

Monitoraggio radar satellitare delle deformazioni del terreno della Regione Toscana. Il sistema informativo e la rappresentazione dei dati

Riccardo Mari ^{(a)(b)}, Lorenzo Bottai ^(b), Bernardo Gozzini ^{(a)(b)}, Silvia Bianchini ^(c), Matteo Del Soldato ^(c), Roberto Montalti ^(c), Federico Raspini ^(c), Lorenzo Solari ^(c), Nicola Casagli ^(c), Vania Pellegrineschi ^(d), Marianna Bigiarini ^(e), Giovanni Massini ^(e)

^(a) IBE-CNR, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI),
mari@lamma.rete.toscana.it

^(b) Consorzio LaMMA, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI)

^(c) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze, Via la Pira 4, 50121 Firenze (FI)

^(d) Genio civile Valdarno centrale e tutela delle acque, Piazza della Resistenza 54, 51100 Pistoia (PT)

^(e) Regione Toscana, Direzione Difesa del suolo e protezione civile, Palazzo B – Via di Novoli, 26 Firenze (FI)

Riassunto

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito dell'accordo "Attività di monitoraggio del rischio idrogeologico nel territorio della regione Toscana" stipulato il 06 dicembre 2017, ai sensi dell'art. 15 della legge 7 agosto 1990, n. 241, e dell'art. 6 della legge 24 febbraio 1992, n. 225, tra la Regione Toscana, il Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze.

L'obiettivo principale delle attività è quello di fornire informazioni utili alla formulazione di un quadro sinottico dei fenomeni di deformazione del suolo sull'intero territorio regionale, a supporto delle Regioni, dei Comuni e degli Enti Territoriali coinvolti nelle attività per la difesa del territorio e di gestione dei rischi. A tale scopo è stata generata una banca dati rappresentativa del territorio regionale contenente le misure dei movimenti del terreno ottenute mediante interferometria SAR (Synthetic Aperture Radar) satellitare e resa fruibile attraverso il Geoportale della Difesa del Suolo della Regione Toscana realizzato del Consorzio LaMMA.

Introduzione

L'interferometria radar satellitare si basa sull'analisi di lunghe serie di immagini SAR (Synthetic Aperture Radar) acquisite da piattaforma satellitare sulla stessa area in tempi diversi, in modo da consentire misurazioni non invasive e ad alta precisione degli spostamenti del suolo e dei manufatti.

L'interferometria SAR satellitare rappresenta lo strumento più all'avanguardia per la misura degli spostamenti superficiali e consente l'individuazione, la mappatura e l'analisi, anche tramite le serie temporali degli spostamenti, di

quelle aree interessate da deformazioni indotte da fenomeni di dissesto idrogeologico come frane e subsidenza indotta da pompaggi della risorsa idrica o connessa allo sfruttamento della risorsa geotermica. Tale metodologia sebbene non consenta di intercettare fenomeni improvvisi ed imminenti, permette comunque un monitoraggio continuo di eventuali spostamenti e deformazioni che protraendosi nel tempo possono essere precursori e causa di possibili eventuali criticità sul territorio e sulle infrastrutture.

Il recente lancio dei satelliti della costellazione Sentinel-1 dell'ESA (Agenzia Spaziale Europea) ha aperto nuove opportunità per il monitoraggio della superficie terrestre e per la valutazione degli scenari di rischio connessi a movimenti del suolo. La missione Sentinel-1, progettata nell'ambito del progetto europeo Copernicus, è composta da una costellazione di due satelliti (Sentinel-1A e Sentinel-1B). Il satellite Sentinel-1A è stato lanciato il 3 aprile 2014, Sentinel-1B il 25 aprile 2016. Entrambi i satelliti sono equipaggiati con sensori SAR in banda C (lunghezza d'onda di circa 5.6 cm) ed hanno tempi di rivisitazione di 12 giorni. La presenza in orbita dei due satelliti gemelli ha permesso di ridurre il tempo di rivisitazione a 6 giorni. Tale missione opera in modo da acquisire archivi consistenti di immagini adatti a programmi di monitoraggio a lungo termine e garantisce un flusso continuo di dati radar satellitari acquisiti con regolarità su vaste aree del pianeta e in particolare sull'Italia. La costellazione di satelliti Sentinel-1 è ideata per fornire informazioni sempre aggiornate, in continuità con i dati provenienti dalle precedenti missioni ERS 1/2 e ENVISAT, ma con un notevole miglioramento delle informazioni, soprattutto in termini di affidabilità, fruibilità e tempestività di consegna dei dati stessi. Questa costellazione satellitare risulta la migliore scelta operativa per attività di studio e monitoraggio delle deformazioni del terreno a media risoluzione con coperture a scala regionale.

