



COMUNE DI STIO

Provincia di Salerno

MESSA IN SICUREZZA DELL'ABITATO DI GORGA DAL RISCHIO IDROGEOLOGICO

PROGETTO ESECUTIVO

Data: Ottobre 2023	Elabor.	Verif.	Approv.
Riferimenti:	Distinta materiale n°		
Progettisti RTP: Ing. Maria Rosaria Reielli (Capogruppo) Ing. Pasquale Trotta Arch. Leopoldo Lillo Geom. Gennaro Infante Geol. Luigi Lillo	ATTIVITA' DI SUPPORTO SCIENTIFICO CUGRI-CONSORZIO INTER-UNIVERSITARIO PER LA PREVENZIONE E PREVISIONE GRANDI RISCHI UNIVERSITA' DI SALERNO Direttore Prof. Domenico Guida		
Committente: Amministrazione Comunale di Stio	Scala:	Foglio di	
Tavola: Piano di Monitoraggio	Disegno n :		1.9
Documenti di proprietà Comune di Stio	Diritti tutelati a termine di legge		

Piano di Monitoraggio collegato al Progetto degli Interventi di Mitigazione del Rischio della frazione Gorga del comune di Stio (SA)

Finalità e oggetto del Piano di Monitoraggio

Oggetto del seguente piano di monitoraggio è il controllo delle velocità di movimento dei dissesti in atto che interessano l'abitato di Gorga, frazione del Comune di Stio (SA). Il Piano è stato redatto in funzione della verifica di efficacia ed efficienza ex-post degli interventi di mitigazione del rischio idrogeologico integrato da frane ed erosione (Aree di Attenzione). Il Piano di Monitoraggio di seguito descritto completa, integra e si configura quale misure non strutturali di mitigazione e controllo del rischio residuo come previsto dalle vigenti Norme di Attuazione del PSAI e delle Specifiche Tecniche per le Frane di Scorrimento profonde, intermittenti ed a cinematismo intermittente.

Il seguente Piano è stato redatto dai tecnici incaricati per la redazione del Progetto di Mitigazione del Rischio della frazione Gorga, con il supporto tecnico-scientifico del C.U.G.RI., nelle persone del dott. PhD Mario Valiante, ricercatore in Geomorfologia, e del prof. Domenico Guida, ordinario di Geomorfologia, entrambi incardinati nel Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno.

La definizione delle soluzioni progettuali è stata anche condotta attraverso delle autonome indagini di mercato da parte del gruppo di progettazione, sia ai fini tecnologici che economici.

Metodologia e cenni teorici

Le operazioni di monitoraggio, da remoto, saranno effettuate tramite l'utilizzo della tecnica dell'interferometria satellitare. Tale tecnica rientra tra le tecniche di monitoraggio radar. I sistemi radar (acronimo di *RA*dio *DE*tecting *AN*d *RAN*ging) satellitari sono sensori di tipo attivo, ossia inviano un segnale che viene riflesso dalla superficie terrestre e ricevuto dal sensore. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati **in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno che di notte**.

Il principio di funzionamento è il medesimo per tutti i sistemi radar: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica (con determinata lunghezza d'onda e frequenza) che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, scattering). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detection*) e, misurando lo sfasamento tra il segnale emesso e quello ricevuto, valutare la distanza (*ranging*) a cui il bersaglio è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*). La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante, consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*, ovvero la direzione parallela all'orbita del satellite).

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo θ - detto *off-nadir* - rispetto alla verticale) è detta *slant range* (o più semplicemente *range*) oppure LOS (*Line Of Sight*, linea di vista del satellite).

Le immagini radar contengono due tipi di informazione:

- **la fase**, indice della distanza sensore bersaglio;
- **l'ampiezza**, ossia l'ampiezza del segnale riflesso dal terreno.

Ogni cella di un'immagine contiene entrambe le quantità. L'ampiezza individua la parte di campo elettromagnetico incidente riflessa verso il sensore e può essere utilizzata per valutare il cambiamento delle superfici nel tempo (ad esempio la variazione di umidità nei terreni agricoli). La fase rappresenta l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche e viene utilizzata per ricavare, attraverso algoritmi specifici, gli spostamenti del terreno.

I satelliti radar permettono di misurare spostamenti superficiali del terreno con **precisione millimetrica** grazie all'impiego di particolari tecniche di elaborazione dei dati dette "interferometriche". Tra le più recenti e sofisticate, la tecnica SqueeSAR consente di individuare dei particolari bersagli al suolo per i quali è possibile stimare il loro spostamento nel tempo. SqueeSAR (Ferretti et al., 2011) rappresenta l'evoluzione della tecnica PSInSAR (Ferretti et al., 2001; Colesanti et al., 2003), sviluppata e brevettata nel 1999 dal Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva nel 2000 a Tele-Rilevamento Europa (TRE) S.r.l., spin-off del Politecnico. Le tecniche PSInSAR e SqueeSAR rappresentano gli strumenti più efficaci per il monitoraggio da remoto, con accuratezza millimetrica, dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre.

L'interferometria satellitare si basa sulla misura delle variazioni di fase tra due acquisizioni del satellite nello stesso punto. In Figura 1 viene illustrato in maniera schematica questo principio. Il satellite passa su di un punto acquisendo un segnale la cui fase è dipendente dalla distanza sensore-bersaglio in quel dato momento. In caso di movimento del terreno (in questo caso un abbassamento tettonico) la distanza sensore bersaglio aumenta e di conseguenza la fase subisce una variazione misurabile. Questo tipo di elaborazione viene comunemente chiamata interferometria differenziale (acronimo DInSAR).

