ReSTART

autoritadistrettoac.it/notizie/restart/lapplicazione-delle-tecnologie-di-telerilevamento-radar-nel-progettorestart-lanalisi-ed-il



Sommario

L'articolo descrive le attività di Telerilevamento radar previste dalla Linea 2 del Progetto Restart (Obiettivo Operativo 2 - Realizzazione del sistema integrato delle conoscenze per la valutazione del rischio gravitativo) che prevede la costruzione del quadro di riferimento, aggiornato ed aggiornabile, del rischio geomorfologico pregresso ed indotto associato all' evento sismico, ad alimentazione del data base di Progetto. Alla luce di recenti ricerche ed applicazioni di Telerilevamento radar dallo Spazio basate sulla tecnica dell'interferometria differenziale di tipo puntuale (PSInSAR), è stata dimostrata la possibilità di un controllo delle deformazioni del suolo non solo di tipo gravitativo superficiale (Frane), ma anche legato a deformazioni crostali (post e pre sismiche) legate ai movimenti delle strutture responsabili della sismicità in atto nelle aree dell'Appennino Centrale.

Quest'ultimo aspetto riveste un carattere di esternalità applicativa delle osservazioni da Telerilevamento radar inizialmente previste dal Progetto Restart per le deformazioni geomorfologiche ed infrastrutturali collegate al sisma, ma di estremo interesse per le potenziali applicazioni di un controllo dallo Spazio dell'evoluzione dei fenomeni deformativi del sottosuolo legati alla variazione, nel tempo e nello spazio, del campo di sforzo tettonico.

Il Telerilevamento radar e la tecnica dell'Interferometria differenziale SAR(Syntetic Aperture Radar)per l'analisi ed il monitoraggio delle deformazioni

L'Interferometria differenziale SAR (o DInSAR), è un metodo di trattamento delle immagini radar acquisite da satellite, teorizzato in USA negli anni '80 e successivamente perfezionato in Italia all'inizio degli anni '90 tramite la tecnica dei Permanent Scatterers (PSInSAR).

Tale tecnica, oggi diffusa ed applicata a livello globale, prevede il confronto di una terna o più immagini satellitari radar di cui sono noti tutti i parametri orbitali, con cui è possibile estrarre la differenza di fase del segnale radar sulle varie immagini della stessa scena, e ricavarne non solo la quota altimetrica di ogni oggetto riflettente a terra, ma la sua velocità di spostamento nel tempo, registrata nelle diverse immagini. Questa osservazione dallo Spazio viene realizzata con precisione millimetrica secondo due punti di vista opposti(LOS), derivati: dalle orbite ascendenti o discendenti del satellite rispetto al Polo Nord -animazione 1-, e dalla frequenza di passaggio dei satelliti radar sulla stesa scena chevaria, oggi, tra settimanale e/o giornaliera. Pertanto gli elementi territoriali (edifici, infrastrutture, ecc.), le frane, le subsidenze, ma anche le anomalie geodetiche possono essere oggi osservate, misurate e controllate con l'uso di sistemi satellitari orbitanti di tipo radar (SAR) - animazione 2-. L'accuratezza delle misure millimetriche fino ad oggi realizzate dai sistemi SAR in banda C, X ed L, e dalle metodologie di analisi multi temporale (DinSAR – PSinSAR) ha consentito di ottenere negli ultimi due decenni impressionanti immagini delle modificazioni strutturali e morfologiche in aree colpite da forti terremoti (vedi approfondimento); ma sempre ad evento catastrofico avvenuto. Recenti osservazioni¹ utilizzando la tecnica PSInSAR, applicate agli eventi sismici dell'Aquila hanno indotto ad ipotizzare che precedentemente al main shock ed eventuali foreshocks sia possibile acquisire da SAR utili informazioni di inizio lento della deformazione tettonica² di ampi volumi di roccia, quale possibile e potenziale precursore deformativo di un probabile evento di rottura ad energia maggiore, ovvero di un'anomalia deformativa precedente, verosimilmente anche mesi o anni prima alla manifestazione dell'evento principale ad elevato potenziale distruttivo. Attualmente, tutte le aree del globo terrestre, e quindi anche l'Italia, sono sorvolate quasi quotidianamente da satelliti radar europei (Sentinel 1a e 1b) e nazionali (4 CosmoSkyMed), con capacità di acquisizione notturna e diurna ed in qualsiasi condizione atmosferica, poiché trasportano a bordo sensori attivi a microonde (SAR).

Osservazioni sulla sismicità recente dell'Appennino Centrale

L'Appennino Centrale è una nota area sismica della Nazione la cui attività si è manifestata fin dall'antichità con terremoti di magnitudo superiore a 6.0 (Terremoto della Marsica del 1915 M 7.1) e con eventi sismici non uniformemente distribuiti nel tempo, ma con una tendenza a raggrupparsi in 2 periodi di maggiore attività, in termini di densità temporale ed energia rilasciata: il primo dal 1703 al 1751 e purtroppo il secondo dal 1997 ad oggi.

La seguente tabella riporta date, località, intensità e magnitudo degli eventi sismici di maggiore importanza avvenuti nell'Appennino Centrale, a partire dal 1997.

Anno	Mese	Giorno	Area Epicentrale	Іо	Mw
------	------	--------	------------------	----	----

1997	9	26	Appennino Umbro-Marchigiano	8-9	6.0
2009	4	6	Aquilano	9-10	6.3
2016	8	24	Appennino Centrale	10	6.2
2016	10	26	Appennino Centrale	9	6.1
2016	10	30	Appennino Centrale	10	6.5

Durante questo periodo di attività, così come per il periodo storico precedente, gli epicentri dei terremoti hanno coperto praticamente tutta la linea sismica attiva delle faglie numerate da SFS01 a SFS09 nella mappa rappresentata in figura 1. E' interessante notare che il meccanismo distensivo che caratterizza i terremoti che osserviamo attualmente sulle faglie della fascia appenninica interna, indicate dal colore violetto in figura 1, è dovuto alla riattivazione di faglie preesistenti di meccanismo compressivo, per effetto dell'inversione del regime di sforzo (o carico litostatico), da compressivo a distensivo, avvenuta in epoca geologica relativamente recente, dopo il pleistocene medio (solo alcune centinaia di migliaia di anni fa).

