Monitoraggio di versante in continua con reti di ricevitori GNSS L1 a basso costo e a controllo remoto

Mauro Degasperi ([a]), Andrea Franceschini ([b]), Davide Curone ([c]), Massimiliano Chersich ([c])

([a]) Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, Via Vienna 17, 38121 Trento, tel. 0461-492581, mauro.degasperi@provincia.tn.it
([b]) Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, Via Vienna 17, 38121 Trento, andrea.franceschini@provincia.tn.it
([c]) YETITMOVES, c/o EUCENTRE – Università di Pavia, Via Ferrata 1, Pavia, tel. 335-5429320, info@yetitmoves.it

Introduzione

Il dissesto franoso che coinvolge l'abitato di Castel Condino (TN) è noto da qualche decennio. Alcuni edifici, situati nella parte più a valle dell'abitato, a suo tempo, avevano subito significative lesioni tanto da rendersi necessarie anche alcune demolizioni. Per questo motivo il Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento è incaricato del monitoraggio dell'area fin dai primi anni '90. Il sistema di monitoraggio, inizialmente costituito da sette catene inclinometriche installate nell'abitato, è stato successivamente integrato con misure ottiche, per meglio definire l'area soggetta a dissesto, e con l'analisi di immagini di interferometria da satellite. La morfologia del versante ha imposto soluzioni tecnicamente non facili, che hanno portato a risultati attendibili ma affetti da un'incertezza maggiore rispetto ad altri monitoraggi simili. Negli anni novanta è stata realizzata, da parte del Servizio Prevenzione Rischi, un importante opera di consolidamento del versante, a valle dell'abitato e in destra orografica del Rio di Cimego; il monitoraggio ha cercato di misurare nel tempo eventuali deformazioni indotte dalle stesse opere di consolidamento. Negli ultimi anni, la ricrescita della vegetazione ha impedito la collimazione di alcuni dei punti più rilevanti; si è chiesta pertanto al Servizio Bacini Montani una collaborazione per la pulizia dell'area, la quale si è conclusa nell'Aprile dello scorso anno. A seguito di questo importante intervento si è ridefinito il monitoraggio ottico, spostando la zona di stazione più a monte con lo scopo di migliorare la visibilità, ampliare la zona monitorata e, nello stesso tempo, mantenere quanto più possibile la continuità di misura sui punti storici.
Gli strumenti descritti non garantiscono la possibilità di effettuare misurazioni in continua: per questo motivo nel Dicembre del 2017 il Servizio Geologico ha installato nell'area una rete di ricevitori permanenti GNSS L1 "a basso costo" a controllo remoto e in grado di effettuare misure in continua, in collaborazione con la società YETITMOVES. La rete è costituita da quattro stazioni, tre installate nell'area soggetta a dissesto ed un ricevitore di riferimento posto all'esterno di essa. La rete GNSS è operativa da dicembre 2017 e permette di effettuare misure di spostamento con periodicità da oraria a giornaliera e con

ripetibilità da centimetrica (componente verticale delle stime orarie) a millimetrica (componenti planimetriche delle stime giornaliere). Con questo strumento è possibile apprezzare eventuali variazioni di velocità di scivolamento del versante ad esempio correlate ad eventi meteorologici significativi. Il software di gestione della rete GNSS permette di visualizzare in tempo reale tali misure, di effettuare analisi statistiche e di generare allerte in caso di superamento di soglie critiche di spostamento.
La disponibilità concomitante di misure indipendenti di spostamento offre inoltre la possibilità di verificare e validare periodicamente le misure in continua dei ricevitori GNSS. Nell'articolo vengono presentati i risultati preliminari del monitoraggio GNSS ed il confronto con le misure rilevate con i restanti strumenti di misura installati nell'area.

