

Monitoraggio di grandi frane riattivate e sospese nella valle del Fiume Secchia (Appennino settentrionale)

Alessandro Corsini^{1*}, Lisa Borgatti¹, Maurizio Pellegrini¹, Francesco Ronchetti¹

con la collaborazione di:

Annalisa Borghi², Ivano Campagnoli³, Giuseppe Caputo⁴, Alberto Gatti³, Enrico Leuratti², Corrado Lucente², Giovanni Truffelli⁴, Gaetano Sartini⁴

¹Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Scienze della Terra

²Regione Emilia Romagna, Servizio Tecnico di Bacino Panaro e destra Secchia

³Provincia di Modena, Servizio Geologico

⁴Regione Emilia Romagna, Servizio Tecnico di Bacino Enza e sinistra Secchia

*Autore corrispondente: Largo S. Eufemia, 19 - 41100 Modena. e-mail: corsini.alessandro@unimore.it, tel. 0592055864

e-mail altri autori principali: borgatti.lisa@unimore.it; pellegrini.maurizio@unimore.it; ronchetti.francesco@unimore.it

e-mail collaboratori: aborghi@regione.emilia-romagna.it; campagnoli.i@provincia.modena.it; gcaputo@regione.emilia-romagna.it;

gatti.a@provincia.modena.it; leuratti@regione.emilia-romagna.it; lucente@regione.emilia-romagna.it; gtruffelli@regione.emilia-romagna.it, gsartini@regione.emilia-romagna.it

Monitoring reactivated and suspended large scale landslides in the valley of River Secchia (Northern Apennines)

ABSTRACT: Large complex landslides of prehistoric age, that are coupling multiple roto-traslational rock slides at the crown to earth slides and earth flows in the intermediate and lower part of the slope, are widespread over the Northern Apennines of Italy. Typically, these landslides alternate decades or centuries long dormancy periods, to shorter periods characterised by the alternation between reactivation events and phases of suspended activity. This note deals with four landslides of this kind, that have been repetitively reactivated in the last decade causing damages to key road connections in the subcatchments of Secchia River. A comparative analysis of data from the four sites collected with monitoring systems such as inclinometers, TDR cables, wire extensometers, GPS benchmarks networks and automated electric piezometers, has been carried out. This has enabled the kinematics and hydrogeologic characteristics of the landslide during the suspended activity phases, and during the most recent reactivation phases, to be reconstructed. This has yield indications that can have a general validity for these type of mass movements.

Key terms: landslide, reactivation, monitoring, Northern Apennines, Italy

Termini chiave: Frana, riattivazione, monitoraggio, Appennino settentrionale, Italia

Riassunto

Grandi frane complesse di origine preistorica che associano scivolamenti roto-traslativi multipli di roccia al coronamento e scivolamenti e colate di terra nella parte medio-bassa del versante sono molto diffuse nell'Appennino settentrionale. Tipicamente, queste frane alternano periodi decennali o anche secolari di quiescenza, a più brevi periodi caratterizzati dall'alternarsi di eventi di riattivazione e fasi di sospensione dell'attività. La presente nota si occupa di quattro frane di tal tipo, che si sono riattivate in più fasi nell'ultimo decennio, causando danni ad infrastrutture viarie di primaria importanza nel bacino del Fiume Secchia. I dati raccolti nei quattro siti da sistemi di monitoraggio quali inclinometri, cavi TDR, estensimetri a filo, reti di capisaldi GPS e piezometri elettrici a registrazione automatica, sono stati oggetto di analisi comparata. Questo ha permesso di caratterizzare dal punto di vista cinematico e idrogeologico tanto la fase di

sospensione, che quella di inizio e, in parte, di sviluppo, degli eventi di riattivazione più recenti, fornendo indicazioni che possono avere un carattere generale per questa tipologia di fenomeni.

1. Introduzione

Nell'Appennino settentrionale le caratteristiche litologiche e strutturali e l'evoluzione geomorfologica hanno generato un'estesa e differenziata instabilità dei versanti. In Emilia-Romagna sono state rilevate circa 32.000 frane, di cui 14.000 in evoluzione e 17.300 quiescenti (Garberi et al., 1999). Lo stile di attività più frequente è quello di tipo complesso e composito (Cruden & Varnes, 1996), che, rispettivamente in successione temporale o contemporaneamente, associa scivolamenti rotazionali e rototraslativi multipli a colate di terra. Queste frane superano in numero l'80% di tutti i fenomeni franosi che interessano l'intero territorio regionale. Le frane ascrivibili

alla tipologia suddetta, sono solitamente riattivate (quasi mai di primo innesco), retrogressive nella parte alta, in avanzamento nella parte bassa, in allargamento su entrambi i fianchi. Alla fase di riattivazione, che dura solitamente qualche mese e durante la quale si registrano velocità generalmente lente (Cruden & Varnes, 1996), ma che possono aumentare sensibilmente in occasione di eventi di colata in senso stretto, seguono periodi di sospensione cui può seguire un'ulteriore fase di riattivazione oppure una fase di quiescenza della durata di anni, decenni o anche secoli (Bertolini et al., 2001).