In ambienti tettonici estensionali, l'aumento del carico litostatico (comprendente anche i fluidi ed i gas) determina una crescita dello stress differenziale che può portare all'attivazione o innesco di faglie attive, mentre in ambienti tettonici compressivi la diminuzione del carico litostatico aumenta a sua volta lo stress differenziale facilitando,comunque, l'attivazione o l'innesco di faglie attive.

Figura 1 – Mappa

sismotettonica dell'Appennino Centrale. Le stelle indicano gli epicentri della sequenza del 2016-2017 mentre i rettangoli colorati mostrano le faglie riconosciute nella banca dati delle sorgenti sismiche DISS (2018) dell'INGV, qui numerate da SFS01 a SFS24. Il colore violetto indica faglie con meccanismo distensivo, il colore arancione quelle con meccanismo compressivo e il colore verde



quelle con meccanismo trascorrente. Gli epicentri dei terremoti riportati in tabella 1 sono indicati con i relativi anni di accadimento dal 1959 (in rosso). (Da Console et al., Geophysical Journal International, 2018).

La mappa di figura 2 consente di osservare l'evoluzione dell'attività sismica nell'area di

nostro interesse, nella quale spiccano soprattutto la sequenza di Colfiorito del 1997 a nord, quella dell'Aquila nel 2009 a sud (colore blu), nel centro la sequenza del 2016-2017 (colori giallo e arancione).

Figura 2 – Epicentri dei terremoti registrati in Italia Centrale durante le sequenze sismiche verificatesi dal 1985 ai nostri giorni (Fonte INGV).

Come visibile dalla ricostruzione spazio temprale dell'INGV, gli epicentri tendono mano a mano a coprire le aree lasciate scoperte nelle sequenze precedenti dello stesso ciclo sismico- <u>animazione 3</u> -.

La profondità dei piani di faglia nella sequenza del 2016-2017 giunge fino a circa 16 km all'interno della crosta terrestre al disotto dell'Appennino, la cui topografia è indicata in alto nella sezione verticale in figura 4,che mostra un'immagine tri-dimensionale delle faglie la cui frattura ha determinato i terremoti principali dell'intera sequenza sismica.





Figura 4 – Distribuzione della dislocazione (slip) prodotta dai terremoti del 24 agosto, 26 ottobre e 30 ottobre 2016 sulle rispettive faglie (Fonte INGV).

I piani di faglia hanno un'inclinazione talvolta minore di 45° rispetto al piano orizzontale, tipico di faglie di tipo compressivo (faglie inverse) pur essendosi osservato su tali faglie un meccanismo dei terremoti di tipo estensionale (faglie normali). E' possibile che queste strutture rappresentino delle vecchie strutture compressive riattivate come faglie normali.

I colori delle cellette presenti sulla rappresentazione dei piani di faglia in figura 4,indicano dislocazioni (slip) causate dai terremoti del 24 agosto, e del 26 e 30 ottobre sulle rispettive faglie, con valori di deformazione variabili dai 10 cm (verde scuro) ad 1 m circa (rosso scuro); tali valori sono stati determinati dall'inversione dei dati di deformazione del suolo da telerilevamento radar (PSInSar) ed accelerazioni registrate da sensori sismici a terra.

La figura 5 mostra in dettaglio i valori della dislocazione sul piano di faglia del solo terremoto del 24 agosto 2016, determinati tramite la modellazione delle registrazioni ottenute da 24 stazioni accelerometriche; la figura riporta anche, con i cerchi bianchi, l'espansione della frattura a partire dall'ipocentro localizzato dalla rete sismica nazionale alla profondità di 10 km (stella rossa).

L'intervallo temporale fra un cerchio e l'altro è di 1 sec., denotando una velocità di frattura dell'ordine di 3 km/s (velocità approssimativa delle onde sismiche di taglio nella crosta superiore).

La distribuzione delle dislocazioni indica chiaramente un processo complesso, con vari episodi di fratturazione di zone di asperità della faglia, evidenziate dal colore rosso, dove lo slip, o dislocazione, è stato maggiore.

Questa immagine dinamica testimonia la potenzialità dei mezzi di osservazione ed analisi moderni, che consentono di evidenziare la complessità del modello fisico di ciascun terremoto, al di là della semplice elencazione dei parametri ipocentrali riportati nei cataloghi sismici tradizionali <u>(vedi approfondimento)</u>



Figura 5 – Distribuzione delle dislocazioni (slip) prodotte sulla faglia dal terremoto di Amatrice del 24 agosto 2016 (Fonte INGV). La scala dei colori di queste dislocazioni è riportata a destra dell'immagine.

Da quanto descritto e rappresentato si può ricavare una visione del fenomeno sismico relativo alle sequenze dell'Appennino Centrale, in cui una fase di lenta preparazione inter-evento, una fase di eventuali precursori (Nardò et al., 2019), la complessità cosismica della sorgente e una fase di aftershocks sono episodi con scale temporali diverse di un unico processo auto-organizzato di carica e scarica dell'energia elastica accumulata da inesorabili movimenti tettonici profondi.

