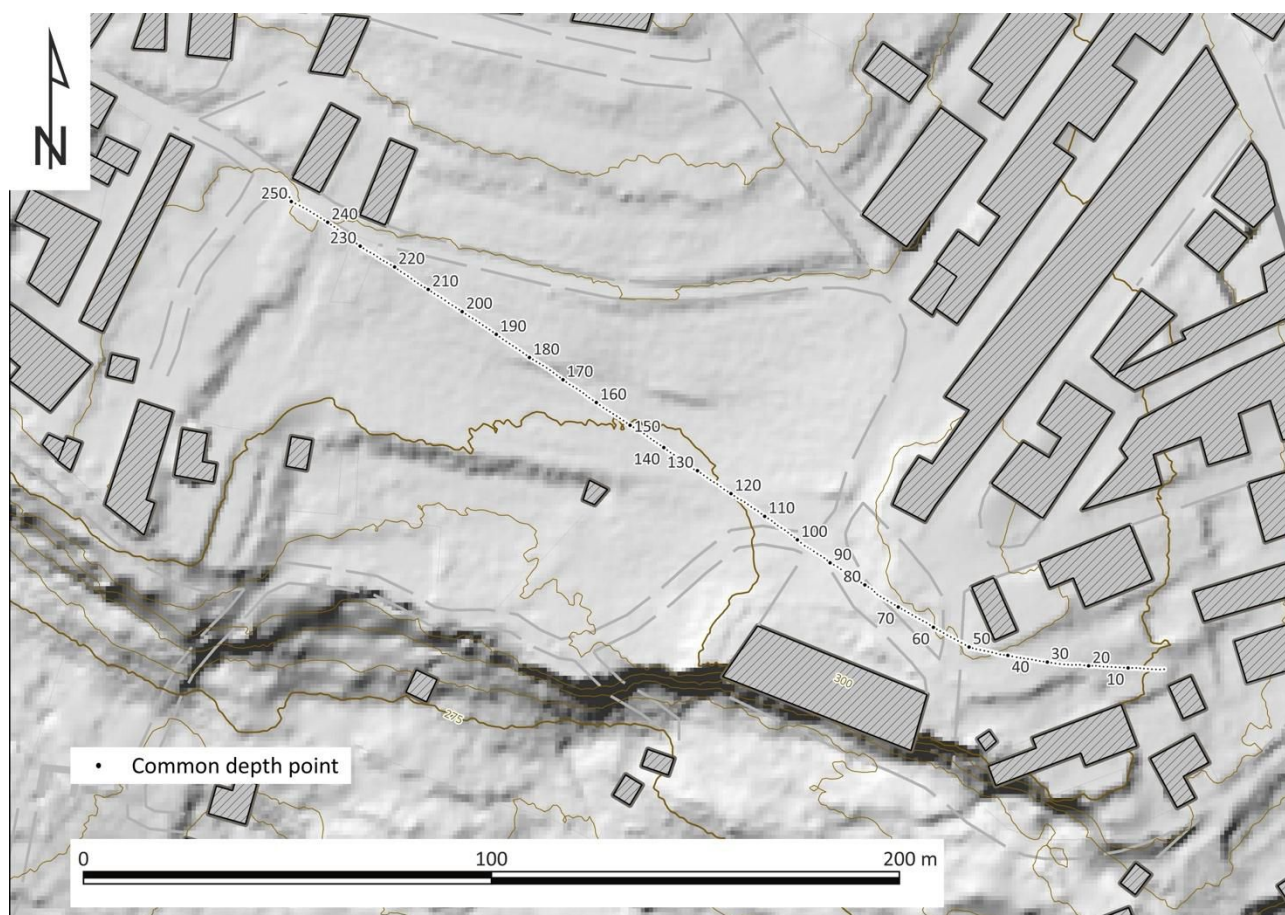


Figura 118 - Posizione dei CMP/CDP lungo la linea sismica.

In Figura 119 è mostrata la sezione a riflessione delle onde P convertita in profondità utilizzando il campo delle velocità ottenuto in fase di *stack*.

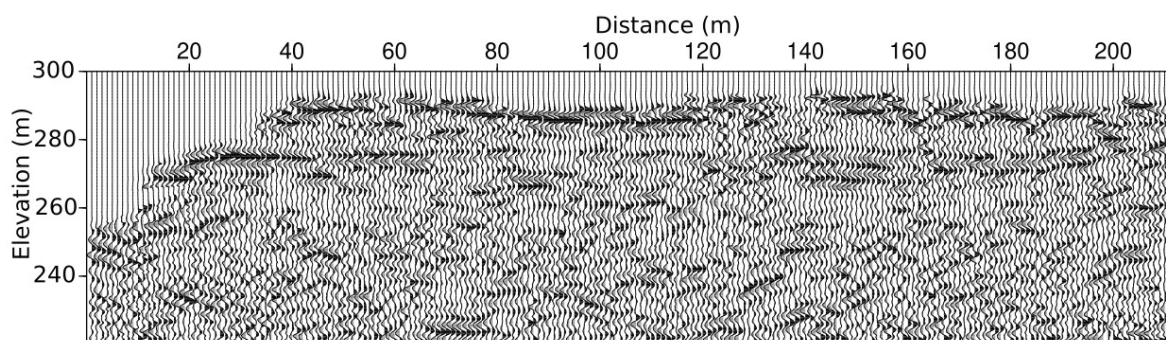


Figura 119 - Sezione a riflessione delle onde P convertita in profondità utilizzando il campo delle velocità ottenuto in fase di *stack*. I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

Al fine di integrare il profilo tomografico con la sezione sismica a riflessione, i due risultati sono stati sovrapposti e sono mostrati in Figura 120. Si può così valutare la coerenza tra i due risultati, ottenuti in modo del tutto indipendente. Questo permette quindi di aumentare il grado di affidabilità dei risultati.

Questo riflettore rappresenta molto probabilmente il contatto litologico tra le sabbie sovrastanti e il livello argilloso-marnoso sottostante. La continuità e la buona definizione del riflettore indicano un contrasto di impedenza acustica marcato, compatibile con la transizione tra materiale granulare relativamente rigido e materiale fine plastico. L'accordo geometrico tra riflessione e tomografia rafforza l'affidabilità dell'interpretazione, anche considerando che la conversione tempo–profondità introduce inevitabilmente un margine di incertezza legato al modello di velocità.

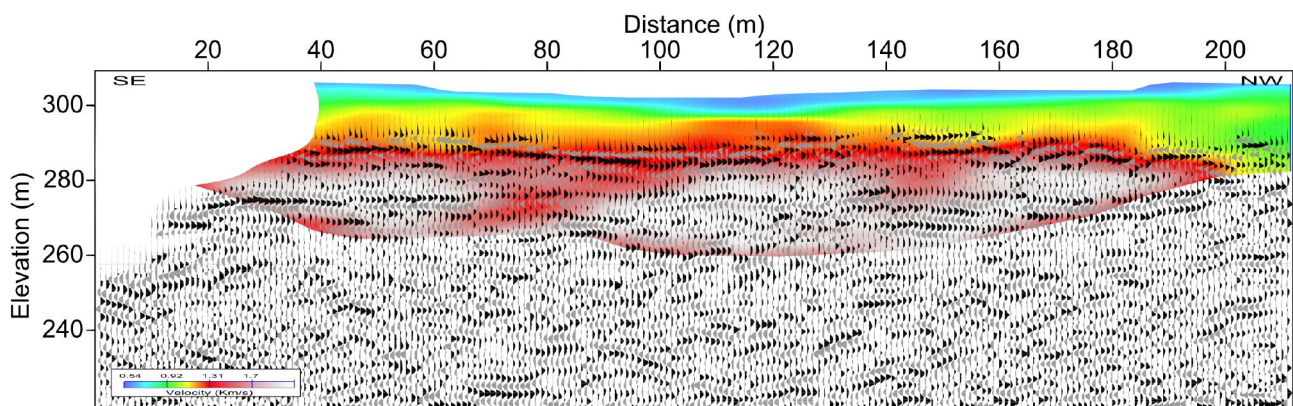


Figura 120 - Sovrapposizione dell'imaging P con il profilo tomografico corrispondente. I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

Dalla sovrapposizione con il profilo di velocità tomografica (Figura 121) si evidenzia la presenza di un primo strato alterato a bassa velocità fino a una profondità di 10-12 m alla cui base sono presenti delle velocità variabili lateralmente da 0,55 Km/s a 1,2 km/s. Alcune di queste variazioni laterali possono essere legate alla presenza di zone più o meno fratturate o più o meno consolidate che vanno a influenzare i valori di velocità delle onde S.

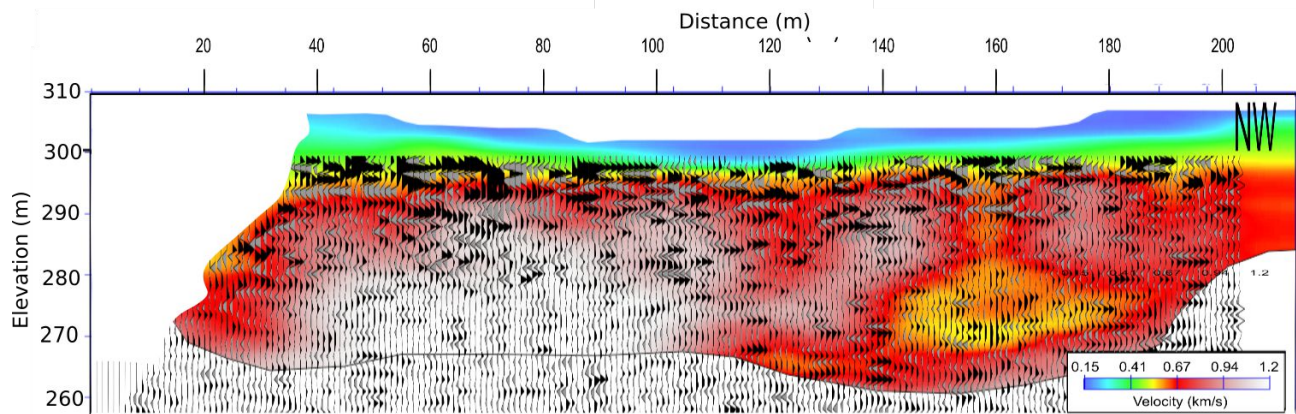


Figura 121 - Sovrapposizione della parte superficiale della linea sismica con il risultato dell'inversione tomografica (onde SH). I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

A profondità superiori, dove si hanno informazioni solo dalla sezione sismica a riflessione appare evidente la presenza di un passaggio litologico, evidenziato nella sezione di una fascia di riflessione abbastanza frastagliata, alla profondità di circa 35-40 metri. In Figura 122 e in Figura 123 sono riportate rispettivamente la sezione *stack* e la stessa sezione convertita in profondità utilizzando il campo di velocità di *stack*.

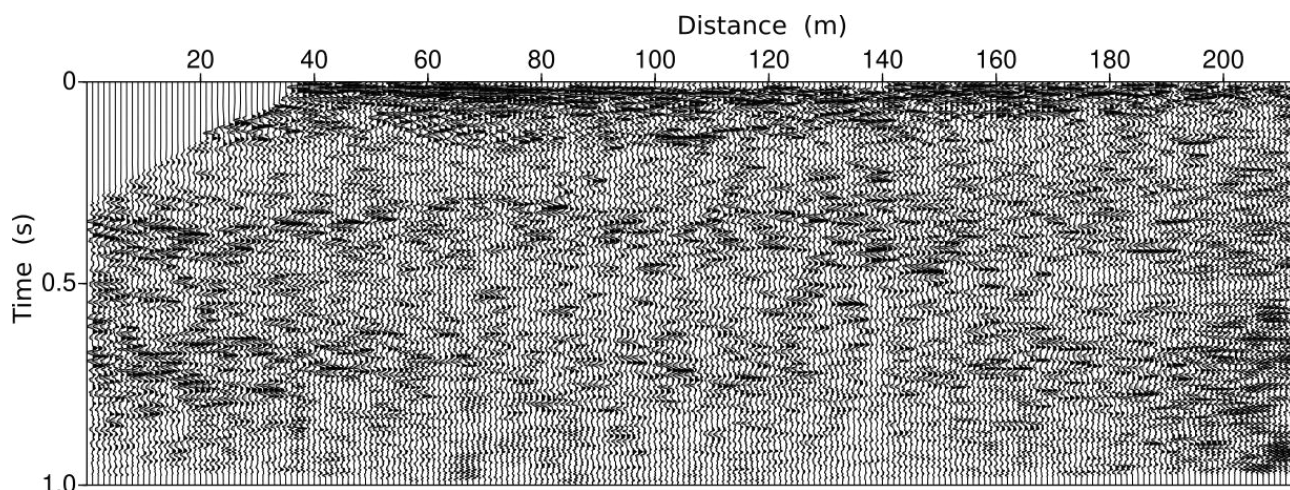


Figura 122 - Sezione Stack SH nel dominio dei tempi. I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

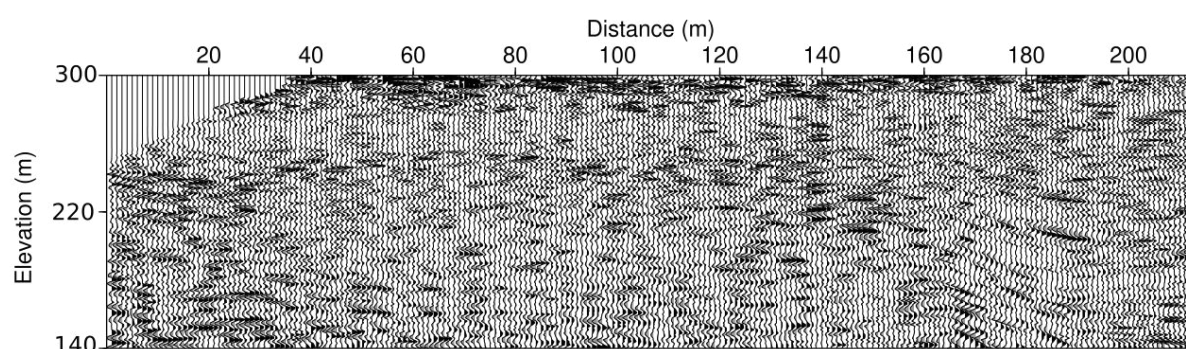


Figura 123 - Sezione Stack SH convertita in profondità. I valori riportati sull'asse delle ascisse rappresentano sia la distanza reale dall'inizio della linea sia la posizione dei CMP.

6.2.5 Risultati: onde di superficie

Le onde di superficie sono state trattate con il metodo di analisi multicanale noto come *MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves)*. Questo metodo si basa sul carattere dispersivo delle onde di superficie, ovvero sulle diverse velocità di propagazione a frequenze diverse. L'inversione delle onde di *Rayleigh* si basa sull'analisi della loro dispersione per ricostruire il profilo verticale delle proprietà elastiche del sottosuolo, in particolare della velocità delle onde di taglio (V_s).

Le onde di *Rayleigh* sono onde superficiali a moto ellittico retrogrado nel piano verticale (P–SV) e la loro propagazione dipende principalmente dalla V_s , pur risultando debolmente influenzata anche da V_p e dal coefficiente di *Poisson*.

Nel caso specifico, è stato preso in considerazione il sismogramma relativo al punto di scoppio 139, selezionando i ricevitori da 143 a 226 (geometria illustrata in Figura 124). Il profilo monodimensionale risultante è quindi una sorta di media delle velocità di onde di taglio nella sezione compresa tra i ricevitori sopra menzionati.

L'elaborazione è stata effettuata utilizzando la componente verticale con geofoni aventi frequenza naturale di 10 Hz, lungo il medesimo stendimento precedentemente descritto. L'inversione è stata condotta mediante approccio *Full Velocity Spectrum (FVS)*, senza effettuare un *picking* manuale delle curve di dispersione. In questo metodo, l'intero spettro frequenza–velocità viene confrontato con lo spettro teorico calcolato per un modello stratificato del sottosuolo.

In Figura 125 viene mostrato il sismogramma (sinistra) e lo spettro di velocità (destra). Il processo iterativo modifica spessori e valori di V_s fino a minimizzare la differenza globale tra spettro osservato e spettro sintetico, riducendo la soggettività legata all'interpretazione manuale delle sole curve modali.

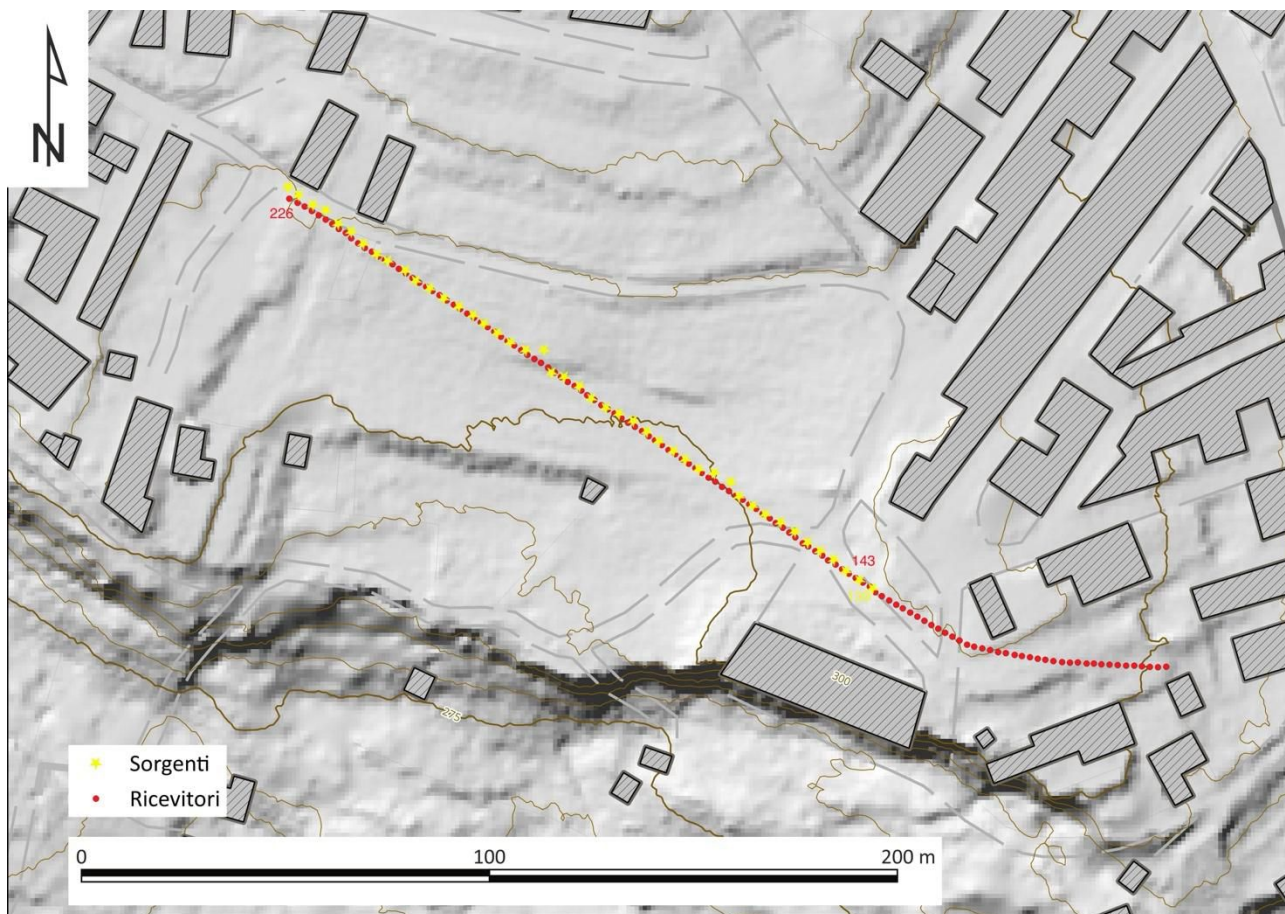


Figura 124 - Geometria di acquisizione con indicati in giallo i punti di energizzazione ed i geofoni considerati nel calcolo della MASW.

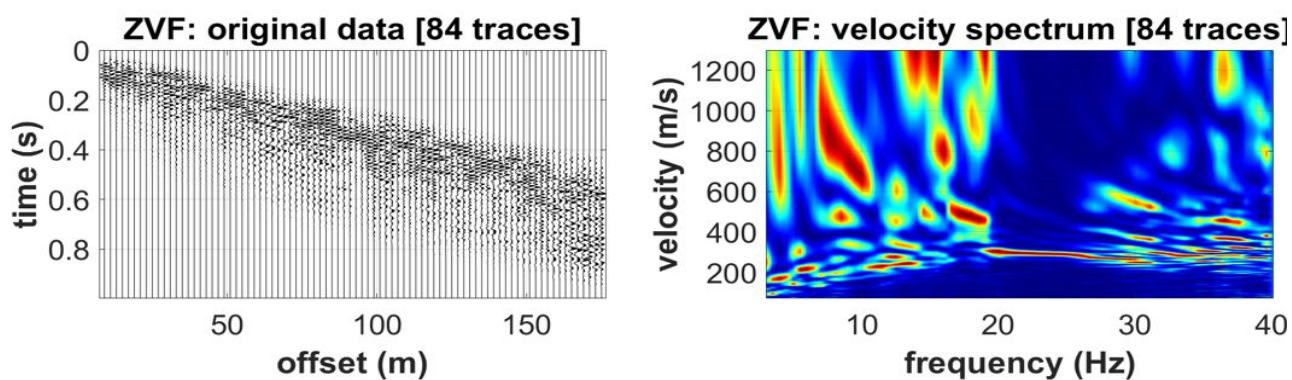


Figura 125 - Sismogramma (sinistra) e spettro di velocità (destra).

Questo approccio consente di sfruttare l'intera informazione contenuta nei dati, inclusi eventuali contributi modali multipli, migliorando la stabilità dell'inversione rispetto ai metodi basati esclusivamente sul modo fondamentale. L'attendibilità del modello dipende dal contenuto in frequenza registrato e dalla lunghezza dello stendimento.

Con geofoni da 10 Hz, è limitata rispetto a geofoni a frequenza naturale inferiore. Poiché la profondità di indagine delle onde superficiali è proporzionale alla lunghezza d'onda (circa metà della lunghezza d'onda dominante), la frequenza minima effettivamente registrabile controlla la profondità massima realmente vincolata dal dato sperimentale.

La lunghezza dello stendimento influisce direttamente sulla capacità di campionare lunghezze d'onda elevate: uno stendimento più lungo consente di vincolare meglio gli strati profondi, mentre una linea più

corta aumenta l'incertezza alle basse frequenze e, conseguentemente, nelle porzioni più profonde del modello.

In sintesi, l'inversione FVS delle onde di *Rayleigh* con geofoni da 10 Hz fornisce una stima robusta del profilo di V_s e del parametro V_{seq} nei primi metri o decine di metri, mentre le porzioni più profonde del modello risultano progressivamente meno vincolate dal contenuto in bassa frequenza dei dati acquisiti e devono pertanto essere interpretate con maggiore cautela.

Eventuali stime di V_p o del coefficiente di *Poisson* devono inoltre essere considerate indicative, in quanto non direttamente determinate in modo indipendente dai dati di dispersione.

In questo tipo di approccio MASW viene realmente invertita la curva di dispersione delle onde di *Rayleigh*, che è fortemente sensibile alla velocità delle onde di taglio V_s , mentre la sensibilità a V_p e alla densità è secondaria.

Di conseguenza, il modello ottenuto è affidabile soprattutto per il profilo di V_s . I valori di V_p e del coefficiente di *Poisson* riportati nel software sono infatti indicati come "*approximate values*": questo significa che non sono stati direttamente invertiti, ma derivano da ipotesi o relazioni empiriche a partire da V_s . Con la sola componente verticale, quindi, non si effettua una vera inversione delle onde P, ma una stima indiretta di V_p basata su assunzioni sul rapporto di *Poisson*.

Il profilo V_s (Figura 126) mostra una forte eterogeneità nei primi metri e un progressivo incremento della rigidità in profondità, con un V_{s30} intorno a 250 m/s, compatibile con una categoria di sottosuolo C secondo le NTC 2018.