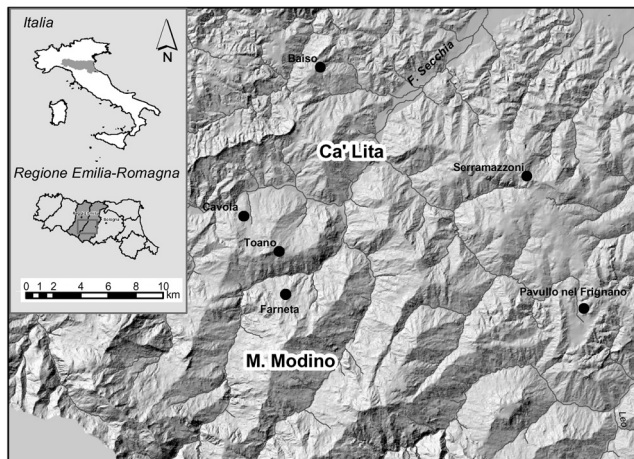


Fig. 1 - Localizzazione geografica delle frane studiate. Le frane di Tolara, Lezza Nuova e Valoria sono localizzate alle pendici del M. Modino.

Geographical location of the studied landslides. Tolara, Lezza Nuova and Valoria landslides are located on M. Modino slopes.

Grande parte delle emergenze dovute a frane dagli anni '90 ad oggi nell'Appennino emiliano sono riconducibili ad eventi di riattivazione di questo tipo di frane. Il monitoraggio di questi fenomeni è importante ai fini sia della pianificazione territoriale sia della gestione del rischio. L'attività di monitoraggio è condotta in Emilia-Romagna da diverse istituzioni che, su casi specifici, collaborano talora con istituti di ricerca universitari. La presente nota nasce dall'esperienza maturata dal 2001 ad oggi dai ricercatori del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Modena nell'ambito di collaborazioni instaurate con alcuni enti che fanno capo alla Regione e alla Provincia di Modena. Oggetto di tali collaborazioni sono studi geologico applicativi finalizzati alla comprensione dei meccanismi di sviluppo di alcune grandi frane riattivate di recente, che hanno previsto attività di monitoraggio in foro e di superficie.

L'obiettivo della presente nota non è tanto quello di presentare in dettaglio i dati di monitoraggio ottenuti sui singoli fenomeni, e di proporre sulla base di essi delle valutazioni di pericolosità, quanto piuttosto quello di discutere gli stessi in maniera sinottica, per evidenziare il comportamento di tali frane nei diversi settori, in

riferimento alle diverse fasi d'attività.

2. Caratteri salienti delle frane monitorate

Le frane monitorate nella valle del Fiume Secchia di cui si occupa la presente nota sono (Fig. 1):

- frane di Tolara, Lezza Nuova e Valoria, localizzate nella parte montana del bacino, alle pendici del Monte Modino, a circa 1400 m di quota;
- frana di Ca' Lita, localizzata nella parte collinare del bacino, a circa 600 m di quota.

Questi fenomeni sono stati più volte riattivati in modo pressoché completo a partire dagli anni '50 (Fig. 2; Fig 3) e sono da considerare complessi e/o compositi nei termini sovra esposti. In pianta presentano un ampio coronamento (dove le pendenze sono $>20^\circ$), un canale mediano, relativamente più stretto e corrispondente alla zona di scorrimento delle colate, e un accumulo basale, con pendenze modeste, talora $<10^\circ$. Le loro caratteristiche morfometriche sono sintetizzate in Tab. 1.

Tab. 1 - Caratteristiche morfometriche delle frane studiate. T: Tolara; L: Lezza Nuova; V: Valoria; C: Ca' Lita; H: quota s.l.m.; α : pendenza; L: lunghezza; W: larghezza; D: profondità; A: area; V: volume.

Morphometrical characteristics of the studied landslides. T: Tolara; L: Lezza Nuova; V: Valoria; C: Ca' Lita; H: altitude a.s.l.; α : slope; L: length; W: width; D: depth; A: area; V: volume.

