

Sistemi di monitoraggio GNSS di strutture, infrastrutture e territorio: uno Standard

di Fernando Sansò, Ludovico Biagi, Caldera Stefano, Lisa Pertusini

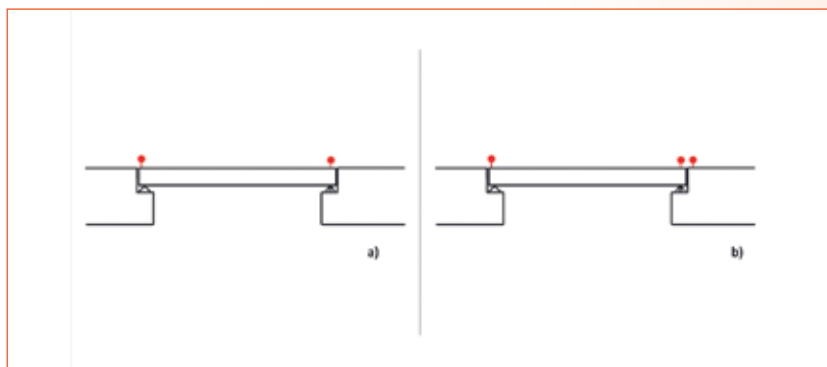


Fig. 1 - Monitoraggio di un ponte: nella configurazione a) si vedono solo le deformazioni della struttura, nella configurazione b) si vede anche lo spostamento del ponte rispetto all'ambiente circostante.

L'esperienza di uno spin-off del Politecnico di Milano nella Ricerca e Sviluppo di soluzioni innovative nel campo del monitoraggio GNSS a basso costo

“Ho insegnato per oltre 10 anni un corso dal titolo Topografia e fenomeni aleatori, dedicato agli studenti del Corso di laurea in Ingegneria Civile del Politecnico di Milano. Scopo principale del corso era far comprendere il nesso profondo esistente tra tecnologie topografiche/geodetiche per il rilevamento degli spostamenti di punti e metodi statistici di analisi dei dati per valutare la significatività e la regolarità o meno di segnali di deformazione nel tempo. Dopo molti anni di ricerca e di esperienza nel settore, con l'avvento di strumenti satellitari (GNSS) sento la necessità di proporre uno standard per la messa in opera di un sistema di monitoraggio GNSS che non sia visto come una pura installazione di hardware (HW) più o meno tecnologicamente avanzato. Faccio questo, con colleghi coautori dell'articolo, sia nella mia veste di Professore Emerito del Politecnico di Milano, che di Presidente di GReD, uno spin-off del Politecnico che lavora da 6 anni nel campo del monitoraggio. In particolare tutti i dati dei sistemi di monitoraggio discussi nell'articolo, nonché molte delle soluzioni concrete date alle questioni di analisi dei dati, sono basate sull'esperienza fatta con GReD”.

Fernando Sansò

Il monitoraggio geodetico per punti

Ci proponiamo nei prossimi paragrafi di dimostrare con diversi esempi che le osservazioni GNSS, anche eseguite con strumenti di costo assai basso (Low Cost, LC) sono competitive con quelle classiche quanto a precisione, ma sono anche capaci di dare una immagine continua nel tempo dello spostamento dei punti, agendo in modo totalmente automatico,

connettendo punti tra loro non visibili, in tutte le condizioni di tempo e fornendo informazioni utili con una latenza fino ad un'ora.

Passeremo poi a fissare i requisiti (gli standard) che devono essere soddisfatti affinché un sistema di monitoraggio fornisca i risultati di accuratezza, affidabilità e latenza richiesti dall'utenza.

Lo scopo finale del monitoraggio, tralasciando gli aspetti

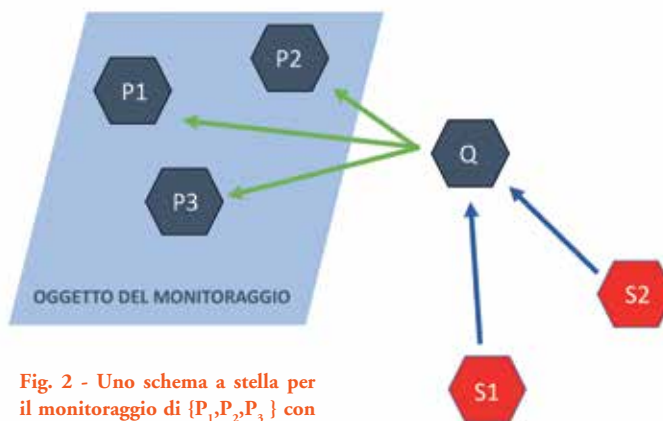


Fig. 2 - Uno schema a stella per il monitoraggio di $\{P_1, P_2, P_3\}$ con riferimento in Q a sua volta monitorato da stazioni di un servizio permanente, S₁ e S₂.

geofisici che sono al di fuori del tema di questo articolo, è in questo ambito quello della prevenzione/mitigazione dei danni provenienti da rischi di tipo strutturale e/o naturale, specie in ambito geotecnico e idrogeologico. Intendiamo qui focalizzarci su casi in cui la rete di monitoraggio sia contenuta in un'area di diametro massimo di 10 km.

Sebbene i comportamenti fisici di una struttura e di una porzione di terreno siano in genere assai diversi, all'approssimarsi di un evento disastroso si manifestano caratteristiche simili tra loro. Tipico è che l'oggetto del monitoraggio presenti sia un moto lento e regolare, su scale lunghe di tempo (tra alcuni giorni e alcuni anni) che comunque assume una forma statisticamente stazionaria, sia un moto a scala di tempo più breve, spesso legato a fattori ambientali quale la temperatura, ma comunque stazionario, e che in presenza di qualche fattore scatenante (ad esempio l'accumulo di affaticamento di una struttura o la presenza di una pioggia intensa su una frana) esca dal regime stazionario accelerando il proprio moto, fino a raggiungere un momento di rottura con un moto discontinuo che segnala il sopraggiungere di un disastro.

Queste osservazioni permettono di definire alcuni requisiti importanti del monitoraggio in continuo. L'andamento a tempi lunghi potrà essere colto con serie temporali di una soluzione al giorno. L'accuratezza delle coordinate della soluzione giornaliera dovrà stare tra 1 e 2 millimetri, così che il modello di trend abbia uno s.q.m. della previsione submillimetrico. Questo dovrebbe permettere di recepire deviazioni dal moto di fondo in tempi che vanno

dai 10 ai 100 giorni, a seconda dell'entità della variazione. L'andamento a tempi più corti richiede soluzioni con una risoluzione temporale maggiore, ad esempio soluzioni orarie che tipicamente avranno una accuratezza inferiore; risoluzione ed accuratezza sono due parametri da analizzare di volta in volta in funzione del caso in esame.