L'obiettivo generale dell'attività riguarda il monitoraggio geomorfologico in continuo dello scenario deformativo del territorio della Regione Toscana tramite dati radar interferometrici satellitari. Tale approccio di monitoraggio è finalizzato ad aggiornare in modo dinamico e continuo il quadro conoscitivo del territorio regionale per il rischio idrogeologico e geomorfologico, e a rilevare tempestivamente situazioni di criticità basate sull'individuazione di anomalie. La disponibilità di dati su tutto il territorio della Regione Toscana e il programma di acquisizioni rapide e sistematiche permettono oggi di effettuare analisi continue, specifiche e sempre aggiornate delle deformazioni in atto.

Generalità interferometria radar satellitare e tecniche multi-interferometriche

Non è scopo di questo articolo trattare in modo approfondito la parte relativa alle tecniche multi-interferometriche utilizzate nel presente progetto. Si rimanda alla bibliografia del presente lavoro e alla documentazione consultabile dal sito istituzionale e dal geoportale dedicati al progetto per gli eventuali approfondimenti soprattutto in merito alle linee guida per la corretta consultazione dei prodotti multi-interferometrici, al loro campo di applicazione, ai limiti della tecnica interferometrica e alle pratiche da evitare.

I sistemi radar (acronimo di radio detecting and ranging) 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.

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".

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.

Le tecniche multi-interferometriche si basano sulla definizione in ogni immagine radar dei così detti 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 di decorrelazione temporale e spaziale, consentono di seguire gli spostamenti intercorsi tra multiple immagini radar (*Figura 1*).

