

# Analisi della serie temporale della stazione CGPS sulla Grande Frana di Patigno

Cenni Nicola<sup>1</sup>, Dal Forno Giulio<sup>2</sup>, Durante Paolo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fisico, Dipartimento Scienze della Terra Università degli Studi di Siena

<sup>2</sup>Geologo libero professionista

## 1. INTRODUZIONE

Le aree di dissesto idrogeologico coprono circa il 7% del territorio italiano, in particolare la Regione Emilia Romagna risulta essere una delle tre regioni a più alto tasso di dissesto in quanto oltre il 20% del territorio collinare e montano è interessato da accumuli di frane attive o quiescenti (dati progetto nazionale IFFI, Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia). In tale contesto un corretto ed efficace monitoraggio di questi fenomeni da parte dei diversi Enti preposti risulta essere un'attività sempre più importante e necessaria sia per i settori inerenti alla protezione civile, che per quelli riguardanti la pianificazione. Le moderne tecniche di monitoraggio possono fornire risultati molto interessanti per il controllo di tutte le deformazioni che avvengono all'interno di un'area in dissesto. Tali informazioni possono essere facilmente integrate con quelle dedotte utilizzando le tecniche più classiche come ad esempio estensimetri e/o i rilievi topografici, e/o correlate con altri tipi di rilievo, come ad esempio le misure eseguite utilizzando pluviometri o piezometri.

Nella prima parte del lavoro sono descritte brevemente le principali caratteristiche delle metodologie di monitoraggio geofisico satellitare, aeree e terrestri. In particolare, sono descritte le diverse modalità di rilievo che possono essere eseguite utilizzando la metodologia GNSS e le precisioni raggiungibili. Di seguito è descritta un'interessante applicazione in relazione alla grande frana di Patigno, un'area di dissesto idrogeologico tipica dell'Appennino settentrionale ubicata nel comune di Zeri in provincia di Massa Carrara (Fig.1).

## 2. METODOLOGIE DI MONITORAGGIO

Gli ultimi 30 anni hanno visto la nascita e lo sviluppo di tecniche di rilievo satellitare, aereo e terrestre che consentono di eseguire indagini su zone inaccessibili o su grandi aree in tempi relativamente brevi. Queste tecniche si basano sostanzialmente sull'invio e/o ricezione di segnali elettromagnetici (luce visibile, segnali radar, laser e onde radio) e possono essere facilmente installate su

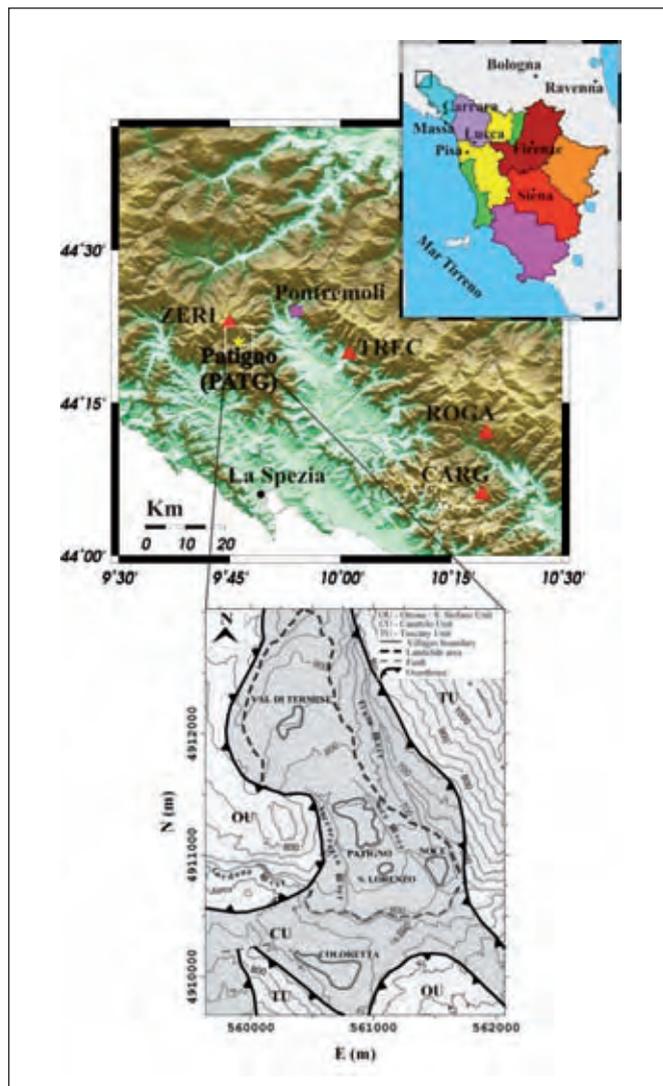


Figura 1 – Posizione delle diverse stazioni GNSS permanenti (triangoli rossi) istituite per studi di carattere tettonico ed utilizzate anche per il monitoraggio dei movimenti della Grande Frana di Patigno. Le sigle a quattro caratteri alfanumerici indicano il nome in codice GNSS delle rispettive stazioni. La stella gialla indica la posizione della stazione permanente ubicata nel paese di Patigno, denominata PATG. Il quadrato fucsia indica la posizione della stazione pluviometrica di Pontremoli i cui dati sono stati utilizzati per lo studio dei movimenti della frana di Patigno. Il rettangolo nero nel riquadro in alto indica la posizione geografica dell'area di dissesto. Nella parte in basso della figura è riportata la carta geologica della frana al cui interno sono evidenziate la posizione dei diversi centri abitati

diversi tipi di mezzi come ad esempio satelliti in orbita attorno alla Terra (SAR, GPS), aereomobili (Fotogrammetria, SAR e Laser) o su apparecchi a terra (Fotogrammetria, SAR e Laser) vicino alle aree in esame.

La tecnica di rilievo denominata SAR (Synthetic Aperture Radar) si basa sulla propagazione di onde elettromagnetiche nel campo delle microonde. Dato che tale tipo di onde non è influenzato dalle condizioni meteo-climatiche (nubi) e di illuminazione (luce o buio), dispositivi che sfruttano questa tecnologia sono sempre attivi e possono essere montati anche su satelliti in orbita attorno alla Terra. Come un comune radar tali dispositivi inviano un'onda che colpendo l'ostacolo ritorna verso la sorgente. Il risultato che si ottiene da un rilievo di questo tipo è un'immagine bidimensionale con diversi livelli di grigio che indicano un valore diverso della potenza del segnale acquisito (Fig. 2).

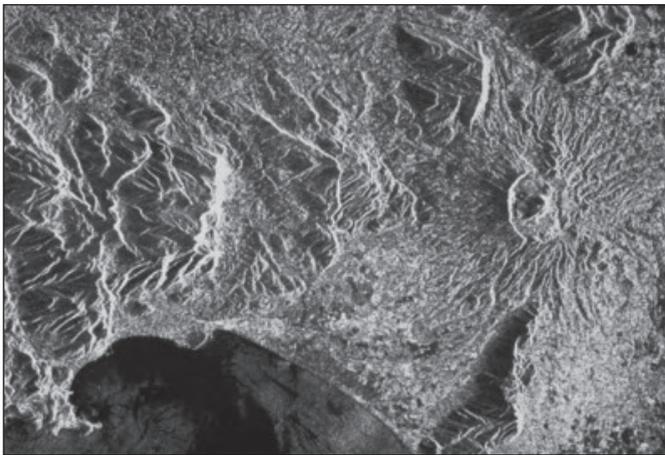


Figura 2 – Esempio di immagine SAR. Baia di Gaeta in provincia di Latina (fonte ESA)

La possibilità di avere immagini SAR di una stessa area acquisite in tempi diversi permette di monitorare nel tempo gli spostamenti avvenuti in tale area. Il confronto tra due o più immagini SAR successive viene eseguito utilizzando la tecnica di elaborazione InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), la quale consente di stimare con precisione millimetrica gli spostamenti avvenuti nell'area indagata (cfr. Tabella 1). I rilievi SAR satellitari ed aerei presentano basse prestazioni per terreni agricoli o boschivi, le cui superfici assorbono la maggior parte della potenza del segnale radar; mentre forniscono ottimi risultati per le aree urbanizzate, in quanto gli edifici presentano un'elevata riflettività. Bassi valori di riflettività possono essere superati installando riflettori definiti *corner reflector* o *permanent scatter* le cui proprietà riflettive rimangono invariate nel tempo, permettendo un loro facile riconoscimento nell'immagine radar. Attualmente esistono più di una decina di satelliti dotati

di dispositivi SAR in orbita attorno alla Terra; tra questi vi è la costellazione italiana COSMO-SkyMed sviluppata dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e gestita da Telespazio (<http://www.telespazio.it/cosmo.html>). La complessa procedura di analisi delle informazioni acquisite da questi satelliti permette di monitorare gli spostamenti anche in aree molto grandi; per questo motivo attualmente viene applicata nello studio di diversi fenomeni geofisici quali la subsidenza, la stima delle deformazioni prodotte da un evento sismico, le aree di dissesto idrogeologico e quelle vulcaniche.