Progettazione e implementazione del sistema di monitoraggio GNSS

Suddividiamo l'argomento secondo gli aspetti di HW e quelli

del disegno della rete dei ricevitori GNSS.

Hardware

Diciamo subito che nel monitoraggio locale è opportuno dirigere la scelta verso ricevitori GNSS a basso costo (LC); questi infatti a parità di budget permettono di monitorare un maggior numero di punti e quindi rendono più efficace il monitoraggio. Come già sperimentato nella letteratura degli anni passati (Benedetti et al. 2014, Biagi et al. 2016, Caldera et al. 2016, Gogoi et al. 2018) ciò non va a detrimento dell'ac-

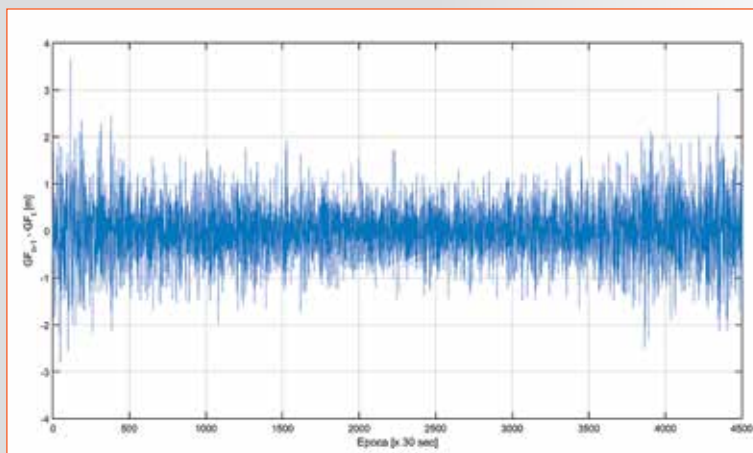


Fig. 3 - Andamento dell'indice $GF_{(t+1)} - G_t$ per un ricevitore LC ed un satellite, della durata di 4440 epoche (ogni 5 s), corrispondenti a circa 6 ore di tracciamento; la media dell'indice è -2 mm e lo s.q.m. è di circa 50 cm. Si distinguono alcuni spike che potrebbero corrispondere a grandi c.s.

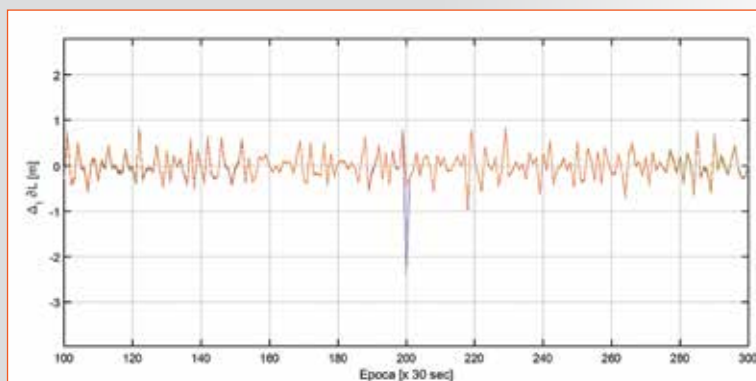


Fig. 4 - L'indice $\Delta_i \partial L$ per una stazione e tutti i satelliti in vista; sulle ascisse il numero di epoche (ogni 30 s) e sulle ordinate l'indice in metri. Risulta evidente un grande c.s. per uno dei satelliti in vista, all'epoca 200, pari a -13.

curatezza: ulteriori esempi sul campo saranno riportati nel presente articolo.

Tuttavia, essendo il punto monitorato il centro di fase dell'antenna, è necessario che questi presenti una stabilità compatibile con la precisione che si vuole ottenere e, ove possibile, è bene applicare alle osservazioni le correzioni del centro di fase in funzione di angolo d'altezza ed azimut della linea di vista del satellite (Rothacher 2001). Questo richiede una accurata scelta che bilanci il costo dell'antenna stessa con il suo rendimento.

Un'altra funzionalità necessaria al sistema di monitoraggio è quella del controllo e della memorizzazione dei dati. Il controller, oltre a verificare il buon funzionamento di tutto l'apparato, ha il compito di imporre al ricevitore la frequenza di campionamento delle osservazioni. Questo permette di ridurre le richieste di trasmissione dei dati in periodi normali e invece di intensificarle in presenza di movimenti critici. Oltre che contenere una adeguata memoria, il modulo di monitoraggio deve avere una batteria che consenta il mantenimento autonomo dei dati, anche quando la stazione sia dotata di connessione alla rete elettrica. Va da sé che qualora la alimentazione ordinaria non sia possibile, occorre anche disporre di pannelli fotovoltaici opportunamente dimensionati. Inoltre l'unità di monitoraggio deve contenere un modulo per la trasmissione dei dati. La situazione ideale è che sia presente alla stazione una connessione internet che permetta di scaricare in modo continuo i dati stessi. Quando questa non sia presente, i dati andranno inviati tramite rete mobile o addirittura, per stazioni in siti non coperti da una rete telefonica,

con una connessione di tipo satellitare.

Infine un sistema di monitoraggio necessita di un centro di raccolta ed elaborazione dei dati (CRED). A parte gli aspetti SW di analisi dei dati, di cui ci occuperemo in seguito, è chiaro che il CRED deve in primo luogo raccogliere i dati ed archivarli per un periodo che dipende da quando si pensa che possano essere sottoposti a nuove analisi. Inoltre il CRED dovrà mantenere i risultati delle analisi (stima delle posizioni e loro accuratze) ed eventualmente di parametri ancillari, quali ad esempio i ritardi zenitali (di cui parleremo oltre), nonché costruire una interfaccia-utente che permetta all'utilizzatore di compiere varie azioni con i risultati del monitoraggio, dall'invio di messaggi di allerta con varie soglie di anomalia del comportamento dell'oggetto, alla consultazione retrospettiva delle serie temporali per periodi di interesse, alla rielaborazione con risoluzione temporale maggiore di particolari periodi. L'ultimo aspetto HW da considerare è quello della installazione della stazione, cioè del fissaggio dell'antenna GNSS all'oggetto da monitorare, che deve essere abbastanza rigido da garantire il mantenimento della posizione relativa a livello del decimo di millimetro.

Disegno della rete

In linea di principio un ricevitore GNSS è in grado, anche se isolato, di fornire la posizione del punto in un sistema di riferimento terrestre unificato (ITRF). Ciò tuttavia non è esattamente quello che serve per il problema che ci siamo posti; infatti ad esempio la velocità di un punto in ITRF comprenderà necessariamente anche le componenti tettoniche del moto

della regione in cui hanno sede i fenomeni che vogliamo monitorare. Occorre infatti ben comprendere che gli spostamenti che interessano in un problema di monitoraggio devono essere relativi ad un sistema di riferimento istituito fisicamente nell'area di interesse, ad esempio creando una o più stazioni di riferimento. Ciò tra l'altro permette di andare ad un'analisi dei dati GNSS eseguita per basi (vedi oltre), che comunque fornisce il risultato più accurato in termini di posizionamento relativo.