	T	L	V	C
H max. (m)	1.000	1.390	1.350	640
H min. (m)	550	625	520	230
ΔH (m)	450	770	830	410
α (%)	18	20	24	15
L max. (km)	2,5	4,0	3,5	2,7
W max. (km)	1,0	1,0	0,7	1,5
D max. (m)	50	50	50	43
A (km ²)	1,2	1,4	1,1	1,0
V (Mm ³)	38	40	30	42

In concomitanza di ciascuna riattivazione, si è osservato che i primi movimenti sono costituiti da scivolamenti rotazionali nell'area di coronamento, spesso in corrispondenza dei contatti tra flysch e complessi argillosi di base, che si trovano ad essi geometricamente sottoposti. Tra i precursori fisici di questi eventi si osserva l'apertura progressiva di trench gravitativi che, in molti casi, risultano preesistenti, ovvero collegati a fasi d'attività precedenti. L'arretramento della scarpata principale dovuto a questi fenomeni provoca uno scivolamento verso valle di ammassi rocciosi più o meno estesi. Tale materiale subisce poi una rapida degradazione meteorica, si satura d'acqua sino allo stato di consistenza plastico o liquido, e dà luogo a scivolamenti di terra e colate in avanzamento nella parte media-alta del corpo di frana, con velocità di spostamento

anche relativamente elevate (fino a circa 10 m/giorno). Durante alcuni degli eventi di riattivazione osservati e monitorati, gli scivolamenti e le colate di terra hanno raggiunto nell'arco di alcuni giorni o decine di giorni la parte mediana del corpo di frana, riattivando anche accumuli precedenti. Successivamente, questi fenomeni sono andati a sovrapporsi all'accumulo basale, determinandone, in alcuni casi, la riattivazione per

scivolamento sulla superficie profonda di frana, con conseguente avanzata del piede. Gli spostamenti determinati in superficie dalle colate sono stati di alcune centinaia di metri per ogni riattivazione, costituendo, pertanto, il principale elemento di rischio, mentre gli spostamenti profondi sono stati solitamente di un ordine di grandezza inferiore. Solo in un caso, l'evento di Ca' Lita del 2004, il piede è avanzato di qualche centinaio di metri.