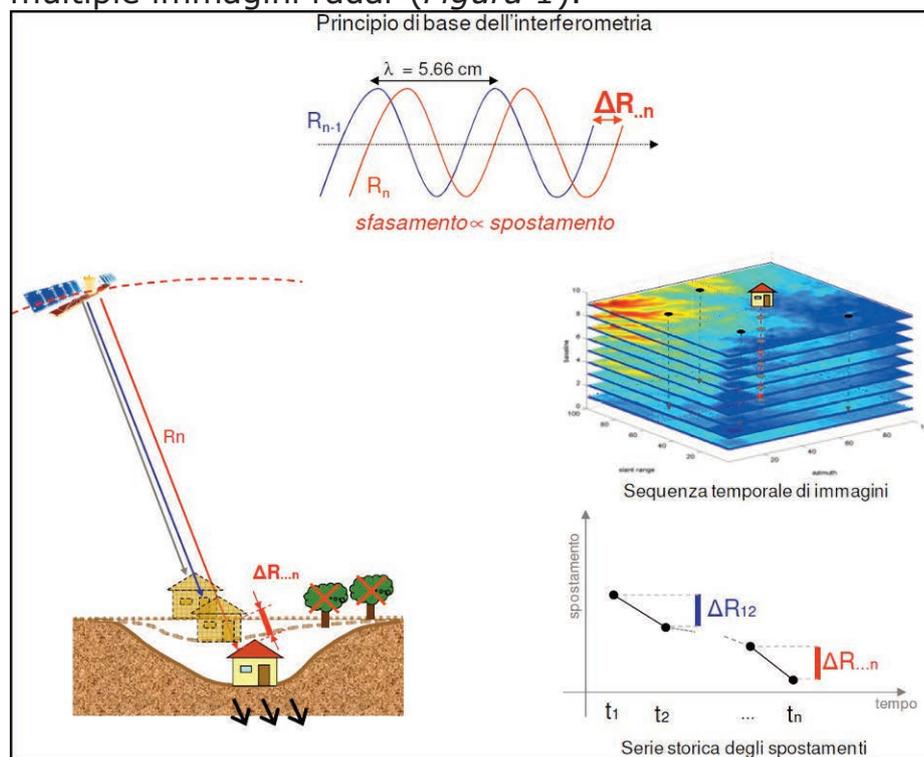


Figura 1 - Principio di funzionamento della tecnica interferometrica, basato sulla misura di variazione di distanze satellite-bersaglio a terra

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 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:

- 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.



Figura 2 - Esempio di moto con componente prevalentemente verticale come la subsidenza

verticale come la subsidenza (figura 2) 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).

Ugualmente, 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

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

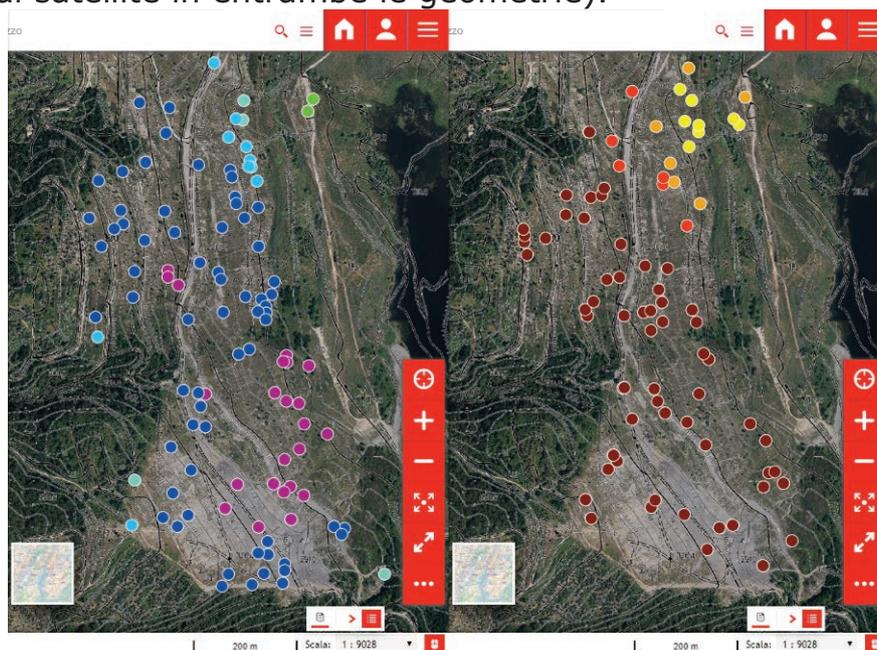


Figura 3 - Esempio con moto con componente orizzontale non trascurabile come una frana

(figura 3), 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).

Il sistema informativo e la rappresentazione dei dati

Come detto nell'introduzione gli attori del progetto sono *Regione Toscana*, che trasmette le informazioni acquisite dal monitoraggio per una loro diffusione presso gli enti competenti, il *Dipartimento di Protezione Civile*, che si occupa dei presidi territoriali e delle procedure, il *Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze*, che si occupa dell'interpretazione dei dati e del monitoraggio in continuo dello scenario deformativo del territorio ed il *Consorzio LaMMA* che si occupa dell'integrazione dei dati del progetto nel SIT regionale ed ha implementato e gestisce l'infrastruttura dati geografica dedicata.

Lo scopo principale di tale infrastruttura è quello di organizzare, gestire e divulgare, nel modo più semplice e chiaro possibile, i prodotti del progetto, in modo da renderli consultabili con relativa semplicità sia dal decisore politico che dal singolo cittadino.