Tuttavia, le elevate deviazioni standard negli strati più profondi indicano una minore sensibilità della curva di dispersione oltre una certa profondità, e quindi una maggiore incertezza del modello in quelle zone. In sintesi, l'inversione della componente verticale delle onde di *Rayleigh* fornisce una stima robusta di V_s , ma non consente una determinazione affidabile e indipendente di V_p .

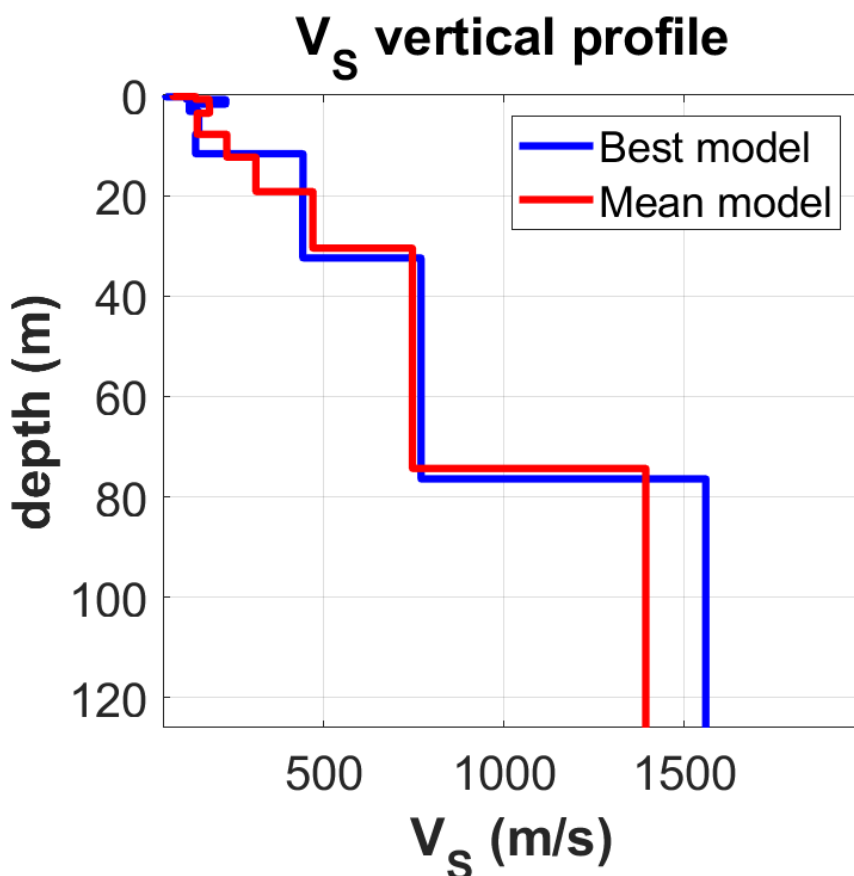


Figura 126 - Risultato dell'analisi delle onde di superficie con metodo MASW.

L'inversione delle onde di *Love* si basa sull'analisi della loro dispersione per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (V_s) nel sottosuolo. Le onde di *Love* sono onde superficiali a polarizzazione orizzontale (SH) e si propagano in mezzi stratificati in funzione esclusiva delle proprietà di taglio dei materiali attraversati. Proprio perché dipendono unicamente dal comportamento SH, esse risultano particolarmente adatte alla determinazione diretta della V_s , senza essere influenzate dai parametri compressivi (V_p e coefficiente di *Poisson*).

Nel caso specifico sono state utilizzate le acquisizioni con geofoni con frequenza naturale di 14 Hz, orientati trasversalmente alla linea sismica, così da registrare la componente orizzontale perpendicolare alla direzione di propagazione, dove l'energia delle onde di *Love* è predominante.

I segnali registrati nel dominio tempo-spazio sono stati quindi trasformati nel dominio frequenza-velocità per ottenere lo spettro di dispersione (Figura 127) ed il processo di inversione è avvenuto come per l'analisi delle onde di *Rayleigh*. Al termine del processo è stato ottenuto un profilo verticale di V_s compatibile con i dati registrati, insieme a una stima dell'incertezza e alla valutazione della profondità effettivamente investigabile. L'attendibilità del risultato è strettamente legata al contenuto in frequenza effettivamente registrato e alla geometria dello stendimento, così come descritto in precedenza.

Nel caso di geofoni con frequenza naturale di 14 Hz, la risposta strumentale è ottimizzata per frequenze medio-alte, mentre risulta meno sensibile alle basse frequenze rispetto a geofoni a frequenza naturale inferiore. Ciò implica una minore capacità di registrare in modo efficace energia a frequenze molto basse, che sono quelle associate alle lunghezze d'onda maggiori e quindi agli strati più profondi.

In sintesi, l'inversione delle onde di *Love* fornisce una stima diretta e fisicamente ben vincolata del profilo di V_s e del parametro V_{s30} (Figura 128); tuttavia, con geofoni da 14 Hz e una configurazione tipica di indagine superficiale, il modello risulta generalmente molto affidabile nei primi metri-decine di metri (in particolare per la stima del V_{s30}), mentre le porzioni più profonde devono essere interpretate con maggiore cautela, in quanto meno direttamente vincolate dal contenuto in bassa frequenza dei dati acquisiti.

Le onde di *Love* sono polarizzate orizzontalmente e dipendono esclusivamente dalla propagazione delle onde SH in un mezzo stratificato. A differenza delle onde di *Rayleigh*, non coinvolgono il moto P-SV e non sono influenzate direttamente da V_p o dal coefficiente di *Poisson*. La curva di dispersione delle onde di *Love* è quindi sensibile quasi esclusivamente al profilo di V_s , rendendo l'inversione concettualmente più "pulita" dal punto di vista parametrico.

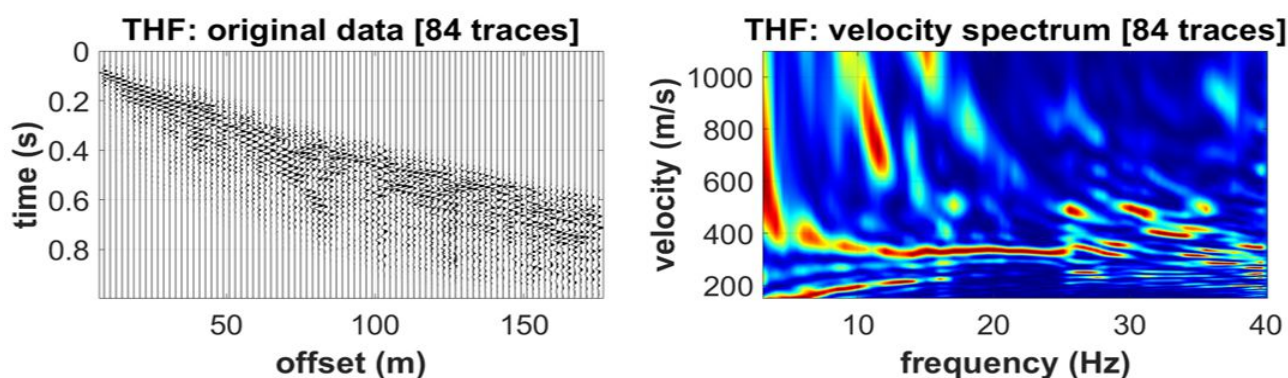


Figura 127 - Sismogramma (sinistra) e spettro di velocità di fase relativo alle onde di *LOVE* (componente SH).

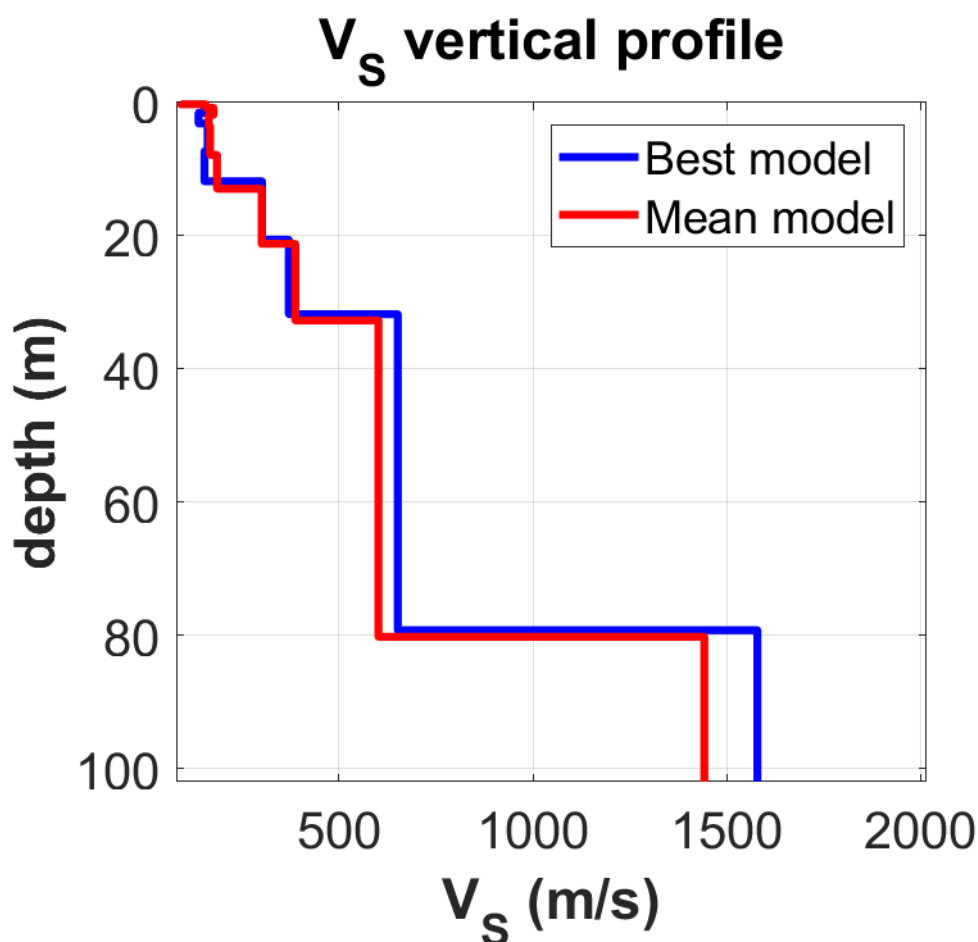


Figura 128 - Risultato dell'inversione delle onde di Love.

In questo caso, il modello migliore mostra valori di V_S nei primi metri compresi tra circa 100 m/s e 170 m/s, con un progressivo aumento della rigidità in profondità. Anche qui si osservano leggere inversioni locali di velocità nei primi strati, probabilmente legate al *trade-off* spessore/velocità tipico delle inversioni *multilayer*. Il *trade-off* spessore–velocità è la difficoltà intrinseca nel distinguere se una certa risposta sismica sia dovuta a uno strato più spesso o a una diversa velocità, perché entrambe le combinazioni possono spiegare ugualmente bene i dati osservati. La V_{S30} risulta compresa tra 228 m/s e 239 m/s (rispettivamente *best model* e *mean model*), valore coerente con una categoria di sottosuolo C secondo le NTC 2018.

Un aspetto importante è che, a differenza del caso *Rayleigh*, qui non compaiono stime di V_P o di *Poisson*: questo è coerente con la fisica del problema. L'inversione delle onde di Love non consente in alcun modo di stimare V_P , perché le onde SH non “sentono” il comportamento compressivo del mezzo. Di conseguenza, il modello ottenuto rappresenta direttamente un profilo di V_S , senza necessità di assunzioni su ν . Le deviazioni standard crescenti in profondità indicano, anche in questo caso, una riduzione della sensibilità oltre la profondità realmente investigabile (circa 30–40 m per il calcolo di V_{S30} , mentre il modello si estende molto più in profondità).

Questo suggerisce che gli strati più profondi sono meno vincolati dai dati di dispersione. In sintesi, l'inversione della componente trasversale delle onde di Love fornisce una stima di V_S ancora più direttamente vincolata rispetto alle onde di *Rayleigh*, perché elimina l'influenza di V_P e del coefficiente di *Poisson*. Tuttavia, proprio per questa ragione, non permette alcuna informazione sulle onde P o sui parametri elastici completi del mezzo.

Il confronto tra i modelli di velocità ottenuti dall'inversione delle onde di *Rayleigh* (componente verticale) e delle onde di Love (componente trasversale, SH), acquisiti nello stesso sito, evidenzia una sostanziale coerenza del quadro geofisico generale. Entrambi i modelli mostrano terreni superficiali a bassa velocità, con

progressivo incremento della rigidità in profondità e presenza di un substrato rigido oltre alcune decine di metri.

I valori di V_{S30} risultano compresi tra 228 m/s e 261 m/s nei due casi, conducendo in modo concorde alla classificazione del sito in categoria C secondo le NTC 2018. Le principali differenze si osservano nei primi metri: il modello derivato dalle onde di *Rayleigh* presenta maggiore variabilità e inversioni locali di velocità, mentre il modello ottenuto dalle onde di *Love* risulta più regolare e leggermente più elevato nei livelli superficiali.

Tale differenza è attribuibile alla diversa sensibilità fisica delle due tipologie d'onda: le onde di *Rayleigh* sono influenzate, seppur in misura secondaria, anche dai parametri elastici compressivi (V_P e coefficiente di Poisson), mentre le onde di *Love* dipendono esclusivamente dal comportamento SH, fornendo una stima più diretta della V_S .

In profondità, le discrepanze tra i due modelli aumentano ma risultano associate a una maggiore incertezza d'inversione, come evidenziato dall'incremento delle deviazioni standard; pertanto, tali differenze non possono essere considerate significativamente vincolate dai dati. Nel complesso, i due modelli sono compatibili e descrivono in modo coerente la struttura sismica del sito, con differenze riconducibili principalmente alla diversa sensibilità fisica delle onde considerate e al normale grado di non unicità dell'inversione.

6.3 Integrazione indagine geoelettrica e sismica

L'integrazione delle indagini geoelettriche, sismiche a rifrazione (tomografia dei primi arrivi P e SH), a riflessione (onde P e SH) e delle analisi delle onde di superficie (*Rayleigh* e *Love*) ha permesso di ricostruire, con i limiti intrinseci di errore, in modo coerente e complementare la struttura elettro- e sismo-stratigrafica del sottosuolo.

Il modello 3D di resistività mostra chiaramente la presenza di un importante volume basso resistivo profondo che si sviluppa generalmente a partire da 50 m di profondità, descrivibile come il pacco di argille noto dalla letteratura dell'area e confermato dai sondaggi presenti nell'area. Il livello di argille individuato nel sondaggio è ascrivibile ad argille limoso sabbiose in condizioni sature con valori fino a 50 Ω m (colore verde in Figura 129), mentre le argille umide hanno valori fino a 20 Ω m (colore blu in Figura 129). Questo è in accordo con il lavoro di Rizzo (2004) che mostra come il tetto del corpo argilloso sia irregolare e presenti degli elementi con resistività inferiore.

La tomografia dei primi arrivi ha evidenziato una chiara zonazione verticale delle velocità, con uno strato superficiale a bassa V_P e V_S (materiali sabbiosi sciolti o poco addensati), seguito da un progressivo incremento delle velocità interpretabile come aumento di compattazione, fino a un marcato contrasto a circa 35–40 m di profondità, attribuibile al passaggio verso un livello argilloso-marnoso più rigido. La buona densità di raggi nelle porzioni superficiali garantisce un'elevata affidabilità del modello nelle prime decine di metri, mentre la risoluzione decresce in profondità per limiti geometrici dell'inversione.

Le sezioni sismiche a riflessione confermano la presenza di un riflettore continuo e ben definito alla stessa profondità, indicativo di un forte contrasto di impedenza acustica coerente con il contatto litologico sabbie/argille. La sovrapposizione tra tomografia e riflessione mostra una significativa coerenza geometrica, rafforzando l'interpretazione e aumentando l'affidabilità complessiva del modello.

Le analisi MASW, condotte con inversione *Full Velocity Spectrum* delle onde di *Rayleigh* e con inversione delle onde di *Love*, hanno fornito un profilo di V_S robusto nei primi 30–40 m, con valori superficiali dell'ordine di 100–170 m/s e incremento progressivo fino a valori superiori a 500–700 m/s in profondità. Le differenze tra modelli *Rayleigh* e *Love* sono riconducibili alla diversa sensibilità fisica delle onde considerate e al normale grado di non unicità dell'inversione, mentre le discrepanze alle maggiori profondità riflettono la minore sensibilità del dato alle basse frequenze.

Nel complesso, le diverse metodologie sismiche, pur basate su principi fisici distinti, convergono verso un modello stratigrafico coerente caratterizzato da terreni superficiali sabbiosi a bassa rigidezza sovrastanti un livello più competente a maggiore rigidità e contrasto elastico, individuato con elevata continuità laterale intorno ai 35–40 m di profondità. L'accordo tra tecniche indipendenti costituisce un elemento fondamentale di validazione del modello geofisico ricostruito.

Il modello di sottosuolo ottenuto dall'integrazione delle indagini geofisiche è stato utilizzato quale vincolo stratigrafico e geometrico per la definizione del modello numerico agli elementi distinti presentato nella Sezione 7.2, contribuendo alla ricostruzione delle superfici di contatto litologico e alla calibrazione della geometria del sottosuolo adottata nelle simulazioni.

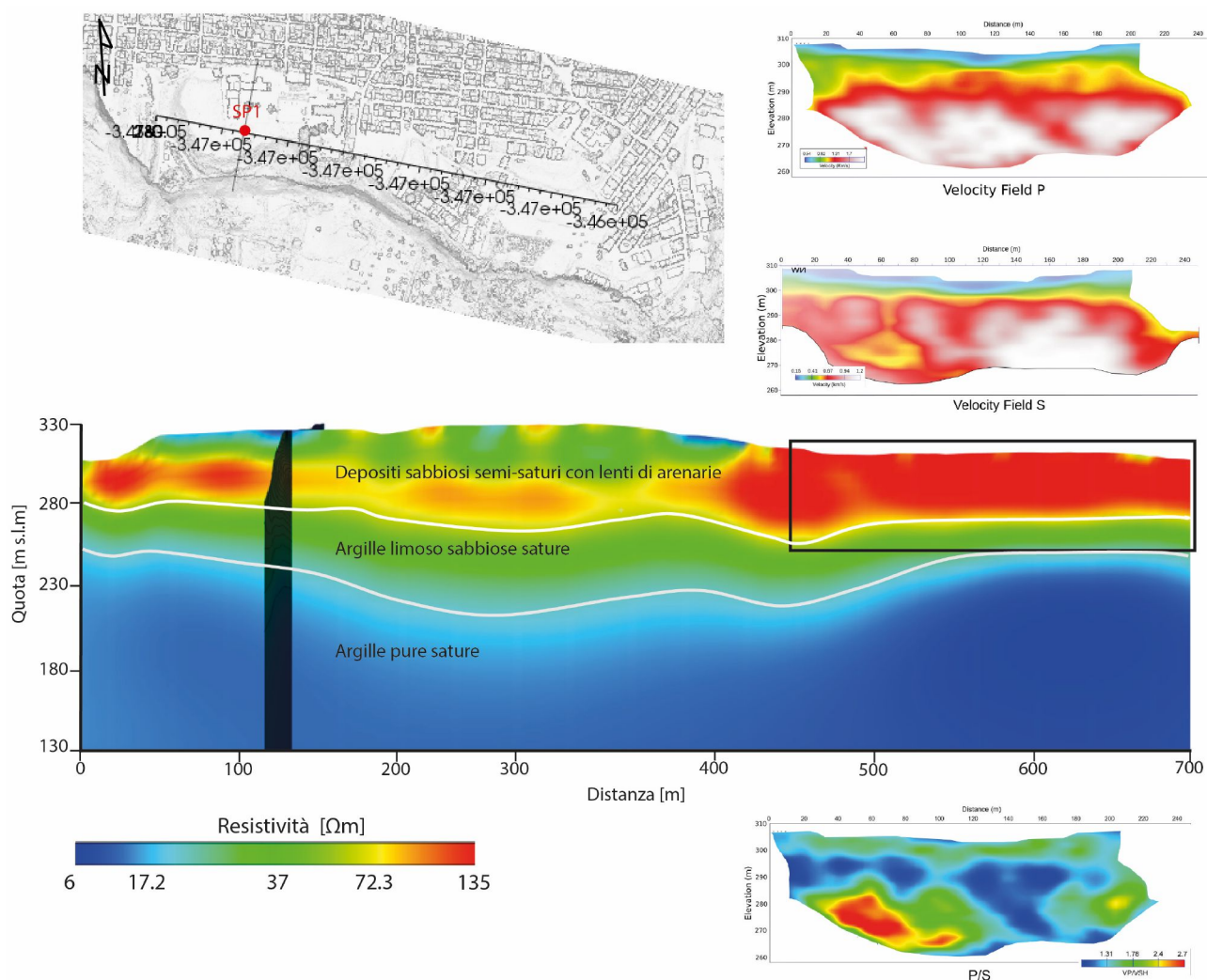


Figura 129 - Sintesi dei risultati delle indagini geofisiche.

7 Caratterizzazione e modellazione geotecnica

7.1 Caratterizzazione geotecnica

7.1.1 Stratigrafia

Lo studio geologico e geotecnico effettuato dal Comitato Tecnico Scientifico relativamente alla frana del 12 ottobre 1997 (Castiglione *et al.*, 2000) evidenzia in maniera chiara come dal punto di vista litologico l'area sia caratterizzata da materiali con un forte contrasto in termini sia di resistenza sia di permeabilità.

Dai dati derivanti dai 74 sondaggi effettuati successivamente alla frana e spinti a profondità comprese tra i 17,5 m e i 100 m, Castiglione *et al.* (2000) hanno potuto ricostruire con elevato dettaglio la serie stratigrafica dei terreni fornendo importanti indicazioni sugli spessori dei litotipi e sull'assetto giaciturale.

Relativamente alla stratigrafia i sondaggi evidenziano uno spessore del livello delle sabbie variabile da poco più di 30 m, in corrispondenza del ripiano su cui sorge l'abitato, a valori di 10 m - 15 m spostandosi verso il piede della frana. Questi valori trovano conferma con i dati derivanti dalla microzonazione sismica realizzata all'interno del paese per conto della Regione Siciliana.

Relativamente alle condizioni di giacitura del contatto lo studio di Castiglione *et al.* (2000) evidenzia un'inclinazione nella porzione centrale e terminale della frana del 1997 compresa tra i 5° e i 7° e valori prossimi ai 10°-12° in prossimità della scarpata, dove il contatto appare leggermente inclinato per effetto del movimento della frana.

7.1.2 Proprietà geotecniche

Nello studio di Castiglione *et al.* (2000) sono descritte in dettaglio le proprietà geotecniche delle argille derivate da prove in laboratorio su campioni con differente grado di disturbo prelevati da 49 dei 74 sondaggi effettuati a carotaggio continuo eseguiti sia nel pianoro su cui sorge l'abitato di Niscemi sia sulla frana del 1997.

Le argille si presentano normalconsolidate con un peso di volume compreso tra i 19 e i 20 kN/m³ e una plasticità variabile da bassa a elevata. Il contenuto d'acqua, valutato al tempo dell'esecuzione dei sondaggi tra 1999 e il 2000 ben dopo l'evento del 1997, risulta sempre superiore al limite di plasticità.

In particolare, gli autori evidenziano come il contenuto d'acqua nelle argille tende a diminuire con la profondità là dove le argille non risultano rimaneggiate mentre i valori maggiori sono rilevati a profondità maggiori dove le argille risultano rimaneggiate, ovvero a profondità maggiori di ca. 40 m in prossimità del torrente Bonifazio e a profondità minori spostandosi verso il piede della frana (fino a 10 m per il sondaggio posto più a valle). Questo aspetto, unito a quanto evidenziato dai dati inclinometri successivamente descritti, fornisce una chiara indicazione sulla potenziale profondità della superficie di scivolamento.

Relativamente ai parametri di resistenza al taglio delle argille questi sono stati derivati da differenti prove di laboratorio tra cui: prove triassiali consolidate non drenate; prove di taglio diretto e prove di taglio residuale.

I risultati delle prove mostrano valori pressoché indipendenti dalla profondità di campionamento con valori di c' nulli e ϕ' pari 21° relativamente alle prove triassiali; e valori di c' compresi tra 0 e 30 kPa e ϕ' in genere pari a 27° con minimo di 22° relativamente alle prove di taglio diretto. I valori di resistenza residua risultano pari a $c'_r=0$ e $\phi'_r=18^\circ$ in ottimo accordo con quelli Rizzo (2004) pari rispettivamente a $c'_r=0$ e $\phi'_r=17^\circ$.