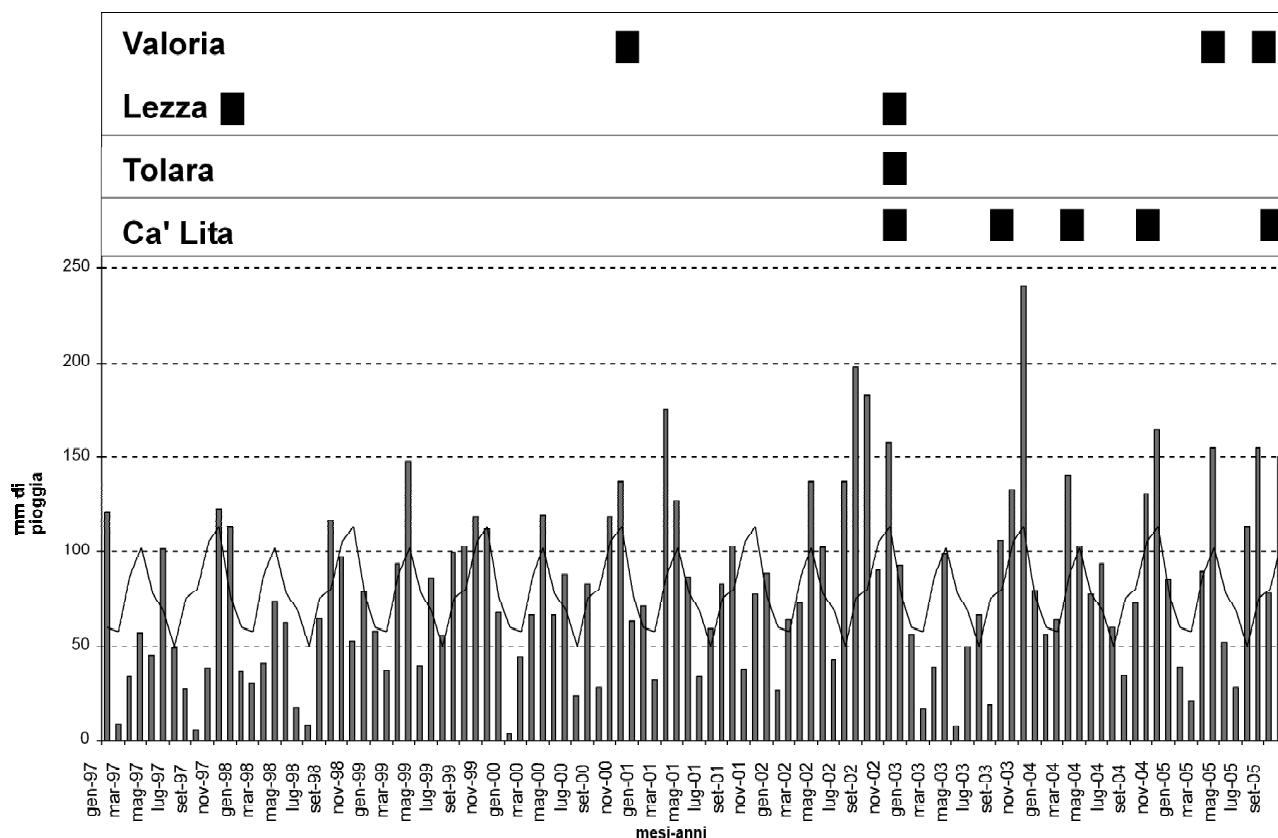


Fig. 2 - Precipitazioni mensili per il periodo gennaio 1997 - ottobre 2005 e precipitazioni medie mensili della stazione di Farneta (380 m s.l.m.) calcolate sul periodo 1991-1963. Nel grafico sono riportate le riattivazioni recenti delle frane descritte nella nota. *Monthly rainfall for the period January 1997 - October 2005 and mean monthly rainfall recorded at the Farneta rain-gauge (380 m a.s.l.) for the period 1961-1993. The most recent reactivations of the landslides presented in this paper are sketched in the upper part.*

La causa principale di questi fenomeni di dissesto va ricercata, innanzi tutto, nelle caratteristiche geologiche dei versanti entro cui si sviluppano, ovvero nella sovrapposizione di formazioni prevalentemente flyschoidi su complessi di base prevalentemente argillosi ad assetto caotico in entrambi i casi a grado di tettonizzazione molto intenso, appartenenti alle successioni Toscane e Liguri. Per quanto riguarda la qualità meccanica di questi ammassi rocciosi, essi possono essere classificati tra le rocce deboli (Barla et al., 1987; Bieniawski, 1989), litologicamente e/o strutturalmente complesse (Esu, 1977). Vista l'eterogeneità intrinseca, il loro studio pone problemi sia dal punto di rilevamento sul terreno che di caratterizzazione in laboratorio e, di conseguenza, di classificazione e

previsione del comportamento dal punto di vista geomeccanico e della circolazione idrica (Marinos & Hoek, 2001).

In termini attuali, le cause fisiche della riattivazione dei fenomeni considerati sono da ricercarsi soprattutto nei fattori idrogeologici, legati all'aumento dei livelli idrostatici e/o delle pressioni interstiziali, sia negli ammassi rocciosi al coronamento, che nei corpi di frana. Da un punto di vista idrogeologico, il trasferimento di carico idrico tra ammassi rocciosi al coronamento e corpi di frana avviene presumibilmente al contatto tra sequenze di flysch e complessi argillosi di base, che si configurano come modeste soglie di permeabilità in corrispondenza delle quali si collocano prevalentemente i coronamenti di frana.

Analogamente a quanto osservato in casi simili (Elmi et al., 1993; Mandrone & Torta, 2000; Lollino et al., 2001), l'aumento dei livelli idrostatici avviene conseguentemente a infiltrazione efficace di tipo cumulato su periodi lunghi, anche fino a mesi, precedenti la riattivazione. Questa appare legata a precipitazioni intense e/o prolungate, anche di tipo non eccezionale, ed al concorso della fusione delle nevi.

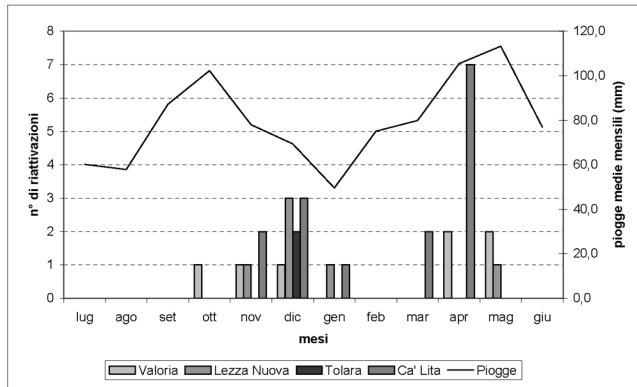


Fig. 3 - Numero di riattivazioni per mese delle frane presentate nella presente nota dal 1950 ad oggi. Con la linea continua sono riportate le precipitazioni medie mensili della stazione di Farneta (380 m s.l.m.) per il periodo 1991-1963.