Il sistema di monitoraggio GNSS

Il sistema di monitoraggio GNSS installato, denominato DISPLAYCE, è sviluppato, mantenuto e commercializzato dalla società YETITMOVES. L'architettura funzionale di tale sistema è mostrata in Figura 1 ed è composta dai seguenti moduli:

(1) Una rete di quattro ricevitori GPS L1, basati su chipset U-BLOX NEO M8T, in grado di acquisire osservabili grezze di codice e di fase con periodo di 30 secondi. Tale periodo di campionamento è di fatto uno standard per applicazioni di monitoraggio statico e rappresenta un buon compromesso tra la qualità delle misure e la quantità di dati da acquisire, trasmettere ed elaborare [Curone et al., 2011]. I ricevitori DISPLAYCE sono caratterizzati da un basso consumo energetico (potenza richiesta inferiore a 400 mW), per cui sono alimentati attraverso pannelli solari da 50 W-picco. Uno dei ricevitori (denominato GPS4 in Figura 4) è stato installato in prossimità del fondovalle, in un'area non soggetta a spostamenti dovuti al fronte franoso ed è utilizzato come stazione di riferimento; i tre restanti ricevitori (GPS1, GPS2, GPS3) sono stati installati in prossimità dell'abitato di Condino, in aree soggette a spostamenti. Ciascun ricevitore include un radio-modem in banda ISM a 868 MHz, in grado di trasmettere le osservabili acquisite e una serie di dati di telemetria (tensione di batteria e di pannello solare, qualità del segnale radio, etc.) in tempo reale fino a una distanza superiore a 3 Km in condizioni di visibilità ottica e in caso di utilizzo di antenne direzionali. Data la topologia della rete di monitoraggio (caratterizzata da condizioni di visibilità ottica tra la stazione di riferimento e ciascun *rover*), i tre ricevitori *rover* sono stati configurati come nodi, in grado di trasmettere i propri dati alla stazione GPS4, a sua volta configurata come *gateway* e dotata di modem GPRS[1]. Il modem permette la trasmissione remota e in tempo reale di osservabili GPS e dati di telemetria ad un server di calcolo.

[1] Si osserva come, nelle installazioni DISPLAYCE, l'architettura del sistema di trasmissione dati non debba necessariamente rispecchiare l'architettura *rover/reference* della rete di monitoraggio GPS. A seconda dell'orografia del territorio e della distanza tra i ricevitori, è possibile anche utilizzare un *rover* della rete di monitoraggio come *gateway* locale, o la stazione di riferimento come "nodo" nella rete di trasmissione.