In ogni caso il punto (o i punti) di riferimento è quello che dà senso agli spostamenti che rileviamo, quindi è quello che consideriamo "fermo".

Per quanto riguarda le stazioni di riferimento, occorre dire che in generale vengono utilizzati ricevitori a due frequenze, per meglio garantire l'accuratezza della rete. Anche un singolo ricevitore è efficace come riferimento, se è disponibile nell'area un servizio di posizionamento (Barbarella et al., 2009) con una stazione permanente ad una distanza inferiore ai 30 km. Il lavoro sul campo svolto da GReD ci ha mostrato che anche un ricevitore LC a singola frequenza può svolgere il ruolo del riferimento, specie se è a sua volta monitorato da una rete di posizionamento regionale con i limiti sopraddetti.

È poi chiaro che la rete di monitoraggio dovrà contenere stazioni GNSS sui punti significativi per i fenomeni che vogliamo tenere sotto controllo. Poiché il numero di punti è generalmente limitato dal budget, è essenziale che la scelta dei punti sia fatta da un esperto del processo deformativo da monitorare. Questa condizione, tuttavia, da sola non è sufficiente; occorre anche verificare che

i siti delle stazioni monitorate abbiano, ove possibile, una ampia visibilità del cielo e, se necessario, una buona connessione GPRS. Naturalmente analoghi criteri valgono, se non di più, per la (le) stazione di riferimento. Infine un accenno al grafo della rete. Come si sa (Leick et al. 2015), per reti GNSS di maggiori dimensioni, c'è una tendenza a disegnare il grafo mantenendone i lati i più corti e omogenei possibile, rendendo così più efficiente l'analisi dei dati per differenze doppie; infatti in tal caso meglio si cancellano i termini perturbativi e con maggior probabilità si ha un tracciamento simultaneo degli stessi satelliti. Tuttavia, per reti di monitoraggio alla scala di cui stiamo parlando, questi criteri sono assai meno cogenti.

Supposto che la stazione di riferimento abbia caratteristiche HW superiori alle stazioni monitorate, è bene che queste siano direttamente collegate a quella evitando che ad esempio un malfunzionamento di una stazione a cui ne siano connesse altre in serie, abbia a invalidarne i risultati. Ne segue che lo schema più elementare, ma efficiente di grafo per il monitoraggio di una piccola rete è quello a stella riportato in Fig.2.

Analisi di dati GNSS: dalle osservazioni alle posizioni

Con questo titolo intendiamo l'analisi di tutti i valori di codice e di fase raccolti da tutti i ricevitori del sistema, in un certo tempo (1 giorno, 1 ora, ...) allo scopo di stimare una posizione (cioè coordinate 3D) di ognuno dei punti, rappresentativa di quel periodo, in un sistema di riferimento definito dalla stazione (stazioni) di riferimento. Il tempo di latenza del risultato può essere variabile tra 1 ora e qualche giorno, a secon-

da dell'applicazione considerata. Vogliamo sottolineare che oggi, dati il numero delle costellazioni e dei satelliti tracciabili, anche da ricevitori LC, e data la aumentata stabilità dell'elettronica, il problema più importante dell'uso del GNSS nel monitoraggio sta nella capacità di evitare soluzioni generate da osservazioni spurie, non scambiandole per falsi spostamenti critici. In effetti è molto più importante sapere se un punto si muove di 10 cm in un giorno per davvero, o si tratta di un outlier, che non ottenere dall'algoritmo di stima una deviazione standard delle coordinate di 1 mm piuttosto che di 1,5 mm. Per questo motivo è essenziale dividere l'analisi dei dati in preprocessing, processamento e validazione del modello.

Preprocessing

È una fase di analisi dei dati finalizzata a eliminare il più possibile dati spuri prima che questi vengano passati alla fase di processamento. In questa fase si cerca anche di determinare i grandi cycle slip (CS), cioè almeno quelli maggiori di 5 volte la lunghezza d'onda, ovvero di circa ± 1 m.

Descriveremo qui 4 operazioni di preprocessing:

1. selezione di dati basata sull'uso di un indice di inefficienza della connessione tra singolo ricevitore e singolo satellite; tale indice è il rapporto tra il numero teorico di osservazioni (codice e fase) che si dovrebbero trovare nel tempo, con il campionamento prescritto, ed il numero vero di osservazioni ricevute dal CRED.
2. Come è noto la combinazione Geometry Free (GF) di codice e fase è condizio-

nata dal noise del codice, che possiamo pensare a livello dei 30 cm.

La sequenza dei valori, differenziata tra due tempi consecutivi nel periodo, permette di individuare la presenza di eventuali grandi CS.

3. Dopo un periodo iniziale di validazione del sistema di monitoraggio, le posizioni di tutti i punti in un riferimento locale possono considerarsi note, con al più qualche centimetro d'errore, anche in presenza di movimenti "veloci". Ne segue che la distanza stazione-satellite è nota con errori inferiori ai 10/20 cm, anche considerando l'errore delle effemeridi rilasciate da IGS con una latenza di circa due giorni per le rapide e circa due settimane per le precise. La variazione dell'ambiguità di fase è nulla se, nel periodo considerato, non intervengono CS. Pertanto, calcolando dal valore di range e dalla correzione di orologio stimata con il solo codice, per tutti i satelliti in vista, e successivamente calcolando le differenze tra due epoche della fase corretta da, si trova un indice avente uno s.q.m. dell'ordine di 20/30 cm, dovuto per lo più all'errore di orologio stimato dal codice, a meno della presenza di CS. Un esempio è presentato in Fig. 4, dove sono rappresentati gli indici di diversi satelliti ed uno di essi ha un CS all'epoca 200.
4. Un'operazione più raffinata che può essere eseguita dopo un certo periodo di funzionamento della stazione, è la caratterizzazione elettromagnetica del sito,

ovvero la stima degli effetti del multipath come descritto in letteratura (Leick et al. 2015).

Tutto sommato possiamo affermare che l'uso di un preprocessamento profondo come quello sopra proposto può fornire al processamento un dato con errori omogenei che dipendono sostanzialmente, come previsto dalla teoria (Teunissen & Montenbruck 2017), dall'angolo zenitale della linea di vista del satellite, con i grandi cycle slips (da 3 a 5 cicli o più) già identificati.