Number of reactivations per month of the landslides presented in this paper since 1950. The solid line represents the mean monthly rainfall recorded at the Farneta rain-gauge (380 m a.s.l.) for the period 1961-1993.

Nei casi di studio le riattivazioni recenti si sono quasi sempre verificate a seguito di piogge di entità superiore alla media mensile calcolata sul trentennio (Fig. 2).

L'importanza della fusione del manto nevoso tra le cause di innesco nel corso della stagione primaverile, è evidenziata dalla distribuzione degli eventi di riattivazione nell'arco dell'anno, con un massimo nei mesi di marzo-aprile (Fig. 2; Fig. 3).

3. Casi di studio: metodi e fasi di monitoraggio

Qui di seguito verranno descritti i casi di studio delle frane di Tolara, Lezza Nuova, Valoria e Ca' Lita. Le fasi di attività dei diversi fenomeni e i periodi di installazione e funzionamento dei diversi strumenti sono sintetizzati in Fig. 4.

3.1. Frana di Tolara

La frana di Tolara si è riattivata all'inizio del mese di dicembre 2002 dopo oltre 40 anni di inattività. Tale dinamica non è stata documentata da sistemi di monitoraggio, allora non presenti all'interno del corpo di frana, ma è stata documentata mediante fotografie e note descrittive. Il movimento durante la fase parossistica ha raggiunto velocità di metri al giorno, con una massima velocità di 10 metri al giorno. Successivamente alla riattivazione, conclusasi la fase di attività, è stata ristabilita

la viabilità ordinaria e sono state realizzate opere di sistemazione del versante che hanno riguardato la regimazione delle acque superficiali in fossi di scolo e la realizzazione di opere drenanti (trincee drenanti e dreni sub-orizzontali).

Nel estate del 2003 sono stati installati cinque inclinometri e un tubo piezometrico fenestrato, internamente e a contorno del corpo di frana riattivatosi nel 2002. A partire dall'agosto 2004 è iniziato un monitoraggio idrico delle opere drenanti che è proseguito fino all'agosto 2005 in maniera saltuaria, con cadenza quando possibile bisettimanale, portando all'acquisizione di una notevole mole di dati, anche se discontinua e frammentaria nel tempo. Nel 2005 sono stati installati ulteriori quattro inclinometri e un piezometro, con l'intento di monitorare e raccogliere il maggiore numero di informazioni a proposito della frana storica. In questo periodo si è anche provveduto ad installare misuratori di livello in grado di registrare le fluttuazioni della falda in semi-continuo all'interno dei tubi piezometrici.

3.2. Frana di Lezza Nuova

La frana di Lezza Nuova si è riattivata a fine gennaio 1998. Questa riattivazione è ben documentata da fotografie e da note descrittive. Durante la fase di maggiore attività, la frana ha raggiunto velocità di alcune decine di metri al giorno. Successivamente a questa fase sono stati condotti lavori per la sistemazione del versante. Nei mesi precedenti l'estate 1999 sono state condotte indagini geognostiche e geofisiche. In particolare sono stati installati 7 piezometri e 2 inclinometri nell'area sorgente del evento del 1998. La frana si è riattivata nuovamente nel dicembre 2002. I movimenti sono stati in parte registrati dai tubi inclinometrici. Durante la fase di attività, si è ricorso anche l'utilizzo di paline, poste sia all'interno del corpo in movimento che all'esterno. Questa riattivazione si è protratta fino a febbraio 2003. Successivamente, a seguito delle piogge di ottobre 2003 si sono verificati ulteriori scivolamenti nell'area sorgente e nella zona di accumulo. Questa riattivazione è stata tra le più intense degli ultimi 50 anni. Successivamente agli eventi del 2003 nel 2004 è stata ripristinata la rete di scolo di drenaggio superficiale e sono state realizzate opere drenanti nel versante (trincee drenanti, dreni suborizzontali, pozzi profondi attrezzati con batterie di dreni suborizzontali). Anche in questo sito, alla fine dell'estate 2004 è iniziato un monitoraggio delle opere drenanti che è proseguito fino ad agosto 2005. Nell'estate 2005 sono stati installati ulteriori quattro inclinometri, due cavi TDR e tre piezometri. Questi strumenti sono stati perlopiù ubicati all'interno della frana storica, al fine di approfondire le conoscenze del fenomeno.