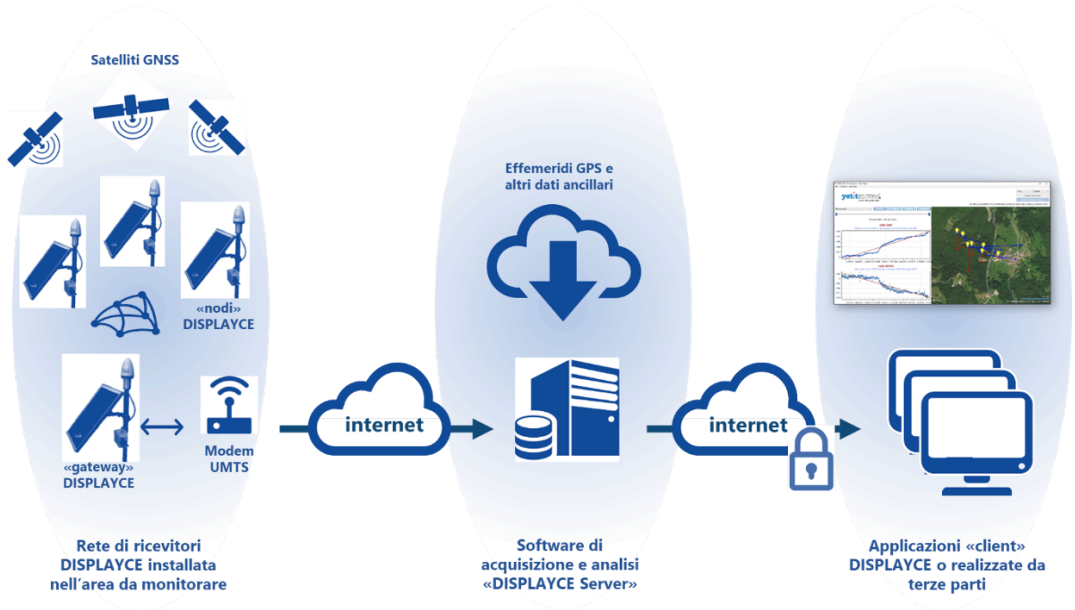

Figura 1 - Architettura funzionale del sistema di monitoraggio DISPLAYCE

(2) Un server di calcolo sul quale vengono installati i componenti software (DISPLAYCE *Server*) necessari per:

- l'acquisizione delle osservabili GPS e dei dati di telemetria dai ricevitori;
- il *download* di file ancillari (e.g. effemeridi *broadcast* globali, file con i parametri di modelli atmosferici, etc.) da archivi istituzionali pubblici su internet;
- il processamento delle osservabili GPS in modalità statico-differenziale, al fine di misurare in modo continuo gli spostamenti relativi di ciascun ricevitore *rover* rispetto alla stazione di riferimento. Il *software* genera parallelamente serie storiche di sessioni con durata di 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 e 24 ore, a seconda della configurazione definita dall'utente;
- la pubblicazione mediante servizi *web* REST delle misure effettuate, oltre che dei dati di telemetria e diagnostica del corretto funzionamento del sistema di monitoraggio, nelle sue componenti hardware e software;
- la generazione di allerte email in caso di spostamenti sopra soglie predefinite dall'utente o di anomalie nel funzionamento delle varie componenti del sistema di monitoraggio;
- la generazione di report automatici periodici, in formato PDF e inviati come allegato ad email, con grafici e informazioni sullo stato di funzionamento del sistema di monitoraggio.

Nel caso del sistema installato per il monitoraggio oggetto di questo articolo il software "DISPLAYCE *Server*" è stato installato su una macchina messa a disposizione dal Servizio Geologico della Provincia di Trento.

(3) Un'applicazione *client*, installabile dall'utente su qualsiasi macchina Windows, con la quale l'utente può, previa autenticazione:

- accedere ai servizi web pubblicati dal server di calcolo per scaricare tutti i dati relativi al monitoraggio;
- visualizzare in tempo reale le serie storiche degli spostamenti di ciascun punto monitorato;
- applicare strumenti statistici per il filtraggio o l'interpolazione delle misure;
- visualizzare le serie storiche delle misure di telemetria relative alle stazioni GPS e al server di calcolo;
- visualizzare su mappa le stazioni e, per ciascuna, eventuali messaggi di allerta legati agli spostamenti o ad anomalie nel funzionamento dell'hardware;
- scaricare sul PC locale le misure di spostamento in formato testo o le osservabili grezze (pseudo-codici, fasi, Doppler e potenza del segnale GPS) in file RINEX 2.11;
- impostare in locale e caricare sul server di calcolo le soglie relative a tutte le variabili monitorate da utilizzare, lato server, per la generazione delle email di allerta.

Misure inclinometriche

Si riportano di seguito i principali risultati visibili nelle letture inclinometriche, tenendo presente che sono rimasti attivi i soli ID232 e 243 mostrati in Figura 2.