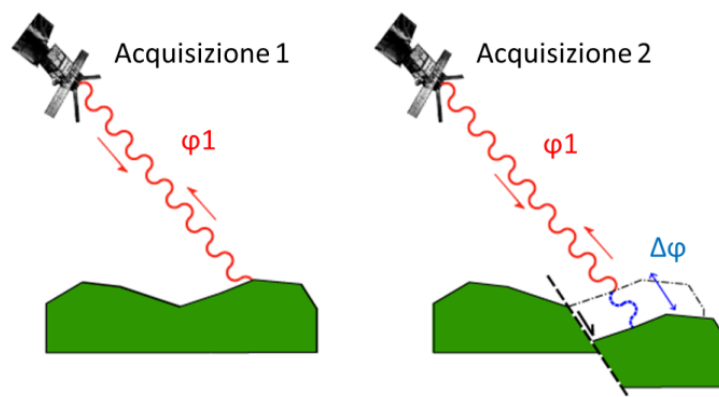


Figura 1 - Principio della differenza di fase nell'acquisizione radar.

L'interferometria differenziale si basa sulla misura di fase tra due diverse acquisizioni sulla stessa area. L'obiettivo della tecnica interferometrica differenziale è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi atmosferici o rumore, ovvero di stimare accuratamente la differenza di fase ($\Delta\phi$) dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra. La tecnica DInSAR permette di valutare le differenze, in termini di spostamento del terreno, intercorse tra due immagini. Il prodotto dell'elaborazione viene chiamato **interferogramma**.

Lo sviluppo, a partire dai primi anni 2000, delle tecniche multi-interferometriche ha 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. 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. Ovviamente, questa capacità è limitata dal numero e dalla distribuzione temporale delle acquisizioni disponibili.

Le tecniche multi-interferometriche si basano sulla definizione in ogni immagine radar dei cosiddetti riflettori permanenti (*Permanent Scatterers* in inglese), 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. Questi punti, essendo praticamente immuni da effetti decorrelazione temporale e spaziale, consentono di seguire gli spostamenti intercorsi tra multiple immagini radar.

Tra le più recenti e sofisticate, la tecnica SqueeSAR consente di individuare dei particolari bersagli al suolo per i quali è possibile stimare il loro spostamento nel tempo. SqueeSAR (Ferretti et al., 2011) rappresenta l'evoluzione della tecnica PSInSAR (Ferretti et al., 2000; 2001; Colesanti et al., 2003), sviluppata e brevettata nel 1999 dal Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva nel 2000 a Tele-Rilevamento Europa (TRE) S.r.l., spin-off del Politecnico. Le tecniche PSInSAR e SqueeSAR rappresentano gli strumenti più efficaci per il monitoraggio da remoto, con accuratezza millimetrica, dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre. La tecnica PSInSAR rappresenta il capostipite di tutte le tecniche multi-interferogramma, vale a dire di quelle tecniche che impiegano lunghe serie temporali di immagini radar satellitari per l'individuazione e la misura di fenomeni deformativi della superficie terrestre.

In particolare, la tecnica si basa sull'osservazione di un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, denominati diffusori permanenti (Permanent Scatterers, PS), che sono praticamente immuni da effetti di decorrelazione temporale e spaziale. Ciò significa che essi mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini radar utilizzate, al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando l'informazione di fase nel tempo. Il segnale di fase è proprio l'elemento che contiene l'informazione relativa alla posizione al suolo e alla distanza del bersaglio dal satellite.

Poiché i segnali utilizzati hanno lunghezze d'onda centimetriche (microonde), spostamenti anche di pochi millimetri inducono degli sfasamenti tra un'onda e la successiva che possono essere rilevati (Figura 2). I PS corrispondono generalmente ad elementi già presenti al suolo, quali strutture di origine antropica (edifici, monumenti, strade, linee ferroviarie, antenne, tralicci, elementi metallici, etc.), oppure elementi naturali (affioramenti rocciosi, accumuli di detrito): ovvero a tutti quegli elementi già presenti al suolo, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche e atmosferiche.

Al contrario, la risposta elettromagnetica della vegetazione, il cui aspetto muta di continuo, cambia anche per brevi intervalli temporali. La Figura 2 mostra una rappresentazione schematica della base teorica della tecnica interferometrica, di un PS e dei disturbi presenti nelle acquisizioni radar (disturbi atmosferici, variazione della componente di riflettività che dà luogo a decorrelazione temporale, variazione della baseline normale che dà luogo a decorrelazione geometrica).

La densità spaziale dei PS risulterà quindi 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 (fino a diverse centinaia di PS/km²), mentre sono pressoché assenti nelle zone vegetate o innevate.

In generale, affinché la tecnica risulti applicabile con successo è necessario disporre di un dataset di almeno 25-30 immagini radar. Maggiore è il numero delle immagini disponibili e l'omogeneità della loro distribuzione temporale, migliori sono i risultati. In dettaglio, mediante l'analisi statistica delle variazioni dei valori di ampiezza e di fase di ciascun pixel dell'area di interesse è possibile individuare i riflettori più stabili.