Un'altra applicazione che utilizza le microonde, sviluppata sul finire degli anni '90, è l'interferometria SAR terrestre, solitamente definita attraverso gli acronimi TInSAR (Terrestrial InSAR) o GBInSAR (Ground Based SAR Interferometry). In questo caso lo strumento viene posizionato a terra ad una distanza inferiore a 4 Km dall'area da monitorare e gestito da un operatore specializzato; questo consente un'alta frequenza temporale nelle misure, fino a pochi minuti tra una scansione completa dell'area e l'altra. I dati SAR acquisiti con questa tecnica sono immagini bidimensionali di spostamento che possono raggiungere precisioni molto elevate, fino a pochi decimi di millimetro. Una tecnica di rilievo i cui dispositivi sono solitamente installati su aeromobili o più raramente su satelliti è la Fotogrammetria; con questo termine di solito si indica l'insieme delle operazioni che permette di ottenere la posizione spaziale (informazioni metriche tridimensionali) di tutti i punti d'interesse di un oggetto a partire dall'analisi di fotogrammi o immagini digitali dell'oggetto stesso, presi da punti di vista diversi. Questa tecnica, nata inizialmente per essere utilizzata nel rilievo architettonico, è da tempo utilizzata massicciamente anche per il rilevamento topografico.

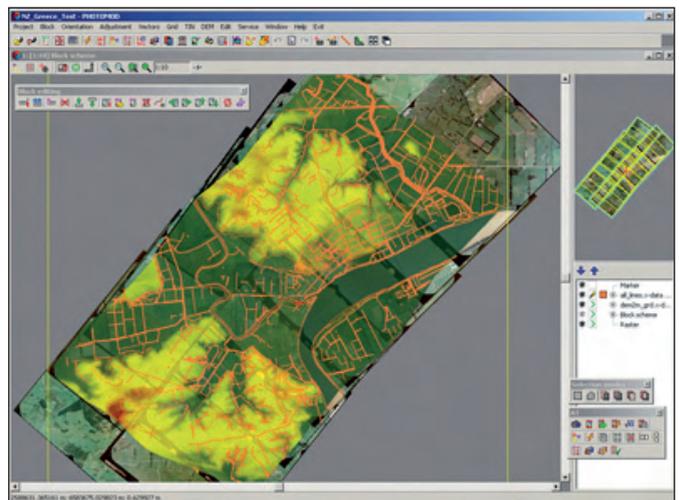


Figura 3 – Finestra di applicativo software per la creazione di DTM da immagini fotogrammetriche.

Utilizzando particolari macchine fotografiche installate su aerei appositamente attrezzati vengono scattate diverse foto alle aree da monitorare. Successivamente queste immagini sono elaborate (Fig. 3) per estrarre un modello digitale del terreno (DTM, Digital Terrain Model) o un modello digitale delle quote (DEM, Digital Elevation Model). Il confronto tra due DTM o DEM ottenuti in tempi diversi, opportunamente georeferenziati, tramite punti appoggio ottenuti da altre metodologie, permette di stabilire se la zona studiata ha subito delle deformazioni e stimarne l'entità. La precisione con cui è possibile ricavare il singolo DTM/DEM varia da qualche metro a poche decine di centimetri per quanto riguarda la fotogrammetria aerea e dipende fortemente dalla quota del volo, dal tipo di strumentazione ed anche dalla precisione con cui si conosce la posizione dei punti appoggio (cfr. Tabella 1). Questa precisione può essere migliorata a pochi centimetri con rilievi a piccola scala utilizzando macchine fotografiche posizionate a terra, qualora gli oggetti da rilevare siano entro i 400 m di distanza.

Lo sviluppo tecnologico che ha coinvolto i dispositivi laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) in tutti i campi delle scienze ha ampliato lo spettro delle tecniche di monitoraggio geofisico introducendo due nuove dispositivi: il laser a scansione terrestre (TLS, Terrestrial Laser Scanner) e il telerilevamento laser da aereo o da satellite (LIDAR, Light Detection and Ranging; o Laser Imaging Detection and Ranging). In entrambi i casi il dispositivo di misura è costituito da un emettitore basato su tecnologia laser, che utilizza la porzione dello spettro elettromagnetico vicino all'infrarosso. Questi strumenti permettono in modo non invasivo di stimare con precisione la posizione tridimensionale di un numero molto elevato di punti. Queste stime vengono eseguite a partire dalla distanza tra i punti e l'emettitore laser che viene calcolata misurando il tempo che intercorre fra l'emissione dell'impulso laser e la ricezione del segnale retrodiffuso dall'oggetto colpito. La differenza tra questi strumenti e un distanziometro laser risiede nella capacità di eseguire una misura senza l'ausilio di speciali dispositivi riflettori e di poter indirizzare durante una scansione il fascio laser su una griglia bidimensionale di punti in modo da poter ricoprire automaticamente almeno una parte dell'area monitorata. L'assenza di dispositivi riflettori fa sì che le misure eseguite con queste tecniche oltre che l'informazione planimetrica abbiano al loro interno anche un'informazione riguardante il materiale colpito dal fascio, contenuta nell'intensità del segnale retrodiffuso. Per quanto riguarda i rilievi utilizzando il laser terrestre (Fig. 4) la precisione raggiungibile sulle singole misure dei punti è millimetrica, ma dipende fortemente dalla distanza tra il dispositivo e l'area da misurare, dalle condizioni ambientali e climatiche.



Figura 4 – Esempio di strumentazione laser scanner (fonte Leica)

Nel caso del LIDAR le precisioni raggiungibili sono più basse, dell'ordine di alcuni centimetri. La principale particolarità di questi due sistemi di misura è legata al notevole numero di punti di cui si può misurare la posizione in un tempo relativamente breve; per questa ragione tali tecniche, nell'ambito del monitoraggio dei fenomeni di dissesto, sono solitamente utilizzate per la creazione di DTM ad alta risoluzione.

L'ultima metodologia, ma non in ordine di importanza, che andremo brevemente ad analizzare è la tecnica satellitare GPS (Global Position System), o attualmente definita in modo più generico come GNSS (Global Navigation Satellite System). Tale tecnica nacque nel 1973 su un progetto del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America, con lo scopo di creare uno strumento che consentisse la navigazione in tempo reale di imbarcazioni, veicoli terrestri ed aerei. Il sistema fu sviluppato a partire dal 1978 con il lancio in orbita del primo satellite e dichiarato completamente operativo a partire dal 1995. Analogamente nell'allora Unione Sovietica fu messo a punto un sistema simile chiamato GLONASS (GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) che però fu abbandonato verso il 1990 a causa della crisi sovietica e ripristinato dal governo russo, a partire dal 2001, per cercare di portarlo alla piena operatività. Data l'importanza strategico-commerciale di un sistema di posizionamento satellitare, anche la Repubblica Popolare Cinese e la Comunità Europea stanno sviluppando dei sistemi satellitari propri chiamati rispettivamente COMPASS e GALILEO. In generale, la tecnica di navigazione satellitare, basata sui diversi sistemi attualmente in funzione (GPS, GLONASS) o che entreranno in funzione (COMPASS e GALILEO), viene definita mediante l'acronimo GNSS. Come vedremo più dettagliatamente nel prossimo paragrafo, le diverse modalità di misura che si

possono eseguire con il GNSS consentono di realizzare ad esempio un modello digitale del terreno di un'area di dissesto, di monitorarne nel tempo l'andamento di alcuni punti significativi e di correlare queste misure con altri tipi di dati (esempio: pluviometri o estensimetri). I costi relativamente contenuti della strumentazione e la copertura satellitare ormai garantita in ogni punto del globo rendono questa tecnica molto diffusa ed utilizzata.