In particolare, nell'area di coronamento si trova un tubo inclinometrico installato nell'estate 2005, che ha mostrato spostamenti millimetrici nei primi dieci metri. Sempre in questo periodo si è provveduto ad installare misuratori di livello all'interno dei piezometri.

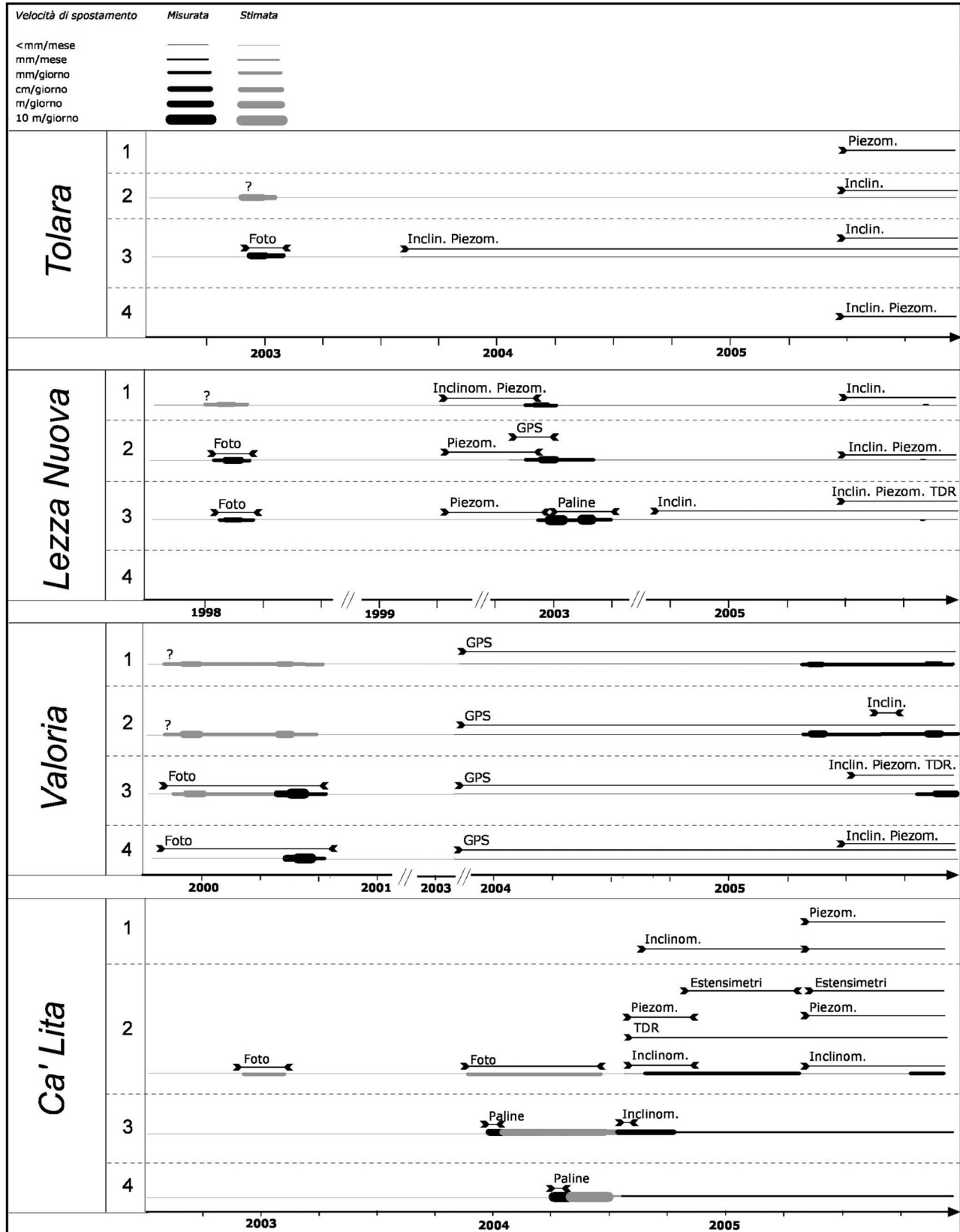


Fig. 4 - Fasi di attività delle frane e fasi di monitoraggio.
Landslide activity phases and monitoring phases.

3.3. Frana di Valoria

La frana di Valoria si è riattivata alla fine del 2000, a seguito di un periodo di abbondanti precipitazioni, anche nevose. Questa riattivazione, iniziata nella parte alte del versante, è poi evoluta in maniera parossistica nella primavera del 2001. Anche in questo caso le velocità hanno raggiunto alcune decine di metri al giorno (Manzi et al., 2004).