Nella relazione di Castiglione *et al.* (2000) non risultano parametri geotecnici per le sabbie sovrastanti per l'impossibilità di prelievo di campioni indisturbati da utilizzare per prove di laboratorio.

La Tabella 11 riassume i principali parametri geotecnici delle argille.

Peso di volume	Contenuto d'acqua	Prova TxCD		Prova TD		Prova TR	
γ (kN/m ³)	w _n (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ'_r (°)
19-20	0.25-0.30	0	21	0 - 30	22 - 27	0	18

Tabella 11 - Principali parametri geotecnici delle argille (Castiglione *et al.*, 2000).

7.1.3 Inclinatori

I dati inclinometrici (Figura 130, Figura 131, Figura 132) riportati nello stesso studio che vanno dal 1999 al 2000 evidenziano movimenti a due differenti profondità. Sono ben evidenti movimenti alla profondità di 37.5 m per l'inclinometro S19C e alla profondità di 26 m per l'inclinometro S17C; movimenti di entità minore sono visibili a profondità maggiori e rispettivamente alla profondità di 58 m per l'inclinometro S19C, 66 m per l'inclinometro S08C e 55 m per l'inclinometro S07C.

Si ritiene che i movimenti più superficiali possano essere indicativi di un movimento successivo all'interno della frana principale la cui superficie di scivolamento sia posizionata a profondità comprese tra i 55 m e i 66 m.

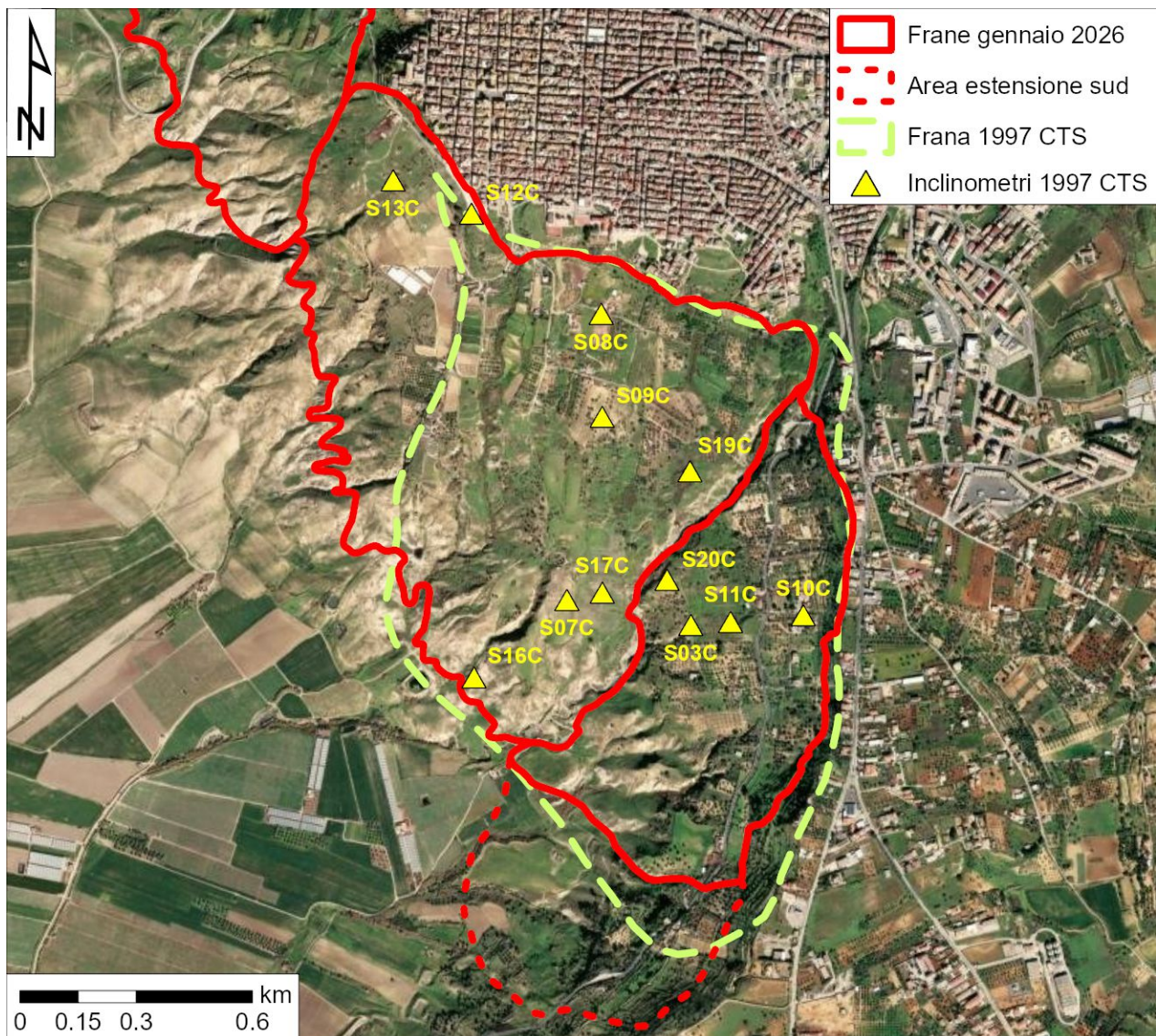


Figura 130 - Ubicazione dei sondaggi attrezzati con tubi inclinometrici (Castiglione *et al.*, 2000).

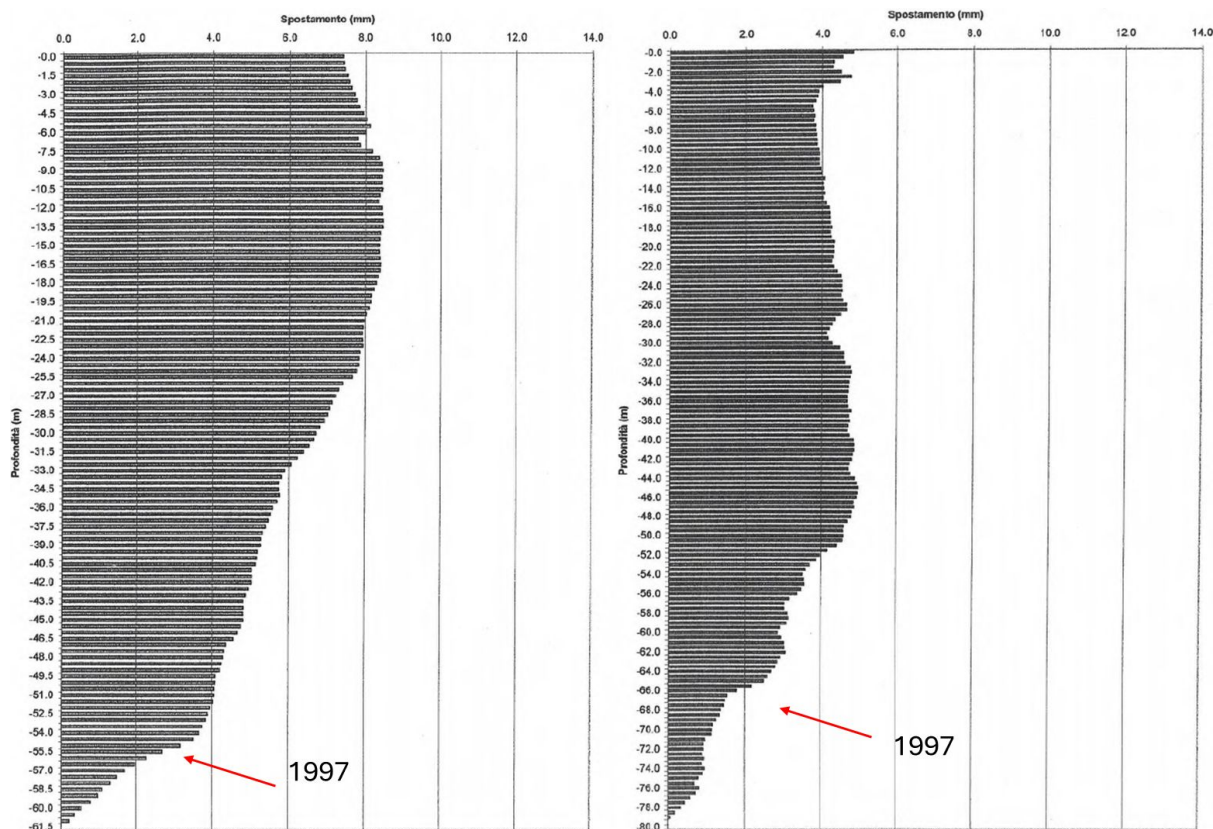


Figura 131 - Valori cumulati degli spostamenti rilevati al periodo 28 gennaio 1999 - 22 giugno 2000. A sinistra inclinometro S07C a destra inclinometro S08C.

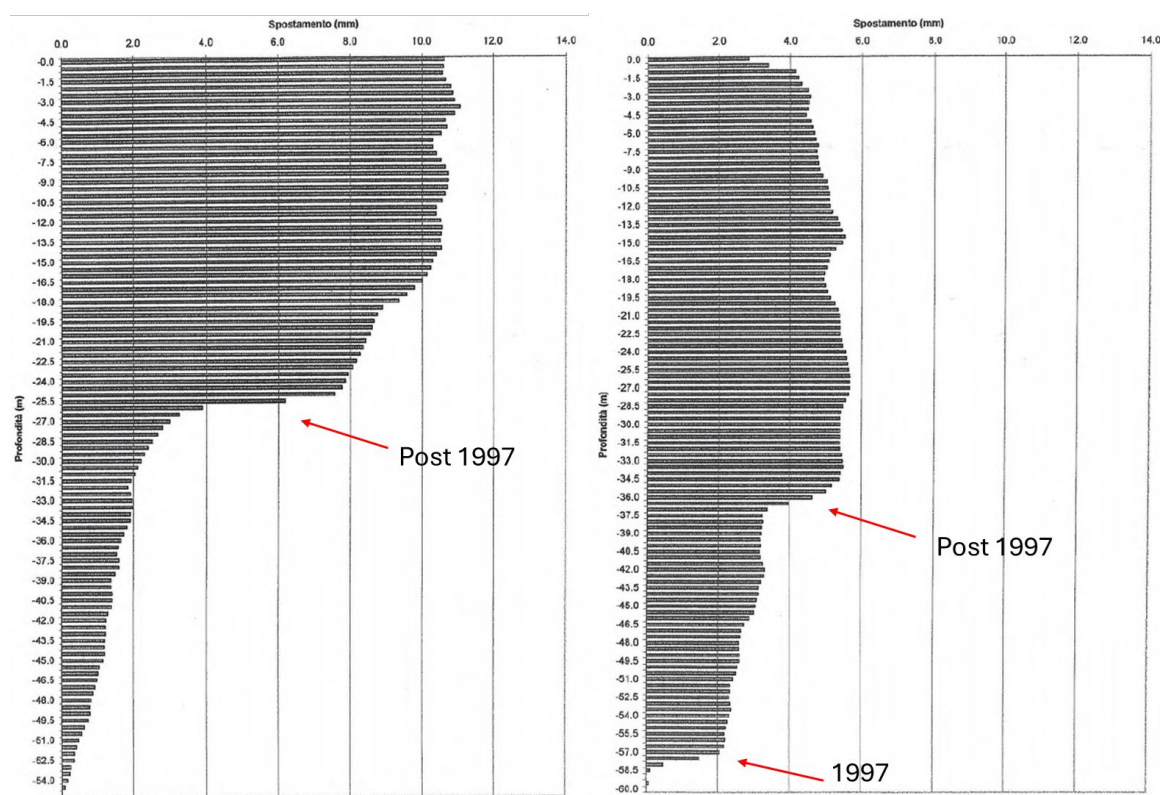


Figura 132 - Valori cumulati degli spostamenti rilevati al periodo 19 marzo 1999 - 16 febbraio 2000 (S17C) e al periodo 10 marzo 1999 - 27 giugno 2000 (S19C). A sinistra inclinometro S17C a destra inclinometro S19C.

7.1.4 Piezometria

I dati piezometrici (Castiglione *et al.*, 2000) mostrano come all'interno delle argille si siano mantenute nel tempo condizioni di acqua in pressione con livelli di risalita anche superiori ai 10 m (Figura 133, Figura 134).

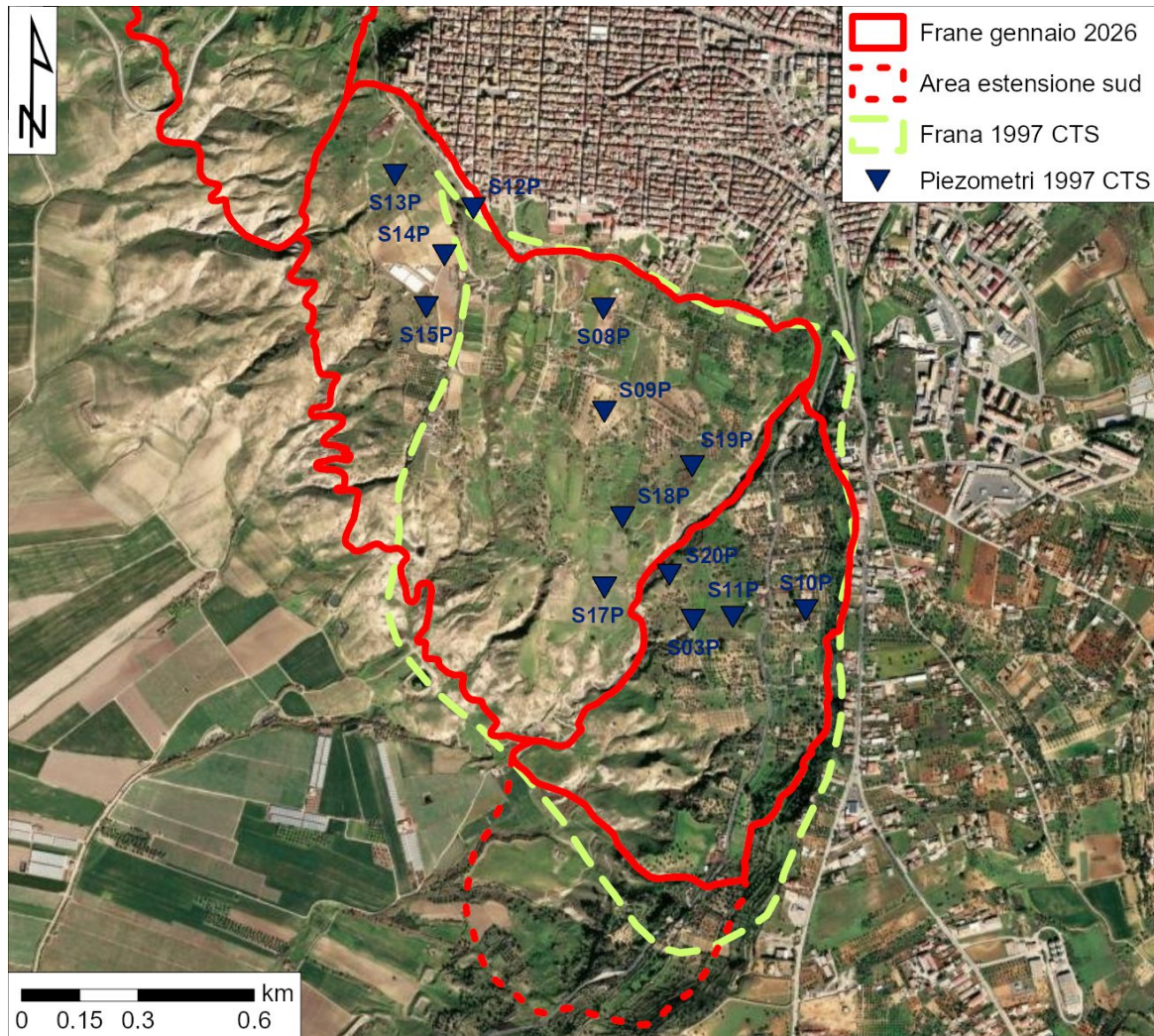


Figura 133 - Ubicazione dei sondaggi attrezzati con tubi piezometrici (Castiglione *et al.*, 2000).

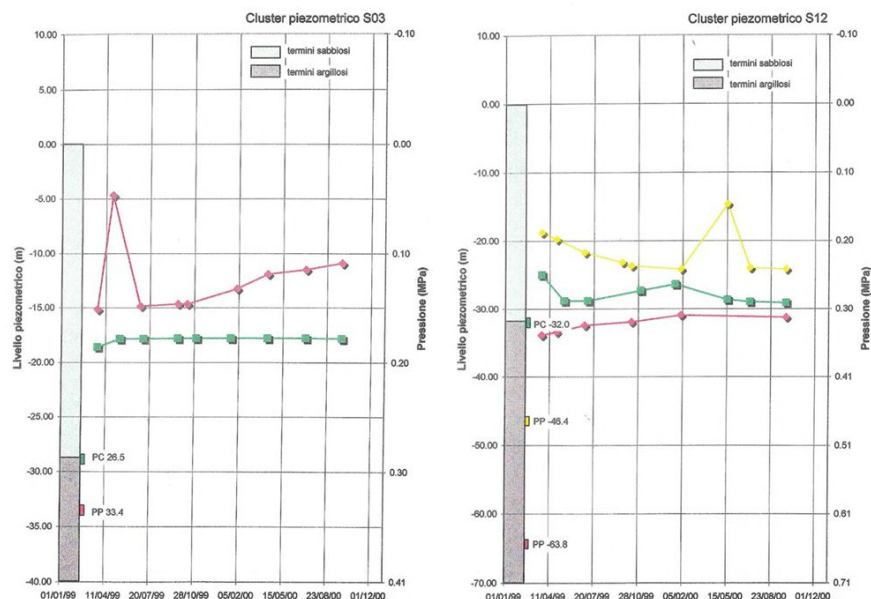


Figura 134 - Andamento del livello piezometrico nelle argille e al contatto con la sabbia (da Castiglione *et al.*, 2000).

7.2 Modellazione numerica

Con l'obiettivo di confermare il modello cinematico di riferimento ipotizzato sulla base delle osservazioni geologiche e geomorfologiche, sono state effettuate delle modellazioni numeriche con il codice FLAC 2D (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*), un codice di modellazione numerica del continuo in due dimensioni sviluppato da Cundall (1976) appositamente per applicazioni nel campo della geomeccanica. Il programma utilizza uno schema di calcolo esplicito basato sul metodo delle differenze finite con formulazione lagrangiana.

I metodi numerici alle differenze finite (FDM) e agli elementi finiti (FEM) suddividono i materiali che devono essere modellati in un certo numero di elementi, in modo da formare una griglia (*mesh*) e risolvere le equazioni del moto ai nodi di tale griglia. Mentre nei FEM queste sono risolte simultaneamente per tutti i nodi della griglia impostando un sistema di equazioni che mettono in relazione le forze e gli spostamenti di ciascun nodo tramite una matrice di rigidezza globale (*global stiffness matrix*), nei FDM le equazioni vengono risolte individualmente per ogni nodo.

Questo può essere fatto grazie al codice esplicito utilizzato, che fa riferimento a una procedura con scansione nel tempo (*time marching*) per la risoluzione delle equazioni del moto. Si assume infatti che, per intervalli di tempo sufficientemente piccoli, un disturbo in un nodo non influenza gli elementi immediatamente adiacenti. A questo proposito è opportuno precisare che, nelle analisi meccaniche, gli intervalli di tempo non corrispondono ad un tempo reale, ma si riferiscono soltanto ad un "tempo macchina" legato alla procedura di calcolo.

Un'ulteriore prerogativa del programma è la cosiddetta "formulazione lagrangiana", secondo la quale qualora si verificano condizioni di plasticizzazione e di deformazione i nodi si spostano realmente, dal momento che le loro coordinate vengono aggiornate automaticamente ad ogni ciclo di calcolo. Questo risulta possibile proprio in virtù della procedura impiegata per la soluzione delle equazioni del moto, indipendentemente per ogni nodo, senza la necessità di assemblare una matrice di rigidezza globale.

Ogni ciclo di calcolo di FLAC passa attraverso i seguenti punti:

1. per ogni nodo del reticolo viene calcolata, sommando i contributi delle zone di continuo ad esso collegate, una massa m , una risultante delle forze esterne F_e applicate al nodo e una risultante delle azioni interne F_i ottenuta per integrazione degli sforzi nelle zone collegate al nodo stesso. Si calcola quindi la forza netta agente sul nodo $F_u = F_e - F_i$ (*unbalanced force*); tale forza, che in un sistema in equilibrio deve essere nulla, è responsabile dell'eventuale situazione di non equilibrio del nodo;
2. per ogni nodo viene impostata un'equazione di Newton, mediante la quale si determina l'accelerazione a del nodo. Integrando due volte l'accelerazione si ottengono la velocità e lo spostamento incrementale del nodo (ricordando che il passo d'integrazione dt deve essere scelto con molta attenzione per evitare problemi di instabilità numerica);
3. il campo di spostamenti incrementali così calcolato permette di determinare il campo di deformazioni incrementali e quindi, attraverso il legame costitutivo dei materiali, il campo di variazione degli sforzi nelle zone del reticolo;
4. la variazione degli sforzi comporta una variazione nodo per nodo della risultante delle forze interne F_i ; si ritorna quindi al punto 2 con questi valori aggiornati e si ripete il ciclo procedendo al successivo incremento dt .

Per il raggiungimento delle condizioni di equilibrio FLAC esegue automaticamente uno smorzamento "fittizio" in base alla velocità calcolata per ciascun nodo. Il tipo di soluzione di un problema può essere ricondotto ad uno dei seguenti casi:

- verificando che nell'evoluzione dello stato di sforzo le F_i progressivamente equilibrano le F_e e dunque le forze nette si riducono e con esse le velocità (grazie all'effetto dello smorzamento), mentre gli spostamenti raggiungono valori costanti e il modello evolve quindi verso uno stato stazionario;
- in una o più parti del modello le proprietà meccaniche del materiale vengono superate e, quindi, le F_i non arrivano mai a riequilibrare le F_e .

Nel secondo caso, nei nodi si continua ad avere un'accelerazione (compensata dall'azione delle forze smorzanti) e una velocità che non scendono mai a zero, con il materiale che continua quindi a deformarsi (meccanismo di collasso). FLAC permette di seguire questo fenomeno fino a che le deformazioni non divengono tali da produrre zone di forme geometricamente inaccettabili, come per esempio quadrilateri concavi, il che generalmente avviene a stadi molto avanzati del collasso, per i quali la modellazione del materiale come continuo non è più corretta.

La sezione di riferimento utilizzata per le modellazioni numeriche è la stessa del profilo schematico riportata nella sezione precedente, e le proprietà geotecniche rappresentative dei materiali (Tabella 12) sono state estratte analizzando i risultati di prove di laboratorio discusse nella sezione precedente.

Materiale	Densità (kg/m ³)	c' - picco (kPa)	ϕ' - picco (°)	c _r ' - residua (kPa)	ϕ_r' (°) - residuo
Sabbia	2000	0	32	0	32
Argilla	1950	20	23	0	18

Tabella 12 - Proprietà dei materiali considerate nell'analisi FDM.

Con l'obiettivo di verificare la cinematica generale del movimento principale è stato definito un modello geologico semplificato della frana principale, dove è stato inserito all'interno delle argille un unico livello debolmente a franapoggio, in accordo con le informazioni geologiche disponibili, con la consapevolezza che tale schematizzazione rappresenta comunque una semplificazione della realtà (Figura 135).

Sebbene non si abbiano informazioni dirette sulla distribuzione delle pressioni interstiziali immediatamente precedenti alla fase parossistica, si è ipotizzata all'interno del modello la presenza di una falda prossima al piano di campagna, condizionata dal contrasto di permeabilità fra le sabbie e le argille sottostanti. Sono state fatte in particolare due ipotesi in merito alle possibili distribuzioni delle pressioni interstiziali che verranno presentate in seguito. In entrambi i casi, assegnando al materiale argilloso i parametri di picco (Tabella 12), il modello raggiunge sempre una situazione di equilibrio (Figura 136), a testimoniare un fattore di sicurezza $F_s > 1$.