Metodologia	Precisione	Costo stimato
SAR	Qualche millimetro (componente verticale)	Migliaia di euro (immagini)
Fotogrammetria aerea	Qualche decina di centimetri	Centinaia/migliaia di euro (immagini)
Laser/Lidar	Qualche millimetro	100000 euro (strumentazione)
GNSS	Qualche millimetro	20000 euro (strumentazione)

Tabella 1 – Massime precisioni raggiungibili dalle diverse metodologie di rilievo nella stima della posizione di un punto nell'area di misura. Costo indicativo per l'acquisto della strumentazione o delle immagini da elaborare.

### 3. IL RILIEVO GNSS

Qualsiasi sia il sistema di posizionamento utilizzato, il principio di funzionamento è il medesimo: la posizione di un punto sulla superficie terrestre viene stimata a partire dalla misura del tempo intercorso tra il momento in cui un particolare segnale radio viene inviato da un satellite e il momento in cui viene captato dall'antenna ricevente. Da questa misura di tempo è poi possibile, conoscendo la posizione dei satelliti in orbita, stimare la distanza che separa l'antenna dal satellite, da cui poi dedurre la posizione del punto in un sistema di riferimento tridimensionale che modella la superficie terrestre. Questo sistema di posizionamento può considerarsi come composto da tre differenti segmenti: uno spaziale formato dai satelliti in orbita, quello terrestre/aereo composto dai numerosi utenti e quello di controllo a terra, che si occupa del buon funzionamento del sistema (Fig.5).

Il segnale GPS è in realtà composto da due segnali radio definiti portanti L1 e L2, che vengono modulati in modo da trasmettere informazioni ai ricevitori a terra attraverso dei codici numerici. Una stima dei parametri necessari per calcolare le orbite dei satelliti, definiti effemeridi, è contenuta in uno dei codici inviati a terra dai satelliti; la precisione di questa stima è però molto bassa ed è questo uno dei motivi per il quale il calcolo immediato della posizione attraverso gli strumenti GPS portatili, come il navigatore dell'auto, è poco preciso. Tuttavia, confrontando tra loro la fase del segnale ricevuto con la sua replica, attraverso una procedura di elaborazione più complessa, si ottiene una precisione più elevata. L'accu-



Figura 5 – Antenna GPS in fase di acquisizione

rezza raggiunta attualmente dai ricevitori più economici è variabile tra il metro (solo utilizzando la portante L1) e diversi centimetri (con entrambe le portanti L1 e L2), mentre quella raggiunta dagli strumenti più sofisticati a doppia frequenza (L1 e L2) è dell'ordine di pochi millimetri (cfr. Tabella 1). La precisione sulla componente verticale della posizione è inferiore rispetto alle componenti planimetriche; solitamente l'errore sulla quota GNSS è almeno doppio rispetto a quello delle altre componenti. Questa differenza è dovuta principalmente alla precisione con cui sono noti i parametri per modellare correttamente i diversi strati della ionosfera e troposfera che sono attraversati dal segnale emesso dal satellite. Le reali osservazioni acquisite dai ricevitori GNSS non sono direttamente fruibili ad un normale utente, ma necessitano di una fase di elaborazione per essere trasformate in coordinate. Pertanto, un fattore che riveste particolare importanza nella precisione della tecnica GNSS è il programma utilizzato per ricostruire (modellare) il percorso del segnale dal satellite al ricevitore. In questo caso i semplici programmi installati sui navigatori satellitari portatili consentono stime con una precisione molto bassa (metri, decine di centimetri); mentre gli algoritmi sviluppati in ambito scientifico (ad esempio: Bernese, Gamit/Globk e Gipsy) possono raggiungere precisioni molto

Ellissoide	Semiassse maggiore (a)	Semiassse minore (c)	Schiacciamento
Bessel (1830)	6377397 m	6356079 m	1/299.15
Hayford (1909)	6378388 m	6356912 m	1/297
WGS84 (1984)	6378137 m	6356752 m	1/298.257

Tabella 2 – Caratteristiche geometriche di alcuni dei più importanti ellissoidi di rotazione utilizzati in campo geodetico e topografico. L'ellissoide di Hayford è il sistema di riferimento assunto nel 1941 come riferimento per la cartografia ufficiale in Italia.

alte dell'ordine di pochi millimetri; tra questi estremi si inseriscono in termini di precisione i moderni programmi sviluppati dalle diverse ditte costruttrici di strumenti per il posizionamento in ambito commerciale. Al termine dell'elaborazione le osservazioni GNSS vengono tradotte in termini di posizione sulla superficie terrestre, che deve essere descritta attraverso un opportuno modello matematico. Gli organismi internazionali hanno scelto, come superficie di riferimento per quanto riguarda il sistema GNSS, l'ellissoide di rotazione definito WGS84 le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 2. Le effemeridi dei satelliti fornite dal segmento di controllo sono espresse nel sistema di riferimento WGS84, per questo motivo la posizione dell'antenna al termine dei calcoli sarà data nel medesimo sistema. All'interno dei diversi programmi di elaborazione i calcoli vengono eseguiti per semplicità utilizzando come sistema di coordinate un sistema cartesiano tridimensionale (X,Y,Z). Questo sistema di coordinate è però privo di alcun significato geodetico e cartografico; per tale motivo al termine, vi è una trasformazione di coordinate che permette di passare a sistemi più intuitivi come ad esempio quello geografico in termini di longitudine, latitudine e quota ellissoidica, o quello delle coordinate piane locali in termini di coordinata Nord (distanza in metri dall'equatore), coordinata Est (distanza in metri dal meridiano di Greenwich) e quota ellissoidica. Poiché l'ellissoide WGS84, come pure qualsiasi altro ellissoide, non ha alcun significato geofisico, la componente quota ellissoidica negli ultimi due sistemi di coordinate non rappresenta la coordinata ortometrica rispetto al livello del mare, ma bensì la quota rispetto alla superficie dell'ellissoide. Per conoscere la quota ortometrica è necessario sommare alla quota GNSS un termine definito correzione geoidica, che rappresenta la differenza tra il geode e l'ellissoide in quel punto. Questa correzione ha una variabilità molto elevata in termini spaziali, ed è oggetto di continui aggiornamenti e studi. Nel caso degli strumenti GNSS che forniscono direttamente la quota sul livello del mare, al loro interno possiedono dei modelli molto semplici di queste correzioni. La tecnica GNSS permette di stimare la posizione di un punto attraverso due metodologie di posizionamento

differenti: assoluto e relativo. Nel primo caso si ha un'unica antenna ricevente, e un tipico esempio è il navigatore GNSS dell'auto. La massima precisione raggiungibile nel caso di un posizionamento assoluto è dell'ordine delle decine di centimetri. Il posizionamento relativo, invece, prende in esame osservazioni eseguite da due o più antenne contemporaneamente, alcune delle quali (ma non tutte) possono essere anche in movimento. In fase di elaborazione delle informazioni mediante opportune strategie di calcolo è possibile eliminare o attenuare alcune delle principali fonti di errore che affliggono il posizionamento assoluto; per questo motivo con tale tipo di posizionamento è possibile raggiungere una precisione di pochi millimetri (Tabella 3). In generale nell'ambito del monitoraggio dei fenomeni di dissesto idrogeologico si tende ad utilizzare un posizionamento relativo ed è possibile distinguere diverse modalità di rilievo, sulla base anche del passo di campionamento utilizzato. Il passo di campionamento è l'intervallo di tempo che intercorre tra una misura del segnale e la successiva e quindi tra una stima e la successiva della posizione del punto. Le modalità di rilievo possibili nel caso del posizionamento relativo sono quattro: cinematico, rapido-statico, semi-permanente e permanente. Nella modalità di rilievo di tipo cinematico vengono utilizzati almeno due strumenti, uno lasciato fermo in un punto (*master*) e l'altro (*rover*) trasportato da un operatore sempre in movimento. Entrambi gli strumenti devono essere programmati con lo stesso passo di campionamento, solitamente di 1 secondo. In questo modo lo strumento in movimento sarà in grado di misurare ad ogni secondo la posizione di un punto diverso. Le osservazioni acquisite dal ricevitore rimasto fermo risultano indispensabili per applicare in fase di elaborazione gli algoritmi per il posizionamento relativo; in questo modo, anche utilizzando i più comuni programmi commerciali, è possibile raggiungere una precisione di alcune decine di centimetri. Attraverso questi punti sarà poi possibile realizzare un modello digitale del terreno (DTM) o delle quote (DEM) dell'area in esame, già georeferenziato. La precisione di questo modello dipende anche dalle modalità con cui è stato eseguito il rilievo, in particolare se l'operatore ha camminato molto lentamente si avrà a disposizione un numero elevato di punti da utilizzare. Inoltre, lo strumento lasciato fermo, deve essere posizionato nelle vicinanze della zona da monitorare in un'area ritenuta stabile. Questo requisito, come quello dell'accessibilità dell'area da monitorare rappresentano le due principali limitazioni di questa tecnica nel monitoraggio delle aree instabili. Esistono però numerosi vantaggi, come la semplicità della strumentazione e della fase di elaborazione, la possibilità di generare diversi DTM/DEM dell'area già georeferenziati che possono essere confrontati con quelli dedotti

utilizzando altre tecniche. Inoltre, se si utilizza sempre il medesimo punto fermo, esterno all'area, è possibile confrontare direttamente i DTM senza dover passare ad una georeferenziazione più completa.