Dopo i grandi terremoti, i volumi più profondi della crosta "scorrono" in risposta ai cambiamenti dello stress crostale causato dal precedente terremoto, proprio come l'acqua scorre lontano dalle aree di alta pressione in modo da riequilibrare la pressione ovunque all'interno di un corpo idrico, ma un flusso di questo genere si può verificare solo se le rocce si trovano ad una temperatura tale da non provocare fratture durante la fase di carico.

Tali movimenti profondi hanno in molti casi dimostrazioni millimetriche superficiali del fenomeno, visibili da osservazioni continue da sensori radar come quelli attualmente disponibili dai satelliti Sentinel 1 e CosmoSkyMed ed analizzabili, nel loro contesto spazio-temporale, tramite attività di pre e post processamento PSInSAR.

Interferometria differenziale SARper l'analisi ed il monitoraggio della pericolosità sismica

Nelle deformazioni della crosta terrestre un ciclo sismico presente può essere suddiviso in quattro fasi (Scholz, 2002; Thatcher 1983) in cui quella iniziale, o fase di carico, che rappresenta il periodo di deformazione in cui lo sforzo crostale lento e forse graduale nel tempo, si accumula nella\e faglia\e.

Durante questa fase, definita inter-sismica, sono attese anomalie della deformazione sul medio termine, mesi o anni, o di breve durata, settimane o meno (Scholz, 2002), anche se il modello geofisico che sottende tale fenomeno, evidenziato dalle osservazioni SAR, risulta ancora da chiarire.

La fase inter sismica (che può quindi verosimilmente durare da anni, a centinaia e a decine di migliaia di anni), tali deformazioni sono il risultato dell'accumulo di stress sismico su uno o più segmenti di faglia; potenzialmente rilevabili, se la dinamica è in atto, come variazione di fase del segnale elettromagnetico di acquisizioni multitemporali di immagini SAR nel tempo (vedi approfondimento).

Ad esempio negli archivi di immagini SAR a partire dal 1992³, realizzati con i satelliti europei ERS ed Envisat, oltre ad essere stati "congelati" i comportamenti deformativi inter-sismici (cioè le deformazioni crostali esistenti prima del verificarsi della scossa principale) di eventi significativi avvenuti nel periodo di riferimento (di cui 367 con magnitudo superiore a 4 - Rovida et al 2016 CPTI15 INGV), sono "conservati" i comportamenti deformativi inter sismici di due importanti eventi: la sequenza di Colfiorito del 26 Settembre 1997, caratterizzata da tre eventi di media energia (ML 5.5, 5.8 e 4.7) ravvicinati nel tempo, e la sequenza de L'Aquila (Abruzzo), del 6 Aprile 2009, con un evento principale (ML 5.9, Mw 6.3) preceduta da un'attività sismica da alcuni mesi (foreshock) e seguita da una lunga sequenza di repliche (aftershock).

Su queste basi sono state analizzate le serie di dati ERS sull'area di Colfiorito e di dati Envisat sull'area de L'Aquila.

Sull'area di Colfiorito, specifiche applicazioni DInSAR hanno evidenziato in parte il fenomeno, ma senza approfondirlo, concentrandosi sulla sola fase cosismica della deformazione – <u>figura ed animazione 4</u>- .

Nel caso dell'Aquilai dati ERS dalle piattaforme orbitanti 1 e 2 non hanno fornito un riscontro oggettivo in termini di percezione di eventuali fenomeni deformativi inter sismici mostrano invece oscillazioni periodiche di pochi millimetri e di carattere stagionale, quindi probabilmente ascrivibili ad effetti del ciclo di ricarica delle falde idriche presenti nelle piane alluvionali, così come nelle strutture carbonatiche(fig. 6).



Fig. 6 – Esempio di serie temporale di PS ERS discendente (1992 – 2000) sull'area epicentrale del sisma de L'Aquila 2009. Il trend generale di deformazione è suborizzontale con oscillazioni periodiche di tipo stagionali.

Diversamente i dati Envisat hanno evidenziato sull'area epicentrale del sisma de L'Aquila 2009 (fig. 9):

- nella serie temporale discendente (Fig. 7 B a destra) un trend deformativo positivo (sollevamento o più precisamente un avvicinamento al satellite) fino al mese di settembre 2008 Stage A-;
- nella serie temporale ascendente (Fig. 7 A a sinistra)un trend deformativo suborizzontale in cui le possibili oscillazioni periodiche di tipo stagionale vengono appiattite dal grande salto relativo al sisma;
- nella serie temporale discendente (Fig. 7B a destra) un trend deformativo negativo (abbassamento o allontanamento dal satellite) – Stage B - coincidente con l'inizio della sequenza sismica dei foreshock, che dura sino al salto co-sismico – Stage C -

Figura 7– Esempio di serie temporali di PSEnvisatascendente (A) e discendente (B) (2003 – 2010). La linea verticale viola indica il momento in cui avviene il sisma.

Combinando geometricamente in maniera opportuna il dato ascendente e discendente ed estrapolando in un piano geografico (fig. 8) quello che nella realtà viene visto dal satellite secondo una



orientazione all'incirca est-ovest, si individuano nell'area epicentrale, prima del sisma, una deformazione inizialmente positiva (sollevamento), lunga circa 4 anni, e poi una negativa (subsidenza), lunga circa 6 mesi, che recupera quasi completamente la **Figura 8** – Deformazione verticale presismica del suolo (IDW [50x50 m cellsize] spatial interpolation) ad ovest della faglia di Paganica (linee rosse) cioè dove è avvenuta la frattura; A (Gennaio 2005 - Settembre 2008, circa 4 anni); sollevamento medio ca. 10 mm; B (Settembre 2008 - Febbraio 2009, circa 6 mesi); subsidenza media ca. 10 mm. La scala cromatica indica dal blu (sollevamento del suolo) al rosso (abbassamento del suolo).