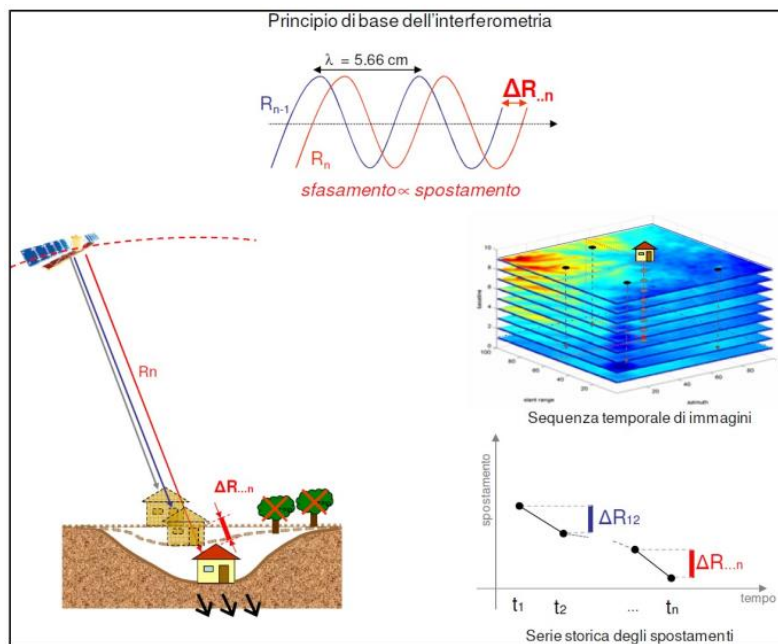


Figura 2 - Principio di funzionamento della tecnica interferometrica, basato sulla misura di variazione di distanze

Per ogni singolo bersaglio (PS) si ricavano la posizione (le sue coordinate geografiche: latitudine, longitudine, quota), il trend medio di deformazione (calcolato in mm/anno come l'interpolazione lineare dello spostamento misurato nell'intero periodo di monitoraggio) e l'intera serie temporale degli spostamenti, fornendo un valore di spostamento per ognuna delle acquisizioni disponibili.

Tutte le misure sono sempre calcolate lungo la congiungente sensore-bersaglio (linea di vista del sensore, LOS), che è inclinata rispetto alla verticale di un angolo (θ) che varia secondo il satellite utilizzato. Inoltre, tutte le misure sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra (reference points), di coordinate note e supposti fermi (su basi geologiche oppure indicati come tali, ad esempio, da misure GPS o di livellazione ottica). Inoltre, tutte le informazioni di movimento fornite dai PS sono relative e non assolute, cioè sono riferite temporalmente alla data di acquisizione della immagine master, usata come misura "zero" (es.: prima acquisizione disponibile nell'arco temporale analizzato).

La particolare combinazione tra il moto del satellite che orbita intorno alla Terra e il movimento di rotazione della Terra stessa, permette al sensore di rilevare la stessa area geografica secondo due differenti geometrie (Figura 3):

- in modalità ascendente, quando il satellite percorre l'orbita da S verso N, e illumina l'area da O verso E;

- in modalità discendente, quando il satellite percorre l'orbita da N verso S, e illumina l'area da E verso O.

Come conseguenza delle diverse geometrie di acquisizione si possono registrare deformazioni di segno opposto (positive oppure negative). Per convenzione si hanno segni positivi per spostamenti in avvicinamento lungo la congiungente sensore-bersaglio e segni negativi per allontanamenti rispetto al sensore. Un moto con componente prevalentemente verticale come la subsidenza determina velocità di deformazione simili in entrambe le geometrie sia come intensità che come segno (i.e., in allontanamento rispetto al satellite in entrambe le geometrie).

Uguualmente, un fenomeno di sollevamento determina velocità di deformazione simili sia come intensità che come segno (anche se in questo caso si avrà un avvicinamento in entrambe le geometrie). Al contrario, un moto con componente orizzontale non trascurabile (come una frana) determina velocità di deformazioni diverse nelle due geometrie, sia come intensità che come segno: in una geometria si hanno velocità negative (ovvero il sensore registra un allontanamento), nell'altra si hanno velocità positive (ovvero il sensore registra un avvicinamento) (Figura 3).

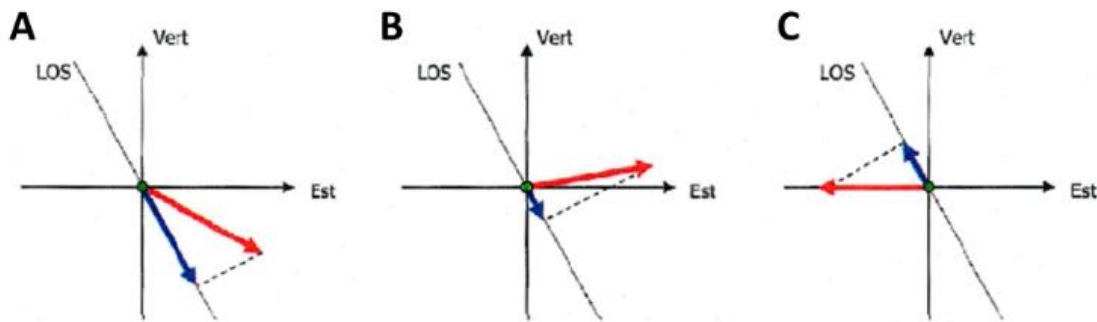


Figura 3 - Variazione della quantità e del segno della componente di deformazione misurata da lungo la LOS (freccia blu) in funzione dell'orientazione della direzione reale del movimento (freccia rossa).