Figura 2 - Ubicazione dei tubi inclinometrici

ID inclinometro	Lettura 0	Ultima lettura	Profondità deformazione principale (m)	Velocità di deformazione mm/anno	Orientamento deformazione
ID16	10/07/91	19/02/08	26	3-4	85° Est
ID17	21/08/91	19/02/08	non certa	1	95° Est
ID18	10/07/91	19/02/08	16	2-3	85° Est
ID19	21/08/91	19/02/08	17	7	80° Est
ID231	18/08/05	13/02/12	28	5	75° Est
ID232	18/08/05	20/11/17	26	5	70° Est
ID243	04/05/06	20/11/17	32	3-4	75° Est

Figura 3 - Storico delle misure di spostamento medio ottenute con le catene inclinometriche

Dai risultati delle letture inclinometriche appare certo un movimento di versante che coinvolge uno strato superficiale di uno spessore stimabile in circa 25-30 metri all'altezza delle abitazioni più a valle. La direzione di spostamento è assoggettabile alla massima pendenza (80° EST) e la velocità media è di circa 4 mm/anno.

Misure ottiche

Nel 2007 il monitoraggio è stato integrato aggiungendo agli inclinometri un sistema ottico, stazione totale – prismi, in modo da ampliare la zona monitorata. Il punto di stazione, in un primo momento, era stato realizzato nel giardino antistante alla canonica e permetteva, oltre l'osservazione di quattro punti fissi di orientamento esterni all'area, la misura di una ventina di punti di controllo del movimento su edifici e su muri di sostegno immediatamente a EST e a valle dell'abitato. A seguito delle prime elaborazioni è nata l'esigenza di estendere ancora il monitoraggio e quindi, nel 2010, si è realizzato un pilastrino in calcestruzzo sul muro di sostegno a valle del tornante al km. 3.3 della S.P. 70. La nuova stazione permetteva la misura di altri punti di monitoraggio posti più a valle, nella zona soggetta all'intervento del Servizio Prevenzione Rischi, oltre ad un nuovo punto di orientamento, ampliando verso valle la conoscenza del fenomeno. Nel 2017, la stazione è stata spostata a quota 800 m, su una comoda cengia rocciosa, a valle della strada forestale che dal campo sportivo, attraversa il versante del monte Melino, in direzione NORD/EST. Viste le distanze in gioco (media 1000 m) si è deciso di effettuare le misure da treppiede, fissando quattro punti fermi che costituiscono i vincoli per la determinazione delle coordinate di stazione e di conseguenza dei punti di monitoraggio. Nella successiva Figura 4 sono riportati sull'ortofoto i vettori di spostamento misurati. I diversi colori dei punti distinguono le diverse date della lettura di zero, come da legenda. I punti contrassegnati con la lettera V non sono più misurabili.