Questo evento è secondo alcuni autori il maggiore in termini di magnitudo negli ultimi 50 anni. Altri eventi minori sono avvenuti negli anni '50 e '70. Successivamente a questo evento è stata condotta un'indagine sismica speditiva al fine di valutare le volumetrie coinvolte nel movimento, da considerare poi per la realizzazione di opere drenanti (trincee drenanti e dreni suborizzontali), che sono state oggetto di monitoraggio saltuario nel 2004. Già a partire da inizio estate 2005 molte delle opere drenanti sono state monitorate in semi-continuo. Nell'estate del 2005 nell'area della frana di Valoria sono state condotte indagini geognostiche e geofisiche. Sono stati installati, quasi totalmente all'interno del corpo di frana riattivatosi nel 2000, quattro inclinometri, tre piezometri e due cavi TDR. Questa fase non si è ancora conclusa, a causa di una ulteriore riattivazione del fenomeno avvenuta a inizio ottobre 2005 e che ad oggi non si è ancora esaurita.

3.4. Frana di Ca' Lita

La frana di Ca' Lita si è riattivata nel 2002 a seguito di un periodo ventennale di quiescenza. L'evento del 2002 ha interessato un'estesa area della zona di alimentazione e la parte superiore della zona d'accumulo. Nei mesi tra inverno 2003 e primavera 2004 si è avuta una fase parossistica, durante la quale tanto gli scivolamenti in roccia nella zona di scarpata, quanto la colata di terra si sono riattivati, con spostamenti che nella colata hanno superato 10 metri al giorno, e che hanno portato ad un avanzamento complessivo del piede nell'ordine dei 400 m. Successivi eventi di riattivazione in porzioni localizzate dell'area sorgente si sono avute nel novembre 2004 ed in aprile 2005. Una prima campagna di monitoraggio è stata condotta tra la tarda primavera e l'autunno del 2004. Dal momento che gli eventi di novembre 2004 e aprile 2005 hanno sostanzialmente messo fuori uso gran parte degli strumenti in foro predisposti nella prima fase, una seconda campagna di monitoraggio è stata avviata nell'estate del 2005, parallelamente alla costruzione di opere di mitigazione. Durante le due fasi sono stati approntati un totale di 17 sondaggi a carotaggio continuo su tutta l'area interessata dal dissesto. Nove fori di sondaggio sono stati attrezzati con inclinometri, due con Cavi TDR, e sei con piezometri a tubo aperto o celle. Nel novembre 2004 si sono approntati anche due estensimetri a filo nella zona di coronamento che mostrava segni di incipiente rottura. La seconda campagna di monitoraggio è stata finalizzata, in modo particolare, alla ricostruzione del flusso delle acque sotterranee, di fondamentale importanza per la verifica dell'efficacia delle

opere di drenaggio.

4. Sintesi dei risultati

I dati raccolti, per quanto specifici di ogni fenomeno considerato e utili pertanto ad una valutazione delle condizioni di pericolosità e rischio a scala di sito, che comunque esula dagli obiettivi della presente nota, si prestano ad un'analisi complessiva che può fornire indicazioni circa le modalità di movimento e le condizioni idrogeologiche nei diversi settori dei corpi di frana, sia nella fase di sospensione di attività (durante la quale le superfici di scorrimento anche profonde permangono attive dal punto di vista strumentale), che di riattivazione. I dati ottenuti da strumenti in foro (inclinometri, TDR e piezometri) comprendono essenzialmente la fase di sospensione e di incipiente riattivazione, in quanto non sono in grado di assecondare spostamenti superiori ad una decina di cm massimo (a parte i TDR, che possono resistere fino a circa 50 cm o poco oltre). Al contrario, i dati GPS coprono sia la fase di sospensione (dove sul lungo periodo possono comunque verificarsi spostamenti che superano il campo d'errore) e, soprattutto, la fase di riattivazione, ammesso che i capisaldi risultino effettivamente raggiungibili dall'operatore.

Con riferimento ai diversi settori di frana (segnatamente zona di coronamento, zona di alimentazione, zona d'accumulo e piede) i risultati ottenuti nel monitoraggio di spostamenti profondi, spostamenti di superficie e misure di falda, sono sintetizzati nei grafici di Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, che sono qui di seguito commentati.

4.1. Zona di coronamento

Le profondità di movimento variano tra 10 e 40 m nella fase di quiescenza, l'entità media dei movimenti profondi è sempre inferiore ad 1 mm/giorno (Fig. 5). Questi dati vanno riferiti a fenomeni di rottura progressiva di ammassi rocciosi non ancora coinvolti in senso stretto nel fenomeno, che nella fase di riattivazione evolvono in scorrimenti rotazionali o traslativi, con successivi collassi dei fronti di scarpata e retrogressioni della stessa. Nella fase di incipiente riattivazione, su superfici profonde si sono invece registrate velocità anche di 30 mm/giorno.