Nel caso de L'Aquila esiste quindi un possibile segnale deformativo (figura 9) che, attraverso una inversione del trend della sua variazione temporale, associato meno ad eventuali sequenze sismiche pre-evento (foreshock), può verosimilmente annunciare l'arrivo di un evento sismico principale ad elevata energia.







Figura 9 - Segnale di deformazione derivante dai dati PS discendenti. Cambio di trend da sollevamento a subsidenza circa sei mesi prima del sisma (Fonte INGV)

Identificare quale fenomeno geofisico endogeno produca questo segnale rilevabile dallo Spazio, così come è rilevabile l'entità delle deformazioni avvenute a seguito del sisma, rappresenta l'obiettivo operativo di ricerca applicata su cui diversi gruppi di studio stanno lavorando in Italia e nel Mondo.

In questo contesto, non sperimentale ma pre operativo, il Progetto Restart intende contribuire all'attività di studio e di applicazione diretta delle tecnologie di Telerilevamento radar disponibili per il controllo crostale di aree sismogenetiche, quale esternalità applicativa diretta svolta nell'ambito delle attività previste dalla Linea di Intervento 2 - Rischio gravitativo - mappatura post sisma e programma delle misure del Progetto. L'applicazione si inserisce inoltre nell'Obiettivo Generale 1, Rischio IDRO GEO -Ricostruzione post sisma in condizioni di sicurezza idrogeologica da fenomeni pregressi e sismo indotti – garantendo l'alimentazione del sistema integrato delle conoscenze per la valutazione del condizioni di rischio geoambientale esistenti sul territorio.

Obiettivi dell'applicazione per l'analisi ed il monitoraggio dei fenomeni deformativi superficiali (Frane e Subsidenze) e sub-superficiali (Deformazioni tettoniche, pre e cosismiche, per variazioni del campo di sforzo).

La Linea di Intervento 2 prevede pertanto la costruzione del quadro di riferimento, aggiornato ed aggiornabile, del rischio geomorfologico pregresso ed indotto connesso con l'evento sismico, ad alimentazione del data base della piattaforma tecnologica Restart, prevedendo una serie di attività di elevato contenuto tecnico scientifico finalizzati alla definizione di modelli interpretativi dei fenomeni rilevati e/o simulati.

La linea sviluppa azioni complessive necessarie a definire un livello di rischio compatibile per la ricostruzione in corrispondenza di fenomeni sismici di area vasta come quelli che hanno colpito l'Appennino centrale nel 2016.

Come previsto e definito dai documenti progettuali, la Linea 2 prevede attività di monitoraggio dell'area interessata dal sisma, ed eventualmente di un suo intorno significativo, con la tecnica dell'interferometria satellitare SAR per mezzo della quale saranno individuate le aree in cui si verificano movimenti della superficie terrestre che indicano la possibile presenza di fenomeni gravitativi, di instabilità del suolo o di deformazione crostale.

Pertanto con lo sviluppo delle attività descritte, si vuole realizzare un'analisi dei fenomeni deformativi presenti nell'area, includendo a quelli gravitativi superficiali anche quelli di carattere geodinamico e sismotettonico, senza escludere dalle osservazioni eventuali implicazioni statiche di infrastrutture residenziali e di mobilità, o sulla stessa stabilità di opere di mitigazione del rischio idrogeologico (es. briglie, palificate, argini, vasche di laminazione, etc.) realizzate e/o progettate.

L'applicazione di Telerilevamento radar da satellite sull'area dei Comuni ReSTART avverrà secondo le tre seguenti Fasi, temporalmente conseguenti e concatenate nelle azioni e negli obiettivi:

- Fase 1 Analisi interferometrica storica 1992-2011
- Fase 2 Analisi interferometrica dal 2011 ad oggi, deformazioni pre e post sequenza sismica 2016/2017
- Fase 3 Monitoraggio nearreal time delle deformazioni in atto con sistema di allerta automatico

L'attività è finalizzata all'utilizzazione e valorizzazione della banca dati interferometrici del PST-A del MATTM che raccoglie dati satellitari radar di tipo PSinSAR sull'Italia dal 1992 al 2011/2013 per la costruzione di una mappa storica delle deformazioni del suolo superficiali (franosità) e profonde (subsidenze, DGPV, deformazioni pre sismiche).

Tale mappa oltre a rappresentare il trend di deformazione locale, in termini di fenomeni geomorfologici e geodinamici esistenti nell'area Restart (frane, subsidenze naturali, sismo tettonica, DGPV, etc.), costituisce la necessaria base di riferimento e concatenamento temporale per le successive applicazioni con le acquisizioni dai sistemi europei Sentinel 1 e dalla costellazione italiana CosmoSkyMed (vedi Fase 2 Analisi pre e post evento sequenza sismica 2016/2017) disponibili in formato grezzo a costo zero.

Questo database, se opportunamente post processato secondo la tecnica PSinSAR , anche nelle sue componenti verticali e orizzontali (con integrazione di dati geodetici in continuo), ed interpretato sulla base di una rappresentazione cartografica di dettaglio delle discontinuità tettoniche e neotettoniche presenti in aree sismogenetiche, è in grado di rappresentare un elemento di particolare rilevanza nell'identificazione di dettaglio di possibili target specifici di criticità ed osservazione.

Fase 2: Analisi pre e post evento sequenza sismica 2016/2017

La Fase 2 si esprime nell'acquisizione ed elaborazione dei dati dalla costellazione satellitare radar CosmoSkyMed, conservati nell'archivio MapItaly sull'area Restart,e successivo post processamento interferometrico dei dati SAR, elaborando un approccio multitarget nella elaborazione PsInSAR in grado di evidenziare ogni minima anomalia del territorio rispetto alla fase pre evento e post evento sismico 2016-2017.