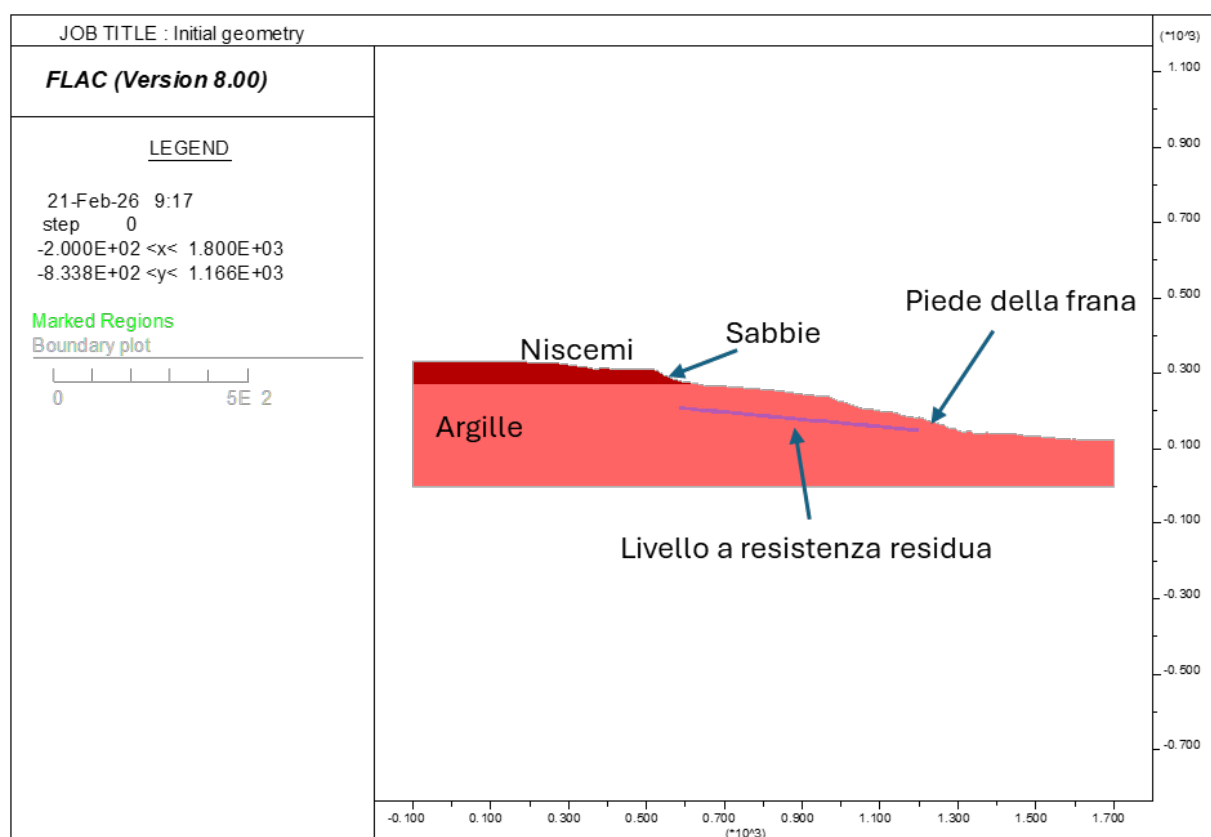


Figura 135 - Modello numerico alle differenze finite della frana principale di Niscemi.

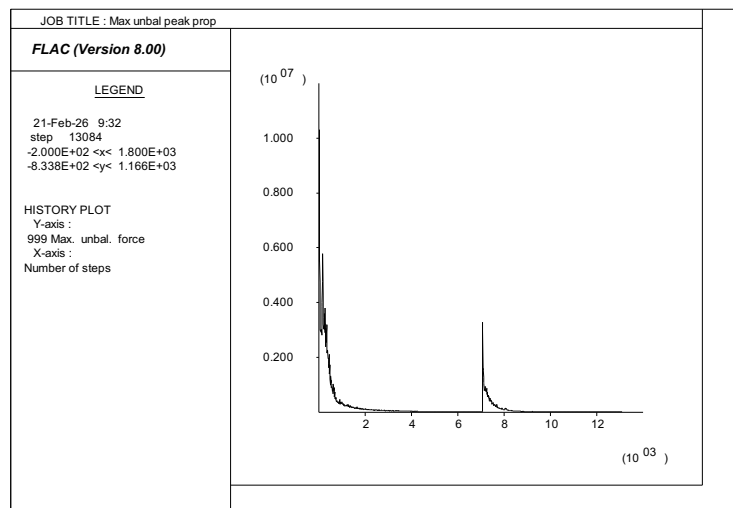


Figura 136 - Variazione della massima forza risultante agente sui nodi del modello. Assegnando i parametri di picco a tutti i materiali argillosi il modello raggiunge una situazione di equilibrio.

7.2.1 Modello con saturazione totale delle argille

Assegnando al modello una falda che si sviluppa all'interno delle sabbie e coincidente col piano di campagna a valle del contatto sabbie argille (Figura 137) e i parametri residui in corrispondenza del livello a resistenza residua all'interno delle argille, il modello non converge verso una situazione di equilibrio (Figura 138), a testimonianza di un fattore di sicurezza $F_s < 1$.

Come si può osservare in Figura 139 e Figura 140, in questo caso la plasticizzazione del materiale riguarda la porzione di piede del versante instabile, con fenomeni che riproducono in scala quello globale, in analogia con quanto osservato da Castiglioni *et al.* (2000).

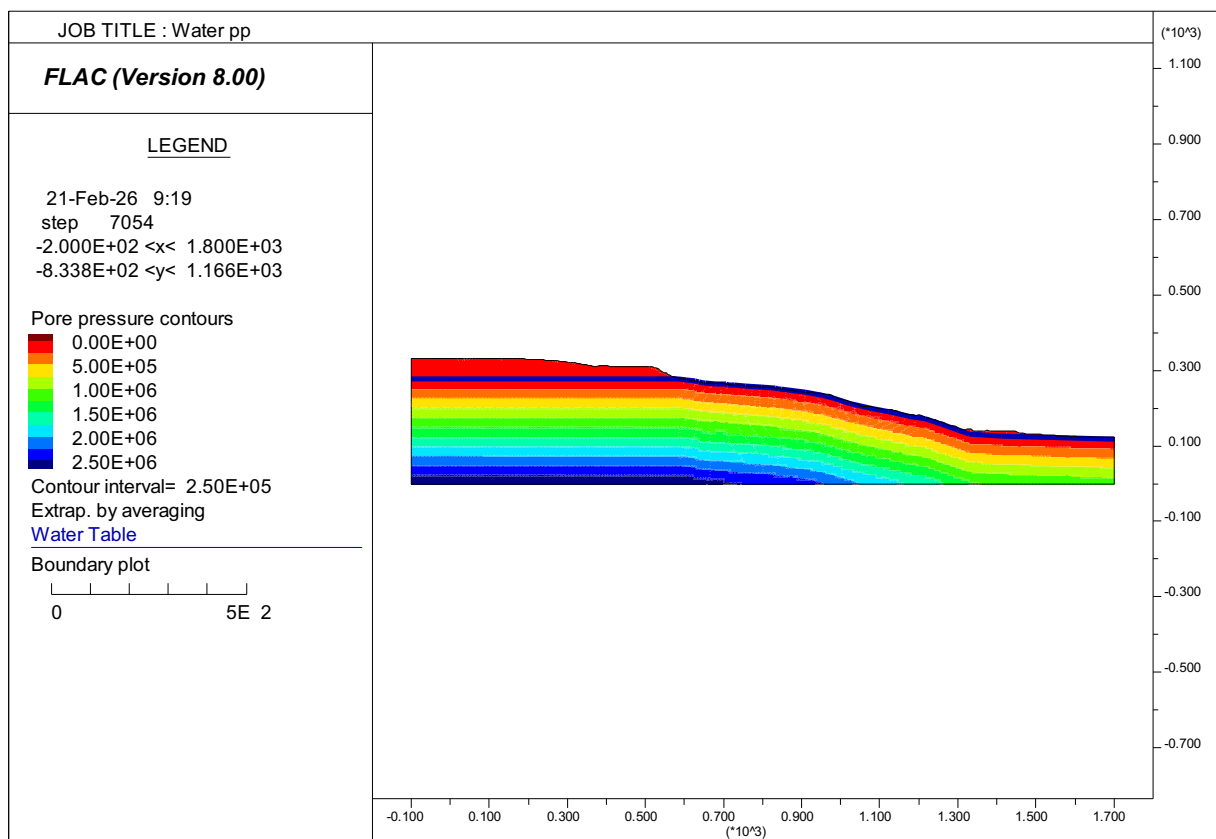


Figura 137 - Impostazione di un livello piezometrico che si sviluppa all'interno delle sabbie e coincidente col piano di campagna a valle del contatto sabbie-argille (linea blu) e relative pressioni interstiziali all'interno del modello.

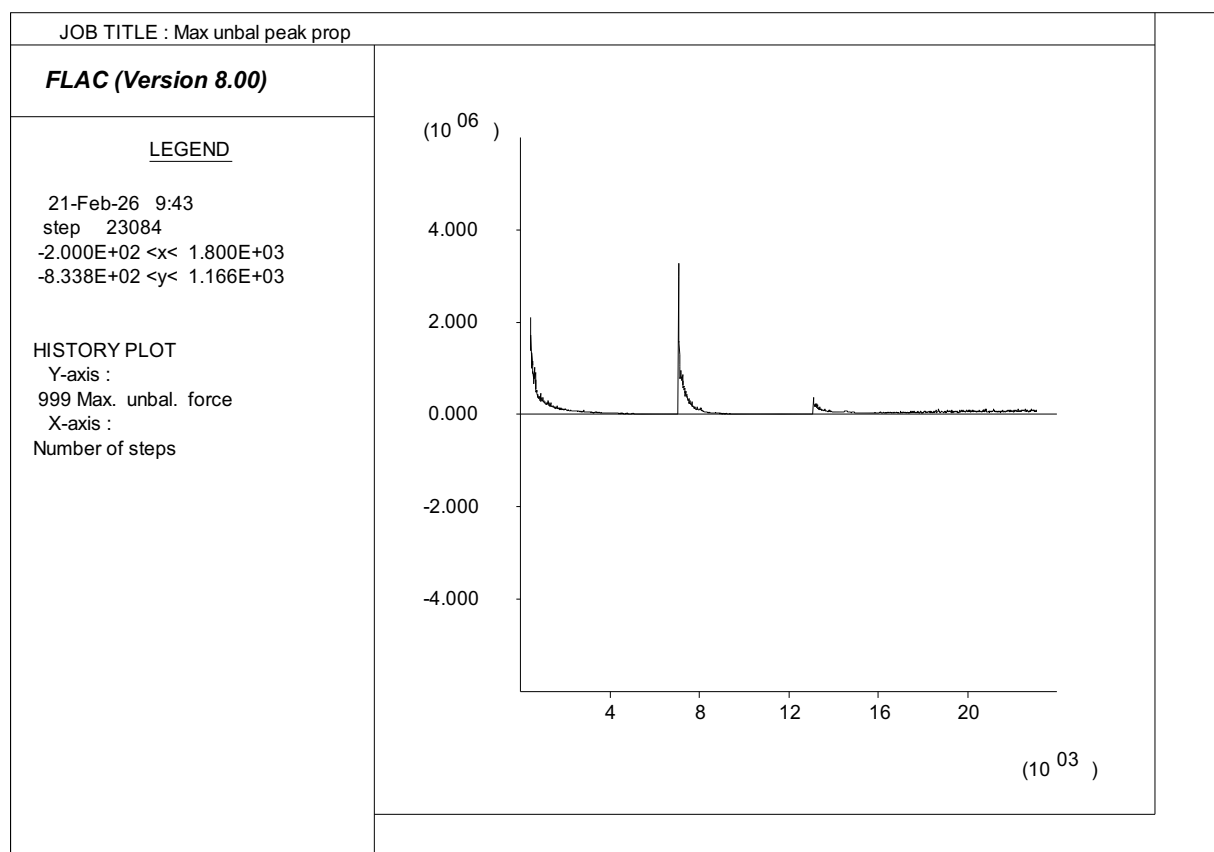


Figura 138 - Variazione della massima forza risultante agente sui nodi del modello assegnando i parametri residui al livello argilloso.

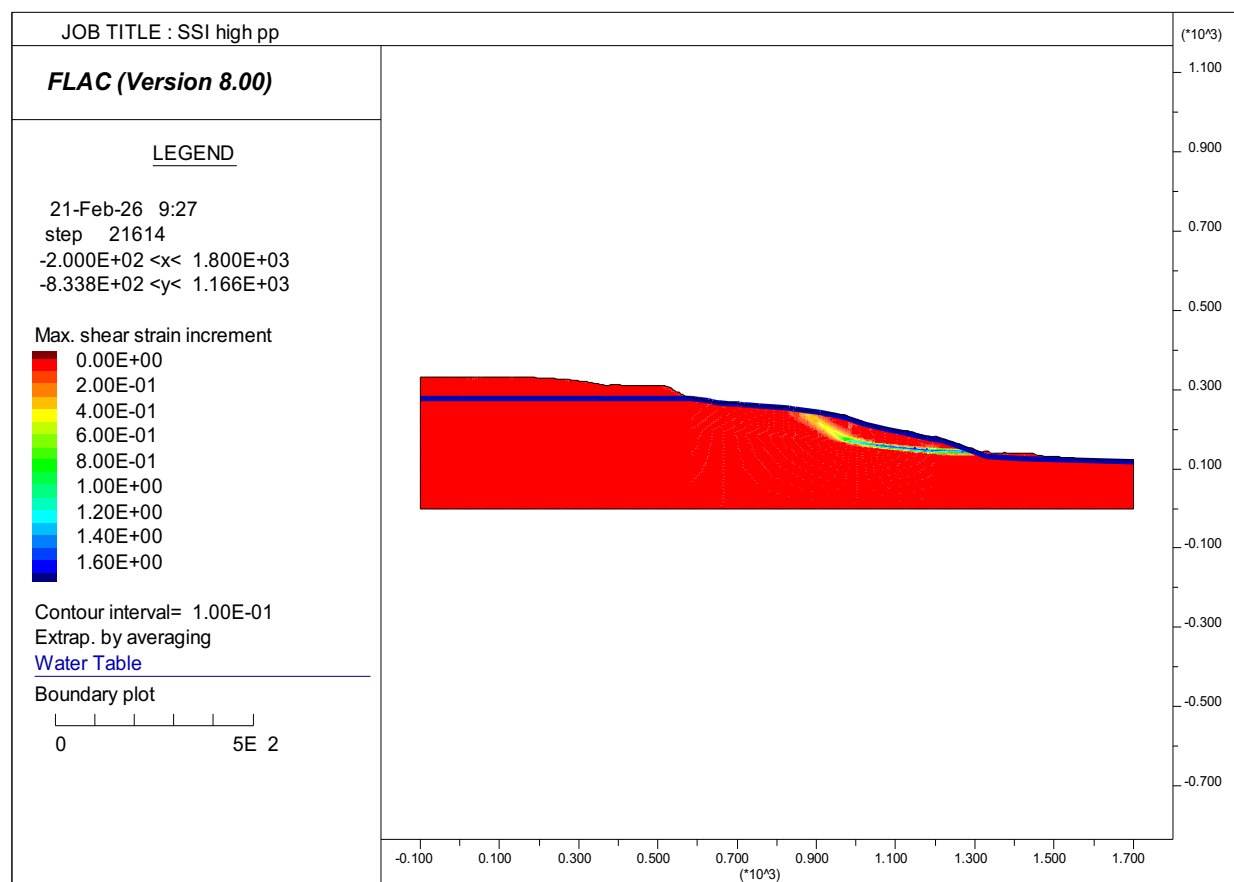


Figura 139 - Zone di concentrazione di rottura per taglio con falda al piano di campagna.

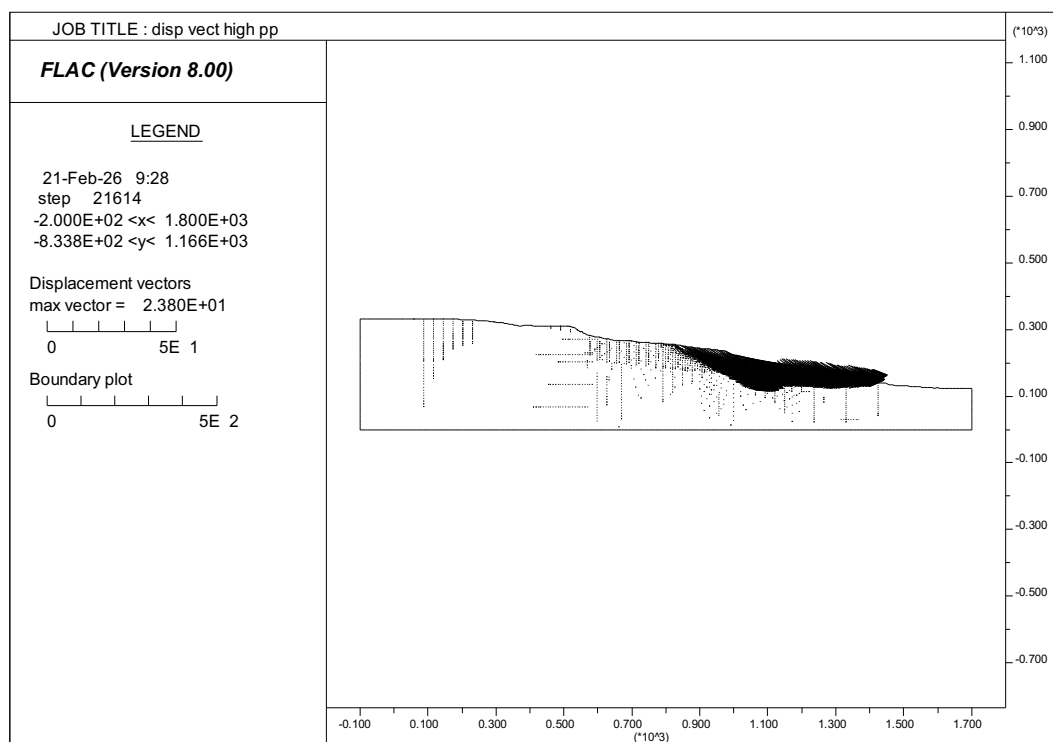


Figura 140 - Vettori spostamento nel caso di falda coincidente col piano di campagna.

7.2.2 Modello con saturazione parziale delle argille

Per cercare di riprodurre il fenomeno generale fino a interessare anche la porzione sabbiosa soprastante si è quindi abbassato il livello piezometrico in prossimità del piede, secondo la configurazione riportata in Figura 141.

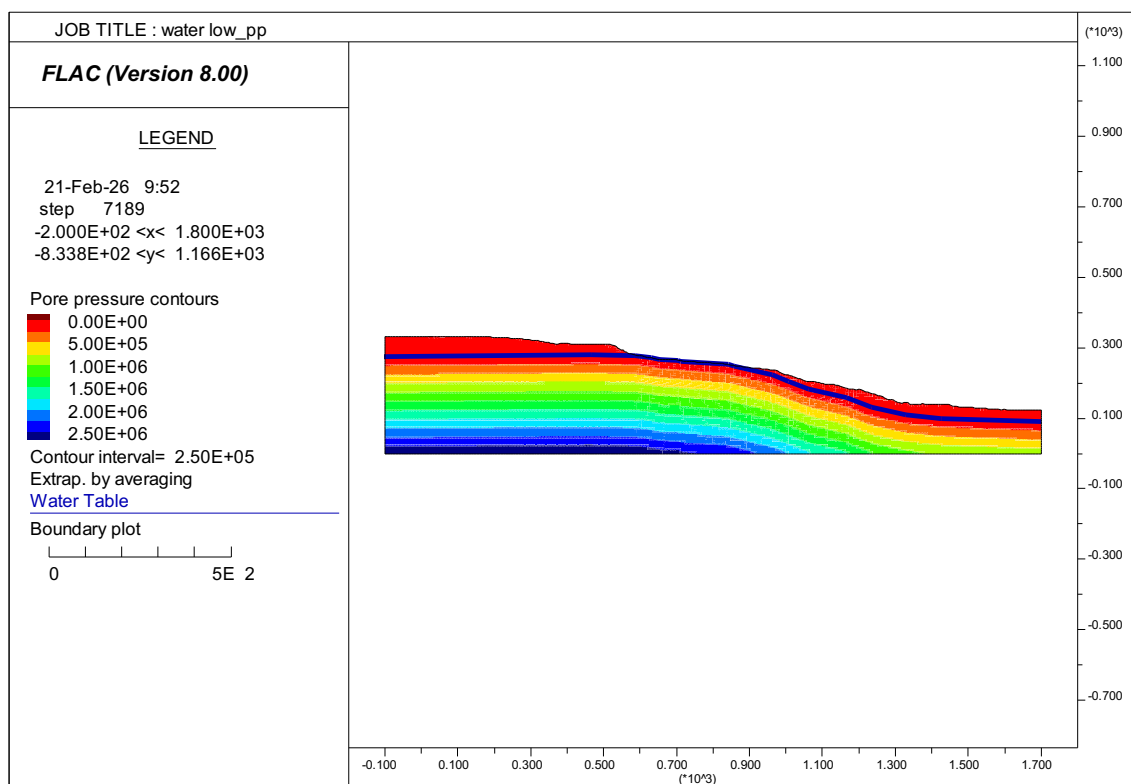


Figura 141 - Livello piezometrico ridotto in prossimità del piede del versante e relative pressioni interstiziali all'interno del modello.

In queste condizioni il modello converge verso una situazione di stabilità.

La condizione limite di scivolamento si verifica per un angolo di resistenza residua pari a 13.5° , determinando una destabilizzazione completa del versante secondo un meccanismo analogo a quello ipotizzato.

Ciò è testimoniato dalla distribuzione dei vettori spostamento e dalle zone di concentrazione di rottura per taglio, che evidenziano la formazione della scarpata principale che taglia la formazione sabbiosa soprastante e di una zona di rottura antitetica a delimitare l'area del *Graben* in abbassamento (Figura 142, Figura 143 e Figura 144).

La distribuzione degli spostamenti all'interno della massa in movimento conferma un movimento prevalentemente orizzontale nella zona centrale e di piede del corpo di frana (Figura 145), con una componente verticale preponderante solamente nell'area del *Graben* (Figura 146).

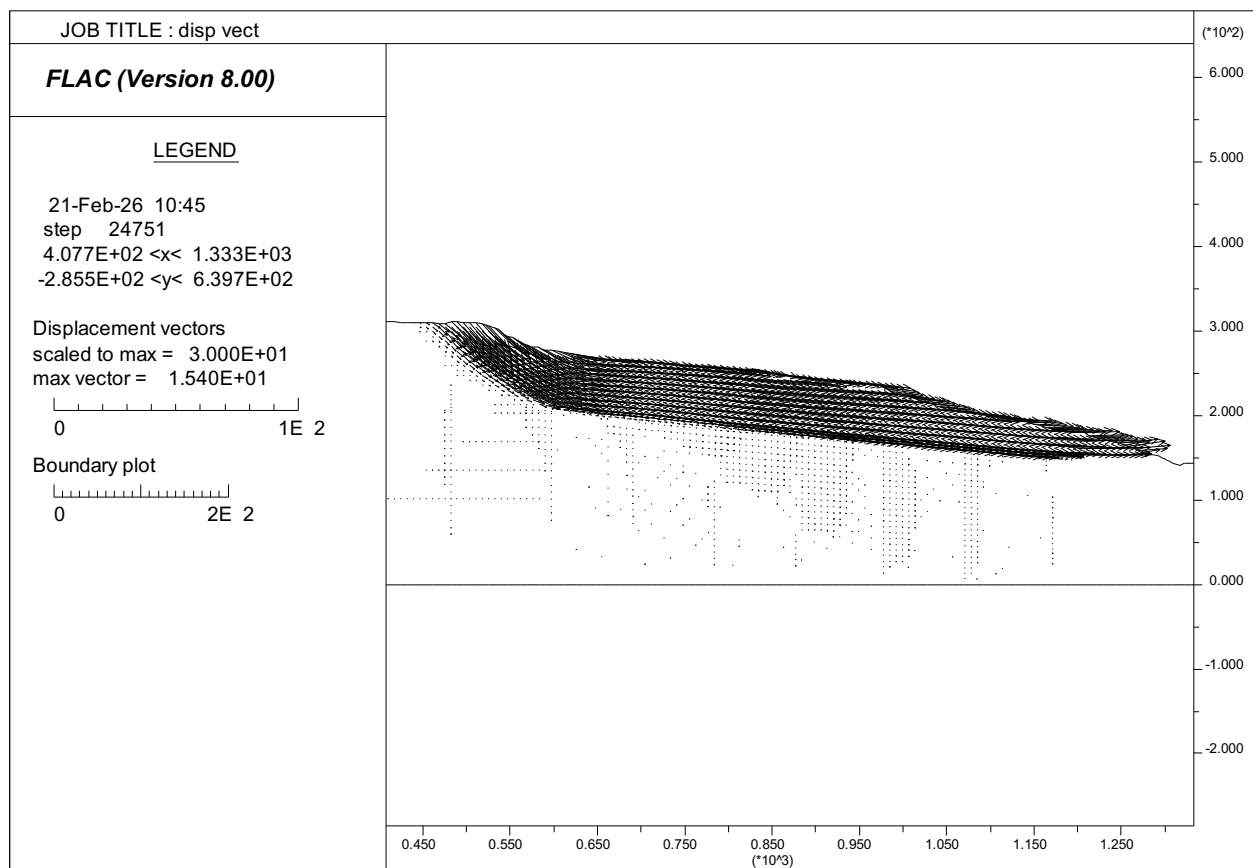


Figura 142 - Vettori spostamento in caso di mobilitazione dell'intero versante, in analogia con la frana principale.