Anche la tecnica GPS Real Time Kinematic (RTK) dove lo strumento in movimento e quello fermo sono collegati via radio rientra nel novero delle modalità di posizionamento relativo cinematico, in quanto lo strumento fisso trasmette a quello in movimento una serie di parametri necessari e sufficienti per una stima in tempo reale della posizione del punto. Queste misure risultano ovviamente meno precise rispetto a quelle calcolate con la fase di elaborazione successiva al rilievo.

Un ulteriore sviluppo del posizionamento in tempo reale è dato dalla tecnica VRS (Virtual Reference Stations) in cui l'operatore utilizza un solo strumento in fase di acquisizione. Anche questa tecnica rientra nella categoria del posizionamento relativo con modalità cinematica, in quanto lo strumento che materialmente esegue la misura deve essere costantemente collegato con un centro di calcolo che crea uno strumento virtuale nelle vicinanze del rilievo, in grado di simulare ed inviare le medesime informazioni inviate dalla stazione reale nel caso del rilievo RTK. La possibilità di simulare nelle vicinanze di un rilievo l'acquisizione del dato da parte di uno strumento virtuale fermo è data dall'esistenza di numerose stazioni costituite da strumenti GPS permanenti in continua acquisizione con passo di campionamento di 1 secondo. Le informazioni provenienti da queste reti di strumenti vengono poi inviate in tempo reale al centro di calcolo che provvede a creare le diverse stazioni virtuali dove i clienti ne hanno fatto richiesta. Entrambe le tecniche RTK e VRS rappresentano uno sviluppo del posizionamento relativo in modalità cinematica, in cui a fronte di una riduzione del livello di precisione (non eccessiva per gli scopi di monitoraggio) si ottiene un notevole risparmio di tempo, non essendo necessaria una fase successiva di elaborazione del dato.

Un'altra modalità di rilievo del posizionamento relativo è quella definita rapido-statica, in cui uno strumento rimane sempre fisso in un punto (master) e l'altro (rover) misura per un periodo limitato di tempo (15/30 minuti) la posizione di un certo numero di punti all'interno dell'area da monitorare. Anche in questo caso entrambi gli strumenti devono essere programmati con lo stesso passo di campionamento, che di solito è di 15 secondi. Con questa modalità è possibile monitorare gli spostamenti di un'area in dissesto confrontando le misure eseguite nel tempo nei diversi punti. Per sfruttare al meglio la quantità di misure acquisite per ogni singolo punto (10 minuti di misura con passo di campionamento a 15 secondi danno 40 misure della posizione dello stesso punto) è necessario eseguire una fase di elaborazione in cui vengono dapprima calcolate le misure di posizione e poi

Tipo di rilievo	Osservabile	Precisione
Cinematico	Codice	Metro
Cinematico	Fasi	Qualche decina di centimetri (dopo elaborazione)
Rapido-statico	Fasi	Alcuni centimetri
Semi-permanente	Fasi	< 1 cm
Permanente	Fasi	Pochi millimetri

Tabella 3 – Precisioni raggiungibili utilizzando le diverse modalità di posizionamento GNSS relativo.

successivamente combinate in una sorta di media pesata per fornire un solo valore della posizione. La precisione raggiungibile con questa modalità è dell'ordine di qualche centimetro utilizzando i programmi commerciali più completi.

Altre modalità di rilievo, in cui l'antenna ricevente è installata in maniera permanente o semi-permanente, sono di solito utilizzate prevalentemente in ambito scientifico per studi di carattere tettonico o per attività di monitoraggio speciali. In questi ambiti, dato che sono richieste precisioni molto alte (millimetriche) si cerca di minimizzare qualsiasi fonte di errore, anche quella derivante dalla tipologia di installazione della strumentazione. Per le installazioni di tipo semi-permanente la strumentazione viene installata e posta in misura per un periodo di tempo relativamente limitato (giorni o settimane). Nel caso delle stazioni permanenti la strumentazione rimane posizionata nel medesimo punto ed operativa per un periodo di tempo molto lungo (anni); da qui l'acronimo inglese che caratterizza questo tipo di installazione CGPS (*Continuous GPS*). In genere il passo di campionamento utilizzato per queste tipologie di rilievo è di 30 secondi e le osservazioni sono solitamente di durata giornaliera; questo significa che alla fine delle 24 ore si hanno a disposizione 2880 stime della posizione del medesimo punto. La precisione raggiunta in questi casi, grazie a specifiche procedure di elaborazione, è dell'ordine del millimetro. L'insieme delle stime giornaliere della posizione di una stazione permanente o semi-permanente eseguite in un certo lasso di tempo (anni) crea una serie temporale. Solitamente per ogni sito si hanno 3 serie temporali distinte, due per le componenti planimetriche Nord ed Est della posizione ed una per la sua componente verticale. Lo studio delle serie temporali giornaliere delle stazioni CGPS permette di individuare la velocità con cui una placca tettonica si muove (velocità assoluta) e più in dettaglio individuare i movimenti sempre in termini di velocità di un punto rispetto a quelli vicini (velocità relativa). Questi ultimi rappresentano gli spostamenti interni alle placche tettoniche che, in un'area di collisione continentale come la penisola italiana, sono molto importanti perché sono in relazione con lo sviluppo della sismicità nell'area (Mantovani et al. 2010a, 2010b). Le serie tem-

porali della posizione dei punti GNSS possono inoltre contenere segnali periodici che altro non sono che il segnale di altri fenomeni naturali che si vanno a sommare a quello tettonico di fondo. Questi segnali possono essere ad esempio la registrazione della fase di riempimento e di svuotamento di una falda acquifera sottostante la stazione, in funzione delle precipitazioni. La possibilità data dalla tecnica GNSS di avere un elevato numero di misure nel tempo che consente di individuare e studiare anche fenomeni periodici e di verificare possibili correlazioni con altri tipi di misure, ad esempio le precipitazioni, è una caratteristica molto importante quando si eseguono attività di monitoraggio in aree di dissesto idrogeologico o studi sulla subsidenza. Inoltre, lo studio delle serie temporali consente anche di stimare eventuali segnali non periodici, come ad esempio salti nel normale andamento della serie, come quelli che si verificano quando si è nelle vicinanze dell'epicentro di un terremoto. Le reti di stazioni permanenti GNSS istituite da diversi enti commerciali e pubblici per il supporto al posizionamento VRS sviluppatasi negli ultimi anni, possono rappresentare un'utile integrazione alla già esistente rete di monitoraggio scientifico. La diffusione di queste reti commerciali di stazioni GNSS permanenti che integra la rete di siti scientifici ha di fatto creato nella penisola italiana una rete di stazioni permanenti che presenta un'interdistanza media di poche decine di chilometri. Questo rende possibile anche il monitoraggio continuo di aree di dissesto idrogeologico con la modalità stazione permanente (Baldi et al. 2008a,b) o lo studio di fenomeni naturali come ad esempio la subsidenza che hanno un forte impatto sociale ed economico sulla popolazione. Nel paragrafo successivo verrà descritto il monitoraggio dei movimenti della Grande Frana di Patigno (Fig. 1) eseguito utilizzando una stazione GPS permanente.