Il risultato della Fase 2 è rappresentato dalla disponibilità di una serie storica continua dal 2011/2013 ad oggi, al cui interno risulta presente e quindi visibile alla metodologia ed alla tecnologia impiegata, la sequenza deformativa nel tempo, ciò consentirà raffinate analisi sui movimenti geodinamici e gravitativi indotti nell'area in esame.

Fase 3 Monitoraggio near real time delle deformazioni in atto con sistema di allerta automatico

La Fase 3 prevede la realizzazione di monitoraggio interferometrico continuo (6 daysreal time) settimanale delle deformazioni del suolo da dati satellitari Sentinel 1e CosmoSkyMed su area pilota Restart.

Tale attività potrà svolgersi all'interno della piattaforma tecnologica Restart tramite connessione con provider privato o tramite disponibilità futura del PS journal del Programma Copernicus o di eventuali iniziative a carattere nazionale.

La Fase 3 è pertanto finalizzata allo sviluppo di un sistema automatico di allerta delle evoluzioni deformative puntuali ed areali, anche prevedendo l'utilizzo delle disponibili tecniche di machine learning e AI per garantire gli automatismi richiesti.

Conclusioni

L'obiettivo dell'applicazione Restart è pertanto quello di esplorare, verificare ed applicare (tramite l'integrazione di dati da telerilevamento satellitare e dati ancillari disponibili e/o producibili da tecnologie prossimali quali reti di monitoraggio a terra) la possibilità di rilevare fenomeni precursori di attività deformativa crostale associabili a forti terremoti ed osservabili e misurabili in termini di anomalie di segnale nel tempo.

L'archivio PST del MATTM consente pertanto la realizzazione del quadro deformativo storico e l'analisi multi temporale dei fenomeni sismici esistenti nel periodo di riferimento (fino al 2011 per la banda C), mentre la disponibilità di dati Sentinel 1 e CosmoSkyMed permette il monitoraggio di un determinato territorio ad elevata pericolosità sismica, ponendolo sotto osservazione continua, remota (Telerilevamento satellitare ed aereo)e prossimale (reti geodetiche, sismometriche ed accellerometriche).

L'intervento descritto prevede quindi la realizzazione di attività di studio applicativo e sviluppo tecnologico, in un contesto pre-operativo, rivolte all'impiego estensivo nei modi (multi missione\multi sensore) e nei tempi (3\6\12 anni) delle tecniche di Telerilevamento satellitare di tipo radar ed ottico attualmente esistenti.

Autori

Sergio Nardo' PhD UNINA 31 Ciclosergio.nardo@unina.it

Rodolfo Console Centro di Geomorfologia Integrata per l'Area del Mediterraneo CGIAM <u>r.console@cgiam.org</u>

Carlo Terranova UAT Sogesid/MATTM -Direzione Generale Sicurezza del Suolo e delle Acque/Geoportale Nazionale <u>terranova.carlo@minambiente.it</u>

Note

¹PS-InSAR data analysis: pre-seismicgrounddeformation in the 2009 L'Aquila earthquakeregion" Boll. di Geofisica Teorica ed Applicata (http://www.bgta.it/provapage.php?id_articolo=830 DOI10.4430/bgta0251).

²Il termine "elastico" si riferisce a un particolare tipo di deformazione della roccia, ovvero la deformazione che può essere "recuperata" in un momento futuro. I materiali elastici hanno "memoria" della loro forma originale e pertanto se la loro forma viene modificata, poichè viene loro imposta una forza, torneranno alla loro forma originale se la forza viene rimossa.

³<u>http://www.pcn.minambiente.it/mattm/progetto-piano-straordinario-di-telerilevamento/</u>

Risorse bibliografiche essenziali

Risorse bibliografiche essenziali

G docs.google.com/document/d/e/2PACX-1vRXKWj8TjsiWpg9a3veEuBCpYEdlfeR_b4SnQHoMfdaUo1PrqSUcaXSLxiO9lKaLcoDzBhBNbTz1DKf/pub

Risorse bibliografiche essenziali

- 1. Achache J., Fruneau B., and Delacourt C., 1995, Applicability of SAR Interferometry for Monitoring of Landslides. ERS Applications, Proceedings of the Second International Workshop held 6-8 December, 1995 in London, p.165.
- 2. Amoruso, A., Crescentini, L., 2010, Limits on earthquake nucleation and other pre-seismic phenomena from continuous strain in the near field of the 2009 L'Aquila earthquake. Geophysical Research Letters, 37(10).
- 3. Anzidei M., Boschi E., Cannelli V., Devoti R., Esposito A., Galvani A., Melini D., Pietrantonio G., Riguzzi F., Sepe V., Serpelloni E., 2009, Coseismic deformation of the destructive April 6, 2009 L'Aquila earthquake (central Italy) from GPS data, Geophysical Research Letters, vol. 36, issue 17
- Atzori S., Hunstad I., Chini M., Salvi S., Tolomei C., Bignami C., Stramondo S., Trasatti E., Antonioli A. and Boschi E., 2009, Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (central Italy). Geophysical Research Letters, 36, L15305.
- 5. Atzori S., Chiarabba C., Devoti R., Bonano M. and Lanari R., 2013: Anomalous far-field geodetic signature related to the 2009 L'Aquila (central Italy) earthquake. Terra Nova, 25, 343–351.
- 6. Berardino P., Fornaro G., Lanari R. and Sansosti E., 2002, A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383.
- 7. Boncio, P., Pizzi, A., Brozzetti, F., Pomposo, G., Lavecchia, G., Di Naccio, D., &Ferrarini, F., 2010, Coseismic ground deformation of the 6 April 2009 L'Aquila earthquake (central Italy, Mw 6. 3), GeophysicalResearchLetters,Vol.37,L06308.
- 8. Burgmann R., Hilley G., Ferretti A. and Novali F., 2006, Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scattererInSAR and GPS analysis, Geology, 34 (3), 221-224.
- 9. Carnec C., Massonnet D., King C., 1996, Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent, Geophysical Research Letters, 37(6).
- Cheloni D., D'Agostino N., D'Anastasio E., Avallone A., Mantenuto S., Giuliani R., Mattone M., Calcaterra S., Gambino P., Dominici D., Radicioni F., Fastellini G., 2010, Coseismic and initial post-seismic slip of the 2009Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Italy, from GPS measurements, Geophys. J. Int., 181, 1539–1546.