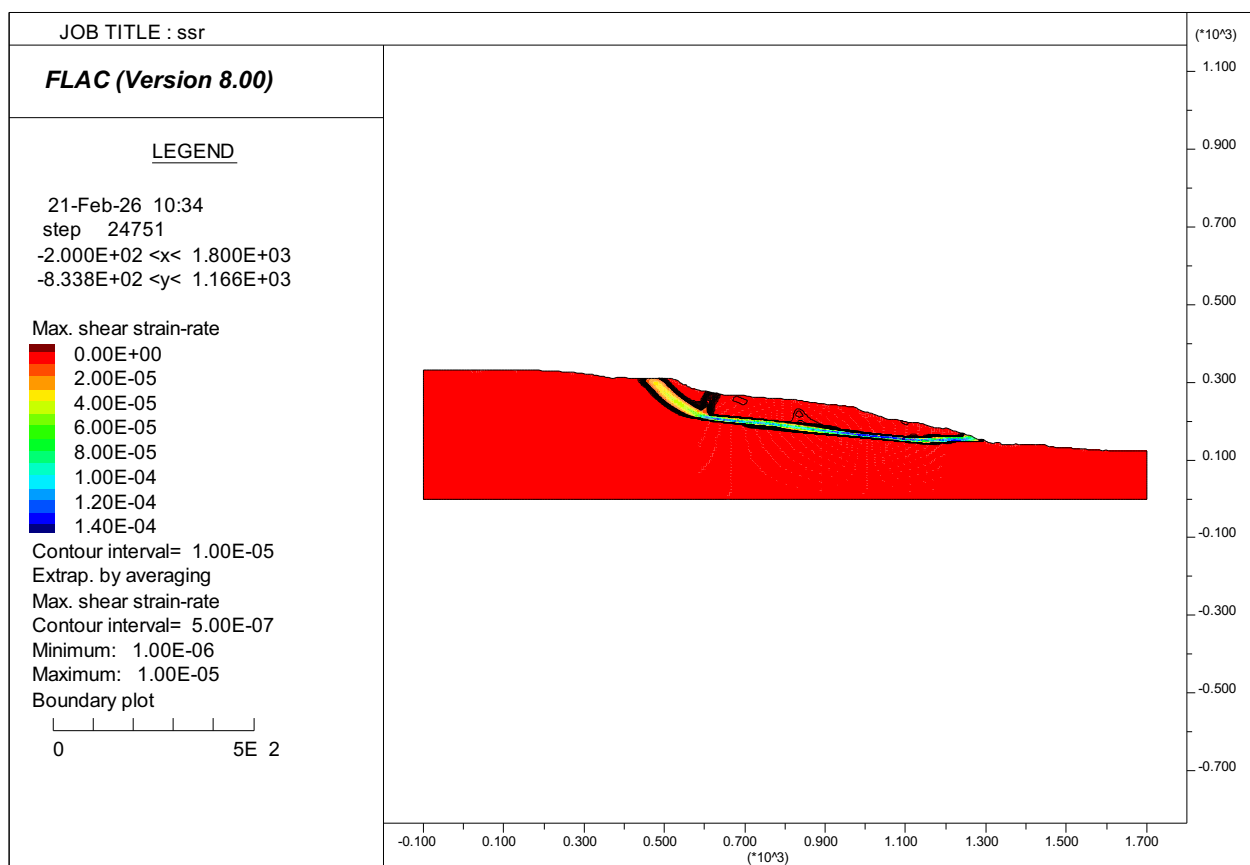


Figura 143 - Zone di concentrazione di rottura per taglio, con evidenza di rottura antitetica.

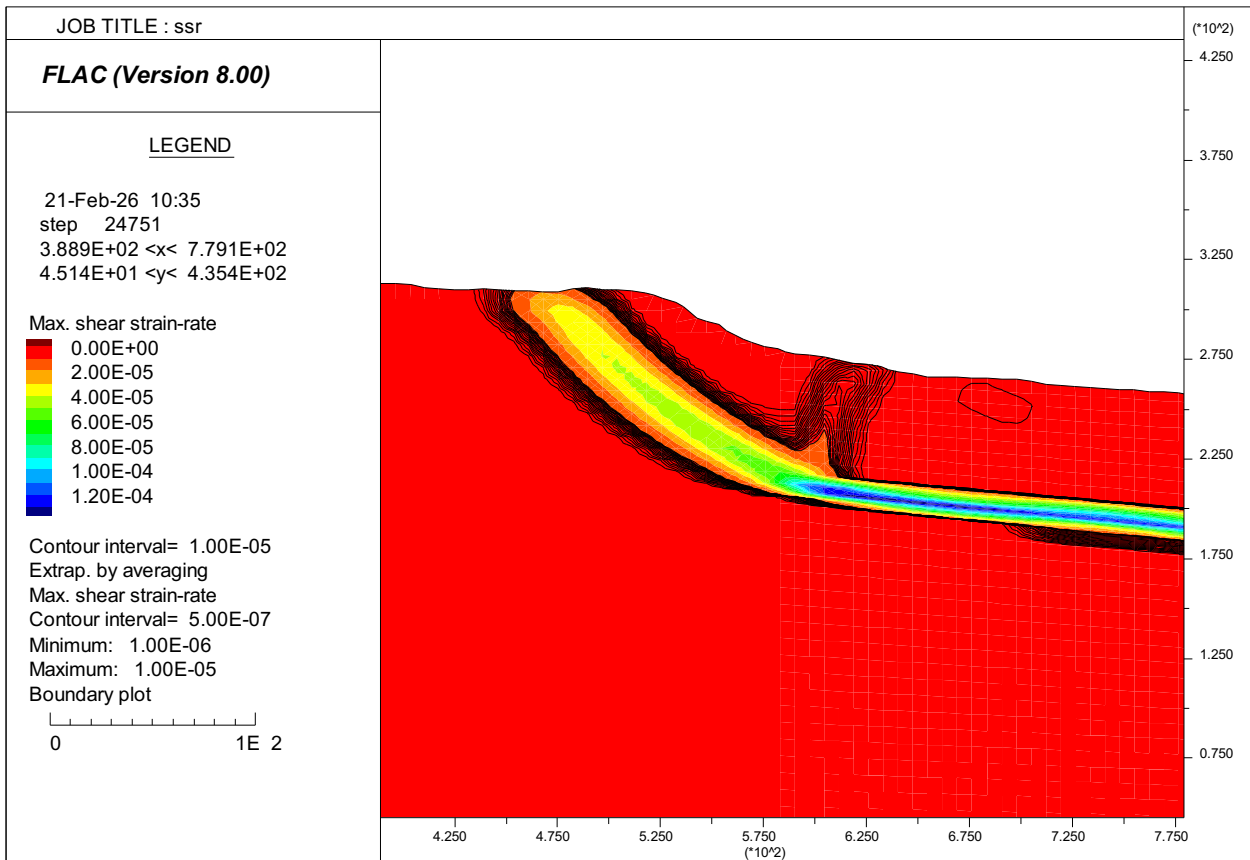


Figura 144 - Zone di concentrazione di rottura per taglio, con evidenza di rottura antitetica. Particolare in corrispondenza della scarpata principale e dell'area del *Graben*.

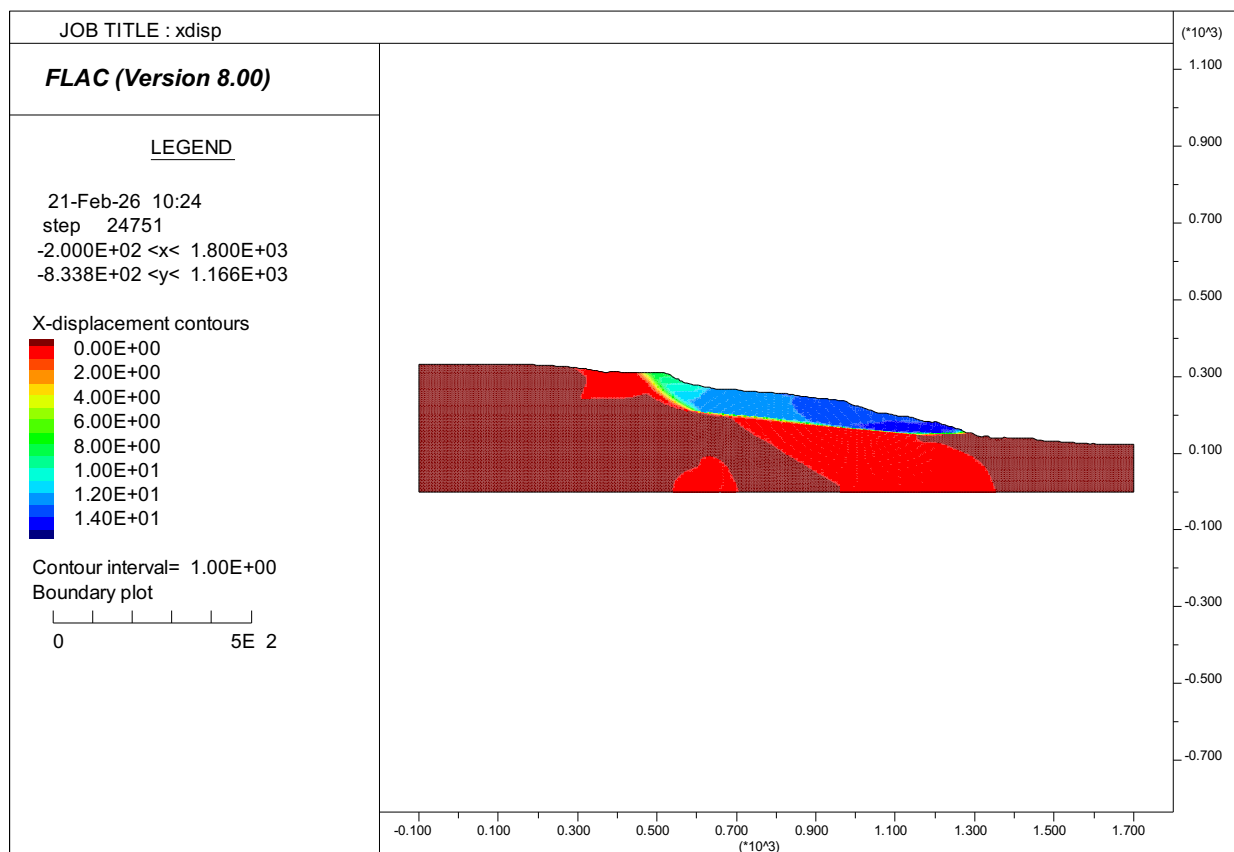


Figura 145 - Isolinee di spostamento orizzontale.

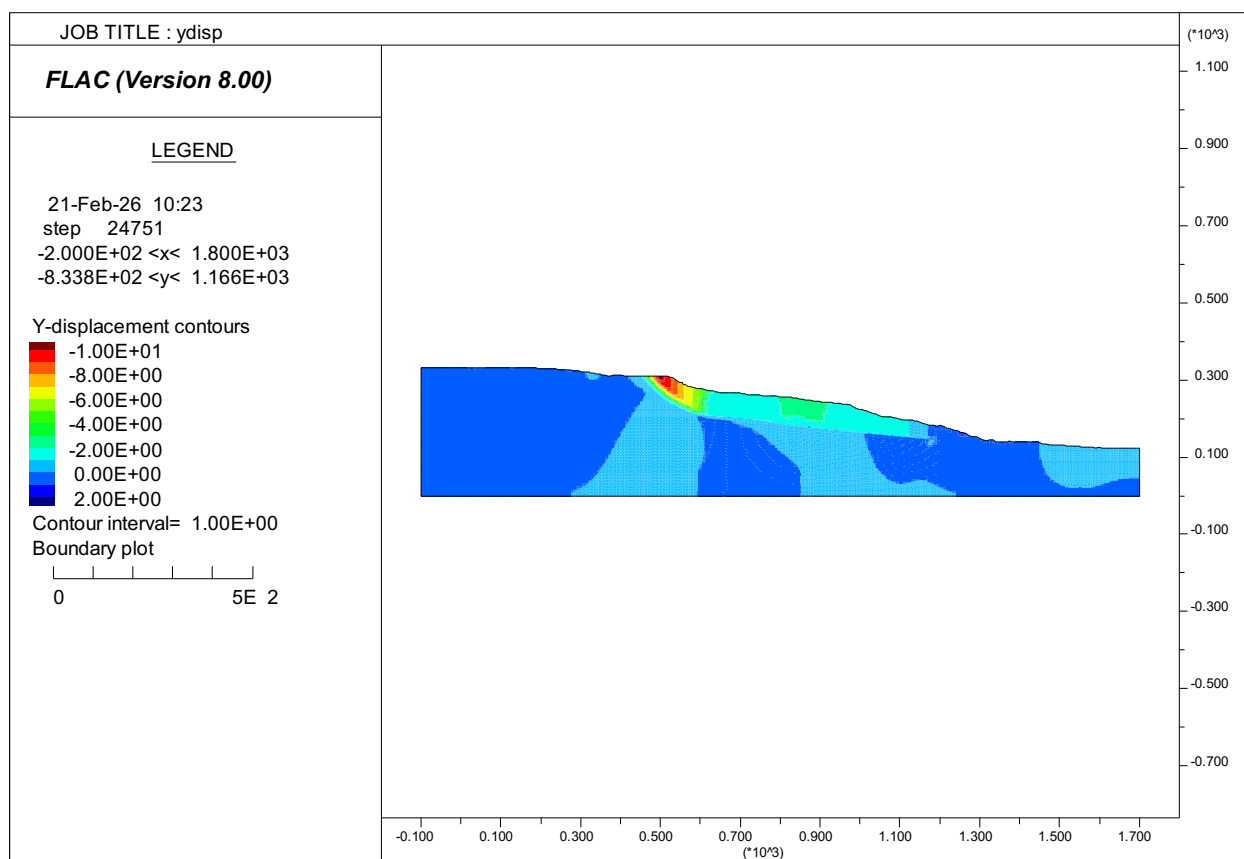


Figura 146 - Isolinee di spostamento verticale.

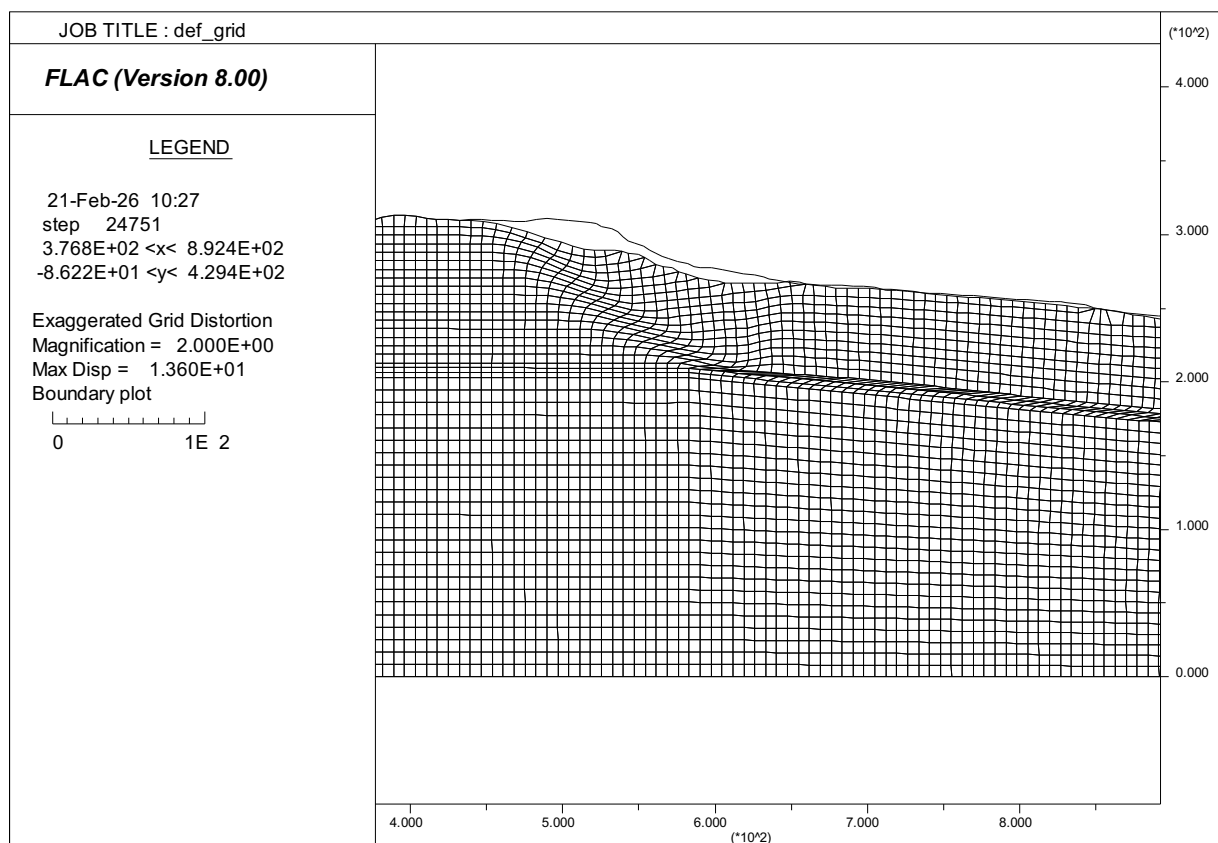


Figura 147 - Deformazione della griglia del modello nella porzione superiore del corpo di frana e profilo indeformato.

8 Valutazione del rischio residuo nel centro abitato

Alla data del presente rapporto le frane di Niscemi si presentano ancora in evoluzione attiva. Le evidenze geomorfologiche (scarpate attive, fenditure aperte, deformazioni del piano campagna) indicano una persistente dinamica di movimento, in particolare nei versanti occidentali e meridionali.

L'analisi dei dati interferometrici satellitari post-evento (sezione 4.5) mostra come il centro abitato presenti condizioni di sostanziale stabilità. Tuttavia, la frana, e in particolare la sua scarpata principale che borda il paese, è suscettibile di evoluzione retrogressiva.

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 rischio residuo per il centro abitato deve pertanto essere considerato elevato per la frana nel suo complesso, con particolare riferimento alle aree immediatamente retrostanti il ciglio della scarpata e ai settori già interessati dal movimento franoso.

Con i dati geotecnici, geofisici e di monitoraggio oggi a disposizione è tuttavia possibile analizzare la stabilità della scarpata principale valutando l'entità della sua futura retrogressione, in modo da ricalibrare l'estensione della "fascia rossa" di interdizione.

8.1 Modello di arretramento della scarpata principale

I materiali su cui sorge l'abitato di Niscemi sono costituiti da un livello superiore di sabbie talvolta addensate intercalate da livelli calcarenitici e limosi alla base, che poggiano con un contatto sub-orizzontale su un livello di argilla limosa.

Dalla documentazione disponibile risulta ben caratterizzato dal punto di vista geotecnico il materiale argilloso sottostante, a differenza della soprastante porzione sabbiosa/calcarenitica. Un riferimento attendibile di quest'ultimo è riportato in una sezione geologica di una relazione relativa a un intervento di stabilizzazione nell'area in oggetto contenuta nel materiale fornito dall'Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia, dove si fa riferimento a un terreno granulare ($c'=0$) con angolo di attrito variabile fra 32° e 42° .

Considerando le caratteristiche geotecniche dei materiali e le evidenze dell'evoluzione in atto sulla parete di neoformazione (Figura 148), si ritiene che il meccanismo di dissesto più probabile sia il graduale arretramento della parete con conseguente riduzione della pendenza per effetto di fenomeni estremamente superficiali, caratteristici di materiale a comportamento puramente attritivo come quello che costituisce il livello sabbioso soprastante.

Col tempo il materiale franato si accumula al piede formando una falda detritica che si va a raccordare con la parete disponendosi secondo l'angolo di riposo caratteristico del materiale. Per le presenti analisi si considera cautelativamente un angolo di riposo pari a 30° .



Figura 148 - Particolare della scarpata principale della frana di Niscemi nella zona del quartiere Sante Croci. Immagine acquisita durante il sopralluogo da elicottero del 27 gennaio 2026 che mostra l'evoluzione in atto della scarpata con formazione di coni detritici

8.2 Scenari di arretramento in funzione del fattore di sicurezza

Sulla base delle osservazioni sopra riportate, è stato realizzato un profilo topografico utilizzando come base il rilievo aerofotogrammetrico del 31 gennaio e passante per la zona del quartiere Sante Croci, in un punto dove la parete non è ancora interessata da evidenti fenomeni di erosione e accumulo e dove risulta ancora evidente il contatto fra le sabbie e le argille sottostanti (Figura 149).

Tale scelta è ancora una volta a favore della sicurezza, in quanto nei settori dove la parete ha già subito un'erosione, le pendenze si sono già ridotte e ci si attende ragionevolmente un arretramento minore.

Lungo tale profilo sono state quindi tracciate a partire dal contatto sabbie-argille (che in tal punto affiora pressoché alla base della parete) le linee corrispondenti all'angolo di riposo ridotto secondo un fattore di sicurezza (FS) variabile da 1 a 2.9.

In particolare, il modello di basa sull'assunzione che l'angolo di riposo delle sabbie, pari a 30° , corrisponda all'angolo di attrito efficace ϕ' per cui l'inclinazione delle linee corrispondenti ai diversi valori di FS è data da: $\tan\phi'/FS$.

Ognuna di queste linee interseca il profilo topografico in corrispondenza del paese in un punto per il quale viene misurata la distanza a partire dall'orlo della scarpata alla data del rilievo utilizzato (31 gennaio).

Come si può osservare da Figura 150 a Figura 156, tale valore varia da circa 44 m (per FS=1) a 150 m (per FS=2.9).