È infatti la prima volta che questa tipologia di dato è resa accessibile a tutti, in modo continuo, con aggiornamento temporale frequente (10 giorni circa), nella sua completezza d'informazione e per un intero territorio regionale.

I software utilizzati per l'implementazione del sistema sono il DBMS PostgreSQL, con estensione spaziale PostGIS, come sistema di gestione di basi di dati. Geoserver e Geowebcache quali software per la pubblicazione dei dati spaziali come geo-servizi secondo gli standard dell'OGC. Infine MapStore come framework per la consultazione dinamica ed in modalità dataless dei dati del progetto.

Il flusso delle operazioni che è stato implementato per la condivisione dei dati è riassunto in figura 4.

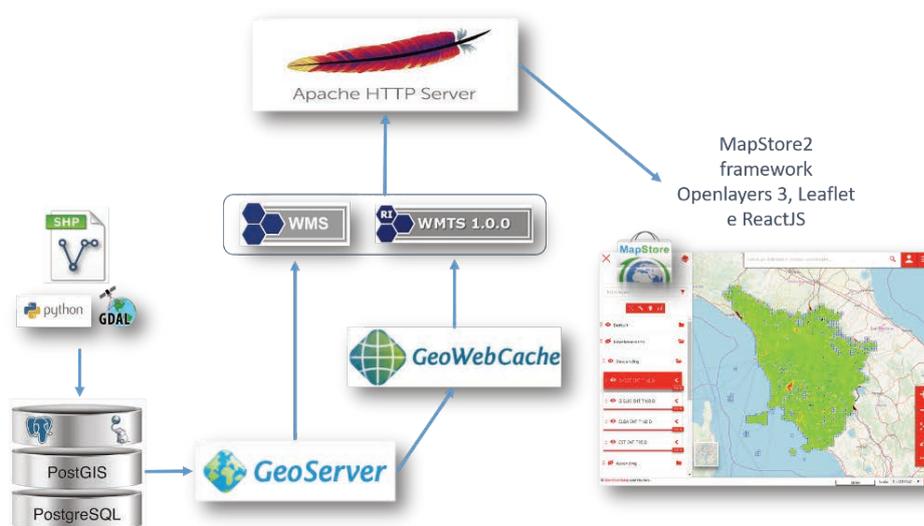


Figura 4 - Architettura del sistema

I circa 1.600.000 punti, suddivisi in orbita ascendente e discendente, che rappresentano i Permanent Scatterers (PS) derivati dall'elaborazione dell'archivio delle immagini Sentinel-1, vengono forniti da TRE ALTAMIRA in

formato shapefile (formato di consegna) e caricati su di un ftp. Tramite una procedura automatica vengono archiviati in un database gestito dal DBMS PostgreSQL ed organizzati in una struttura che ne rende agevole

l'interrogazione temporale. I punti vengono infine gestiti e condivisi dal software Geoserver per la pubblicazione secondo gli standard dell'OGC e visualizzati tramite il framework MapStore.

L'infrastruttura, oltre alla pubblicazione dei PS, si occupa della pubblicazione (attualmente in una parte riservata del portale) dei prodotti delle due attività derivate dall'analisi e dall'interpretazione dei PS stessi (figura 5).

Tali attività sono il *PS-Mapping*, che consiste nell'elaborazione di una mappa della deformazione del suolo e la evidenziazione delle zone e degli elementi a rischio a partire dall'elaborazione dell'archivio storico, e cioè delle serie temporali dei dati di ogni singolo punto e il *PS-Monitoring*, un servizio che viene elaborato ogni 12 giorni in base ai dati degli ultimi passaggi dei satelliti ed emette dei bollettini di monitoraggio.