- 11. Cheloni D., Giuliani R., D'Anastasio E., Atzori S., Walters R.J., Bonci L., D'Agostino N., Mattone M., Calcaterra S., Gambino P., Deninno F., Maseroli R., Stefanelli G., 2014, Coseismic and post-seismic slip of the 2009 L'Aquila (central Italy) MW 6.3 earthquake and implications for seismic potential along the Campotosto fault from joint inversion of high-precision levelling, InSAR and GPS data, Tectonophysics,Vol. 622, Pag. 168-185.
- 12. Cheloni D., De Novellis V., Albano M., Antonioli A., Anzidei M., Atzori S., Avallone A., Bignami C., Bonano M., Calcaterra S., Castaldo R., Casu F., Cecere G., De Luca C., Devoti R., Di Bucci D., Esposito A., Galvani A., Gambino P., Giuliani R., Lanari R., Manunta M., Manzo M., Mattone M., Montuori A., Pepe A., Pepe S., Pezzo G., Pietrantonio G., Polcari M., Riguzzi F., Salvi S., Sepe V., Serpelloni E., Solaro G., Stramondo S., Tizzani P., Tolomei C., Trasatti E., Valerio E., Zinno I., and Doglioni C., 2017, Geodetic model of the 2016 Central Italy earthquake sequence inferred from InSAR and GPS data, Geophys. Res. Lett., 44, 6778–6787.
- 13. Chiarabba C., Amato A., Anselmi M., Baccheschi P., Bianchi I., Cattaneo M., Cecere G., Chiaraluce L., Ciaccio M. G., De Gori P., De Luca G., Di Bona M., Di Stefano R., Faenza L., Govoni A., Improta L., Lucente F. P., Marchetti A., Margheriti L., Mele F., Michelini A., Monachesi G., Moretti M., Pastori M., Piana Agostinetti N., Piccinini D., Roselli P., Seccia D., and Valoroso L., 2009, The 2009 L'Aquila (central Italy) Mw 6.3 earthquake: Main shock and aftershocks. Geophysical Research Letters, 36, L18308.
- 14. Chiaraluce, L., Valoroso, L., Piccinini, D., Di Stefano, R., De Gori, P., 2011, The anatomy of the 2009 L'Aquila normal fault system (central Italy) imaged by high resolution foreshock and aftershock locations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B12).
- 15. Cirella A., Piatanesi A., Cocco M., Tinti E., Scognamiglio L., Michelini A., Lomax A. and Boschi E., 2009, Rupture history of the 2009 L'Aquila (Italy) earthquake from non-linear joint inversion of strong motion and GPS data. Geophysical Research Letters, 36(19).
- Console, R., Vannoli, P. and Carluccio, R., 2018. The Seismicity of the Central Apennines (Italy) Studied by Means of a Physics-Based Earthquake Simulator, Geoph. J. Int., 212, 916-929, doi: 10.1093/gji/ggx451.
- 17. Corsini A., Farina P., Antonello G., Barbieri M., Casagli N., Coren F., Guerri L., Ronchetti F., Sterzai P. and TarchiD., 2006,Space-borne and ground-based SAR interferometry as tools for landslide hazard management in civil protection,International Journal of Remote Sensing,27:12,2351-2369.
- 18. Costantini M., Ferretti A., Minati F., Falco S., Trillo F., Colombo D., Novali F., Malvarosa F., Mammone F., Vecchioli F., Rucci A., Fumagalli A., Allievi J., Ciminelli M.G. and Costabile S., 2017, Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data. Remote Sensing Environ., Volume 202, Pages 250-275.
- 19. D'Agostino N., Cheloni D., Fornaro G., Giuliani R. and Reale D., 2012, Space-time distribution of afterslip following the 2009 L'Aquila earthquake, Journal of Geophysical Research, Vol. 117, B02402.