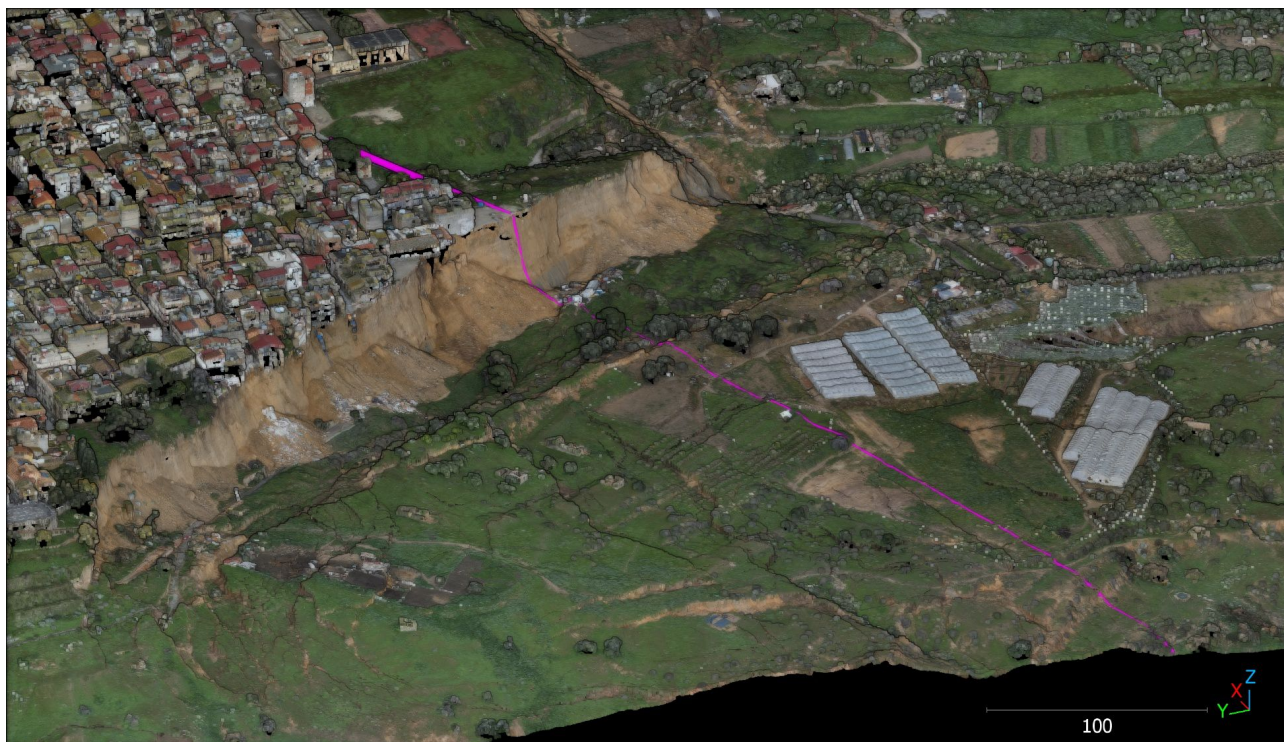


Figura 149 - Traccia della sezione (linea fucsia) utilizzata per la valutazione dell'arretramento della parete.

Si precisa che questa analisi considera la naturale evoluzione, già in atto, di graduale arretramento della scarpata di neoformazione ad elevata inclinazione, senza prendere in considerazione eventuali riattivazioni del corpo di frana principale, che possono prevedere fenomeni di arretramento più profondi, la cui entità può essere comunque cautelativamente assimilata a quella massima osservata in occasione dell'evento del 25-26 gennaio (25-30 m).

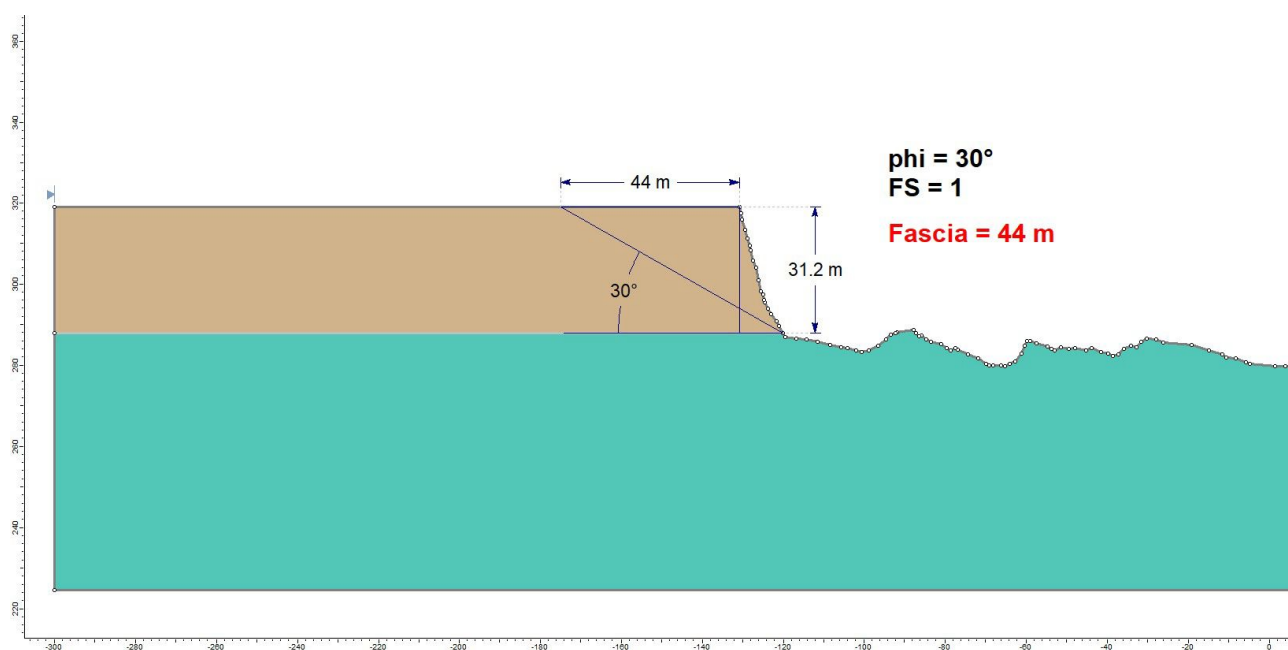


Figura 150 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza FS=1, da cui risulta una fascia di rispetto di 44 m.

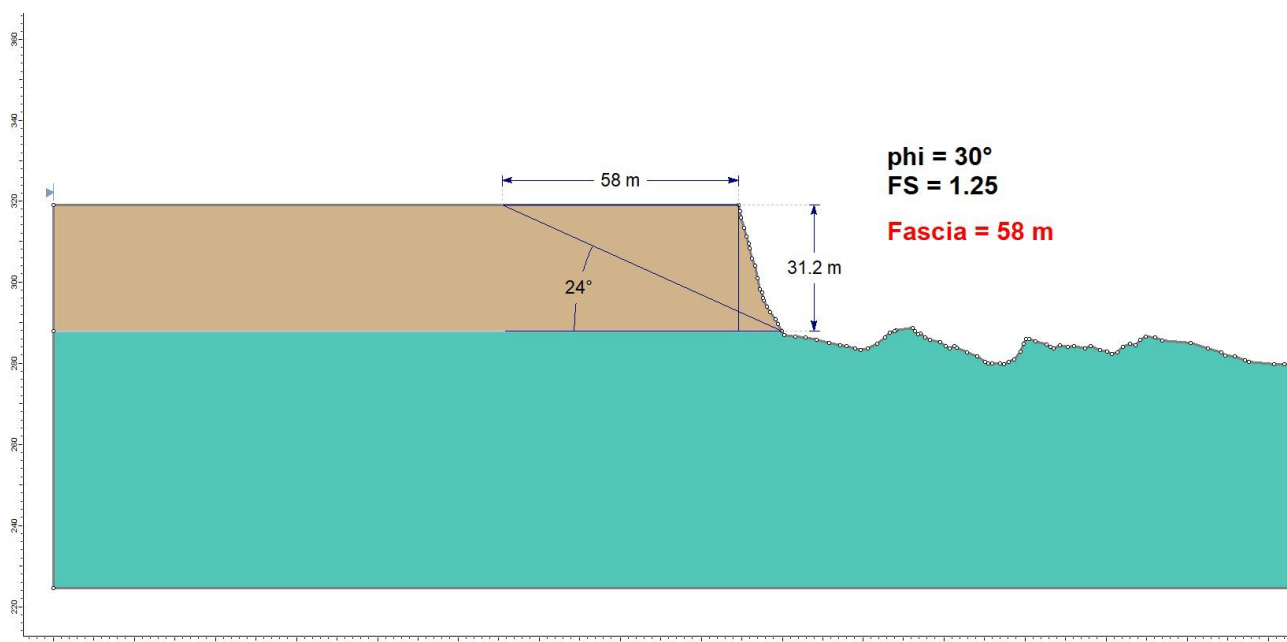


Figura 151 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza $FS=1.25$, da cui risulta una fascia di rispetto di 58 m.

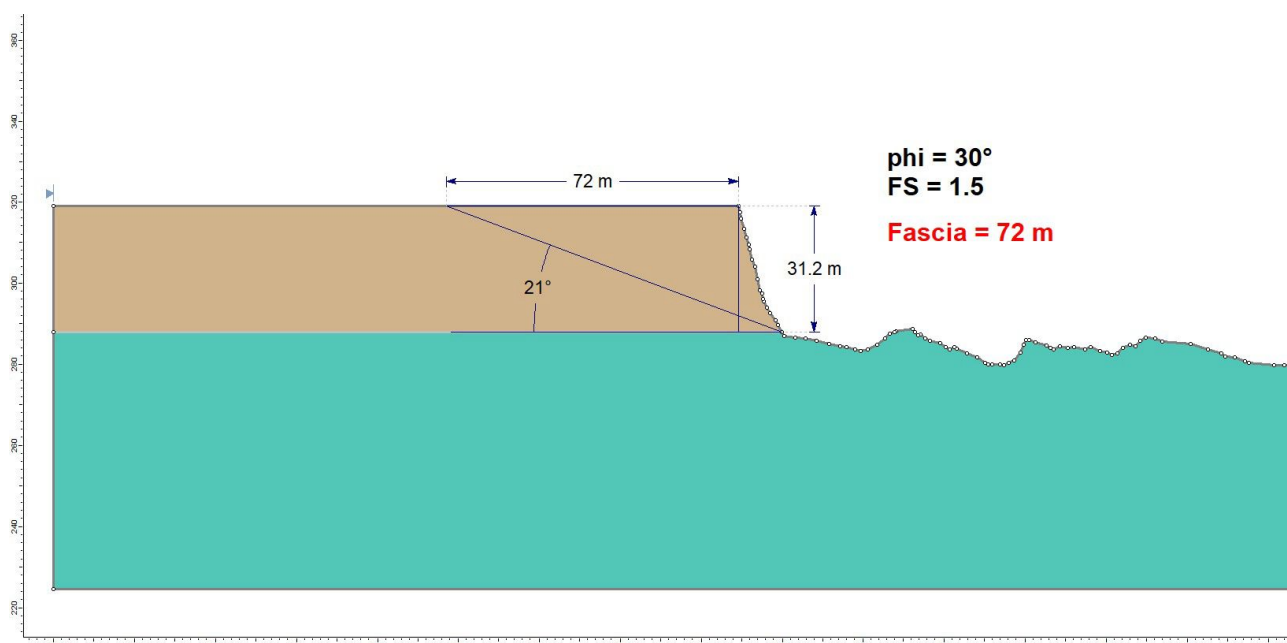


Figura 152 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza $FS=1.5$, da cui risulta una fascia di rispetto di 72 m.

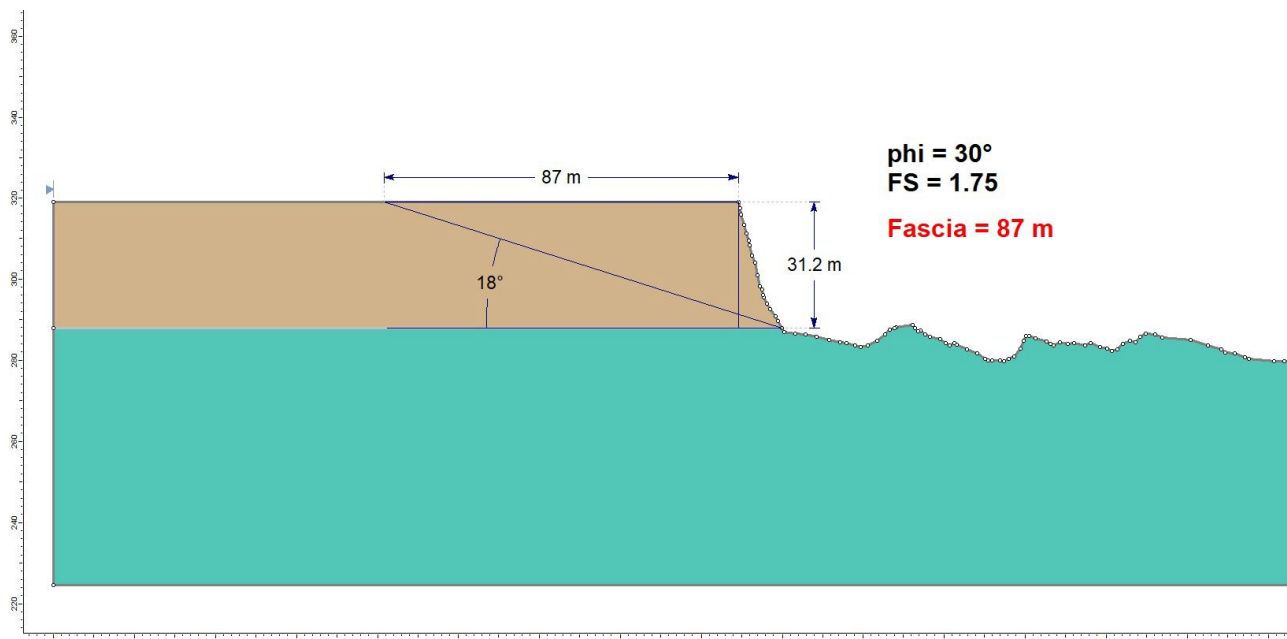


Figura 153 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza $FS=1.75$, da cui risulta una fascia di rispetto di 87 m.

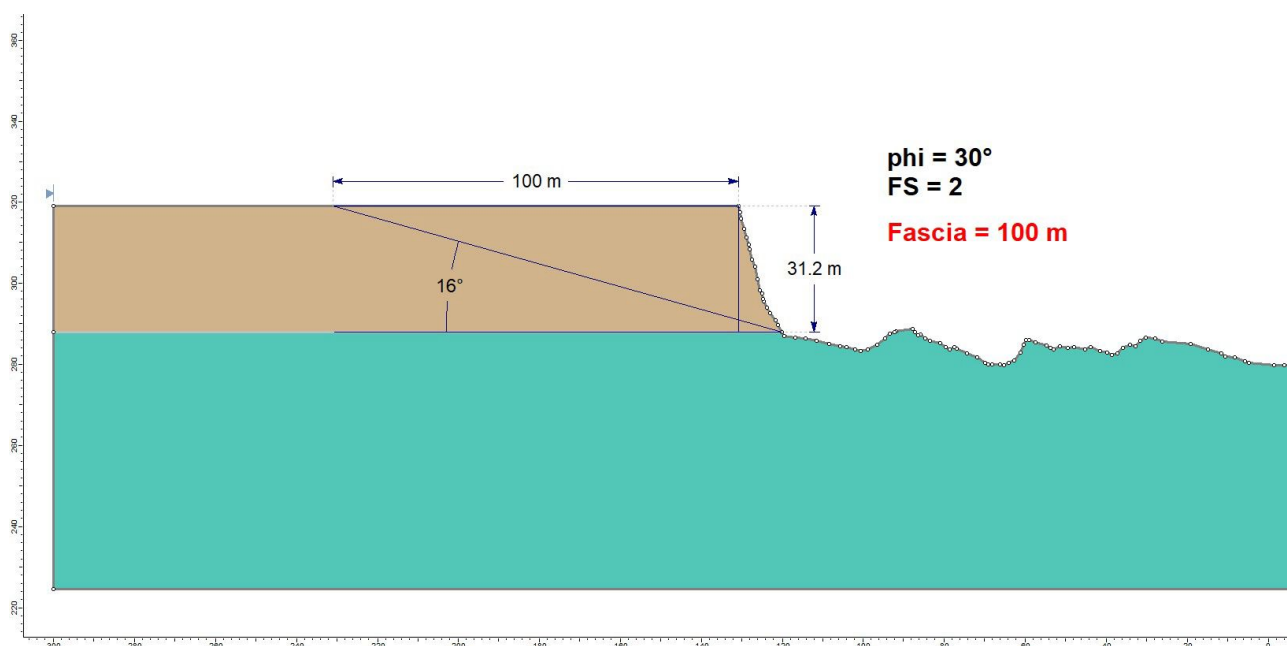


Figura 154 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza $FS=2$, da cui risulta una fascia di rispetto di 100 m.

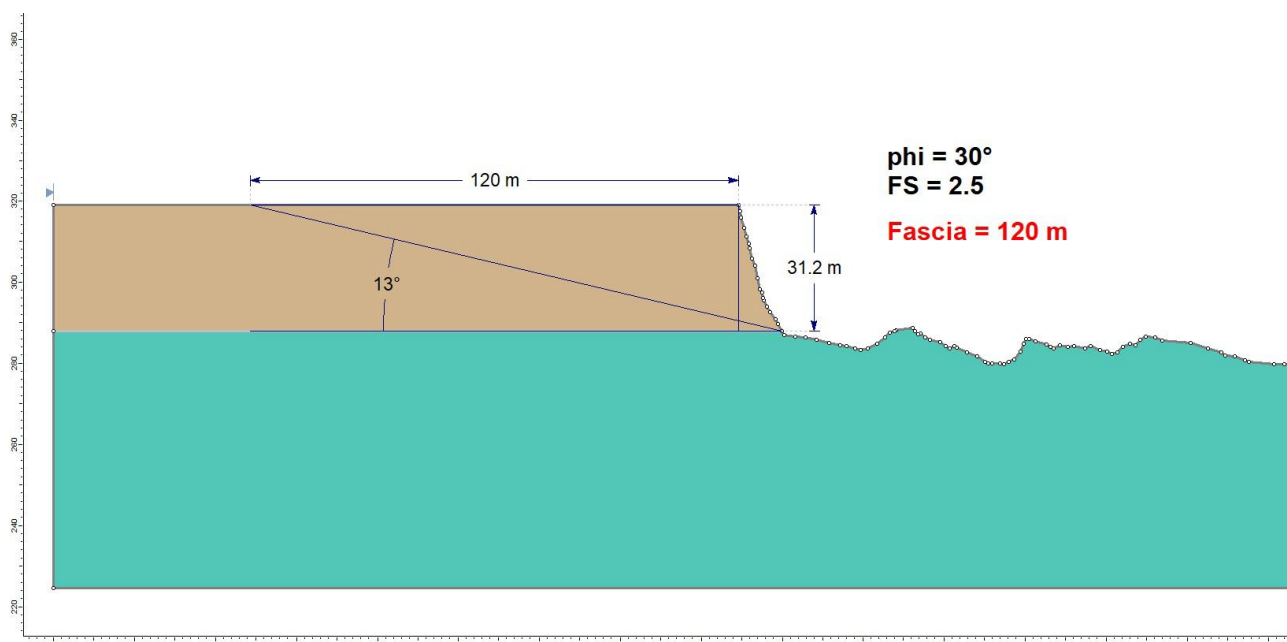


Figura 155 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza $FS=2.5$, da cui risulta una fascia di rispetto di 120 m.

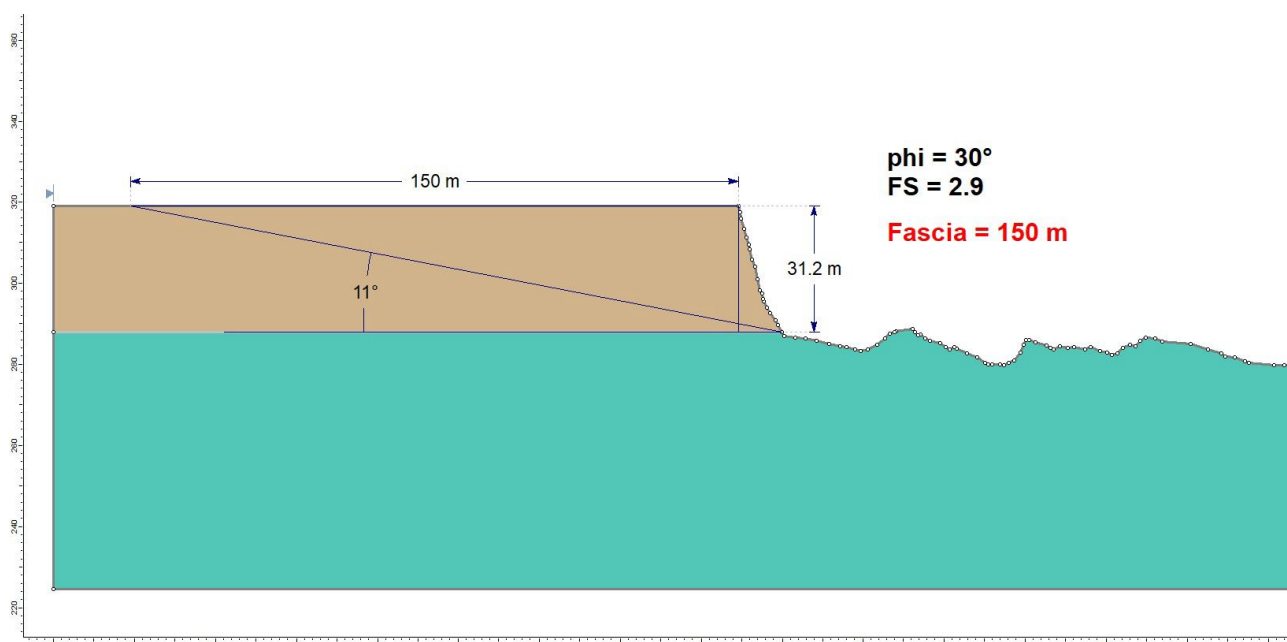


Figura 156 - Stima dell'arretramento della parete principale in corrispondenza del profilo analizzato considerando un Fattore di Sicurezza $FS=2.9$, da cui risulta una fascia di rispetto di 150 m.

Le relazioni fra la geometria pre-frana e i modelli digitali realizzati il 25 e il 31 gennaio sono illustrate nella Figura 157 e nella Figura 158, che mostrano i rapporti geometrici fra la porzione di parete oggetto del distacco principale (profilo e superficie verde) e la successiva evoluzione che comporta erosione e arretramento del versante con conseguente accumulo al piede.

In Figura 159 è riportato il tasso di arretramento del ciglio della frana dal 25 gennaio alla data odierna.

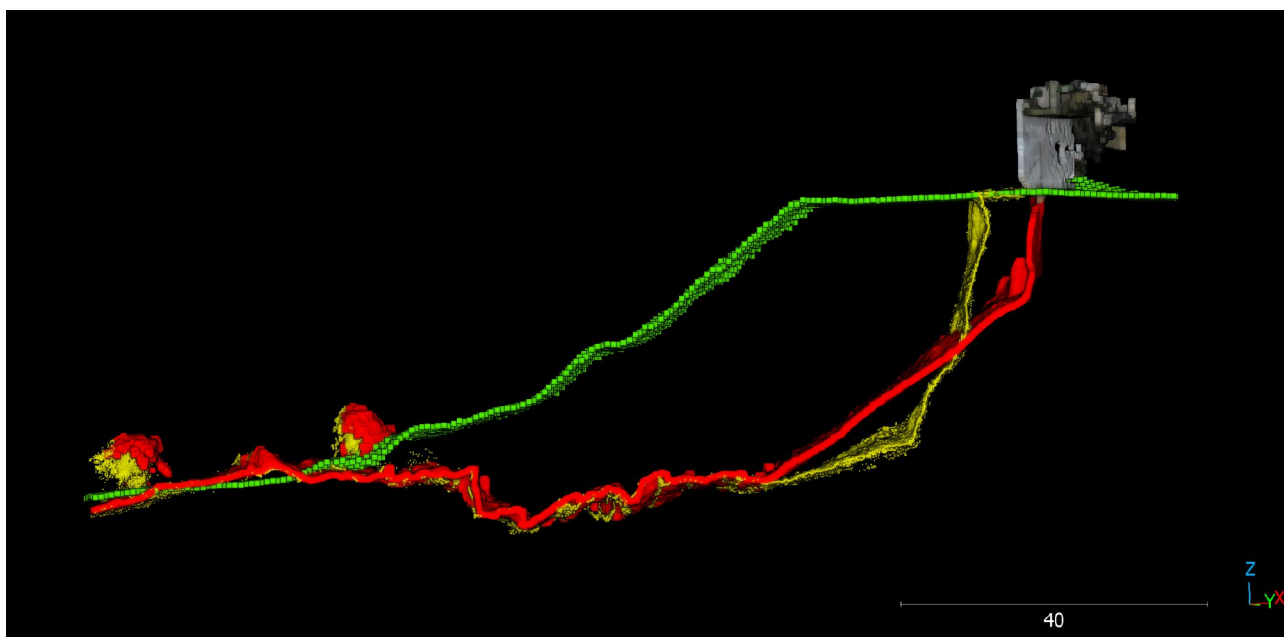


Figura 157 - Confronto nell'area del quartiere Sante Croci fra i profili pre-frana (linea verde da DTM MASE), situazione al 25 gennaio (linea gialla, da modello digitale CPC-UNIFI) e situazione al 31 gennaio (linea rossa da rilievo aerofotogrammetrico realizzato dal Comune di Niscemi).