Come detto, l'area al suolo viene rilevata sotto due angoli di vista praticamente speculari (Figura 4). Disponendo di una adeguata disponibilità di punti di misura, dalla combinazione di dati ascendenti con quelli discendenti è possibile risalire all'orientazione del vettore velocità nel piano Est-Verticale e quindi fornire una stima del moto verticale e orizzontale in direzione Est-Ovest. Un eventuale spostamento in direzione puramente orizzontale Nord-Sud non può essere rilevato per ragioni intrinseche alla geometria del sistema (orbita dei satelliti quasi parallela alla direzione Nord-Sud, da cui si discosta per un angolo δ e visione side-looking).

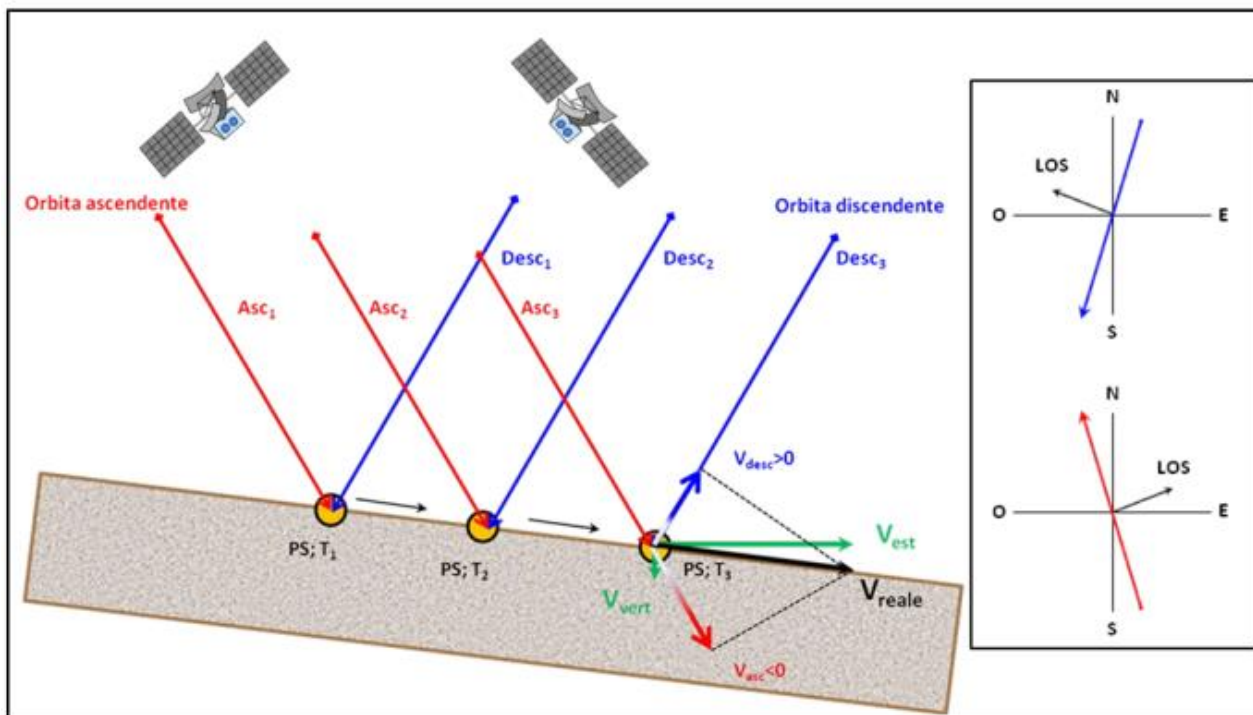


Figura 4 - Scomposizione del moto nelle direzioni verticale e orizzontale (indicate in verde), risultata dalla combinazione delle misure in geometria ascendente e discendente.

Stato del monitoraggio interferometrico a Gorga e analisi preliminari

Allo stato attuale l'area oggetto di studio presenta una discreta quantità di riflettori naturali (Permanent Scatterers), così come si evidenzia dai dati di monitoraggio interferometrico ad oggi disponibili nella banca dati del Geoportale Nazionale. Tali dati fanno riferimento alle acquisizioni della costellazione di satelliti Cosmo-SkyMED nel periodo che va dal 2011 al 2014 (Figura 5Figura 6). Per lo più, tali riflettori sono costituiti da elementi antropici, quali edificati, strade o altro tipo di opere, lasciando di fatto scoperta gran parte dell'area da investigare.