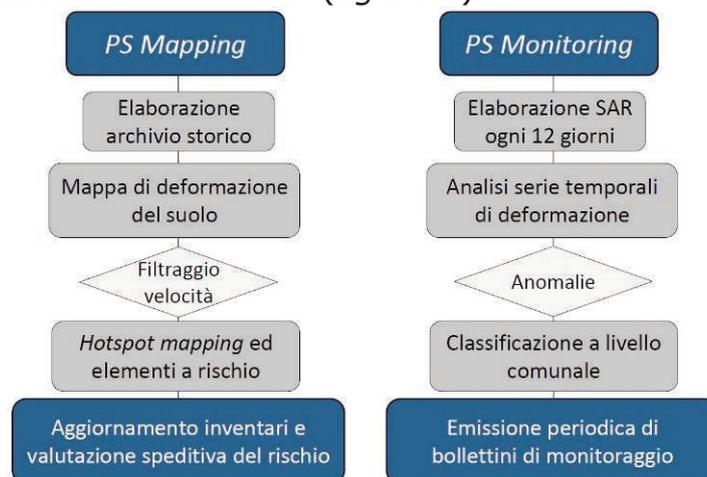


Figura 5 - Prodotti del progetto

I dati del progetto possono essere visualizzati secondo due modalità, una modalità dataless tramite il geoportale della difesa del suolo che permette una prima interazione con il dato ed una modalità desktop tramite un software GIS dopo aver scaricato i PS sul proprio pc.

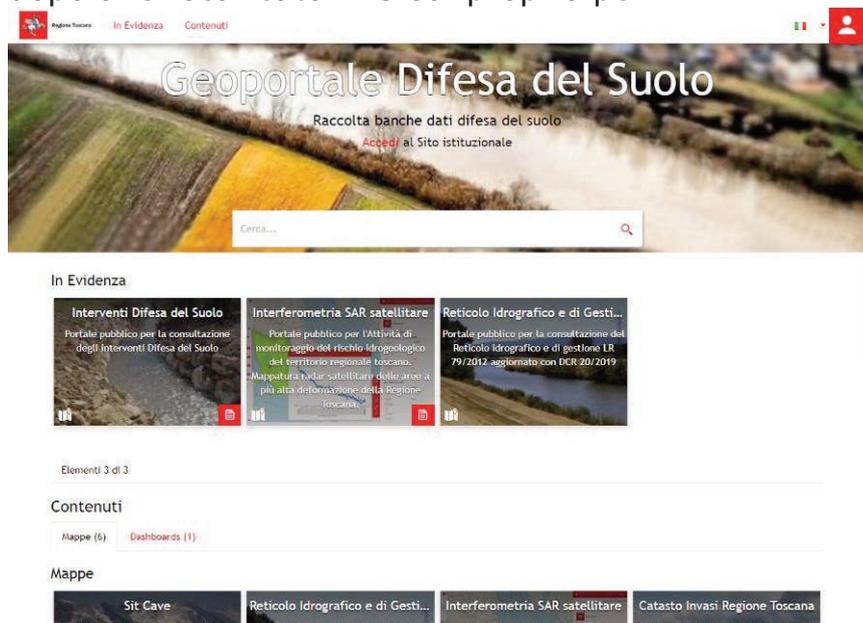


Figura 6 - Geoportale Difesa del Suolo

per il corretto utilizzo dei prodotti del progetto, quali il *Manuale d'uso del portale*, i *Termini di utilizzo* e le *Linee guida per l'utilizzo dei dati interferometrici*.

Tramite il geoportale della Difesa del Suolo della Regione Toscana (figura 6), https://geoportale.lamma.rete.toscana.it/difesa_suolo/ è possibile accedere al WebGIS dedicato ai dati del progetto (Figura 7).