#### 4. LA GRANDE FRANA DI PATIGNO

La frana di Patigno è un importante movimento franoso di tipo complesso situato nella parte alta della Val Gordana, nell'area appennica della provincia di Massa-Carrara. Questa occupa un'area che si estende da località Pandegia (950 m s.l.m.) fino al fondovalle del Torrente Gordana (580 m s.l.m.) per una lunghezza complessiva di quasi 2,5 Km e una larghezza al piede di circa 1 Km. Il materiale in frana è litologicamente costituito da detrito di falda con clasti di argillite e calcare in matrice argillosa, mentre il substrato è costituito prevalentemente dalla formazione delle Argille e Calcari di Canetolo. Recenti studi (Federici et al., 2000, 2002), basati sull'integrazione di indagini di sismica a rifrazione e sondaggi geognostici, hanno evidenziato la presenza di almeno due unità litotecniche sopra il substrato inalterato: una

superficiale costituita dal detrito di falda (8-33 m di spessore) e l'altra più profonda costituita da substrato alterato (5-30 m di spessore). Una rete di inclinometri installata nel 1999 ha inoltre evidenziato la presenza di movimenti superficiali oscillanti tra i 5 e i 15 m, sovrapposti ad un movimento profondo tra 20 e 50 m. Nel complesso, la frana può essere considerata uno scivolamento roto-traslativo profondo, con deformazioni superficiali di tipo plastico (colate, creep e scivolamenti superficiali). Il monitoraggio geodetico della frana di Patigno da parte del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Siena e del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Bologna è iniziato nel 2004, installando una stazione permanente sull'edificio comunale situato al centro del paese di Patigno, ubicato sull'omonima frana e denominata con la sigla PATG secondo il codice di denominazione delle stazioni GNSS. Sfruttando l'esistente rete di stazioni permanenti istituite per studi di carattere tettonico, che presenta nelle vicinanze della zona ad una distanza inferiore ai 70 Km, almeno 4 siti, è stato possibile istituire il monitoraggio utilizzando un solo strumento installato come stazione permanente GNSS. Il confronto tra i risultati ottenuti analizzando i voli fotogrammetrici eseguiti nel 1975, 1987 e 2004 ha permesso di evidenziare come gli spostamenti misurati mediante la tecnica geodetica siano in accordo con le stime fotogrammetriche acquisite in un lungo periodo di tempo (30 anni), e che questi possano essere considerati come rappresentativi dei movimenti dell'intero centro abitato.

La possibilità di installare una stazione permanente presso l'edificio comunale ne ha reso possibile il controllo remoto via telefono rendendo possibile un'alta efficienza (superiore al 95%) della stazione in termini di dati acquisiti. La metodologia di posizionamento adottata per analizzare le osservazioni acquisite dalla stazione di Patigno è quella relativa. Per questo motivo le osservazioni giornaliere (passo di campionamento a 30 secondi, 2880 misure giornaliere) della stazione PATG sono state integrate durante la fase di elaborazione con i dati delle altre 4 stazioni permanenti (ROGA; CARG, TREC e ZERI) situate all'esterno dell'area in dissesto e in zone stabili come dimostrano le analisi dei loro movimenti relativi (Cenni et al. 2008). L'elaborazione del dato è stata eseguita utilizzando il software Gamit/Globk (Herring et al. 2010a,b). Al termine del calcolo eseguito utilizzando le orbite definite finali, fornite con un ritardo di 15 giorni rispetto alle osservazioni dagli Enti preposti, si hanno le posizioni chiamate giornaliere di tutte e 5 le stazioni. In questo lavoro le diverse soluzioni giornaliere sono state allineate nel medesimo sistema di riferimento assumendo fisse le coordinate della stazione ROGA. La figura 6 mostra le serie temporali delle 3 componenti (Nord, Est e Quota) ottenute al termine della fase di elaborazione.

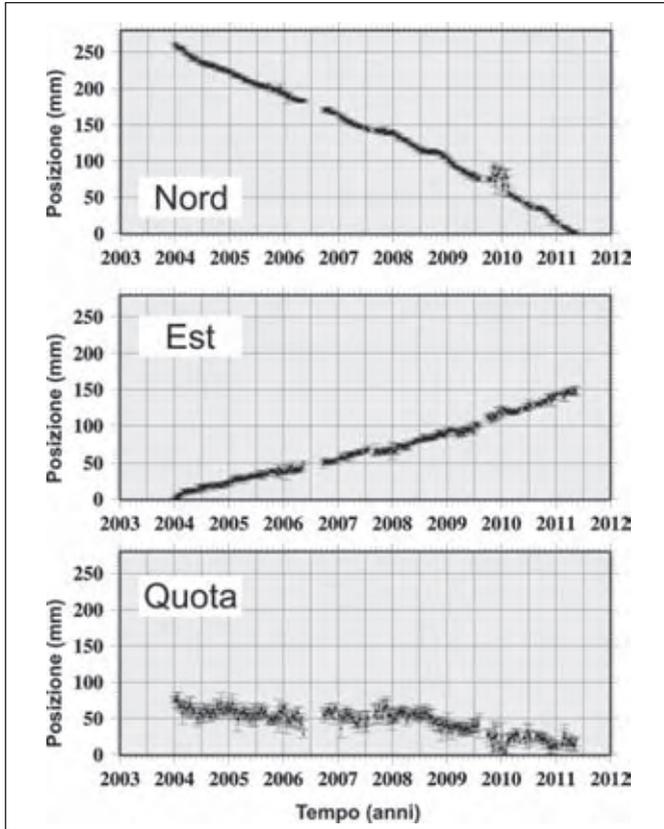


Figura 6 – Serie temporali delle componenti Nord, Est e Quota della posizione giornaliera della stazione GNSS situata sulla frana di Patigno. Le barre verticali rappresentano l'incertezza associata (pochi mm) a ciascuna stima. Per una maggiore leggibilità dei grafici ad ogni componente è stato tolto il valore minimo della serie (Nord = 4937349,5553 m, Est = 777165,8252 m, Quota = 800,1758 m).

Successivamente le posizioni giornaliere di ogni stazione sono state utilizzate per ricavare una posizione mediata nell'arco temporale di una settimana con una media aritmetica pesata allo scopo di ridurre il rumore numerico all'interno delle serie temporali e quindi evidenziare con maggiore precisione eventuali variazioni significative della posizione. Queste serie temporali settimanali sono state poi analizzate utilizzando un approccio ai minimi quadrati per stimare le velocità medie con cui le singole stazioni si spostano nell'arco di un anno e il relativo scarto quadratico medio. Il risultato di questo calcolo è riportato in Tabella 4.

Sigla	T	$V_N$ (mm/anno)	$V_E$ (mm/anno)	$V_Q$ (mm/anno)	$SQM_N$ (mm)	$SQM_E$ (mm)	$SQM_Q$ (mm)
CARG	6.01	$0.0 \pm 0.6$	$0.4 \pm 0.6$	$0.2 \pm 1.3$	1.0	1.0	3.7
PATG	7.37	$-33.4 \pm 0.5$	$18.4 \pm 0.5$	$-6.5 \pm 1.0$	7.0	5.0	9.0
TREC	7.37	$0.4 \pm 0.5$	$0.1 \pm 0.5$	$-0.6 \pm 1.0$	1.3	1.1	3.3
ZERI	5.48	$-0.6 \pm 0.7$	$0.3 \pm 0.7$	$0.1 \pm 1.5$	2.0	2.5	4.2

Tabella 4 – Velocità medie (mm/anno) con relativa incertezza stimate utilizzando le serie temporali settimanali delle stazioni inserite nel calcolo, e scarto quadratico medio (SQM) delle coordinate Nord (N), Est (E) e Quota ellissoidica (Q) delle stazioni considerate. T indica l'intervallo di tempo in anni in cui la stazione è stata operativa. I valori della stazione di riferimento ROGA non compaiono nella tabella in quanto tutti uguali a zero.

La Tabella 4 mostra dei valori di velocità delle altre stazioni stabili (CARG, TREC, ZERI) presenti nel calcolo rispetto alla stazione di riferimento ROGA, inferiori a 1 mm/anno. Inoltre, è possibile notare già da questa analisi che la frana di Patigno è caratterizzata da un importante movimento di scivolamento orizzontale visti gli elevati valori di velocità delle componenti orizzontali rispetto a quelli della componente verticale.