- 20. "Deformazioniappenninocentrale"" (Direttiva MATTM del 17/04/12; Studi Integrat iGeofisici e Geodetici - Punto E: Ricerca-azione conoscitiva delle fenomenologie ambientali) <u>http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/suolo-e-</u> territorio-1/deformazione-appennino-centrale.
- 21. De Fusco L., Terranova C. 1995 Progetto di applicazione sperimentale di tecniche e metodi di interferometria SAR (ERS-1) per il controllo delle deformazioni del suolo in aree sensibili VII Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Telerilevamento, Chieri (TO) 1995
- 22. Di Luccio F., G. Ventura, R. Di Giovambattista, A. Piscini, and F.R. Cinti, 2010, Normal faults and thrusts reactivated by deep fluids: The 6 April 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, central Italy, J. Geophys. Res., 115, B06315, doi:10.1029/2009JB007190.
- 23. DISS Working Group, 2018. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. http://diss.rm.ingv.it/diss/, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, doi: 10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.
- 24. EMERGEO Working Group, 2009. Rilievi geologici di terrenoeffettuatinell'areaepicentraledellasequenzasismicadell'Aquilano del 6 aprile 2009, Technical report, Ist. Naz. Geofis. Vulcanologia, Rome.
- 25. EMERGEO Working Group, 2010, Evidence for surface rupture associated with the Mw 6.3 L'Aquila earthquake sequence of April 2009 (central Italy), Terra Nova, Vol. 22, Is. 1.
- 26. Falcucci E., Gori S., Moro M., Galadini F., Marzorati S., Ladina C., Piccarreda D., Fredi, P., 2009, Evidenze di fagliazione normale tardo-olocenica nel settore compreso fra la conca Subequana e la Media Valle dell'Aterno, a sud dell' area epicentrale del terremoto di L'Aquila del 6 Aprile 2009. Implicazioni sismotettoniche, Earth-prints.
- 27. Fruneau B., Achache J., Delacourt C., 1996, Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry, Tectonophysics, Volume 265, Issues 3–4, Pages 181-190.
- 28. Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2000, Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE TGRS, 38 (5) (), pp. 2202-2212
- 29. Ferretti A., Prati C. and Rocca F., 2001, Permanent Scatters in SAR interferometry. IEEE Transactions Geosci. Remote Sensing, 39, 8–20.
- 30. Galli P., Giaccio B., and Messina P., 2010, The 2009 central Italy earthquake seen through 0.5 Myr-long tectonic history of the L'Aquila faults system, Quat. Sci. Rev., 29, 3768–3789.
- 31. Ghisetti F. and Vezzani L., 2002, Normal faulting, transcrustal permeability and seismogenesis in the Apennines (Italy), Tectonophysics, Volume 348, Issues 1–3, 15, Pages 155-168.
- 32. Hanssen R. F., 2001, Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic Publishers

- 33. Gruppo di Lavoro MS–AQ, 2010, Microzonazione sismica per la ricostruzione dell'areaaquilana, RegioneAbruzzo, Dipartimento della ProtezioneCivile, L'Aquila, 3.
- 34. Jordan T. H., Chen Y.T., Gasparini P., Madariaga R., Main I., Marzocchi W., Papadopoulos G., Sobolev G., Yamaoka K., Zschau J., 2011, Operational Earthquake Forecasting; State of Knowledge and Guidelines for Utilization, Annals of Geophysics, 54, 4.
- 35. Kimura H. and Yamaguch Y., 2000, Detection of Landslide Areas Using Satellite Radar Interferometry Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, V. 66, n. 3, pp. 337-344.
- 36. Lanari R., Casu F., Manzo M., Zeni G., Berardino P., Manunta M., Pepe A., 2007, An Overview of the Small BAseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. In: Wolf D., Fernández J. (eds) Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change. Pageoph Topical Volumes. Birkhäuser Basel
- 37. Lanari R., Berardino P., Bonano M., Casu F., Manconi A., Manunta M., Manzo M., Pepe A., Pepe S., Sansosti E., Solaro G., Tizzani P. and Zeni G., 2010, Surface displacements associated with the L'Aquila 2009 Mw 6.3 earthquake (central Italy): New evidence from SBAS-DInSAR time series analysis. Geophysical Research Letters, 37, L20309.
- 38. Lavecchia G., Boncio P., Brozzetti F., de Nardis R., di Naccio D., Ferrarini F., Pizzi A. and Pomposo G., 2009, The April 2009 L' Aquila (central Italy) seismic sequence (mw 6.3): a preliminary seismotectonic picture, In: Recent Progress on Earthquake Geology, Nova Science Publishers, Inc.
- 39. Lucente F. P., De Gori P., Margheriti L., Piccinini D., Di Bona M., Chiarabba C., and Piana Agostinetti N.,2010, Temporal variation of seismic velocity and anisotropy before the 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Italy. Geology, 38(11), 1015-1018.
- 40. Lundgren P., Casu F., Manzo M., Pepe A., Berardino P., Sansosti E., and Lanari R., 2004, Gravity and magma induced spreading of Mount Etna volcano revealed by satellite radar interferometry, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 31, L04602.
- 41. Manunta P., Deflorio A. M., Paganini M., Palazzo F., Farina P., Moretti S., Colombo D., Menduni G., Brugioni M., Sulli L., Montini G., Risi A., Terranova C., Piscitelli E., Matano F. &Iuliano S.2005 Sviluppo di un servizio di mappatura e monitoraggio delle frane in italia e svizzera: integrazione di tecnologie satellitari ed analisi geologica - Atti Conv. A.I.T. "Telerilevamento e dissesto idrogeologico stato dell'arte e normativa", Cagliari, 37-56.

http://www.sardegnaterritorio.it/documenti/6_83_20060201093106.pdf

42. Manzo M., Ricciardi G.P., Casua F., Ventura G., Zeni G., Borgström S., Berardino P., Del Gaudio C., Lanari R., 2006, Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 151, Issue 4, Pages 399-416.