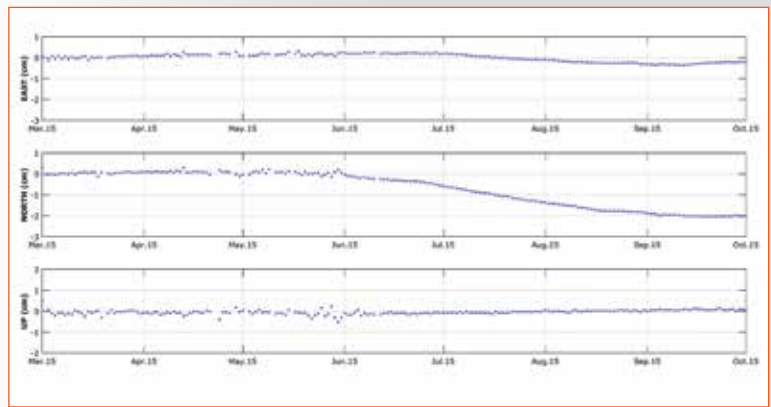


Fig. 5 - Monitoraggio giornaliero di una base di 25 m tra due tralicci: si vede chiaramente una deformazione tra il mese di giugno e il mese di settembre.

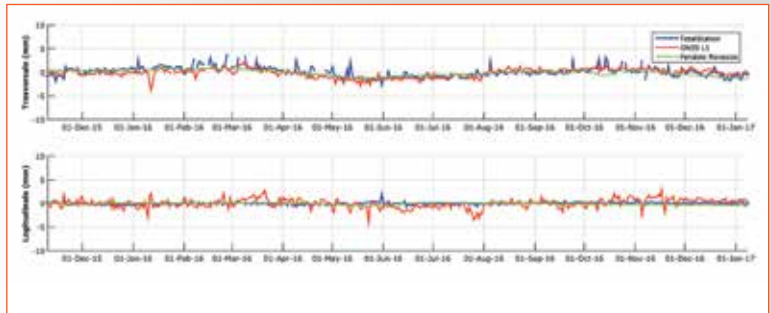


Fig. 6 - Confronto tra spostamenti derivati da GNSS, total station e pendolo inverso.

Processamento

Non intendiamo qua ripetere la teoria che porta alla scrittura delle equazioni di osservazione del GNSS, in particolare delle fasi (Biagi, 2008, Cina, 2014). Ricordiamo soltanto che per basi (coppie di stazioni) della lunghezza tra qualche metro e pochi chilometri, usando la tecnica delle differenze doppie, molti termini correttivi possono essere eliminati, pervenendo alle equazioni di osservazioni qui sotto descritte.

Adottiamo la notazione per differenze doppie, tra due stazioni (M, S) e due satelliti (r, s). Si può allora scrivere, ad esempio per la frequenza L1,

$$\delta L_{M,S}^{r,s} = L_{M,S}^{r,s} - (\tilde{\rho}_{M,S}^{rs} + \tilde{T}_{M,S}^{rs}) = \delta \rho_{M,S}^{rs} - N_{M,S}^{rs} \Lambda_1 + \delta T_{M,S}^{rs} + v_{M,S}^{rs},$$

dove L sono le fasi misurate, $\tilde{\rho}$ le distanze calcolate con i valori istantanei delle effemeridi e le coordinate approssimate delle stazioni, \tilde{T} sono gli effetti troposferici calcolati con i ritardi zenitali da modello (ad esempio Niell (Niell 2001) e con una mapping function (ad esempio la Vienna mapping function (Böhm & Schuh 2003), $\delta \rho$ le variazioni di distanza dovute alle correzioni nella posizione delle stazioni, N sono le ambiguità intere, Λ_1 la lunghezza d'onda nominale del canale L1, δT le correzioni di ritardo troposferico dovute ad una correzione del ritardo zenitale (ZTD), v è il noise di misura.

Nell'equazione precedente il termine di correzione delle distanze può essere linearizzato come

$$\delta \rho_{M,S}^{rs} = \left(\frac{e_M^s + e_S^s}{2} - \frac{e_M^r + e_S^r}{2} \right) \cdot (\delta x_M - \delta x_S);$$

dove e_K^i è il versore della linea di vista tra stazione K e satellite i .

Se inoltre M rappresenta la master station, cioè il punto in cui è centrato il sistema di riferimento, nell'equazione scritta si può prendere $\delta x_M = 0$. Inoltre se $M(\zeta_S^s)$ è la mapping function scelta, tenendo conto che l'angolo zenitale della linea di vista ζ_S^s dipende poco da uno spostamento della posizione della stazione S (anche di 1 km), si può ipotizzare che per una rete di non grandi dimensioni anche la correzione troposferica sia eliminata. Se invece i punti sede di misura sono a quote diverse per centinaia di metri e sono distanti tra loro di 1-2 km, le incognite di ritardo zenitale vanno mantenute e stimate; tipico può essere un valore stimato ogni ora.

Date queste osservazioni occorre prendere una decisione importante sul processamento dei dati. Si deve procedere per basi, oppure fare un'unica compensazione ai minimi quadrati con tutte le osservazioni processate in un'unica rete? Vi sono buone ragioni teoriche e pratiche per affermare che in ogni caso la compensazione base per base deve essere effettuata (Leick et al. 2015). Infatti, in primo luogo si può osservare che se si è adottato un disegno a stella, con una master station di riferimento, la compensazione unica della rete delle basi e quella fatta base per base danno risultati identici quanto alla stima delle posizioni. Inoltre, dato il particolare fine delle operazioni di monitoraggio, è importante avere le compensazioni base per base, perché si possano sottoporre a test situazioni in cui una parte dei punti si muovono ed altri no.

Esistono molti SW per il processamento dei dati GNSS allo scopo del monitoraggio. La nostra maggiore esperienza è con il SW Bernese (Dach et al. 2015, Biagi & Caldera 2013) e con un SW proprietario di GReD, derivato dal freeware goGPS (Realini & Reguzzoni 2013) e adattato al problema del monitoraggio. Importante per un buon risultato è che in un SW complesso si operi una scelta oculata dei parametri da stimare e di quelli da ignorare.