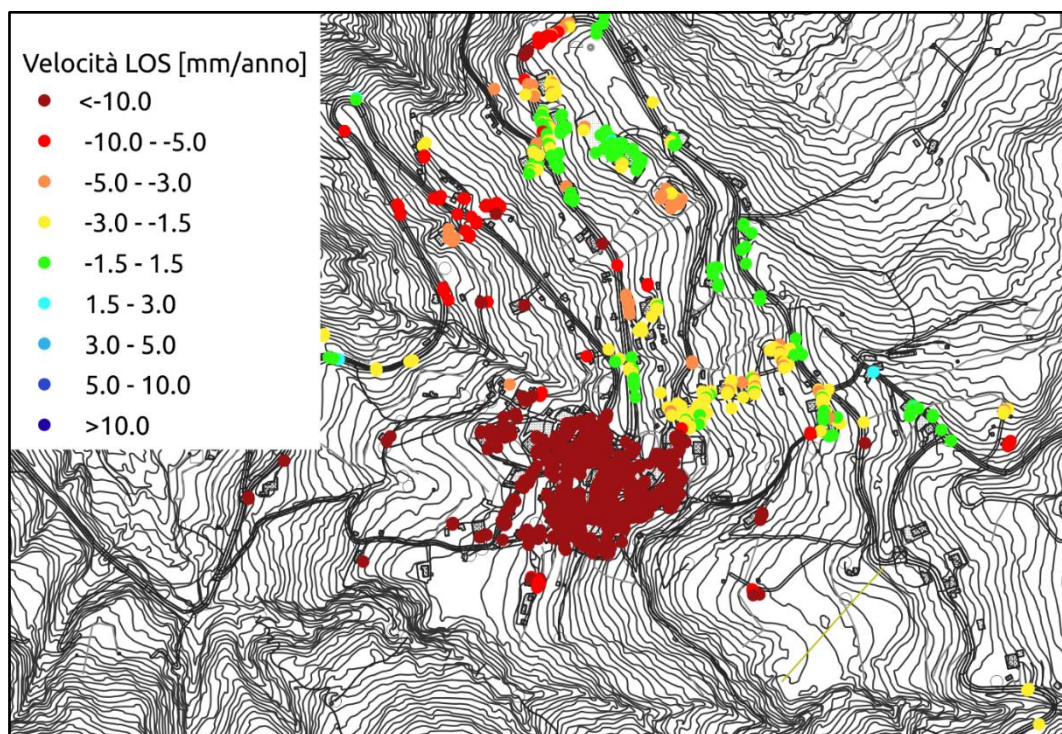


Figura 5 – Dataset COSMO-SkyMED discendente monitoraggio dal 23/10/2011 al 31/12/2013

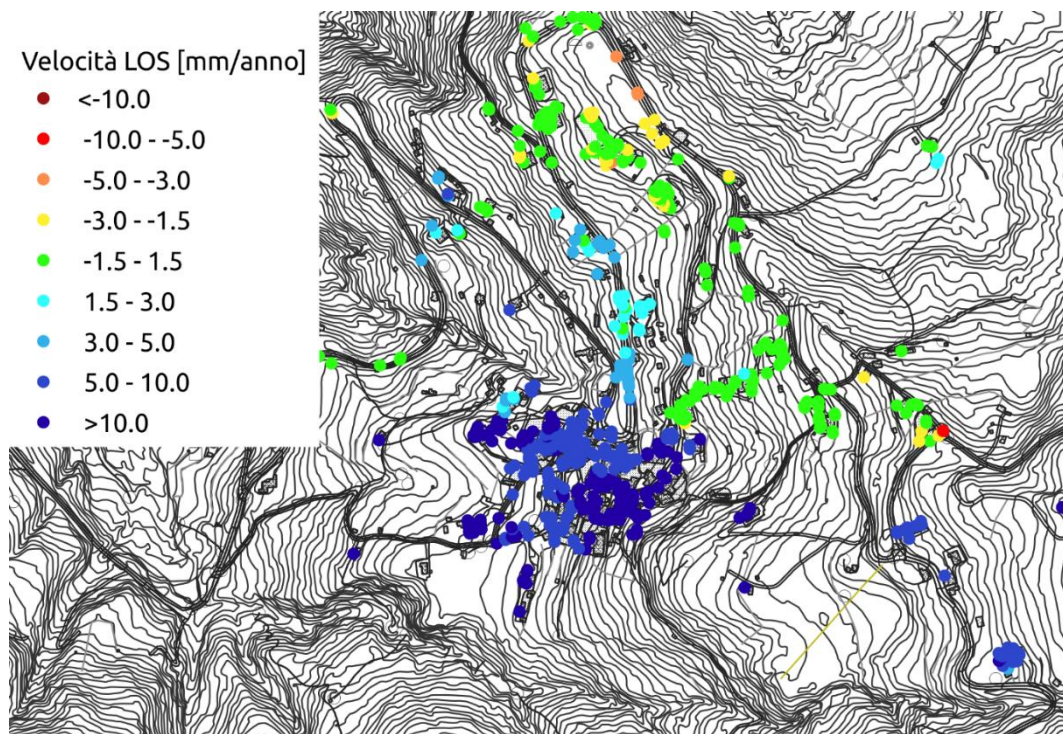


Figura 6 - Dataset COSMO-SkyMED ascendente, monitoraggio dal 30/05/2011 al 19/3/2014

Data la distribuzione dei punti PS disponibili sul Geoportale Nazionale, e dato che le elaborazioni divulgate fanno riferimento soltanto al periodo 2011-2014, si prevede una nuova analisi storica delle deformazioni pregresse aggiornata ad oggi ed eseguita con tecniche più recenti ed efficienti come ad esempio SqueeSAR.