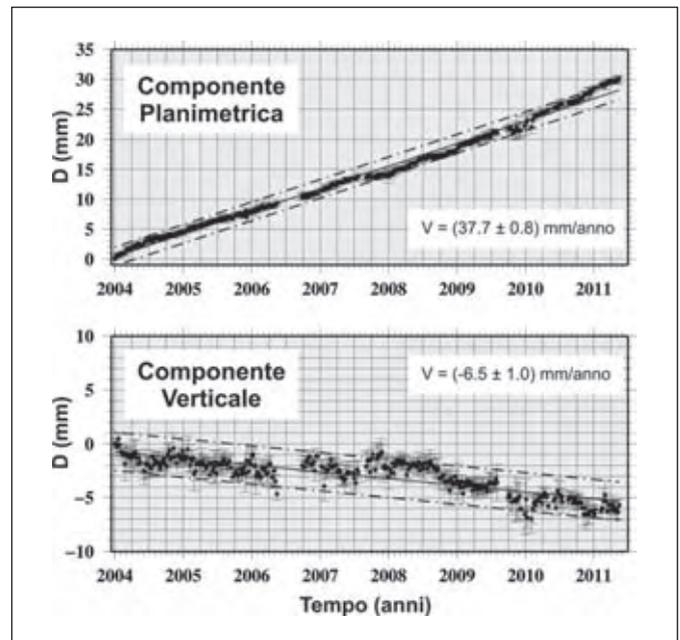


Figura 7 – Serie temporali settimanali della componente planimetrica, ottenuta mediante la somma in quadratura dei valori delle coordinate Nord ed Est, e della componente verticale. La linea continua indica il valore della velocità media calcolata mediante un semplice metodo ai minimi quadrati utilizzando tutti le osservazioni settimanali. L'area delimitata dalle due linee tratteggiate indica l'intervallo di confidenza pari a 2 volte il valore dello scarto quadratico medio. Nei riquadri sono riportate le rispettive velocità stimate con un metodo ai minimi quadrati pesato.

I valori dello scarto quadratico medio relativamente bassi (pochi millimetri) ottenuti per ciascuna componente indicano che questi siti non sono affetti da particolari disturbi locali, come ad esempio rumore elettromagnetico o fenomeni naturali in grado di generare forti segnali periodici. Dall'analisi delle osservazioni geodetiche della stazione di Patigno è stato possibile desumere che il movimento franoso ove è ubicato lo strumento non è trascurabile (Fig.7), ma caratterizzato da una componente planimetrica di circa 3.8 cm/anno in direzione Sud-Est ed una diminuzione di quota di circa 7 mm/anno, con un'inclinazione di circa 10° rispetto alla verticale, compatibile con la pendenza media della superficie topografica dell'area. Per cercare di evidenziare possibili movimenti periodici o improvvise accelerazioni della frana, le serie temporali settimanali sono state analizzate mediante il metodo della "velocità mobile". Questo metodo permette di stimare la velocità utilizzando solo i dati compresi

in una finestra di un numero  $n$  di settimane. La prima stima viene eseguita utilizzando le osservazioni delle prime  $n$  settimane; successivamente lasciando inalterata la dimensione della finestra, questa viene spostata di una settimana e calcolato un nuovo valore di velocità, fino a quando non è stato esaminato l'intero periodo di dati analizzato. Durante il monitoraggio dell'area abbiamo analizzato le serie temporali settimanali delle componenti planimetrica e verticale con finestre di diverse dimensioni; in Figura 8 è riportato il risultato ottenuto considerando una finestra di 20 settimane. L'andamento temporale della "velocità mobile" della componente planimetrica della posizione illustrata in Figura 8A mostra delle oscillazioni significative con valori che vanno da meno di 1 mm/anno fino a velocità superiori a 8 cm/anno, con massimi in corrispondenza del periodo invernale. Per quanto riguarda la componente verticale (Fig. 8B) si hanno delle oscillazioni da valori negativi, fino a -6 cm/anno, che indicano un abbassamento del terreno, a valori positivi fino a circa 4 cm/anno. Queste importanti variazioni nella velocità di spostamento della frana potrebbero essere correlate con l'andamento temporale della piovosità, come osservato in diverse zone

coinvolte da instabilità gravitative. Per questo motivo l'andamento della "velocità mobile" è stato confrontato con l'andamento della piovosità dell'area registrato dalla stazione pluviometrica di Pontremoli. Da questo confronto emerge l'esistenza di una correlazione temporale tra i massimi della "media mobile" della piovosità e quelli della "velocità mobile" della componente planimetrica; infatti, è possibile notare che i massimi della velocità seguono di circa 2-3 mesi i periodi di massima precipitazione. Questo ritardo nel movimento potrebbe essere dovuto alla lenta infiltrazione della pioggia, con un graduale aumento della pressione di poro all'interno dell'area di frana, e conseguente riduzione degli attriti lungo la superficie di scorrimento. Evidenziare una possibile correlazione tra l'andamento della piovosità e quello della "velocità mobile" della componente verticale risulta più complesso in quanto questa componente oltre ad avere una precisione inferiore rispetto a quelle planimetriche, ha un andamento nel tempo che può essere influenzato da diversi fattori. Lo scivolamento della frana lungo la superficie di scorrimento produce una diminuzione del valore della quota, come accade ad un grave quando scivola lungo un piano inclinato; a questo va sommato algebricamente l'effetto dell'imbibimento delle argille in seguito alle precipitazioni. Quest'ultimo fattore non è di facile stima in quanto gioca un ruolo fondamentale anche il fattore di dilavamento e l'evotraspirazione, cioè la perdita di acqua dal terreno che può avvenire direttamente (evaporazione) o attraverso la vegetazione (traspirazione).

Il movimento della Grande Frana di Patigno è stato monitorato giornalmente a partire dal gennaio 2004 attraverso una stazione GNSS permanente. Questo tipo di monitoraggio, tuttavia, presenta alcuni svantaggi legati alla immobilizzazione per lungo tempo di uno o più strumenti, la necessità di trovarvi un ricovero provvisto di alimentazione elettrica ed eventualmente una connessione telefonica o internet. Queste condizioni non sempre possono essere soddisfatte soprattutto se si tratta del monitoraggio di aree di dissesto di dimensioni limitate; in questi casi sono preferibili installazioni geodetiche di tipo semi-permanente. In questo tipo di installazioni lo strumento rimane posizionato sul sito per un periodo limitato di tempo (pochi giorni), e la misura viene eseguita nuovamente dopo un determinato lasso di tempo che può anche non essere costante e può variare da qualche decina di giorni fino a qualche mese. Allo scopo di verificare se una stazione semi-permanente possa essere in grado di monitorare l'andamento medio della frana di Patigno è stata simulata la serie temporale ottenibile da un'installazione semi-permanente partendo dalle serie temporali settimanali delle componenti planimetriche (Nord, Est) e verticale utilizzate in precedenza.

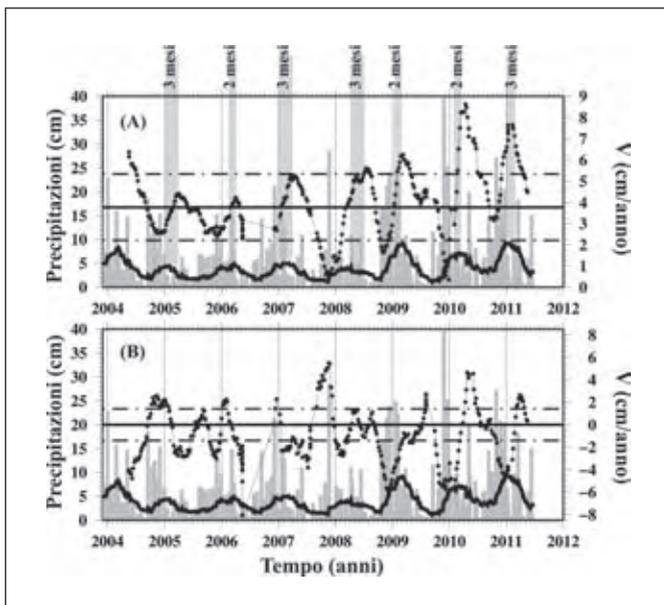


Figura 8 – Serie temporale della "velocità mobile" della componenti planimetrica (A) e verticale (B), ottenute con una finestra di 20 settimane. La linea continua orizzontale indica il valore della velocità a lungo periodo riportato in Tabella 4 e Figura 7. Le due rette tratteggiate individuano un'area pari a 2 volte la dispersione della serie (intervallo di confidenza al 95%). L'istogramma grigio rappresenta l'andamento temporale della piovosità settimanale registrata nella stazione meteorologica situata nel comune di Pontremoli. La linea continua indica l'andamento medio della piovosità stimato utilizzando il metodo della "media mobile" con un finestra sempre di 20 settimane. Le barre grigie in (A) individuano l'intervallo temporale (in mesi) che intercorre tra i valori massimi nella serie temporale delle "media mobile" delle precipitazioni e quelli nella serie della "velocità mobile" della componente planimetrica.