Validazione

La fase di validazione ha lo scopo di fissare l'attendibilità delle stime delle coordinate, cercando di identificare con un'analisi a posteriori dei residui del sistema ai minimi quadrati, se non vi siano osservazioni che contengono errori anomali e di cui non ci si è accorti nella fase di preprocessamento. Questo può avvenire in particolare quando si siano fissate erroneamente le ambiguità intere. In effetti, considerando che gli errori di misura delle osservazioni di fase dovrebbero essere dell'ordine di pochi mm, ci si aspetta che i residui stimati delle equazioni stiano tutti in una fascia di $\pm 1/2$ cm. Tuttavia un errato fissaggio di una ambiguità introdurrà nelle equazioni che la contengono un bias al minimo di ~ 18 cm. Ci aspettiamo perciò che gli scarti di tali equazioni, pur scontando l'effetto di mascheramento tipico dei minimi quadrati (Sansò 1991), si portino a livello di diversi centimetri. Anche un semplice test robusto sulla popolazione degli scarti può permettere di trovare outliers tra le osservazioni ed eventualmente ambiguità erroneamente fissate. A questo proposito ricordiamo che come regola è sempre meglio lasciare un valore float di una ambiguità piuttosto che fissarla ad un intero con una probabilità non vicina ad 1, rischiando che il fissaggio sia errato. Gli argomenti di questo paragrafo giustificano la scelta fatta da GReD per cui un sistema di monitoraggio va fornito all'utente sotto forma di servizio (nel nostro caso GeoGuard (Tagliaferro et al. 2018)) e non come un semplice pacchetto chiavi in mano.

Analisi delle serie temporali

Per ogni periodo di tempo T (ad esempio 1 ora, 1 giorno), il sistema di monitoraggio fornisce un valore stimato delle tre coordinate di ogni stazione GNSS nel sistema di riferimento locale. Ci concentriamo sull'analisi della serie temporale $\hat{x}(t)$ delle posizioni stimate di una singola stazione. Per meglio mettere in evidenza il carattere di spostamento più che di posizione del punto, si potrà considerare la serie $\hat{x}(t) - \hat{x}(0)$, dove il tempo di riferimento $t = 0$ è scelto come quello dell'inizio delle operazioni di monitoraggio, ovvero un altro tempo a seconda del giudizio dell'utente. Per semplicità chiamiamo qui ancora $\hat{x}(t)$ la serie $\hat{x}(t) - \hat{x}(0)$.

In primo luogo consideriamo che il valore stimato $\hat{x}(t)$ deve poter essere ruotato in un qualsiasi sistema di riferimento locale utile alla interpretazione dell'utente. Di sicuro $\hat{x}(t)$ deve essere riferito ad un asse z verticale, sia perché le osservazioni GNSS danno stime più imprecise nella direzione up, sia perché quasi sempre la direzione della verticale, cioè della gravità, ha un ruolo fisico sulle deformazioni in esame. Le altre due direzioni cartesiane possono essere semplicemente cartografiche (Est, Nord), ovvero riorientate a seconda dell'oggetto monitorato.

Concentriamoci ora sulla serie di una singola coordinata, ad esempio $\hat{x}(t)$. In generale sarà

$$\hat{x}(t) = x(t) + \eta(t)$$

con $x(t)$ il valore vero della (variazione della) coordinata ed $\eta(t)$ il suo errore di stima.

A sua volta si potrà distinguere

$$x(t) = m(t) + s(t) + a(t)$$

con $m(t)$ un modello medio di spostamento a scala temporale lunga (trend), $s(t)$ un segnale ambientale eventualmente presente nel moto del punto, ad esempio una deformazione legata alla temperatura, oppure una variazione dovuta a un qualche evento meteorico (piogge intense), $a(t)$ è uno spostamento anomalo indice di una variazione nella meccanica dell'oggetto monitorato, oppure un qualche intervento di manutenzione che sposti l'antenna del ricevitore GNSS.

Inoltre si avrà

$$\eta(t) = \varepsilon(t) + b(t) + o(t)$$

dove $\varepsilon(t)$ è l'ordinario errore di stima dovuto alla propagazione del noise di misura nello stimatore della coordinata x , $b(t)$ è un bias che entra nella stima a causa degli errori di modello nel processamento, $o(t)$ è un errore presente nella stima e dovuto alla presenza (residua) di outliers (o errori grossolani) contenuti nelle osservazioni e sfuggiti alle fasi precedenti di analisi dei dati.

Raggruppando il tutto troviamo

$$\hat{x}(t) = m(t) + s(t) + a(t) + \varepsilon(t) + b(t) + o(t).$$

Il nostro intento è soprattutto quello di conoscere $m(t)$ ed $a(t)$. In particolare:

$a(t)$ è normalmente assente da $\hat{x}(t)$ per definizione. In realtà ne possiamo rilevare la presenza per due caratteristiche. La prima è che abbia una ampiezza che lo fa emergere specificatamente dagli altri fattori, in particolare dovrà essere $a(t) \gg \sigma_\varepsilon$. La seconda è che tipicamente un moto anomalo è persistente, e questo permette di distinguere $a(t)$ da $b(t)$.

$m(t)$ è di solito parametrizzato con semplici funzioni di base. Spesso, forse troppo, si trovano analisi dove $m(t)$ è rappresentato con un trend lineare nel tempo. Nella nostra esperienza è meglio modellizzare $m(t)$ come una combinazione di splines cubiche (dunque funzioni molto lisce), scegliendo opportunamente la distanza tra un polo e l'altro delle splines.

Una tipica analisi della serie di $\hat{x}(t)$ può essere quindi compiuta creando il modello parametrico

$$\hat{x}(t) = \sum_k p_k C(t - kT) + \lambda \xi(t) + v(t)$$

con $C(t)$ spline cubica, $\xi(t)$ eventuale variabile ancillare nota, $v(t)$ noise con s.q.m. σ_v .

La compensazione del modello sopradescritto porta alla stima dei parametri $\{p_k\}$ e λ e quindi ad un modello predittivo di $\hat{x}(t)$ sulla base dei suoi valori passati. È questo il modello su cui si baserà la analisi a posteriori delle anomalie $a(t)$, ovvero il disegno di un allarme che segnali all'utente l'avvicinarsi di condizioni di pericolo. In ogni caso sottolineiamo ancora una volta che la deviazione standard σ_v dei residui dopo l'applicazione di un modello alla serie temporale dei "dati" $\hat{x}(t)$ è la chiave fondamentale per rilevare la comparsa di un'anomalia $a(t)$ tra i dati stessi, e che in generale σ_v risulta essere più grande (anche di molto) rispetto a σ_e , dimostrando che quest'ultima non può essere la base per una statistica utile al disegno di un allarme.

Il disegno dell'allarme

Il sistema dovrà essere in grado di fornire un allarme per l'avvicinarsi di condizioni critiche. In primo luogo occorre che in presenza di un comportamento critico dell'oggetto l'allarme venga effettivamente attivato. È anche importante che l'allarme non venga attivato per errore, cioè in assenza di un comportamento anomalo (falso allarme). Inoltre, dal punto di vista temporale, è necessario che l'allarme venga dato il prima possibile (problema della latenza). Il fatto che tali requisiti, anche in conflitto tra loro, possano essere soddisfatti da un sistema di monitoraggio GNSS è dipendente da un lato dalle caratteristiche comuni degli spostamenti critici, dall'altro dalla accuratezza delle posizioni rilevate dal GNSS.