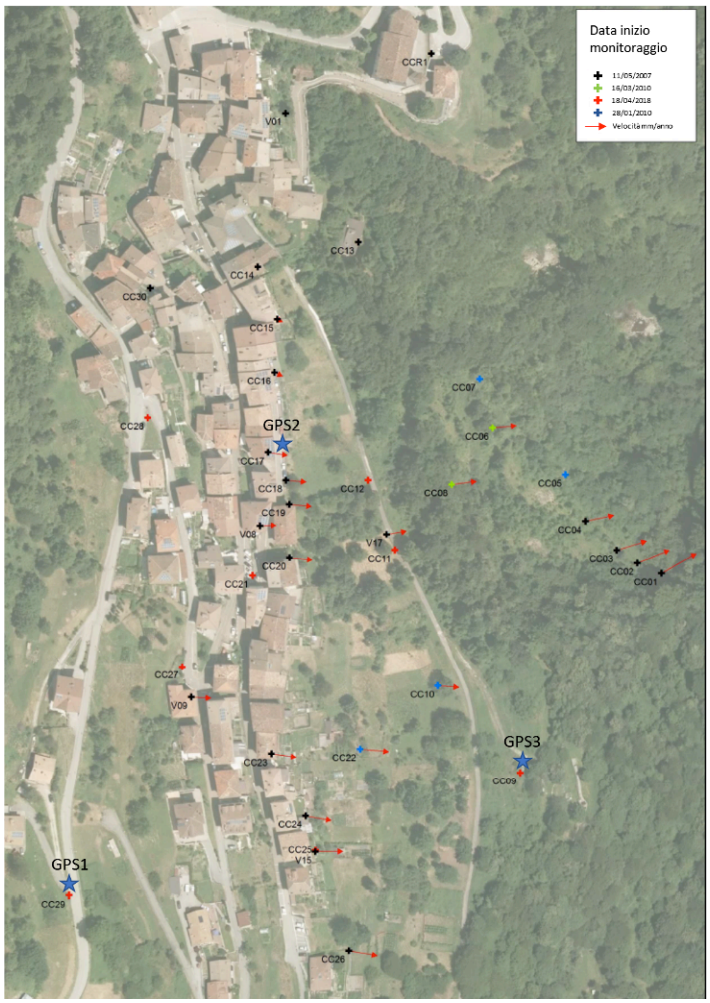

Figura 4 - Mire ottiche e vettore velocità stimato. Nella figura sono evidenziati anche i punti di monitoraggio GNSS.

La zona soggetta a deformazione ha inizio a sud dei capisaldi (CC) 13 e 14 e coinvolge tutti i punti monitorati. Merita un approfondimento l'apparentemente anomalo comportamento dei punti 05 e 07, i quali risultano fermi, nonostante appaiano compresi all'interno della zona in movimento. La velocità media di spostamento varia dai 5 mm/anno del centro paese ai 7 mm/anno della zona sud fino agli 8 mm/anno della zona sotto l'abitato; le direzioni sono compatibili con un movimento di versante. Data la discontinuità e le modifiche di *setup* occorse nel tempo non è stato possibile al momento definire con sufficiente attendibilità eventuali variazioni della velocità di spostamento.

Misure GNSS

A dicembre del 2017 è stata realizzata in collaborazione con la società YETITMOVES una rete satellitare per il controllo in continuo degli spostamenti. La stazione utilizzata come riferimento (GPS4) è stata installata nel paese a fondo valle mentre altre tre stazioni sono state realizzate in punti ritenuti rilevanti al fine del monitoraggio del dissesto. Tutte le stazioni sono state installate su pali da 6 cm di diametro, tre delle quali (GPS1, GPS2 e GPS4) usando come elemento di sostegno muri di delimitazione stradale e una su roccia (GPS3), e sono state dotate di tiranti in acciaio.

Figura 5 - La stazione DISPLAYCE GPS2 installata presso Castel Condino.

Quest'ultima scelta è risultata purtroppo non efficace, rappresentando il tirante stesso un elemento favorente possibili manomissioni da parte di persone o animali. Il risultato sono alcune discontinuità (fino a 12 mm) nelle serie storiche degli spostamenti non riconducibili a riattivazioni dell'instabilità di pendio. Nella seguente Figura 6, ad esempio, si nota lo spostamento di circa 1 cm dell'antenna di GPS2 in direzione OVEST occorso a causa della rottura di un tirante posto in direzione di massima pendenza (EST).