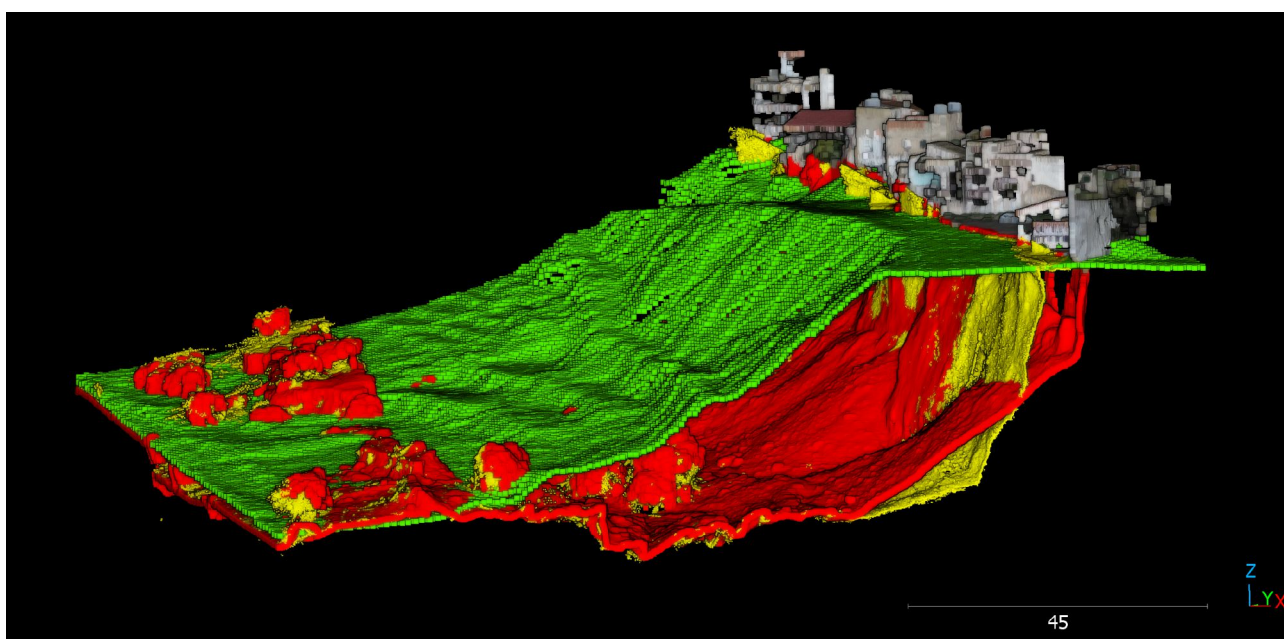


Figura 158 - Confronto nell'area del quartiere Sante Croci fra i modelli pre-frana (superficie verde da DTM MASE), situazione al 25 gennaio (superficie gialla, da modello digitale CPC-UNIFI) e situazione al 31 gennaio (superficie rossa da rilievo aerofotogrammetrico realizzato dal Comune di Niscemi).



Figura 159 - Stima del tasso di arretramento (in rosso in metri) del ciglio di frana (per gentile concessione del Prof. Francesco Castelli).

La fascia di interdizione fissata con ordinanza comunale nell'immediatezza dell'evento, estesa 150 m dalla scarpata di frana verso l'interno dell'abitato, corrisponde a un fattore di sicurezza molto elevato ($FS=2.9$).

Con tutte le precauzioni adottate nel modello, si ritiene di poter ragionevolmente adottare un fattore di sicurezza $FS=1,5$, che comunque risulta superiore al valore $FS=1,25$ previsto dalla vigente normativa per la componente attritiva della resistenza al taglio dei terreni (Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 17 gennaio 2018).

Nella Figura 160 è rappresentata la fascia di arretramento per $FS=1,5$ estrapolando lo schema di calcolo geometrico sopra illustrato a tutta la lunghezza della scarpata che delimita la frana centrale a ridosso del centro abitato.

A tal fine il ciglio della scarpata è stato discretizzato in tanti punti e per ognuno di essi si è calcolato il dislivello fra il ciglio stesso e il piede; laddove il piede della scarpata è ricoperto da cono detritico (ormai quasi ovunque), è stato trovato il punto di intersezione fra la pendenza della scarpata (sempre assunta cautelativamente pari a 70°) e il piano orizzontale che si origina dal piede del cono detritico.

Dal piede della scarpata, reale o ricostruito, è stata di conseguenza calcolata punto per punto la distanza di arretramento del ciglio della scarpata corrispondente a un angolo di 21° (cioè $\tan\phi'/1.5$). La distanza di arretramento stimata in corrispondenza degli edifici è generalmente compresa fra 50 e 70 m, con un valore massimo pari a circa 83 m.

Tenuto conto che il ciglio della scarpata ha registrato un ulteriore arretramento di alcuni metri rispetto all'ultimo rilievo fotogrammetrico utilizzato per le analisi, si raccomanda, in via prudenziale, di prevedere una **fascia di interdizione nel centro abitato non inferiore a 100 m dal ciglio stesso**, con possibilità di aggiornamento sulla base dei risultati del monitoraggio e delle indagini geognostiche.

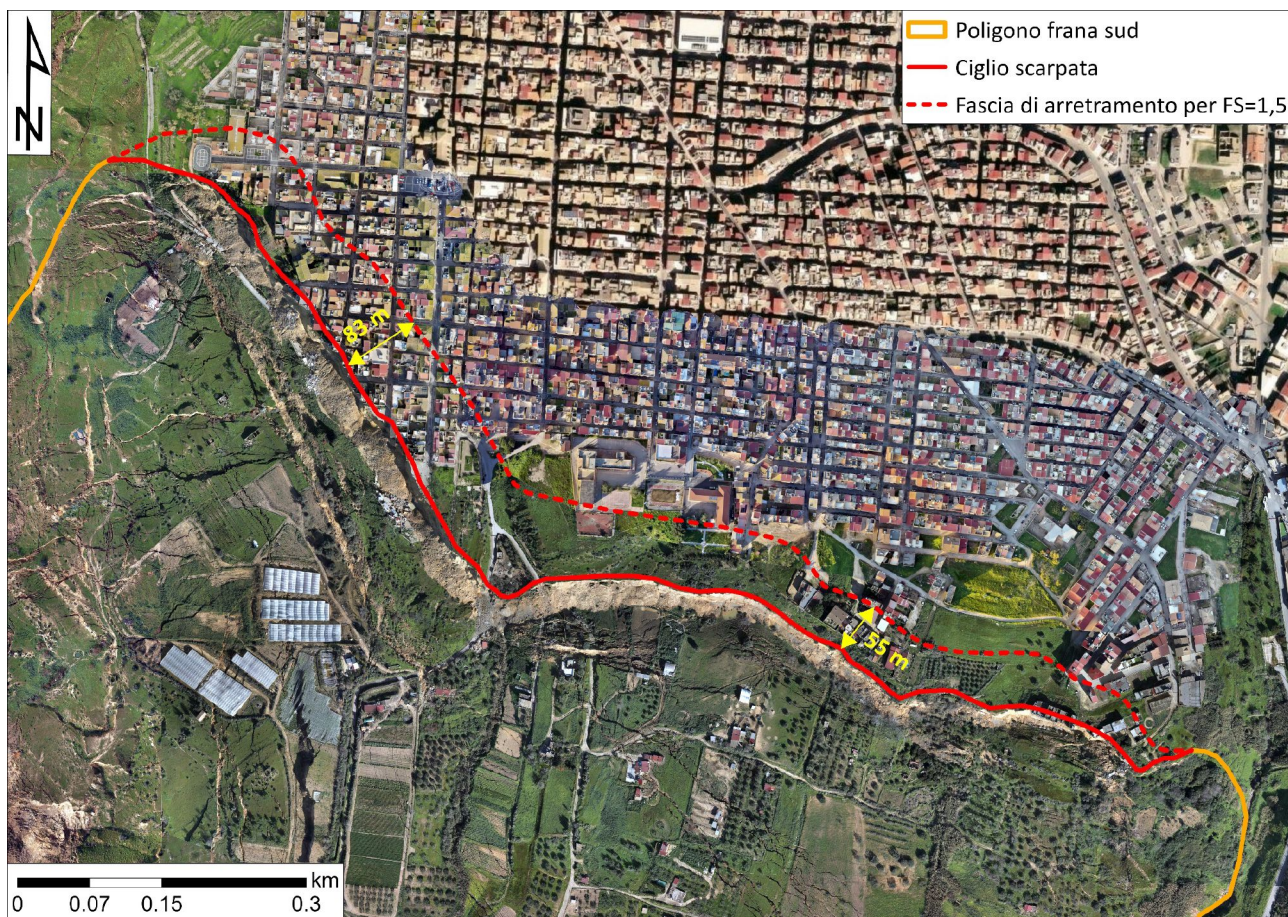


Figura 160 - Distanza di arretramento della scarpata della frana centrale considerando un Fattore di Sicurezza $FS=1.5$.

8.3 Monitoraggio dei movimenti nella fascia di interdizione

Come evidenziato dall'analisi interferometrica post-evento di tutte le immagini satellitari acquisite (Capella Space, Sentinel-1, COSMO-SkyMed, PlanetScope), il centro abitato di Niscemi e la fascia di 150 m non risultano affetti da movimenti apprezzabili (sezioni 4.5 e 5.5).

Tale osservazione è confermata anche dai sensori GNSS installati dall'INGV all'interno della fascia di interdizione che non mostrano spostamenti significativi e con direzione coerente (Figura 161 e Figura 162).

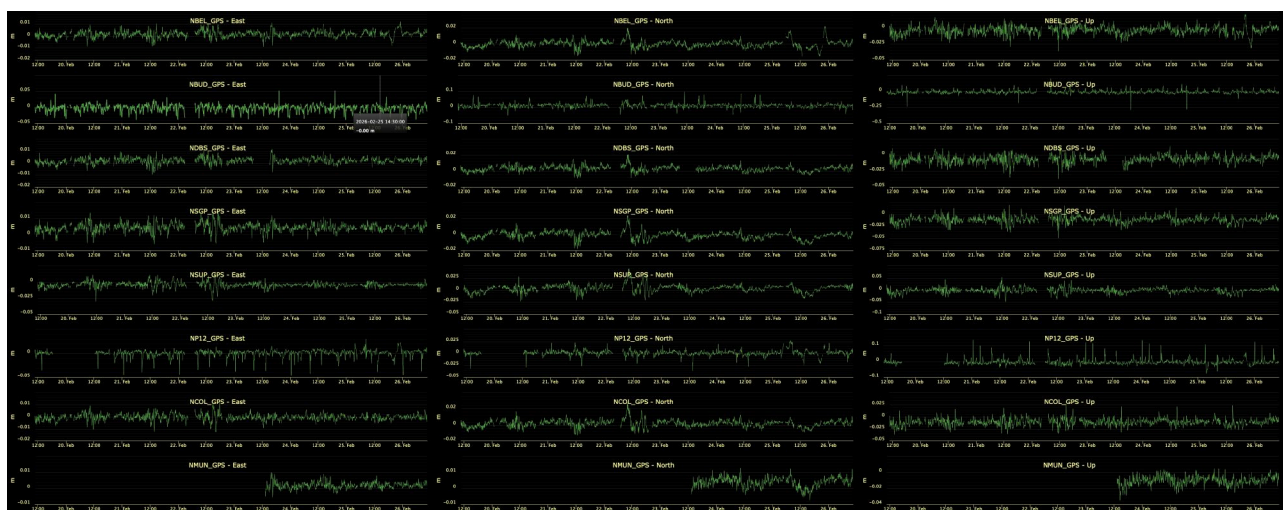


Figura 161 - Serie temporali delle componenti di spostamento delle stazioni di monitoraggio GNSS dell'INGV.

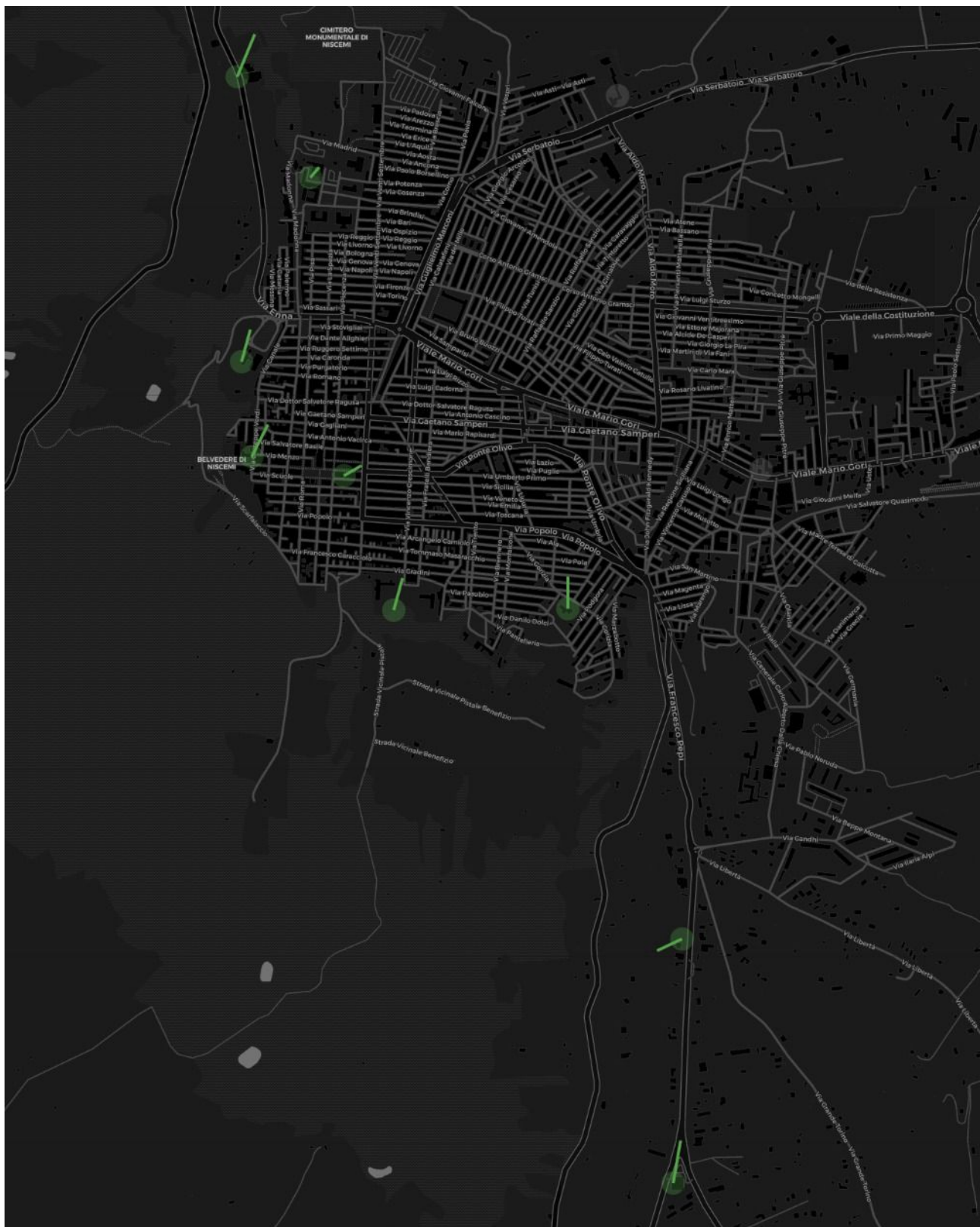


Figura 162 - Ubicazione planimetrica delle stazioni di monitoraggio GNSS dell'INGV con vettori spostamento.

9 Interventi di riduzione e monitoraggio del rischio residuo

Nel quadro evolutivo delineato nel presente rapporto, l'evento del 2026 si configura come una nuova fase di riattivazione, con contestuale ampliamento areale, di un sistema franoso complesso e a carattere persistente.

L'attività del dissesto risulta ampiamente documentata in ambito storico e geomorfologico e ha già manifestato fasi di significativa riattivazione, tra cui quella del 1997, a sua volta riconducibile alla riattivazione di un movimento gravitativo preesistente, attestato almeno a partire dalla fine del XVIII secolo.

In tale prospettiva, l'evento attuale non rappresenta un fenomeno isolato, bensì un'evoluzione coerente nell'ambito della dinamica di lungo periodo del versante. Ne consegue che le valutazioni e i criteri di intervento formulati dal Comitato Tecnico Scientifico in occasione della riattivazione del 1997 (Castiglione *et al.*, 2000) mantengono sostanziale validità concettuale e metodologica.

Tali considerazioni vengono pertanto riprese nel presente rapporto e ricalibrate alla luce delle nuove evidenze morfologiche, geotecniche e idrogeologiche emerse nel contesto attuale.

In totale accordo con le conclusioni di Castiglione *et al.* (2000) si deve preliminarmente riconoscere che le dimensioni, la complessità morfologica e la natura geologica del complesso franoso di Niscemi confermano, anche alla luce delle più recenti evidenze di campo e delle indagini in corso, l'impossibilità di conseguire una stabilizzazione definitiva dell'intero sistema di versante mediante interventi strutturali estensivi.

Tale conclusione non deriva esclusivamente da valutazioni di natura economica o di rapporto costi-benefici, ma soprattutto da considerazioni tecniche e geomeccaniche relative:

- alla scala del fenomeno, che coinvolge volumi molto estesi e superfici di scivolamento profonde;
- alla presenza di materiali con marcato contrasto meccanico e idrogeologico, in particolare sabbie poco cementate sovrastanti argille e limi a bassa permeabilità;
- alla dinamica regressiva del fenomeno, con arretramento della scarpata e continua riorganizzazione morfologica, che rende incerti gli effetti a lungo termine di eventuali interventi di stabilizzazione puntuale;
- al ruolo determinante dei processi idrologici e geomorfologici attivi, in particolare l'erosione al piede dei versanti e l'infiltrazione diffusa delle acque;
- al controllo tettonico e all'influenza di processi deformativi profondi, ancora poco investigati;
- all'influenza crescente degli eventi meteorologici intensi, che possono determinare rapide variazioni delle condizioni di stabilità.

La gestione della criticità idrogeologica attualmente in atto sui versanti occidentale e meridionale di Niscemi impone quindi un approccio graduale, differenziato e adattivo, fondato sulla distinzione tra differenti scenari evolutivi e di rischio residuo.

9.1 Scenario di arretramento della scarpata di neoformazione

Un primo scenario riguarda l'arretramento progressivo della scarpata formatasi a seguito della fase parossistica del movimento. Si tratta di un processo in parte inevitabile e naturale, mediante il quale il versante tende a ristabilire un nuovo profilo di equilibrio.

In questo caso, gli interventi non possono essere orientati alla "ricostruzione" della morfologia preesistente, ma devono accompagnare l'evoluzione del pendio attraverso:

- opere di riprofilatura ove tecnicamente possibile;
- regimazione delle acque superficiali;
- protezione dall'erosione diffusa.

Nel breve periodo, la priorità assoluta rimane la salvaguardia della pubblica incolumità in relazione alla nuova morfologia determinatasi.

Si ritiene pertanto necessario:

- mantenere attive le ordinanze di inagibilità per gli edifici situati in prossimità del ciglio della scarpata;
- confermare una fascia di interdizione di almeno 100 m dal margine della scarpata (corrispondente a fattori di sicurezza superiori a 1,5), con possibilità di aggiornamento sulla base dei risultati del monitoraggio e delle indagini geognostiche;
- prevedere la delocalizzazione degli edifici ubicati entro una fascia di 50 m dal margine della scarpata (corrispondente a fattori di sicurezza minori di 1,25).

Per quanto riguarda la viabilità, si raccomanda:

- la conferma dell'interdizione dei tratti stradali interferenti con il corpo di frana, con particolare riferimento alla SP10 e alla SP12;
- il mantenimento di un monitoraggio continuo della SP11, data la sua prossimità alle aree in movimento, con controllo dello stato di fessurazione dei terreni e delle strutture a valle della carreggiata, anche mediante strumentazione automatica;
- la pianificazione e comunicazione tempestiva di percorsi alternativi sicuri, al fine di garantire l'accessibilità al centro abitato e la continuità dei servizi essenziali evitando il transito in prossimità di aree potenzialmente instabili.

9.2 Scenario di riattivazione del fenomeno profondo

Il secondo scenario riguarda l'eventuale riattivazione del movimento profondo, con mobilitazione dell'intera massa lungo superfici di scivolamento già impostate su livelli a resistenza residua.

L'evoluzione recente della frana ha consentito l'osservazione diretta del contatto tra sabbie e argille sottostanti. Tale contatto evidenzia un marcato contrasto di permeabilità che, unitamente all'assetto debolmente a franapoggio della stratificazione, favorisce fenomeni di filtrazione diffusa e localmente concentrata.

In diversi punti sono state osservate portate significative anche a distanza di giorni dalla fase parossistica, con fenomeni di sifonamento ed erosione di materiale. È importante sottolineare che, prima dell'esposizione del contatto litologico, tali acque si riversavano direttamente nella massa in frana, emergendo solo in minima parte durante eventi pluviometrici intensi.

Le evidenze pluviometriche indicano inoltre una risposta relativamente rapida del sistema (ordine di circa tre giorni) agli eventi piovosi intensi. Tali tempi risultano difficilmente compatibili con la sola permeabilità delle argille, suggerendo un controllo strutturale del dissesto: fratture e discontinuità agiscono infatti come vie preferenziali di infiltrazione verso i livelli profondi, contribuendo all'aumento delle pressioni interstiziali lungo le superfici di scivolamento.

Prima di intervenire direttamente sul corpo di frana, è pertanto necessario:

- comprendere in modo approfondito il regime idrogeologico;
- individuare le cause d'innescio e i percorsi preferenziali dell'acqua;
- attendere una significativa riduzione o stabilizzazione delle velocità di movimento;
- operare esclusivamente in condizioni di sicurezza, supportate da monitoraggio continuo.

9.3 Strategie di mitigazione nel medio periodo

Nel medio periodo, la strategia di mitigazione dovrà concentrarsi prioritariamente sui principali processi che contribuiscono all'evoluzione della frana, con i seguenti obiettivi:

- ridurre l'infiltrazione proveniente da monte;
- intercettare i flussi idrici prima che penetrino nella massa destabilizzata;

- captare e canalizzare le emergenze nei punti a maggiore portata, una volta stabilizzata la scarpata sommitale;
- regimare le acque meteoriche e gli impluvi;
- proteggere il piede del versante dall'erosione;
- intervenire sulla stabilizzazione e, ove necessario, sull'impermeabilizzazione di aree critiche, quali l'alveo del torrente Benefizio.

Tali obiettivi potranno essere perseguiti attraverso un insieme coordinato di interventi di natura idraulica, idrogeologica e geotecnica, finalizzati al controllo delle pressioni interstiziali e alla riduzione dei processi erosivi, mediante:

- la riduzione dell'erosione al piede dei versanti con opere di regimazione idraulica nei principali impluvi, quali briglie selettive, opere dissipative e interventi di stabilizzazione delle sponde;
- la regimazione e l'allontanamento controllato delle acque superficiali provenienti dall'abitato, attraverso il miglioramento e la manutenzione della rete di drenaggio urbano e la separazione efficace delle acque meteoriche e reflue dal corpo di frana;
- la riduzione dell'infiltrazione diffusa mediante la manutenzione delle superfici, la gestione delle fratture e delle depressioni e la protezione dei versanti;
- il miglioramento delle condizioni idrogeologiche mediante sistemi di drenaggio superficiale e profondo, da progettare sulla base di un'adeguata caratterizzazione geologica e geotecnica;
- la protezione dei versanti mediante interventi di ingegneria naturalistica e la gestione della copertura vegetale, al fine di ridurre l'erosione superficiale.

Tali interventi non sono in grado di stabilizzare la frana, ma contribuiscono a rallentarne l'evoluzione e a ridurre la probabilità di riattivazioni e accelerazioni del movimento.