In effetti per comportamenti anomali si può considerare critica una soglia di spostamento assoluta S_a di alcuni centimetri e/o di una velocità S_v di qualche centimetro in un giorno. Queste devono essere determinate quantitativamente dall'utente, esperto del fenomeno monitorato. Talvolta sarà utile considerare una soglia sola; ad esempio per un manufatto potrà essere più importante S_a , mentre per una frana potrebbe essere più importante S_v . In ogni caso la soglia critica (le soglie critiche) deve essere posta dall'utente come condizione al disegno dell'allarme. A fronte dei valori sopra descritti, abbiamo determinazioni delle posizioni giornaliere con accuratezza di pochi millimetri. È proprio la distanza tra questi valori che permette il disegno di un allarme utile, cioè che soddisfi i requisiti precedentemente ricordati. La implementazione di un allarme è basata sul concetto di test statistico di ipotesi e sul concetto di soglia critica. Per chiarire la questione ci concentriamo qui su una singola coordinata x e sulla sua serie temporale $\hat{x}(t)$, supponendo di avere una soglia critica S_c per il valore assoluto di $\hat{x}(t)$.

Illustriamo un disegno semplice, che sfrutta ipotesi semplificative ed è basato su tre protocolli che chiameremo W di warning (allerta), A di allarme, L di valore limite.

Le ipotesi semplificative che poniamo sono che i valori della serie temporale senza spostamenti anomali

$$\hat{x}(t) = M(t) + v(t)$$

siano osservati con $M(t)$ conosciuta esattamente e $v(t)$ distribuito normalmente a media nulla e con deviazione standard σ_v nota, cioè $v = \sigma_v Z$, con Z normale standard. In questo caso è bene notare che il valore di σ_v da usarsi nell'allarme non è un indice astratto dell'errore di osservazione, ma piuttosto uno scarto quadratico medio ricavato da un'analisi a posteriori degli scarti di $\hat{x}(t)$ rispetto al modello $M(t)$.

Non entriamo qui nel merito della statistica che presiede al disegno dell'allarme, limitandoci a presentare di seguito uno schema sintetico basato sul concetto che un pre-allarme permanente in due epoche successive porta ad un allarme che ha bassa probabilità di essere falso:

Protocollo d'allarme

$\hat{x}(t) > L = S_c - Z_\alpha \sigma_v$	allarme immediato
$ \hat{x}(t) - M(t) > W = Z_{\alpha/2} \sigma_v$	si apre una finestra di warning e si passa ad una modalità di campionamento più frequente
$ \hat{x}(t) - M(t) > W, \hat{x}(t+1) - M(t+1) > W$	si emana l'allarme

dove Z_α è il valore critico di una normale standard, ovvero $P(Z > Z_\alpha) = \alpha$.

Ragionamenti analoghi valgono se l'allarme va disegnato sulle velocità, $\hat{x}(t+1) - \hat{x}(t)$; solo in questo caso, nel calcolo della probabilità di falso allarme, occorre considerare che una coppia di variazioni successive di posizione ha una correlazione pari a -0,5. In ogni caso l'esperienza di GReD ci dice che dopo un periodo congruo, ad esempio un anno, di monitoraggio è bene fare una statistica degli warning, allarmi e falsi allarmi per una opportuna taratura dei protocolli. Chiudiamo il paragrafo osservando che è possibile disegnare protocolli d'allarme basati su test più raffinati di quelli qui riportati, anche se i concetti generali, e in particolare la distinzione tra warning, soglie d'allarme e soglia critica, restano gli stessi.

Esempi

Presentiamo qui alcuni esempi di sistemi di monitoraggio istituiti nel corso degli ultimi 4 anni di attività di GReD, allo scopo di dimostrare per casi reali di monitoraggio in campo, le effettive potenzialità delle misure GNSS effettuate con ricevitori LC. I primi 4 esempi si riferiscono ad osservazioni con il solo sistema GPS, mentre l'ultimo è presentato per mettere in luce le potenzialità delle stime congiunte GPS e Galileo.

Esempio 1: si tratta del monitoraggio di una base tra due ricevitori LC montati su tralicci, di cui uno soggetto all'azione di una frana. La base è lunga 25 m ed il periodo considerato è di circa 7 mesi. Le soluzioni sono giornaliere e presentano un certo numero di outliers, soprattutto in Up, ed anche qualche interruzione, dovuta a problemi di trasmissione che però sono stati risolti a partire dal mese di giugno. La deviazione standard dei residui è in E, N e in Up. Benché questo rappresenti una delle prime esperienze in campo fatte da GReD, esso mostra chiaramente la capacità del sistema di seguire un movimento lento con conseguente spostamento finale di -2 cm in Nord e -3 mm in Est.

Esempio 2: si considera il monitoraggio di un punto sul coronamento di una diga, con una base tra due ricevitori LC della lunghezza di circa 70 m. La finalità dell'esempio è di mostrare un confronto con misure di pendoli inversi e di total station robotizzata. In Fig. 6 si mostra il confronto tra gli spostamenti in e (ricordiamo che i pendoli non vedono spostamenti in), che appaiono significativamente concordi tra loro.

Esempio 3: mostriamo il moni-

toraggio di un punto in frana con una base di lunghezza 1400 m e di dislivello 570 m. Gli spostamenti rilevati dal GNSS sono confrontati con quelli di una total station robotizzata. Si osserva che il GNSS, al contrario della total station, ha potuto collezionare dati anche in condizioni meteo avverse.

Esempio 4: si riporta il monitoraggio di una base su un ponte autostradale della lunghezza di circa 70 m. Scopo dell'esempio è di mostrare le soluzioni orarie, calcolate per studiare un warning trasformatosi in allarme, a metà marzo 2016. Il warning riguarda un movimento brusco



Fig. 7 - Monitoraggio di una frana: confronto tra posizioni derivate da GNSS e da total station.



Fig. 8 - Monitoraggio orario di una base corta per un periodo di 7 mesi: si evidenzia una discontinuità in Est alla data 18 marzo 2016.

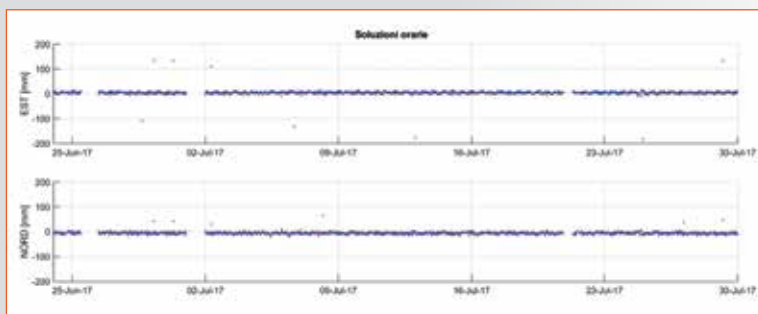


Fig. 9 - Monitoraggio con soluzione oraria di un punto con scarsa visibilità del cielo: confronto tra a) soluzione con solo GPS, b) soluzione con GPS e Galileo.

in Est dell'ampiezza di cm, movimento che tende a riassorbirsi lentamente nei mesi successivi. Si noti che il passaggio a soluzioni orarie tende ad incrementare la deviazione standard dei residui, trovandosi Tale incremento tuttavia non impedisce di individuare la discontinuità con una latenza di 1 ora.