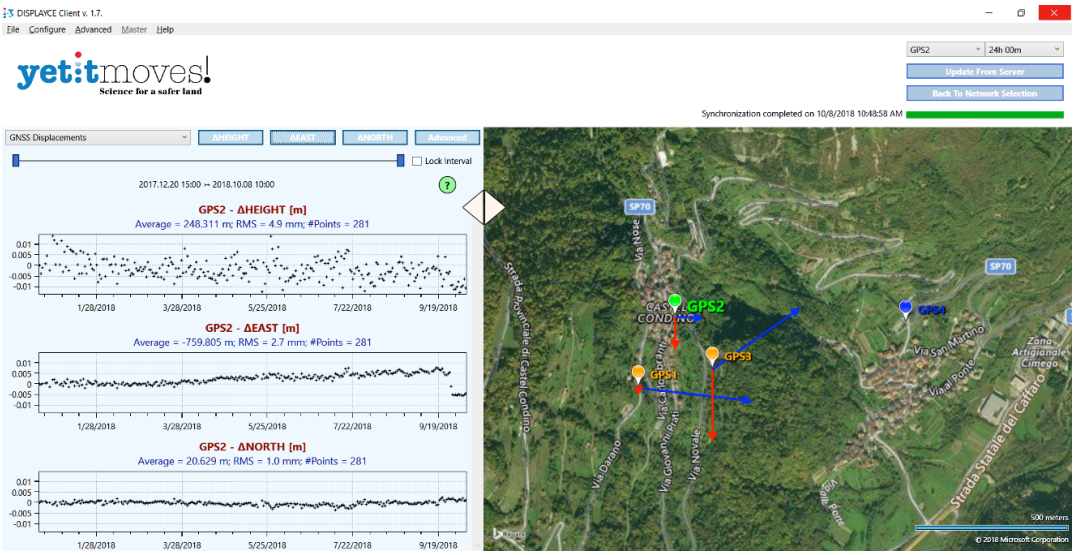

Figura 6 – Cruscotto del sistema di monitoraggio DISPLAYCE. Si noti l'anomalo spostamento repentino di circa 1 cm in direzione OVEST (pannello a sinistra) in data 28/09/2018 dovuto alla rottura di un tirante posto in direzione EST

Tutti i tiranti sono stati rimossi in data 8 Ottobre 2018.

Per l'analisi preliminare in oggetto si sono quindi dovute prendere le seguenti decisioni:

- Trattare i salti come degli *shift* di antenna: le serie storiche sono state ricucite rimuovendo i salti, la cui entità è stata stimata come la media dei dieci giorni di stime precedenti e successive all'evento;
- Vista l'entità esigua del movimento stimato con inclinometri e punti ottici (circa 5-9 mm/anno) e visto il limitato periodo di tempo nel quale il sistema di monitoraggio GPS è in funzione la stima sulla componente QUOTA (la meno precisa per ragioni intrinseche alle misure GPS) non è stata presa in considerazione nella presente analisi.

La tabella seguente riporta le componenti EST e NORD delle velocità dei tre *rover* GPS stimate nel periodo e l'errore formale nella stima della pendenza della regressione lineare associata.

	EST	**NORD**
18/12/2017 - 04/10/2018	**GPS1**	
Numero di soluzioni giornaliere utilizzate	281	
Velocità (mm/anno)	**10.3**	**0.9**
σ_{vel} (mm/y)	0.3	0.2
18/12/2017 - 27/09/2018	**GPS2**	
Numero di soluzioni giornaliere utilizzate	270	
Velocità (mm/anno)	**8.9**	**-0.7**
σ_{vel} (mm/y)	0.3	0.2
18/12/2017 - 04/10/2018	**GPS3**	
Numero di soluzioni giornaliere utilizzate	252	
Velocità (mm/anno)	**9.3**	**-2.9**
σ_{vel} (mm/y)	0.2	0.2

Figura 7 - Stima della velocità di spostamento per le direzioni EST e NORD

Le velocità stimate risultano essere compatibili con i valori misurati dalle catene inclinometriche e dalle misure ottiche anche se la velocità stimata risulta essere leggermente superiore. Non sono al momento disponibili sufficienti misure delle catene inclinometriche e ottiche nel periodo più recente per confermare un potenziale comportamento evolutivo del movimento franoso.

Riferimenti bibliografici

Cina A., Piras M., (2015), "Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring: test and results", Geomatics, Natural Hazards and Risk, 6:5-7, 497-514, DOI: 10.1080/19475705.2014.889046.

Curone D., Chersich M., (2011), "Prestazioni del software di analisi dati GPS NDA Lite in applicazioni di monitoraggio strutturale", Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA, Reggia di Colorno, 15-18 Novembre 2011, 809-820.