S	D	N	V <sub>N</sub>	V <sub>E</sub>	V <sub>Q</sub>	SQM <sub>N</sub>	SQM <sub>E</sub>	SQM <sub>Q</sub>
		334	-33.4	18.4	-6.5	7.0	5.0	9.0
4	28	84	-32.9	18.5	-6.5	6.7	5.2	9.1
6	42	56	-32.8	18.6	-6.1	6.9	5.3	9.5
8	56	42	-32.9	18.4	-6.6	6.9	5.3	9.2
10	70	34	-33.0	18.6	-5.9	7.3	5.4	8.6
12	84	28	-32.8	18.5	-6.4	6.7	5.5	9.9
14	98	24	-32.6	18.4	-6.1	6.6	4.9	8.6
16	112	21	-32.6	18.5	-7.1	7.1	5.7	8.8
18	126	19	-32.6	18.7	-6.2	7.5	5.3	8.7
20	140	17	-33.2	18.5	-5.8	6.5	5.4	7.7
25	175	14	-32.6	18.8	-7.0	8.5	5.0	9.2
27	189	13	-32.8	18.9	-6.5	8.3	5.5	9.2
30	210	12	-33.0	18.9	-6.0	8.3	5.6	9.2

*Tabella 5 – Velocità media in mm/anno e Scarto Quadratico Medio (SQM) in millimetri delle componenti Nord (N), Est (E) e Quota ellissoidica (Q) della posizione della stazione di Patigno ottenute simulando una stazione semi-permanente che ha osservato ininterrottamente per una settimana, acquisendo dati da cui è stata calcolata una posizione media. S indica il tempo in settimane che intercorre tra due rilievi successivi; D indica il numero di giorni che intercorre tra due settimane di osservazione. N è il numero di dati effettivamente utilizzato nell'approccio ai minimi quadrati per stimare il valore della velocità media e dello SQM. Nella prima riga sono state riportati i risultati ottenuti considerando tutte le osservazioni settimanali (334), riportati in Tabella 4.*

Dalle serie temporali settimanali sono stati estratti i valori della posizione ad intervalli regolari di tempo; con questi dati è stata creata la serie temporale ottenibile nel caso la stazione di Patigno fosse semi-permanente. Questa simulazione permette di riprodurre il risultato ottenibile da una stazione semi-permanente che rimane in osservazione per una settimana in modo ininterrotto, ricavando una posizione media settimanale. Successivamente, a partire dalle serie temporali settimanali sono state calcolate la velocità media e lo scarto quadratico medio delle componenti Nord, Est e Quota ellissoidica della posizione, riportate in Tabella 5 in funzione dell'intervallo di tempo (colonna S) che intercorre tra una settimana di osservazione e l'altra. È possibile notare come i valori di velocità media ottenuti con la simulazione si discostano di poco dal valore ottenuto considerando tutte le osservazioni; le differenze, infatti, nel caso di tutte e tre le componenti sono dell'ordine di qualche decimo di mm/anno fino ad un massimo di circa 1 mm/anno. Viste le relativamente alte velocità di spostamento della frana, le differenze riscontrate non sono significative per quanto riguarda il monitoraggio relativo allo spostamento medio della frana, ma possono diventare importanti se si tenta

con un rilievo semi-permanente di studiare i movimenti periodici come è stato fatto in precedenza (Fig. 8). I valori dello scarto quadratico medio riportati in Tabella 5 sono molto simili tra loro, anche quando diminuisce il campione di dati analizzato, anzi in alcuni casi i valori risultano anche significativamente inferiori rispetto al valore ottenuto analizzando tutti i dati. Questo è una conseguenza del fatto che riducendo il monitoraggio non si riescono ad osservare eventuali movimenti periodici e non, la cui presenza aumenta il rumore della serie temporale e di conseguenza il valore dello scarto quadratico medio.

Un fattore importante, soprattutto in termini di tempo, nell'analisi delle osservazioni geodetiche è il tipo effemeridi inserite nel calcolo per modellare le orbite dei satelliti. I risultati appena discussi sono stati ottenuti inserendo nel calcolo le effemeridi precise (disponibili con un ritardo di circa 15 giorni), dato che si eseguiva un monitoraggio in tempo reale. Allo scopo di verificare la precisione raggiungibile nella stima della posizione e della velocità quando si utilizzano effemeridi con un tempo di ritardo molto basso, abbiamo analizzato 3 anni (dal 1 gennaio 2004 fino al 31 dicembre 2006) di dati giornalieri utilizzando le orbite definite rapide, fornite con un ritardo di sole 24 ore dagli Enti preposti.

Sigla	Orbite Precise (Finali)			Orbite Rapide		
	V <sub>N</sub>	V <sub>E</sub>	V <sub>Q</sub>	V <sub>N</sub>	V <sub>E</sub>	V <sub>Q</sub>
PATG	-30.4 ± 0.9	17.1 ± 0.9	-6.0 ± 1.9	-31.1 ± 1.3	18.1 ± 1.3	-7.0 ± 2.1
CARG	0.2 ± 0.9	0.6 ± 0.9	0.4 ± 0.9	0.7 ± 1.2	0.8 ± 1.2	0.9 ± 2.0
TREC	1.0 ± 0.9	0.1 ± 0.9	-1.8 ± 1.9	1.2 ± 1.4	0.3 ± 1.4	-2.1 ± 2.1
ZERI	-1.2 ± 1.1	-0.9 ± 1.1	3.4 ± 2.1	0.3 ± 1.5	-0.1 ± 1.5	2.0 ± 2.5

*Tabella 6 – Velocità e rispettive incertezze delle 3 componenti (Nord = N, Est = E, Quota = Q) in millimetri all'anno calcolate utilizzando le serie temporali settimanali ottenute utilizzando nell'elaborazione le orbite dei satelliti finali (precise, tempo di ritardo 15 giorni) e quelle rapide (meno precise, tempo di ritardo 24 ore). L'analisi si riferisce ad un periodo limitato di 3 anni di dati giornalieri, dal 1 gennaio 2004 fino al 31 dicembre 2006.*

In Tabella 6 sono stati riportati per un confronto i valori di velocità ottenuti inserendo nell'analisi dati due diversi tipi di effemeridi (precise e rapide) per modellare le orbite dei satelliti. È possibile notare come le differenze in tutti i casi siano inferiori alle incertezze, questo indica un sostanziale accordo tra i risultati ottenuti.

Tale accordo si ritrova anche quando si sono confrontati i valori riportati in Tabella 4 con quelli relativi alle orbite finali di Tabella 6; le piccole differenze riscontrate inferiori sempre alle rispettive incertezze sono dovute al diverso periodo di tempo analizzato, superiore ai 5 anni per la Tabella 4 e di solo 3 anni per la Tabella 6. Le caratteristiche in termini di rumore stimate utilizzando il parametro dello scarto quadratico medio (SQM) delle serie temporali settimanali ottenute modellando le orbite nell'analisi dati mediante effemeridi precise e rapide sono state riportate in Tabella 7.

Sigla	Orbite Precise (Finali)			Orbite Rapide		
	SQM <sub>N</sub>	SQM <sub>E</sub>	SQM <sub>O</sub>	SQM <sub>N</sub>	SQM <sub>E</sub>	SQM <sub>O</sub>
PATG	3.0	3.1	6.0	4.0	4.0	8.0
CARG	1.1	1.1	5.0	1.2	1.5	5.6
TREC	1.5	1.5	3.6	1.7	2.0	4.9
ZERI	3.0	3.1	5.2	3.3	3.3	6.3

*Tabella 7 – Scarto quadratico medio (SQM) in millimetri delle serie temporali settimanali della posizione (3 componenti, Nord = N, Est = E, Quota = Q) stimate utilizzando nell’elaborazione le orbite dei satelliti finali (precise, tempo di ritardo 15 giorni) e quelle rapide (meno precise, tempo di ritardo 24 ore). Questa analisi è stata eseguita solamente su un campione di 3 anni di dati giornalieri, dal 1 gennaio 2004 fino al 31 dicembre 2006.*

Dal confronto si ottengono differenze inferiori al millimetro con i valori ottenuti con le orbite rapide sistematicamente più alti, questo è dovuto al maggior rumore presente nelle serie causato dalla minor precisione con cui sono state modellate le orbite dei satelliti. Anche in questo caso le piccole differenze che si registrano confrontando i valori ottenuti con le orbite finali in Tabella 7 con quelli dello scarto quadratico medio riportati in Tabella 4 sono dovute al diverso intervallo di tempo analizzato. Dal confronto eseguito comparando le serie temporali settimanali ottenute con le orbite precise con quelli stimati utilizzando le orbite rapide si evince che le differenze riscontrate non sono tali da ritenere che un eventuale utilizzo delle orbite rapide per un monitoraggio rapido dell’evoluzione dell’area di dissesto possa portare a risultati molto differenti da quelli che si possono ottenere utilizzando le più precise effemeridi finali.