Esempio 5: quest'ultimo esempio riguarda il monitoraggio di un impianto su una condotta forzata, che per motivi di necessità ha una scarsa visibilità del cielo, che risulta in buona parte coperto da alberi che la fiancheggiano. In questo caso si è voluto mostrare il vantaggio, per le soluzioni orarie, nel passare dal posizionamento con il solo GPS a quello che combina GPS e Galileo. Come si vede, la soluzione con Galileo ha molto meno variabilità, eliminando completamente i valori anomali saltuari.

Conclusione: il decalogo del buon monitoraggio GNSS

Concludiamo questo lavoro riassumendo le regole che abbiamo a mano a mano illustrato e che rendono il monitoraggio GNSS efficace e conveniente. Premesso che il sistema di monitoraggio debba avvalersi di ricevitori LC multicostellazione per poter massimizzare a parità di costo il numero dei punti tenuti sotto controllo e di antenne di buona qualità, anche se il loro costo potrà essere uguale a quello del ricevitore, un buon sistema di monitoraggio GNSS deve soddisfare a nostro avviso 10 requisiti, di cui i primi 7 sono obbligatori, gli ultimi 3 facoltativi:

- 1) il disegno della rete di monitoraggio deve essere progettato congiuntamente da un esperto di osservazioni GNSS e da un esperto del fenomeno da controllare; ciò vale in particolare per la scelta dei punti da
- 2) monitorare e di quelli di riferimento,
- 2) l'installazione del ricevitore, degli apparati ausiliari di alimentazione e trasmissione vanno concordati con l'utente, ma soprattutto l'antenna deve essere rigidamente connessa con la parte dell'oggetto che si vuole monitorare,
- 3) il grafo di compensazione della rete deve essere ottimizzato, assumendo una conformazione di processamento a stella o a più stelle; in particolare la scelta del satellite pivot per la formazione delle differenze doppie deve essere ottimale,
- 4) occorre operare un profondo preprocessing dei dati, usando anche la conoscenza delle proprietà elettromagnetiche del sito, allo scopo di una prima identificazione ed eliminazione di outliers e cycle slip,
- 5) occorre operare una rigo-

Droni Idrografici polivalenti

- Rilievi batimetrici automatizzati
- Acquisizione dati e immagini
- Mappatura parametri ambientali
- Ispezione fondali



Dighe, laghi, cave in falda, bacini, fiumi e canali fino a 4 m/s. Insensibili ai bassi fondali e alla presenza di alghe e detriti



Vendita - Noleggio - Servizi chiavi in mano, anche con strumentazione cliente

- rosa compensazione delle basi, con una accurata scelta dei parametri da stimare, di quelli che possono essere trascurati e di quelli che possono essere semplicemente calcolati da modelli; dopo la compensazione delle basi si può operare la compensazione di rete, che fornisce informazione sulle correlazioni tra le stime degli spostamenti di punti diversi,
- 6) ogni compensazione deve sempre essere seguita da un filtraggio dei residui anche semplificato, in particolare allo scopo di eliminare cycle slips o outliers che non sono stati identificati nelle fasi precedenti,
 - 7) occorre formare le serie temporali delle variazioni di coordinate e fare un'analisi statistica degli eventuali valori anomali, stimando nello stesso tempo il modello sottostante di variazioni lente nel tempo,

- 8) può essere utile eseguire un'analisi di correlazione con variabili ancillari che aumentano l'efficienza del modello predittivo,
- 9) può essere utile istituire un allarme basato su tre soglie (warning, allarme, soglia critica) da definire assieme all'esperto del fenomeno monitorato,
- 10) può essere utile rappresentare gli spostamenti in sistemi di riferimento diversi, con assi di particolare interesse per l'oggetto monitorato; in tal caso occorrerà anche trasformare le covarianze degli errori di stima e di previsione.

Da quanto detto appare chiaro che una evoluzione naturale del monitoraggio verrà dalla disponibilità di ricevitori LC a due o più frequenze.

Un altro settore che riteniamo diverrà importante in futuro è l'uso di unità di

monitoraggio che comprendano un ricevitore (LC) GNSS, un'antenna attiva (LC) per il SAR e strumenti inerziali. Un'unità di questo genere in effetti permette di dare un allarme immediato a fronte di una variazione brusca di posizione, di studiare le serie GNSS come descritto nell'articolo e inoltre di usare l'antenna del SAR per propagare la stima del moto a tutti i permanent scatterers dell'area. Su questi concetti è in corso una ricerca dell'Autorità Galileo denominata GIMS, di cui GReD è prime contractor.

L'eccellenza dei dati geografici Toponomastica e numerazione civica



BIBLIOGRAFIA

- Barbarella, Radicioni & Sansò editori (2009) *Lo sviluppo delle tecnologie per le reti geodetiche*, Perugia: Grafiche Bovini
- Benedetti E., Biagi L., Branzanti M., Colosimo G., Mazzoni A. & Crespi M. (2014) GNSS seismology for the 2012 Mw = 6.1 Emilia Earthquake: exploiting the VADASE algorithm, *Seismological Research Letters*, Vol. 85, Num. 3, 649-656
- Biagi L., I fondamentali del GPS, *Geomatics Workbooks N8*, <http://geomatica.como.polimi.it/workbooks/>
- Biagi L. & Caldera S. (2011) The automation of permanent networks monitoring: remarks and case studies, *Applied Geomatics: Vol. 3, Issue 3*, 137-152
- Biagi L., Catalin F. G. & Negretti M. (2016). Low-Cost GNSS Receivers for Local Monitoring: Experimental Simulation, and Analysis of Displacements. *Sensors*, vol. 16, 1-13
- Böhm J. & Schuh H. (2003). *Vienna mapping functions*, Vienna: na.
- Caldera S., Realini E., Barzaghi R., Reguzzoni M. & Sansò, F. (2016) Experimental Study on Low-Cost Satellite-Based Geodetic Monitoring over Short Baselines, *J. Surv. Eng.*, 142, 3.
- Cina A. (2014) *Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System)*. Torino: Per la geomatica. CELID
- Dach R., Lutz S., Wälsler P. & Fridez, P. (2015) *Bernese GPS Software Version 5.2. Documentation*; Astronomical Institute: University of Bern, Switzerland
- Gogoi N., Manzano A.M., Cina A. & P Dabove P. (2018) Fast Deformation Detection with mass market GNSS time differential observations and use of baseline constraints, *GEAM-Geoingegneria ambientale e mineraria- Geoengineering Environment and mining*, 152, 32-39
- Leick, A., Rapoport, L. & Tatarnikov, D. (2015). *GPS satellite surveying*. John Wiley & Sons.
- Niell A. E. (2001), Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models, *Phys. Chem. Earth*, 26, 475-480.
- Realini E. & Reguzzoni M. (2013) goGPS: open source software for enhancing the accuracy of low-cost receivers by single-frequency relative kinematic positioning, *Measurement Science and Technology* 24 (11), 115010
- Rothacher (2001) M. Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. *GPS Solutions* 4(4), 55 - 60
- Sansò F. (1997) *Il trattamento statistico dei dati*, Milano: Città Studi ed.
- Tagliaferro, G., Caldera, S., Realini, E., Molinari, D. & Pasqui, L. (2018) GeoGuard: low-cost GNSS technologies for the continuous monitoring of structures and land movements. *In EGU General Assembly Conference Abstracts*, Vol. 20, 13898
- Teunissen P. & Montenbruck O. eds. (2017). *Springer handbook of global navigation satellite systems*. Springer.