L'home page ufficiale del progetto è raggiungibile dal seguente indirizzo <http://www.regione.toscana.it/-/attivita-di-monitoraggio-del-rischio-idrogeologico-del-territorio>

La pagina, oltre ad una introduzione del lavoro svolto ed ai link per il download del dato, permette la consultazione di alcuni documenti

fondamentali per il

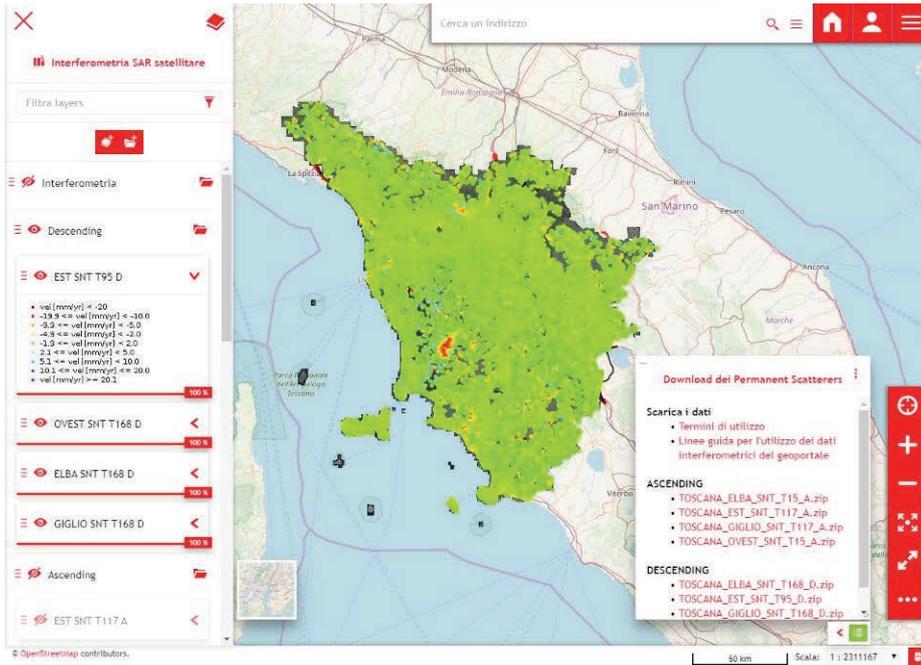


Figura 7 - WebGIS Interferometria SAR satellitare

Quest'ultimo è organizzato secondo un layout standard proprio dei visualizzatori dei dati spaziali e dispone della tavola dei contenuti, dove sono elencati i livelli consultabili e alcuni strumenti di interazione con tali livelli, la mappa per la visualizzazione e l'interazione con i dati e vari strumenti che permettono di zoomare nella

mappa, interrogare gli oggetti, stampare la mappa e aggiungere nuovi livelli (siano essi dei dati presenti in locale che provenienti dai geo-servizi messi a disposizione da altri enti).

Oltre ai dati interferometrici sono presenti alcuni dati provenienti dai servizi di Geoscopio di Regione Toscana, come i dati di infrastrutture e trasporti provenienti dal progetto ITERNET (strade, ferrovie e loro classificazione).

I PS (orbita ascendente e discendente) vengono visualizzati utilizzando una specifica scala colori la quale potrà essere riprodotta dall'utente attraverso un file di vestizione consegnato congiuntamente ai dati puntuali. La scala colori è mostrata in Figura 8.

I punti di misura sono classificati secondo la velocità media annua di deformazione (espressa in mm/anno) secondo la seguente convenzione: il colore verde corrisponde a quei punti la cui velocità di deformazione è molto bassa, compresa tra -2,0 e +2,0 mm/anno, ovvero all'interno dell'intervallo di sensibilità della tecnica interferometrica e definito sulla base della deviazione standard dei dati utilizzati; con i colori da giallo a rosso sono classificati quei punti di misura con velocità di deformazione negativa, che corrisponde a movimenti in allontanamento dal satellite lungo la linea di vista sensore-bersaglio; con i colori da azzurro a blu sono classificati quei punti di misura con velocità di deformazione positiva, che corrisponde a movimenti in avvicinamento al satellite lungo la linea di vista sensore-bersaglio. I dati sono disponibili in entrambe le orbite di acquisizione del satellite Sentinel-1, ascendente (da Sud a Nord) e discendente (da Nord a Sud). La tabella degli