## 5. CONCLUSIONI

Il movimento della Grande Frana di Patigno è stato monitorato a partire da gennaio 2004 utilizzando una stazione GNSS permanente ubicata sull’edificio comunale posto al centro dell’area di dissesto. Dall’analisi delle serie temporali settimanali delle componenti Nord, Est e Quota ellissoidica della posizione della stazione GNSS è stata stimata una velocità orizzontale di scivolamento di 3.8 cm/anno in direzione Sud-Est (azimut di circa 150°) e una velocità di abbassamento verticale di -6.5 mm/anno; tali valori sono compatibili con quelli stimati da altri autori ottenuti analizzando dei rilievi aero-fotogrammetrici (Baldi et al. 2008a, b). L’elevato numero di osservazioni GPS e la loro precisione hanno permesso di determinare le variazioni stagionali della velocità in correlazione con l’idrologia del sito. Infatti confrontando tra loro l’andamento delle piogge con l’andamento della velocità planimetrica stimato utilizzando una “finestra mobile” delle dimensioni di 20 settimane ha permesso di individuare un possibile ritardo di circa 2-3 mesi tra il massimo delle precipitazioni e il picco di massima velocità di scivolamento. Questo ritardo potrebbe esser dovuto ai tempi di

infiltrazione della pioggia nel terreno, e secondo alcuni modelli (esempio Iverson 2000) la dimensione temporale del ritardo indicherebbe che la superficie che scivola e che fornisce il movimento superficiale sia quella ubicata a circa 20 metri di profondità nella parte più alta del basamento roccioso (Federici et al. 2002). I risultati ottenuti in questo lavoro indicano che le accurate osservazioni GNSS in continuo e l’analisi dei dati pluviometrici possono contribuire a comprendere meglio le dinamiche di frane complesse. Purtroppo i costi, i tempi di analisi dati e la logistica richiesta per l’installazione di una stazione permanente non permettono di monitorare ogni area di dissesto con questo tipo di tecnica.

Per tale motivo abbiamo cercato di simulare mediante i dati della stazione permanente un’installazione semi-permanente e di verificare quale impatto sulle stime di velocità e scarto quadratico medio abbiano alcuni parametri, come le effemeridi. In particolare, è stato simulato il monitoraggio per una settimana della frana ripetendolo ad intervalli regolari di tempo. Abbiamo così verificato che per diversi intervalli di tempo le stime della velocità media planimetrica di scivolamento e della componente verticale sono molto simili a quelle eseguite utilizzando tutti i dati a disposizione. Le differenze riscontrate, dell’ordine di alcuni decimi di millimetro all’anno fino ad massimo di 1 mm/anno, possono ritenersi non significative in quando il movimento medio registrato della frana è ordini di grandezza superiore. Nel caso gli andamenti a lungo periodo registrati fossero molto più piccoli (qualche mm/anno), l’utilizzo di una stazione semi-permanente non permetterebbe di stimare significativamente nemmeno l’andamento medio. Inoltre, il monitoraggio semi-permanente non permette un’analisi dettagliata degli eventuali andamenti periodici. L’utilizzo di effemeridi rapide fornite dagli Enti preposti entro le 24 ore dall’osservazione permettono di ridurre i tempi di elaborazione di circa 2 settimane, infatti le orbite precise utilizzate in questo lavoro sono fornite con un ritardo di 15 giorni. Dal confronto tra i risultati ottenuti con le orbite finali e quelle rapide emerge che le serie temporali settimanali ottenute con quest’ultime effemeridi, anche se risultano più rumorose rispetto a quelle stimate con le orbite precise, permettono di stimare valori della velocità media molto simili a quelli ottenuti con le effemeridi precise.

Questi risultati indicano come la posizione e la velocità media ottenute con un’installazione semi-permanente e con un’elaborazione meno complessa di quella utilizzata in ambito scientifico consentono di monitorare i movimenti medi di una frana con installazioni meno complesse rispetto a quelle permanenti, che però risultano indispensabili se si vogliono studiare in dettaglio le variazioni nel tempo di questi movimenti e le loro possibili correlazioni con altri fenomeni come ad esempio le precipitazioni atmosferiche.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i Dipartimenti di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Siena e il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Bologna nelle persone del Prof. Enzo Mantovani e del Prof. Paolo Baldi per aver gentilmente messo a disposizione le loro banche dati GNSS e le loro rispettive esperienze nella realizzazione del monitoraggio della Grande Frana di Patigno. Inoltre, si ringrazia il Sig. Maurizio Ratti della stazione pluviometrica di Pontremoli per aver gentilmente messo a nostra disposizione i risultati dei suoi rilievi pluviometrici giornalieri. Alcune figure presenti in questo lavoro sono state realizzate utilizzando il programma Generic Mapping Tools (GMT, Wessel and Smith 1998).

## BIBLIOGRAFIA

BALDI P., CENNI N., FABRIS M., ZANUTTA A., 2008a. Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data. *Geomorphology*, vol. 102.

BALDI P., CENNI N., FABRIS M., ZANUTTA A., 2008b. Analisi multi-temporale delle variazioni superficiali di un corpo di frana mediante la fotogrammetria d'archivio ed il GPS. *Atti 12<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA*, 221-226. ISBN: 978-88-903132-1-9.

CENNI N., BALDI P., MANTOVANI E., FERRINI M., VITI M., D'INTINOSANTE V., BABBUCCI D., ALBARELLO D., 2008. Short-term (geodetic) and long-term (geological) deformation pattern in the Northern Apennines. *Boll.Soc. Geol.It. (Ital. J. Geosci.)*, 127, 1, 93-104.

FEDERICI, P.R., PUCCINELLI, A., CHELLI, A., D'AMATO AVANZI, G., RISOLINI, A., VERANI, M., 2000. La Grande Frana di Patigno (Massa Carrara). *Memorie della Accademia Lunigianese di Scienze "Giovanni Capellini"*, 70, 3-51.

FEDERICI, P.R., PUCCINELLI, A., D'AMATO AVANZI, G., RIBOLINI, A., VERANI, M., CHELLI, A., 2002. The large landslide of Patigno (Northern Apennines, Italy): geological, geomorphological and geognostic integrated analysis. *First European Conference on Landslides, Balkema, A.A., Prague, Czech Republic*, 1, 547-552.

HERRING T.A., KING R. W., McCLUSKY S.C., 2010a. *Gamit Reference Manual ver. 10.4*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology

HERRING T.A., KING R. W., McCLUSKY S.C., 2010b. *Globk Reference Manual ver. 10.4*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology

IVERSON R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *IN: Water Resources Research*, vol.36, no.7, p.1897-1910.

MANTOVANI E., CENNI N., BALDI P., VITI M., 2010. Misure GPS nell'Italia centro-settentrionale per la stima deterministica della pericolosità sismica. *Ingegneria sismica*, Anno XXVII, N. 3, luglio-settembre 2010, pp. 69-76.

MANTOVANI E., VITI M., BABBUCCI D., CENNI N., TAMBURELLI C., VANNUCCHI A., FALCIANI F., FIANCHISTI G., BAGLIONE M., D'INTINOSANTE V., FABBRONI P., 2010a. Sismotettonica dell'Appennino settentrionale. Implicazioni per la pericolosità sismica della Toscana. *Centro Stampa Giunta Regione Toscana*. [http://www.regione.toscana.it/regione/export/RT/sito-RT/Contenuti/sezioni/ambiente\\_territorio/visualizza\\_asset.html\\_119928546.html](http://www.regione.toscana.it/regione/export/RT/sito-RT/Contenuti/sezioni/ambiente_territorio/visualizza_asset.html_119928546.html).

WESSEL, P., SMITH W.H.F., 1998. New improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU* 79, 579.