Installazioni

Al fine di rimediare all'assenza di riflettori naturali è stata prevista l'installazione di riflettori radar artificiali (*Corner Reflectors*). Il riflettore radar è uno strumento passivo costituito da lastre metalliche che, tramite il particolare orientamento dato alle pareti che lo compongono, riesce a riflettere con eccezionale efficacia le onde radar. Questo fa risultare nei dati una eco ben visibile e costante nel tempo, che può essere associata ad un oggetto esistente, per meglio evidenziare la sua presenza in area, oppure ovviare all'assenza di altro tipo di riflettori, ad esempio, in aree vegetate. Le sue dimensioni sono ridotte e l'installazione è relativamente semplice il che, unito alla bassa tecnologia necessaria alla sua creazione e messa in opera, ne fa un perfetto strumento di costo contenuto per le operazioni di monitoraggio.

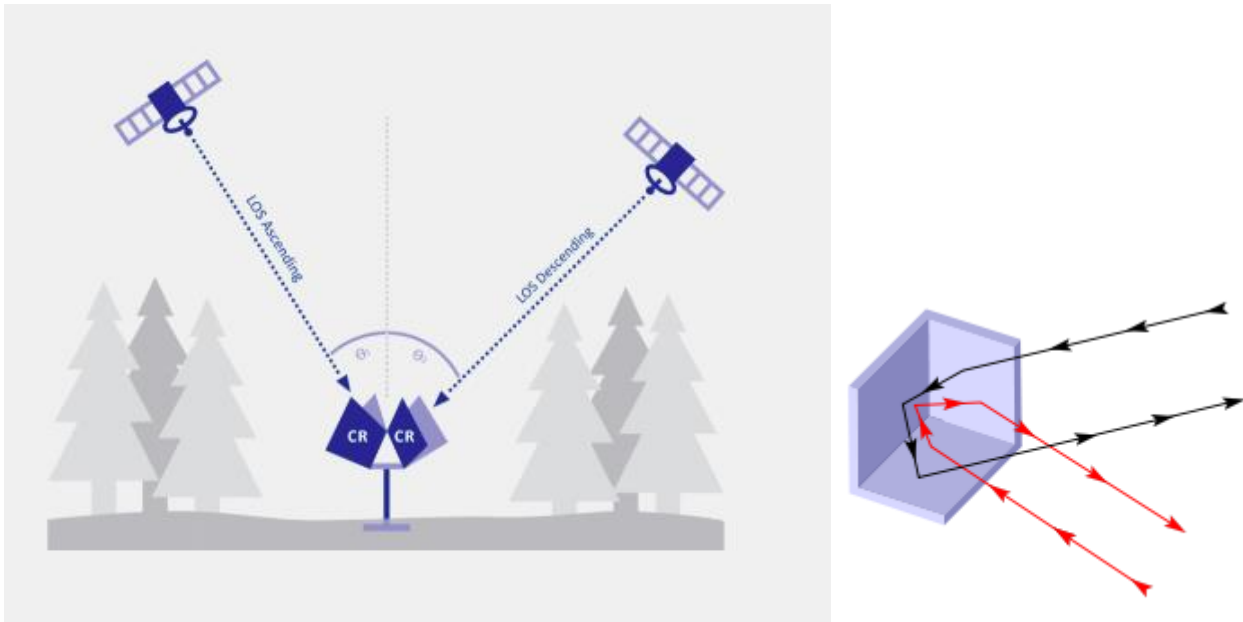


Figura 7 - Esempio di Corner Reflector e principio di riflettività

L'installazione dei corner reflectors si articola nelle seguenti fasi:

1. Studio delle posizioni di installazione dei riflettori artificiali, sulla base delle caratteristiche di accessibilità, sicurezza e permanenza in condizioni iniziali e di quanto descritto di seguito;
2. Caratterizzazione dei siti in termini ST_LOOMM (SpatioTemporal Landslide Object-Oriented Mapping and Modelling) ai fini della loro significatività in termini di aggregazione e disaggregazione dei precedenti PS;
3. Realizzazione delle opere di fondazione tali da impedire cedimenti, rotazioni e traslazioni superficiali, nonché influenze termiche e meccaniche;
4. Assemblaggio in situ dei riflettori e loro installazione da parte di tecnici specializzati;
5. Puntamento dei riflettori in relazione all'angolo di vista delle acquisizioni dei satelliti;
6. Misure GPS per la rilevazione della posizione e della quota di ciascun riflettore artificiale per almeno tre tornate stagionali, al fine di verificare deriva termica e di umidità.

La scelta del posizionamento dei riflettori artificiali è legata, oltre al fenomeno che si intende monitorare, anche ad altre considerazioni. Contemporaneamente, infatti, è necessario tenere conto anche dell'aspetto radaristico del problema, ovvero selezionare aree di installazione che possiedano queste caratteristiche:

- Visibilità da satellite: l'area in cui installare i riflettori deve essere visibile da satellite in tutte le geometrie di acquisizione che saranno utilizzate (ascendente e discendente), vi deve quindi essere assenza di distorsioni geometriche dovute a deformazioni prospettiche;
- Rumore di fondo limitato: l'area di installazione deve essere sufficientemente "buia" affinché il riflettore artificiale sia facilmente identificabile e che esso non interferisca con oggetti riflettenti già presenti nelle vicinanze. È per questo consigliata l'installazione in aree sufficientemente lontane da edifici, rilevati, pali in metallo, recinzioni, etc...