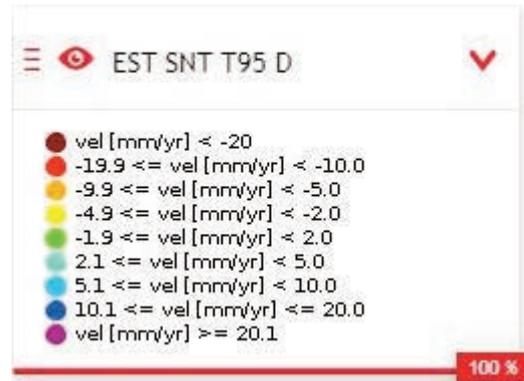


Figura 8
Scala colori standardizzata per tutti i prodotti interferometrici visualizzati nel geoportale

attributi associata ad ogni punto contiene diverse informazioni utili al fine dell'interpretazione dei movimenti. Queste informazioni possono essere visualizzate anche in un qualsiasi sistema GIS una volta scaricato il dato dal geoportale. Di seguito sono elencati i campi che contraddistinguono ogni punto:

- CODE, codice univoco di riconoscimento del PS;
- HEIGHT, quota del punto estratta a partire dal modello digitale del terreno usato per elaborare le immagini radar;
- EFF_AREA, se uguale a zero il punto è un PS. Se maggiore di zero il punto è un DS, quindi riferito ad un'area e non ad un oggetto puntuale (il valore è in m²);
- VEL, valore di velocità media del punto misurato lungo la LOS del satellite ed espresso in mm/anno;
- V_STDEV, valore di deviazione standard della velocità media (espressa in mm/anno);
- H_STDEV, stima dell'errore della stima della quota del PS (espresso in m);
- COHERENCE, indice che misura l'accordo tra i dati ed il modello di spostamento utilizzato in fase di analisi (numero compreso tra 0 e 1, rispettivamente nessuna attinenza ed elevato accordo con il modello). Essa indica la qualità della serie temporale per ogni punto. Se il valore è superiore a 0.75 la serie temporale si considera molto affidabile.



Figura 9 - Esempio di serie temporale di deformazione. In ascissa la data di acquisizione, in ordinata lo spostamento registrato in millimetri.

Tramite lo strumento di interrogazione puntuale degli oggetti sulla mappa (abilitato di default) è possibile visualizzare le informazioni associate ad ogni punto di misura. Da tali informazioni è possibile visualizzare la serie temporale di deformazione associata al PS, dall'inizio del periodo monitorato fino alla data dell'ultima acquisizione satellitare disponibile (Figura 9).

Conclusioni

L'infrastruttura geografica appena descritta rappresenta lo strumento utilizzato per organizzare, gestire e divulgare i prodotti del progetto Monitoraggio radar satellitare delle deformazioni del terreno della Regione Toscana. Al momento è la prima esperienza nella quale questa tipologia di dato è resa accessibile a tutti, sia al funzionario tecnico che al libero professionista, in modo continuo, con aggiornamento temporale frequente (10 giorni circa), nella sua completezza d'informazione e per un intero territorio regionale.

Tale infrastruttura è inserita all'interno del Geoportale Difesa del Suolo che rappresenta il punto di accesso unificato alle banche dati realizzate e gestite per la Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile della Regione Toscana. La direzione ha competenze in materia di difesa del suolo e della costa, protezione civile, prevenzione rischio idraulico ed idrogeologico e tutela della risorsa idrica, servizio idrologico, rapporti con i consorzi di bonifica oltre al coordinamento degli interventi per la gestione ed il superamento delle emergenze.

Al suo interno sono presenti sia portali con libero accesso che portali con accesso riservato dedicati ai Geni civili, Consorzi di bonifica ed altre pubbliche amministrazioni.

Da sottolineare il fatto che tale infrastruttura si integra perfettamente con i geo-servizi resi disponibili dal Geoportale GEOscopio della Regione Toscana, con il quale è possibile visualizzare ed interrogare i dati geografici regionali, in quanto utilizza gli standard OGC per la condivisione dei dati spaziali, il tutto nell'ottica di una infrastruttura federata per la condivisione dell'informazione geo-riferita.