ABSTRACT

In the frame of deformation monitoring of structures, infrastructures and natural hazards, in this paper several examples are provided, that demonstrate how GNSS observations, even if taken by low cost receivers, are competitive in terms of accuracy with classic techniques. Moreover GNSS observations are able to provide a continuous determination of the position of N points in time, in a fully automated way, interconnecting points that are not visible each other, in all weather conditions. This work presents how a low cost GNSS monitoring system can be designed and implemented, both in terms of hardware and software solutions. Then the analysis of GNSS data is shown, describing the consecutive steps of preprocessing, processing and validation of the results. Because deformation monitoring basically means detecting anomalous changes in the time series of each GNSS station, an efficient alarm system is designed and described.

In the end ten basic requirements are identified, which guarantee that the deformation monitoring performed with GNSS can be effective and convenient.

PAROLE CHIAVE

MONITORAGGIO; GNSS; LOW-COST; ALLARME

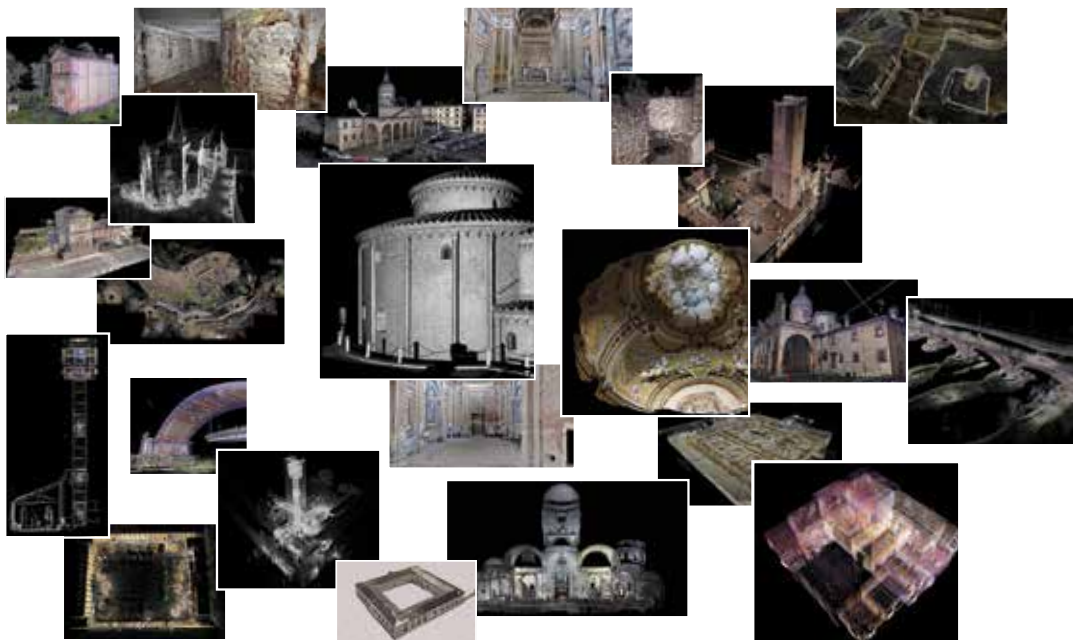
AUTORE

FERNANDO SANSÒ
FERNANDO.SANSO@POLIMI.IT

LUDOVICO BIAGI
LUDOVICO.BIAGI@POLIMI.IT
POLITECNICO DI MILANO, DICA, PIAZZA LEONARDO DA VINCI 32, MILANO

CALDERA STEFANO
STEFANO.CALDERA@G-RED.EU

LISA PERTUSINI
LISA.PERTUSINI@G-RED.EU
GEOMATICS RESEARCH & DEVELOPMENT SRL, VIA CAVOUR 2, LOMAZZO (CO)



GEOGRA

Via Indipendenza, 106
46028 Serride - Mantova - Italy
Phone +39.0386.62628
info@geogra.it
www.geogra.it



GIOCA D'ANTICIPO

Il **monitoraggio satellitare** della superficie terrestre fornisce informazioni aggiornate e puntuali per prendere decisioni rapide e consapevoli in numerosi contesti applicativi.

È la soluzione ideale per il monitoraggio di **aree in frana** o subsidenza; individuare potenziali cedimenti strutturali di **reti idriche** e fognarie; monitorare la stabilità di **reti stradali** e ferroviarie, ponti e viadotti; valutare la qualità delle **acque marino-costiere**; identificare e classificare le **aree percorse dal fuoco** e le **trasformazioni antropiche** nel tempo.

Attiva il tuo servizio di monitoraggio continuo con **aggiornamenti giornalieri**, settimanali o mensili attraverso la sottoscrizione di un **abbonamento annuale** alla **piattaforma Rheticus®**.

Disporrai di report, mappe ed indicatori di sintesi progettati per soddisfare le tue esigenze operative.



UTILITIES

Oil&Gas, Energia,
Estrazione, Reti
idrico-fognarie,
Teleriscaldamento,
Dissalatori



INGEGNERIA

Aeroporti, Ferrovie,
Strade, Tunnel, Dighe,
Ponti, Metropolitane,
Perforazioni offshore,
Dragaggi



FOOD

Pesca,
Acquacoltura,
Previsioni sulle colture,
Precision farming



GOVERNO

Urbanistica,
Frane e subsidenza,
Incendi boschivi,
Acque
marino-costiere

Richiedi una quotazione per la tua area di interesse
su www.rheticus.eu