Per l'analisi del caso di Gorga sono state previste n. 7 Corner Reflectors a doppia geometria, in modo da massimizzare l'acquisizione sia in geometria ascendente che discendente:

- n.1 coppia in corrispondenza del centro abitato per controllo e confronto con i dati restituiti dai riflettori naturali, costituiti principalmente dall'edificato e quindi soggetti ad interferenza antropica;
- n.1 coppia a monte dell'abitato per il monitoraggio dell'area di testata dei movimenti franosi per una migliore valutazione dell'entità di spostamento nella zona passiva del movimento franoso;
- n.3 coppie a valle dell'abitato per il monitoraggio dell'evoluzione dei corpi in deformazione e per una migliore valutazione dell'entità di spostamento nella zona attiva del movimento franoso;
- n. 2 coppie in posizione intermedia per il controllo dell'interferenza con i due fossi principali che bordano l'area d'indagine e quindi monitorare eventuali instabilità secondarie indotte dall'approfondimento del reticolo idrografico.

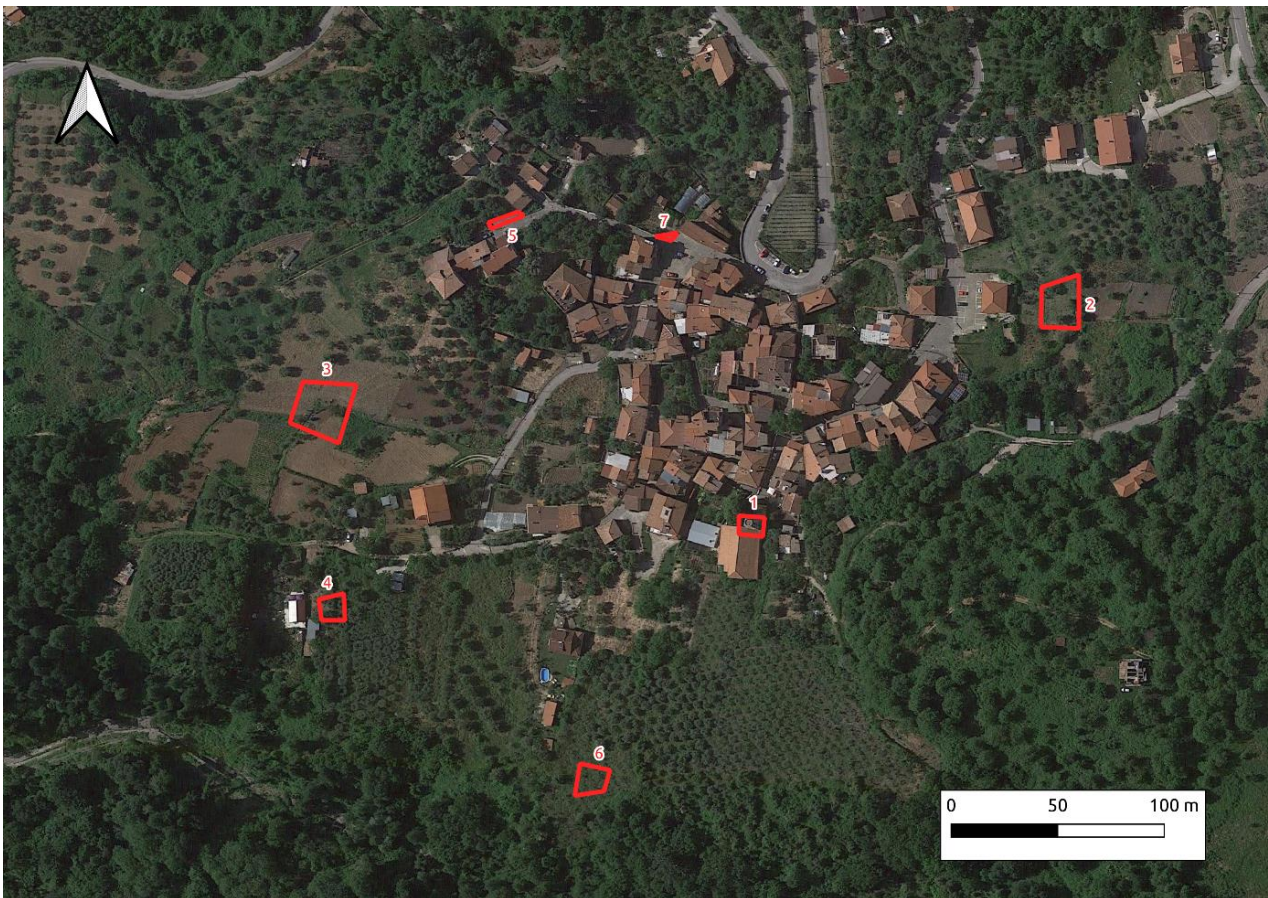


Figura 8 - Area di installazione dei riflettori artificiali.

Test di visibilità, calibrazione e manutenzione

L'installazione dei Corner Reflectors, prevede una prima fase di installazione piuttosto delicata, in quanto l'orientazione del riflettore deve essere accuratamente tarato, in base alle geometrie orbitali dei satelliti, per massimizzare la riflettività.