L'infrastruttura è stata inoltre sviluppata utilizzando software open-source per tutte le sue componenti, quali lo storage, il software di pubblicazione secondo gli standard geo-spaziali dell'Open Geospatial Consortium (OGC) e la parte di presentazione e consultazione online.

Scopo fondamentale di questo articolo è stato quello di riassumere l'esperienza dell'Attività di monitoraggio del rischio idrogeologico che è stata maturata nella Regione Toscana, con particolare riguardo all'infrastruttura di dati implementata per l'archiviazione, gestione e condivisione dei prodotti del progetto. Si rimanda alla bibliografia del presente lavoro e alla documentazione consultabile dal sito istituzionale e dal geoportale dedicati al progetto per gli eventuali approfondimenti, soprattutto in merito alle linee guida per la corretta consultazione dei prodotti multi-interferometrici, al loro campo di applicazione, ai limiti della tecnica interferometrica e alle pratiche da evitare.

Riferimenti bibliografici e sitografia

Del Soldato M.; Solari L.; Raspini F.; Bianchini S.; Ciampalini A.; Montalti R.; Ferretti A.; Pellegrineschi V.; Casagli N. (2019). Monitoring ground instabilities using SAR satellite data: a practical approach. ISPRS INTERNATIONAL JOURNAL OF GEO-INFORMATION, vol. 8(7), pp. 1-24, ISSN:2220-9964
 Crosetto et al., 2016, "Persistent scatterer interferometry". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 115, pp 78-89 DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.

Ferretti et al., 2011, "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Volume: 49, Issue: 9, pp 3460 - 3470 DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465

Zhou et al., 2009, "Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research", Sensors 2009, 9(3), 1876-1912; <https://doi.org/10.3390/s90301876>

Casagli et al., 2009, "Nuove tecnologie radar per il monitoraggio delle deformazioni superficiali del terreno: casi di studio in Sicilia".

https://www.researchgate.net/publication/233859531_Nuove_tecnologie_radar_per_il_monitoraggio_delle_deformazioni_superficiali_del_terreno_casi_di_studio_in_Sicilia

Autori vari, dicembre 2009 "Linee guida per l'analisi di dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici", redatte nell'ambito del progetto di copertura interferometrica nazionale "Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A)".

<http://www.pcn.minambiente.it/GN/images/documenti/leggi/LINEE%20GUIDA%20PER%20ANALISI%20DI%20DATI.pdf>

"Nota sintetica per la comprensione del dato satellitare PSInSAR e Squeesar", progetto RiskNatAlcotra. Autori vari:

http://www.cartografiar.ligione.liguria.it/RiskNat/doc/NOTA%20SINTETICA_P_SInSAR.pdf

Canuti et al., 2006, "Analisi dei fenomeni di subsidenza nel bacino del fiume Arno mediante interferometria radar", Giornale di Geologia Applicata 4 (2006) 131-136, doi: 10.1474/GGA.2006-04.0-17.0145.

<https://www.aigaa.org/AIGA/public/GGA.2006-04.0-17.0145.pdf>

Colesanti et al., 2003, "Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique", Engineering Geology Volume 68, Issues 1-2, February 2003, Pages 3-14 DOI: 10.1016/S0013-7952(02)00195-3.

Ferretti et al., 2001 "Permanent scatterers in SAR interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume: 39, Issue: 1, pp: 8-20 DOI: 10.1109/36.898661

Cruden & Varnes, 1996, "Landslide Types and Processes", National Academy of Sciences, Special Report, 247: 36-75.

Home page Monitoraggio radar satellitare delle deformazioni del terreno della Regione Toscana: <http://www.regione.toscana.it/-/attivita-di-monitoraggio-del-rischio-idrogeologico-del-territorio>

Geoportale Difesa del Suolo:

https://geoportale.lamma.rete.toscana.it/difesa_suolo/

Geoserver OpenSource: <http://geoserver.org/>

MapStore: <https://github.com/geosolutions-it/MapStore2>