- 43. Massonnet D., Rabaute T., 1993, Radar interferometry: limits and potential, IEEE Trans. Geoscience & Rem. Sensing, 31, 455–464.
- 44. Meisina C., Zucca F., Fossati D., Ceriani M. and Allievi J., 2006, Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the OltrepoPavese (Lombardia, Italy), <u>Engineering Geology</u>, <u>Vol. 88</u>, <u>Is. 3–4</u>, 240-259.
- 45. Mele F.andAmato A., 2014, https://ingvterremoti.wordpress.com/2014/11/09/linizio-e-la-fine-dellasequenza-sismica-dellaquila/, INGV-CNT.
- 46. Moro M., Saroli M., Stramondo S., Bignami C., Albano M., Falcucci E., Gori S., Doglioni C., Polcari M., Tallini M., Macerola L., Novali F., Costantini M., Malvarosa F., Wegmüller U., 2017, New insights into earthquake precursors from InSAR, Nature Scientific Reports, 7, 12035.
- 47. Nardò, S., Ascione, A., Mazzoli, S., Terranova, C. and Vilardo, G., 2019. PS-InSAR Data analysis: pre-seismic ground deformation in the 2009 L'Aquila earthquake region, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata Vol. 61, n. 1, pp. 41-56, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, marzo 2020; DOI 10.4430/bgta0251 (http://www.bgta.it/provapage.php?id_articolo=830 DOI10.4430/bgta0251).
- 48. Nappi R., Vilardo G., Terranova C., Bronzino G. 2004 Sistemi informativi geografici web-based per la diffusione dell'informazione sui fenomeni sismotettonici e le loro interrelazioni con il territorio 8a Conferenza Nazionale ASITA, Geomatica, Standardizzazione, interoperabilità e nuove tecnologie, 14-17 dicembre, 2004 Roma, Vol. II, 1541-1546.
- 49. Papadopoulos G. A., Charalampakis M., Fokaefs A. and Minadakis G., 2010, Strong foreshock signal preceding the L'Aquila (Italy) earthquake (Mw 6.3) of 6 April 2009, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 19-24.
- 50. Papanikolaou I. D., Foumelis M., Parcharidis I., Lekkas E. L., Fountoulis I. G., 2010, Deformation pattern of the 6 and 7 April 2009, MW=6.3 and MW=5.6 earthquakes in L'Aquila (Central Italy) revealed by ground and space based observations, Natural Hazards and Earth System Sciences; Katlenburg-Lindau Vol. 10, Fasc. 1, 73.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Morelli A., Ekström G., Olivieri M., Boschi E., 2010, Seismic moment tensors of the April 2009, L'Aquila (Central Italy), earthquake sequence, Geophysical Journal International, Volume 180, Issue 1, Pages 238– 242.
- 52. Prati C., Ferretti A., Perissin D., 2010, Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations, Journal of Geodynamics, Volume 49, Issues 3–4, Pages 161-170
- 53. Progetto S3 . 2013) https://sites.google.com/site/ingvdpc2012progettos3/
- 54. "Pre-Earthquake" 7° ProgrammaQuadro di Ricerca 2011-2012 http://www.preearthquakes.org/?jjj=1484910033110
- 55. Santo A., Ascione A., Di Crescenzo G., Miccadei E., Piacentini T. and Valente E., 2014, Tectonic-geomorphological map of the middle Aterno River valley (Abruzzo, Central Italy), Journal of Maps, 10:3, 365-378.

- 56. Scholz, C. H. 1968, The frequency magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, Bull. Seismol. Soc. Am., 58(1), 399–415.
- 57. Scholz, C. H. 1988 Earthquakes and friction laws. Nature 391, 37-42
- 58. Scholz, C. H. 2002 The mechanics of earthquakes and faulting Second Edition Cambridge University Press, 2002., 471 pages, GBP 32.95, ISBN 0521655404
- 59. Stramondo S., Tesauro M., Briole P., Sansosti E., Salvi S., Lanari R., Anzidei M., Baldi P., Fornaro G., Avallone A., Buongiorno M.F., Franceschetti G., Boschi E., 1999, The September 26, 1997 Colfiorito, Italy, earthquakes: modeled coseismic surface displacement from SAR interferometry and GPS. Geophysical Research Letters, 26(7), 883-886.
- 60. Tizzani P., Berardino P., Casu F., Euillades P., Manzo M., Ricciardi G.P., Zeni G., Lanari R., 2007, Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach, Remote Sensing of Environment, Volume 108, Issue 3, Pages 277-289.
- 61. Terranova C. &Vilardo G. 1992 Progetto di un sistema di monitoraggio delle deformazioni del suolo mediante interferometria S.A.R. (11º Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Roma 1992)
- 62. Terranova C., Iuliano S., Matano F., Nardò S., Piscitelli E., Cascone E., D'argenio F., Gelli L Alfinito M., Luongo G. 2008 the TELLUS PROJECT: a satellite-based slow-moving landslides monitoring system in the urban areas of campania region Rendiconti online Soc. Geol. It., Vol. 2 (2008), 1-3
- 63. Terranova C., Ventura G., Vilardo G., 2015 Multiple causes of ground deformation in the napoli metropolitan area (italy) from integrated PS DinSAR, geological, hydrological, and urban infrastructure data Earth-Science Reviews 146 (2015) 105–119 http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.04.001
- 64. Tofani V., Segoni S., Agostini A., Catani F. and Casagli N., 2013, Technical Note: Use of remote sensing for landslide studies in Europe, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 299-309.
- 65. Valoroso L., Chiaraluce L., Piccinini D., Di Stefano R., Schaff D., and Waldhauser F., 2013, Radiography of a normal fault system by 64,000 high-precision earthquake locations: The 2009 L'Aquila (central Italy) case study. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(3), 1156-1176.
- 66. Ventura G., Cinti F. R., Di Luccio F. and Pino N. A., 2007, Mantle wedge dynamics versus crustal seismicity in the Apennines (Italy), Geochemistry Geophysics Geosystems, ResearchLetter, Vol.8,N.2.
- 67. Vilardo G., Ventura G., Terranova, C., Matano F. and Nardò S. 2009, Ground deformation due to tectonic, hydrothermal, gravity, hydrogeological, and anthropic processes in the Campania Region (Southern Italy) from Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry. Remote Sensing of Environment, 113, 197-212.
- Vilardo G., Isaia R., Ventura G., De Martino P., Terranova C.2010 InSar Permanent Scatterer analysis reveals fault reactivation during inflation and deflation episodes at Campi Flegrei caldera - Remote Sensing of Environment 114 (2010) 2373–2383

69. Walters R. J., Elliott J. R., D'Agostino N., England P. C., Hunstad I., Jackson J. A., Parsons B., Phillips R. J., Roberts G., 2009, The 2009 L'Aquila earthquake (central Italy): A source mechanism and implications for seismic hazard, Geophysical Research Letters, Volume36, Issue 17.