Al termine delle operazioni di installazione, è necessario verificare l'effettiva visibilità dei dispositivi installati. Il test di visibilità dovrà comprendere l'analisi di riflettività di almeno 3 nuove immagini acquisite in geometria ascendente e discendente sull'area di interesse e sarà quindi condotto solitamente circa uno/due mesi dopo l'avvenuta installazione (a seconda del satellite).

In caso di risultato negativo, si indagheranno le cause della mancata visibilità, al fine di intervenire in situ per rimediare al problema insorto.

In caso di responso positivo, l'attività si considererà completata. La rete di riflettori sarà così pronta per essere monitorata attraverso un'attività di monitoraggio radar satellitare.

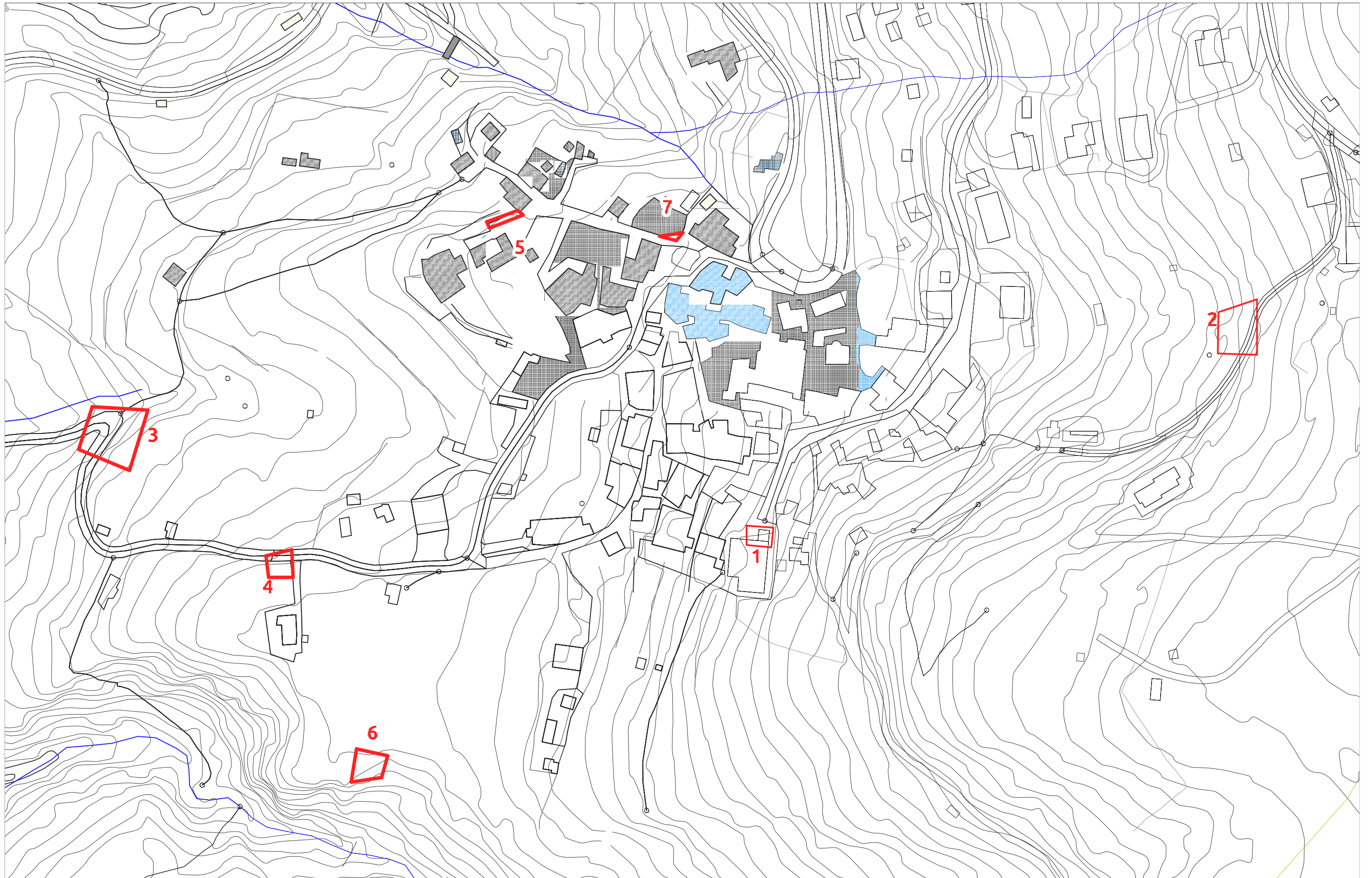
Una volta installati, i Corner Reflectors non richiedono particolare manutenzione, escludendo danni accidentali.


Acquisizione, utilità e divulgazione dei dati di monitoraggio

L'acquisizione e la divulgazione dei dati è da considerarsi fra le attività scientifiche e professionali di supporto, e quindi risulta attività separata dalla installazione, e sarà data in affidamento dell'Ente appaltante a valle dell'esecuzione delle opere previste dal progetto.

Si prevede una durata delle attività di monitoraggio non inferiore a 3 anni, durante la quale la elaborazione dei dati dovrà anche consentire di verificare l'efficacia e l'efficienza delle opere di mitigazione del rischio cui il presente piano di monitoraggio da remoto è collegato e che, date le condizioni complesse di pericolosità e rischio ne costituisce parte integrante.

Planimetria con ubicazione delle coppie di riflettori radar



 Aree di installazione Corner Reflectors