9.4 Strategie di mitigazione nel lungo periodo

È in corso una campagna di indagini finalizzata a definire la profondità e le caratteristiche dei livelli di scivolamento basali. Solo a valle di tale caratterizzazione potrà essere valutata l'eventuale fattibilità di opere strutturali di consolidamento della scarpata e del versante.

Considerata l'estensione planimetrica del dissesto, la profondità delle superfici di scivolamento e la complessità dei meccanismi di instabilità, una stabilizzazione efficace e durevole fondata esclusivamente su opere strutturali - quali grandi palificate, muri di sostegno o sistemi di paratie tirantate - appare tecnicamente complessa, economicamente gravosa e, in prospettiva, di limitata efficacia.

Anche qualora tali interventi risultassero localmente realizzabili, essi inciderebbero prevalentemente sulle porzioni superficiali del versante, senza modificare in modo sostanziale i meccanismi profondi dell'instabilità.

Come già rilevato da Castiglione *et al.* (2000), analoghe criticità si riscontrano nel caso di interventi strutturali estensivi, quali il completo ritombamento delle principali incisioni (in particolare quella del Torrente Benefizio), la gradonatura generalizzata dei versanti o la stabilizzazione delle scarpate di distacco mediante opere di sostegno continue.

Tali soluzioni presenterebbero ancora oggi rilevanti problematiche operative e un'elevata incertezza in termini di risultati attesi, a causa delle complesse condizioni geomorfologiche e geotecniche del sito.

Alla luce di tali considerazioni, un approccio fondato esclusivamente su interventi strutturali massivi non appare idoneo a garantire una stabilizzazione globale del sistema franoso, rendendo necessario privilegiare strategie integrate di regimazione idraulica, controllo delle infiltrazioni, drenaggio profondo, protezione dall'erosione al piede del versante e gestione del rischio.

9.5 Gestione adattiva del rischio

Il complesso franoso presenta un comportamento evolutivo di lungo periodo, su scale pluridecennali o secolari, con possibili riattivazioni locali e un potenziale arretramento progressivo del ciglio.

Le conoscenze attuali indicano un sistema dinamico caratterizzato da fasi lente e persistenti, intervallate da accelerazioni legate a eventi meteorologici intensi o a condizioni idrologiche sfavorevoli, in particolare lungo le incisioni e le scarpate a maggiore acclività.

Non è possibile formulare previsioni puntuali né sui tempi né sull'entità delle future evoluzioni. Tuttavia, è ragionevole ritenere che il fenomeno continuerà a manifestarsi nel tempo, secondo modalità coerenti con la sua natura strutturalmente controllata e con la sensibilità dei terreni coinvolti alle variazioni delle pressioni interstiziali.

Alla luce delle considerazioni esposte, l'approccio più appropriato non consiste nella stabilizzazione integrale del fenomeno, bensì nella gestione del rischio entro livelli accettabili, secondo il principio della convivenza controllata con la frana.

Tale impostazione prevede l'aggiornamento continuo della zonazione della pericolosità, attraverso l'integrazione sistematica di rilievi geomorfologici, dati geotecnici e tecniche di monitoraggio satellitare e strumentale.

Sul piano della pianificazione territoriale, l'approccio implica il divieto o la forte limitazione di nuove edificazioni nelle aree a pericolosità elevata e molto elevata, il controllo rigoroso dell'uso del suolo e la delocalizzazione progressiva di edifici e infrastrutture esposti a rischio significativo, in particolare nei settori prossimi al ciglio della frana e lungo le principali superfici di instabilità. Nelle aree limitrofe, la pianificazione dovrà privilegiare destinazioni compatibili con la dinamica evolutiva del versante, come aree verdi o spazi non edificabili.

Completano il quadro la riduzione progressiva della vulnerabilità, una pianificazione coerente con l'evoluzione del fenomeno e una gestione strutturata del rischio, supportata da un adeguato piano di protezione civile e da una comunicazione trasparente con la popolazione.

Questo orientamento risponde a un principio oggi ampiamente condiviso nella gestione dei grandi movimenti franosi: non l'eliminazione del fenomeno, ma la riduzione dell'esposizione e l'incremento della resilienza del territorio.

9.6 Monitoraggio e sistemi di allerta

Elemento imprescindibile della strategia di gestione adattiva del rischio è il monitoraggio sistematico, che deve integrare:

- osservazioni geomorfologiche e idrogeologiche periodiche;
- strumentazione in sito (piezometri, inclinometri, reti GNSS e sensori accelerometrici);
- misure idro-pluviometriche;
- tecniche di telerilevamento satellitare, in particolare interferometria radar (InSAR).

L'integrazione tra dati satellitari e misure a terra consente oggi una capacità di analisi e interpretazione significativamente più avanzata rispetto al passato, costituendo la base tecnica per eventuali sistemi di allerta precoce.

Il monitoraggio continuo permette altresì di:

- individuare tempestivamente eventuali accelerazioni dei movimenti;
- supportare le decisioni operative delle amministrazioni competenti;
- valutare l'efficacia degli interventi realizzati;
- contribuire al progressivo miglioramento della comprensione dei meccanismi evolutivi del fenomeno.

I dati acquisiti devono inoltre alimentare l'aggiornamento periodico delle fasce di rispetto, la revisione degli strumenti normativi e la pianificazione degli interventi di mitigazione, in un'ottica di adattamento dinamico alla naturale evoluzione del versante.

10 Conclusioni

Il presente rapporto tecnico-scientifico ha analizzato in modo multidisciplinare i complessi fenomeni di instabilità gravitativa che hanno interessato il territorio di Niscemi nel mese di gennaio 2026. L'indagine, condotta attraverso il coordinamento di diverse metodologie d'analisi - dalla geomorfologia classica al telerilevamento avanzato, fino alla modellazione geomeccanica - ha permesso di delineare un quadro conoscitivo coerente e dettagliato dei processi in atto.

La frana di Niscemi rappresenta la riattivazione e l'ampliamento di un sistema franoso profondo noto e storicamente documentato, che interessa i margini del terrazzo su cui sorge l'abitato. L'evento del 16 gennaio, seguito da un secondo evento il 25-26 gennaio 2026, si inserisce in una dinamica di instabilità di lungo periodo, controllata dalla stratigrafia, dall'assetto idrogeologico e dai processi di erosione delle acque incanalate.

Inquadramento geologico e geomorfologico

L'inquadramento geologico e geomorfologico ha evidenziato come l'abitato di Niscemi insista su una successione sabbioso-arenacea plio-pleistocenica permeabile, sovrastante livelli limoso-argillosi e argille marnose plioceniche a comportamento meccanico più debole e sostanzialmente impermeabili.

Tale assetto determina condizioni favorevoli alla concentrazione delle pressioni interstiziali lungo superfici di contatto litologico, costituendo un fattore predisponente primario all'attivazione di superfici di scivolamento profonde.

L'assetto monoclinale con lieve immersione verso SSE, la presenza di scarpate morfologiche nette lungo i margini occidentale e meridionale del pianoro e il controllo strutturale esercitato dal fronte della Falda di Gela configurano un sistema morfostrutturale intrinsecamente predisposto a cinematismi gravitativi di grande scala.

Frane e deformazioni gravitative antecedenti

La ricostruzione storica dei dissesti, con particolare riferimento agli eventi del 1790 e del 1997, ha confermato il carattere policiclico del fenomeno e la sostanziale coincidenza geometrica tra le aree mobilitate nei diversi episodi.

L'evento del 1790, caratterizzato da movimenti di eccezionale entità e da manifestazioni di vulcanismo sedimentario, e quello del 1997, configuratosi come riattivazione di un corpo di frana profondo con cinematica lenta e retrogressiva, costituiscono precedenti diretti dell'evento del 2026. Quest'ultimo si inserisce pertanto in un'evoluzione pluridecennale e plurisecolare del versante, con progressive fasi di alleggerimento al piede, riorganizzazione delle superfici di scivolamento e arretramento dei coronamenti.

Le frane del gennaio 2026

Dall'analisi dei dati topografici aggiornati è stato possibile individuare tre corpi di frana distinti e cinematicamente indipendenti, seppur coalescenti nel loro sviluppo complessivo:

- **Frana Nord:** interessata dalla prima fase parossistica del 15-16 gennaio, caratterizzata da spostamenti di oltre 12 m diretti prevalentemente verso ovest, guidata dall'erosione del reticolo idrografico minore, ha determinato il collasso della SP 12;
- **Frana Centrale:** rappresenta il corpo di frana principale coinvolto nell'evento del 25-26 gennaio, caratterizzata da spostamenti di oltre 50 m diretti prevalentemente verso sud-ovest, bordata a sud-est dal T. Benefizio in forte incisione, ha generato la grande scarpata che lambisce il margine urbano;
- **Frana Meridionale:** formatasi in rapida successione dopo la frana centrale nell'evento del 25-26 gennaio, separata dalla frana dal T. Benefizio, ha manifestato spostamenti di oltre 7 m in direzione W-SW, ha causato la parziale distruzione della SP10.

Dal punto di vista cinematico il fenomeno principale è riconducibile a una frana di scivolamento composto (*compound slide* secondo la classificazione di Hutchinson, 1988) a prevalente componente traslativa, con sviluppo retrogressivo e articolazione in più settori distinti, caratterizzati da differenti direzioni e magnitudo di spostamento.

Le analisi morfologiche e i profili topografici pre- e post-evento evidenziano la prevalenza di movimenti pseudo-rigidi a dominante traslativa, con formazione di strutture tipo *Horst* e *Graben* nella porzione sommitale e sovrascorrimento al piede. La modellazione numerica agli elementi finiti, basata sui parametri geotecnici disponibili, ha confermato la coerenza del modello concettuale di scivolamento composto lungo una superficie listrica con orizzonte basale a bassa inclinazione in condizioni prossime a quelle residue.

Gli eventi del gennaio 2026 hanno determinato nel loro complesso un fronte complessivo di instabilità di circa 4,7 km lungo il margine dell'abitato.

I parametri morfometrici stimati indicano volumi mobilizzati di oltre 80 milioni di metri cubi, con profondità massime presunte fino a 80 m nella frana centrale. L'angolo di mobilità (*Fahrböschung*) pari a circa 6,5° testimonia un'elevata mobilità del sistema, compatibile con condizioni di ridotta resistenza residua lungo la superficie basale e possibili fenomeni di liquefazione statica o di riduzione drastica della resistenza al taglio.

Cause predisponenti e fattori di innesco

L'analisi delle cause predisponenti e dei fattori di innesco ha messo in evidenza il ruolo determinante dell'assetto litologico e del contrasto di permeabilità tra sabbie e argille, nonché dei processi erosivi lungo il Torrente Benefizio e gli impluvi secondari.

L'erosione al piede ha progressivamente ridotto il confinamento laterale, determinando una ridistribuzione dello stato tensionale e una diminuzione del coefficiente di sicurezza.

Le precipitazioni antecedenti agli eventi, pur non eccezionali in termini assoluti, hanno probabilmente contribuito all'innalzamento delle pressioni interstiziali lungo le superfici di contatto litologico, in un contesto già prossimo alle condizioni di rottura.

La concomitanza di cause geologiche strutturali, idrogeologiche ed erosive configura un meccanismo di innesco multifattoriale, coerente con quanto osservato negli eventi storici precedenti.

Monitoraggio satellitare dei movimenti

L'analisi integrata dei dati satellitari *radar* e ottici ha consentito di delineare un quadro complessivo dell'evoluzione deformativa che ha interessato il territorio comunale di Niscemi in relazione agli eventi franosi di gennaio 2026, distinguendo le fasi pre-evento, co-evento e post-evento.

Le elaborazioni interferometriche multi-temporali (SBAS e SqueeSAR), condotte sui dataset Sentinel-1 e COSMO-SkyMed, indicano che nel periodo antecedente ai dissesti il centro abitato risultava, nel complesso, caratterizzato da condizioni di sostanziale stabilità, con velocità medie generalmente contenute entro la soglia di stabilità adottata (± 2 mm). Diversamente, i versanti posti a valle dell'abitato, in particolare nei settori NW e S, mostravano segnali deformativi pregressi, talora persistenti e con andamento quasi lineare nel tempo, compatibili con movimenti lenti già in atto negli anni precedenti, chiaramente evidenti almeno già dal 2011.

Le analisi co-evento, basate su DInSAR e *Pixel Offset Tracking* da dati COSMO-SkyMed e SAOCOM, hanno permesso di delimitare e quantificare il campo di deformazione associato alle riattivazioni del 15-16 e 25-26 gennaio 2026, evidenziando cinematismi prevalentemente traslativi, con componenti planari dirette verso ovest e sud e abbassamenti in corrispondenza delle scarpate, coerenti con la dinamica osservata sul terreno. I dati ottici PlanetScope (analisi COSI-Corr) hanno registrato spostamenti parossistici con picchi fino a 37 metri in soli 11 giorni nel settore meridionale (velocità di circa 3,3 m/giorno), confermando l'estrema severità dell'evento.

Le analisi post-evento, sia interferometriche sia ottiche, mostrano la prosecuzione dei movimenti nei settori già interessati dai dissesti ma evidenziano una sostanziale condizione della stabilità nel centro abitato, anche

all'interno della fascia di interdizione di 150 m, seppur con grado di precisione della misura (± 5 mm) inferiore a quello pre-evento. L'acquisizione di nuove immagini post-evento nei prossimi giorni permetterà di migliorare le elaborazioni interferometriche raggiungendo la consueta accuratezza di ± 2 mm. Nella zona sud-est, lungo la SP11, si rilevano lievi movimenti che saranno oggetto di ulteriori valutazioni con le prossime acquisizioni.

L'analisi dei dati Sentinel-1 mediante tecnica Dynamic InSAR nell'area della frana nord mostra condizioni complessivamente stabili nel mese di febbraio, mentre la frana centrale e quella meridionale evidenziano spostamenti residui fino a 25 mm sul versante a valle del quartiere Sante Croci e fino a 10 mm in prossimità delle SP11 e SP10. Tali movimenti interessano prevalentemente aree non urbanizzate e ben al di fuori della fascia di interdizione nel centro abitato.

Indagini geofisiche, caratterizzazione e modellazione geotecnica

Le indagini geofisiche 3D e la caratterizzazione geotecnica hanno fornito un contributo essenziale alla definizione del modello del sottosuolo, evidenziando la geometria delle superfici di contatto, la presenza di livelli a bassa resistenza e le condizioni di saturazione dei terreni argillosi.

L'integrazione di indagini geoelettriche e sismiche (rifrazione, riflessione e onde di superficie) ha permesso in particolare di ricostruire in modo coerente la struttura elettro- e sismo-stratigrafica del sottosuolo.

Il modello di resistività evidenzia un esteso corpo argilloso profondo a bassa resistività, con tetto irregolare, confermato dai sondaggi. La tomografia dei primi arrivi e le sezioni a riflessione individuano un marcato contrasto a 35-40 m, interpretabile come passaggio da sabbie superficiali poco addensate a un livello argilloso-marnoso più rigido.

Le analisi MASW mostrano un incremento progressivo della velocità delle onde di taglio V_s con la profondità, coerente con l'aumento di rigidità dei terreni. La convergenza tra tecniche indipendenti valida il modello integrato, utilizzato come vincolo stratigrafico e geometrico per le simulazioni numeriche.

I dati inclinometrici e piezometrici relativi alla frana del 1997 indicano la rilevanza delle pressioni interstiziali nel controllo della stabilità, confermando la necessità di un monitoraggio accurato delle condizioni idrogeologiche.

La modellazione numerica alle differenze finite (FDM), eseguita con il codice FLAC, ha verificato la coerenza dell'ipotesi di scivolamento composto, mostrando la formazione di strutture a *Graben* nella porzione sommitale e la risalita del piede della frana nel fondovalle.

Arretramento della scarpata e valutazione del rischio residuo

Alla luce degli esiti della modellazione numerica, delle analisi geotecniche, dei dati geognostici disponibili e delle evidenze provenienti dal monitoraggio topografico e satellitare, è stato applicato un modello geometrico di arretramento della scarpata principale finalizzato alla valutazione del rischio residuo per il settore di abitato prospiciente la frana centrale.

Il modello adottato è stato impostato in modo cautelativo, assumendo parametri geotecnici minimi per le sabbie ($\phi'=30^\circ$ e $c'=0$). In particolare, la valutazione è stata condotta assumendo un fattore di sicurezza $FS=1,5$ per la componente attritiva della resistenza al taglio dei terreni, valore significativamente superiore a quello minimo $FS=1,25$ previsto dalla vigente normativa (Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 17 gennaio 2018) per le verifiche agli stati limite ultimi in condizioni statiche.

I risultati mostrano che la distanza di arretramento stimata in corrispondenza della fascia di interdizione risulta generalmente compresa tra 50 e 70 m, con un valore massimo dell'ordine di circa 83 m. Tali valori, già calcolati in condizioni cautelative e con un fattore di sicurezza superiore a quello richiesto dalla normativa, indicano che l'attuale fascia di interdizione pari a 150 m risulta significativamente più ampia rispetto alle esigenze tecnicamente giustificabili sulla base del modello adottato.

Si evidenzia inoltre che, successivamente all'ultimo rilievo fotogrammetrico utilizzato per le analisi, il ciglio della scarpata ha registrato un ulteriore arretramento di alcuni metri. Tale evoluzione è stata considerata in chiave prudenziale nella formulazione della proposta conclusiva.

In base al modello di arretramento impiegato, fondato sui dati geognostici e di monitoraggio finora raccolti e sviluppato secondo ipotesi cautelative e parametri geotecnici ridotti, si ritiene pertanto ragionevole prevedere una fascia di interdizione non inferiore a 100 m dal ciglio attuale della scarpata nel centro abitato. Tale distanza incorpora un margine di sicurezza significativo rispetto alle distanze di arretramento teoricamente stimate e consente di garantire un livello di protezione adeguato del centro abitato in uno scenario di gestione prudenziale del rischio residuo.

L'analisi interferometrica post-evento di tutte le immagini satellitari acquisite (Capella Space, Sentinel-1, COSMO-SkyMed, PlanetScope) non ha mostrato movimenti apprezzabili nella fascia di interdizione, così come confermato anche dai primi dati della rete di monitoraggio installata *in situ* dall'INGV, che non mostrano spostamenti significativi e con direzione coerente

La riduzione della fascia da 150 m a 100 m nel centro abitato appare quindi tecnicamente sostenibile, coerente con le risultanze modellistiche e del monitoraggio, oltreché compatibile con un approccio conservativo.

Interventi di riduzione e monitoraggio del rischio residuo

Allo stato attuale, i risultati ottenuti rappresentano un quadro conoscitivo tecnicamente coerente, ma da considerarsi preliminare, in quanto basato sulle acquisizioni disponibili fino alla data del presente rapporto.

La complessità del fenomeno e la sua evoluzione nel breve termine rendono necessario proseguire con ulteriori acquisizioni satellitari, sia radar sia ottiche, al fine di monitorare in modo sistematico l'eventuale evoluzione dei movimenti, verificare la persistenza o attenuazione delle deformazioni osservate e aggiornare progressivamente il modello interpretativo del dissesto.

Un monitoraggio multi-temporale continuo costituirà pertanto un elemento fondamentale per supportare le successive valutazioni tecniche e le eventuali misure di mitigazione e gestione del rischio.

Il quadro complessivo delineato dai sopralluoghi e dai dati interferometrici satellitari indica che il rischio residuo rimane elevato per la frana nel suo complesso e che il fenomeno è destinato a evolvere ulteriormente.

Pur permanendo un quadro di instabilità evolutiva del sistema franoso, la verifica puntuale effettuata indica che, allo stato attuale delle conoscenze e con le precauzioni adottate, la fascia di interdizione di 100 m dal ciglio della scarpata nel centro abitato garantisce un margine di sicurezza adeguato rispetto agli scenari di arretramento stimati.

Si raccomanda in ogni caso adottare un approccio integrato per la gestione del rischio residuo che combini misure di Protezione Civile, monitoraggio strumentale continuo, delocalizzazioni e interventi di mitigazione strutturale, al fine di ridurre progressivamente l'esposizione al rischio del centro abitato e delle infrastrutture.

In particolare, si raccomanda di:

- potenziare il sistema di monitoraggio *in situ* mediante reti GNSS, inclinometri profondi e piezometri per il controllo delle pressioni neutre;
- realizzare opere di regimazione delle acque superficiali e drenaggi profondi per ridurre i fattori di innesco idraulici;
- eseguire interventi di protezione al piede dei versanti per contrastare l'erosione fluviale, elemento motore della riattivazione del fenomeno;
- mantenere e aggiornare le fasce di rispetto in base all'evoluzione del quadro deformativo monitorato dai sensori satellitari.

La gestione del dissesto di Niscemi si potrà quindi basare su una strategia adattiva che sappia coniugare la sicurezza immediata della popolazione con una pianificazione territoriale di lungo periodo, resiliente rispetto alla naturale dinamica evolutiva di questo versante.

11 Bibliografia

- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., 2002. *Small baseline subset (SBAS) interferometry: a Novel Method for Monitoring Elevation Changes Applied to volcanoes using ERS synthetic aperture Radar Data*. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 40(11), 2375-2383.
- Capilleri P. P., Maugeri M., Raciti E., 2010. *Geotechnical and Seismic Risk Evaluation in Urban Areas*. Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 9
- 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.
- Cruden D.M., Varnes D.J., 1996. *Landslides Types and Processes*. In: "Landslides: Investigation and Mitigation". Transportation Research Board. National Research Council. Special Report 247. National Academy Press, Washington, 3, 36-75.
- Cundall P., 1976. *Explicit finite difference methods in geomechanics*. Proc. 2nd Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, 133-150.
- 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, 1-4 VDE.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A., 2011. *A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR*. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 49, 9, 3460-3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001. *Permanent Scatterers in SAR interferometry*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 39 (1), 8 -20.
- Heim A., 1932. *Der Bergsturz und Menschenleben*. Fretz und Wasmuth Verlag, Zürich, 218 pp.
- Hutchinson J.N., 1988. *General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, July 1988, Lausanne. 1, 3-36.
- Lanari R., Bonano M., Casu F., Luca C.D., 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.
- Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F., Kuras O., Wilkinson P.B., 2013. *Recent development in the direct-current geoelectrical imaging method*. Journal of Applied Geophysics, 95, 135-156.
- 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.
- Marsiano A., 1981. *Niscemi, Geografia Fisica*. EPOS ed. Palermo.
- Masaracchio G., 1790. *Relazione dei vulcani manifestati nelle terre di Niscemi in Sicilia. Lettera al vescovo di Siracusa*. Antologia romana, 50, tom. XVI. Roma (Biblioteca Comunale di Palermo, 30, D.129, 145).
- Maugeri G., 1869. *Ricordo di una convulsione ignivoma avvenuta a Niscemi*. Tipografia Luciano Rizzo.
- Nava S.L., 1792. *Relazione della rivoluzione accaduta in marzo 1790 nelle terre vicine a S. Maria di Niscemi*. E. Bartels, Hamburg, 1-52.

- Pazzi V., Morelli S., Fanti R., 2019. *A review of the advantages and limitations of geophysical investigations in landslide studies*. International Journal of Geophysics. Article ID 2983087.
- Pepe A., Yang Y., Manzo M., Lanari R., 2015. *Improved EMCF-SBAS processing chain based on advanced techniques for the noise-filtering and selection of small baseline multi-look DInSAR interferograms*. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 53(8), 4394-4417.
- Sorriso-Valvo M., 1997 - Relazione sul sopralluogo effettuato a Niscemi (CL) il 16 ottobre 1997, sui luoghi della frana del 12 ottobre 1997. CNR IRPI Rapporto interno.
- Rizzo V., 2004. *Un vasto movimento gravitativo al fronte della falda di Gela; evidenze e problematiche in relazione alla tettonica (Franca di Niscemi, Sicilia Meridionale)*. Bollettino della Società geologica italiana, 123(2), 229-252.
- Rizzo V., Toni G., Fragale F., Rijillo R., 2002. *Modelling of The Deep Gravity-movement of Niscemi (Caltanissetta, Sicily, Italy): The Decisive Role of Tectonic Deformation*. In EGS General Assembly Conference Abstracts, 3689.
- Toni G., Rizzo V., Rijillo R., 2004. *Modelling of the deep gravity-movement of Niscemi (Caltanissetta, Sicily, Italy)*. Acta Naturalia de l'Ateneo Parmense, 40, 19-34.