Valori pressoché analoghi sono stati ottenuti con capisaldi GPS (Fig. 6). Questi ultimi, riferiti alla fase di sospensione, hanno dato valori di 0,5 - 2 mm/giorno, mentre nella fase di riattivazione sono arrivati a segnare anche a 30 mm/giorno.

Per quanto riguarda le profondità della falda (Fig. 7), queste si attestano su valori simili, nell'ordine dei 12-15 m dal piano campagna, registrando al contempo fluttuazioni anche rilevanti (fino a 5 m). È da sottolineare che queste fluttuazioni sono piuttosto rapide, e rispondono in tempi nell'ordine di pochi giorni ai picchi di precipitazione, e sono state perciò apprezzate grazie alle misure eseguite in pseudo-continuo con intervalli d'acquisizione minori di 6 - 12 ore.

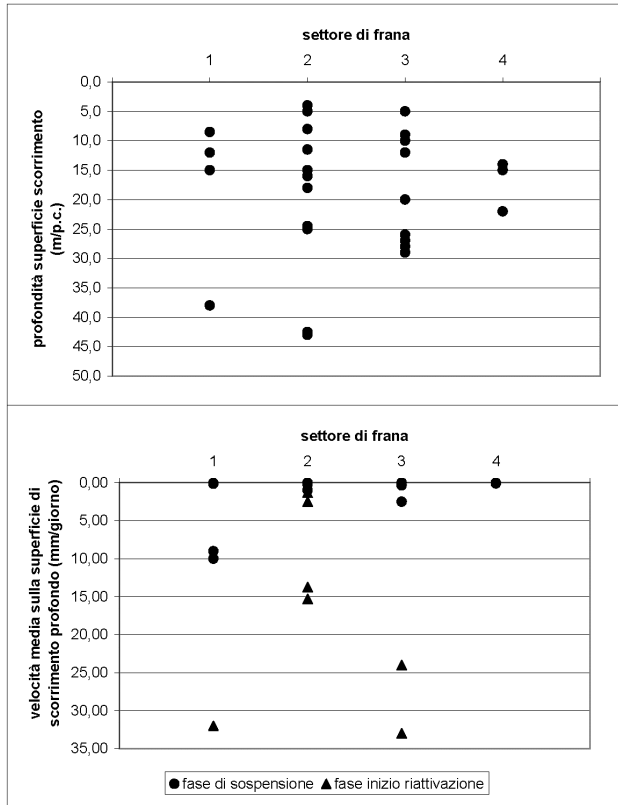


Fig. 5 - Profondità della superficie di scorrimento e velocità media in corrispondenza di essa nella fase di sospensione e inizio riattivazione dei fenomeni, nei diversi settori di frana. 1: zona di coronamento; 2: zona d'alimentazione; 3: zona d'accumulo; 4: piede.

Sliding surface depth and mean velocity recorded at its depth during suspended phase and early reactivation phase in the different sectors of the landslide. 1: crown zone; 2: source area; 3: accumulation zone; 4: toe.

4.2. Zona d'alimentazione

Le profondità di scorrimento hanno un ampio range di variabilità, che va dai 5 agli oltre 40 m (Fig. 5). È da sottolineare che le profondità superiori ai 20 m si riferiscono a fenomeni di scivolamento di ammassi rocciosi ormai fortemente detensionati e caoticizzati, mentre le superfici di scivolamento a meno di 20 m di profondità si riferiscono a corpi di scivolamenti in terra in fase di sospensione, che nelle fasi di riattivazione tendono ad evolvere in vere e proprie colate. La velocità di movimento variano fortemente, anche in questo caso, tra la fase di sospensione, dove si hanno velocità medie fino a 2-3 mm/giorno, e la fase di incipiente riattivazione, quando si ottengono valori che raggiungono 15 mm/giorno, considerando il tasso di deformazione che ha portato all'interruzione, ma non alla rottura, di taluni tubi inclinometrici.

I dati GPS riferiti agli spostamenti in superficie sono in accordo coi precedenti nelle fasi di sospensione, durante le quali si rilevano velocità di 0,5 – 3 mm/giorno (Fig. 6).

Nelle fasi di riattivazione, durante le quali i capisaldi GPS possono seguire entità di spostamento largamente superiori a quelli degli strumenti in foro, i valori di velocità hanno raggiunto anche 118 mm/giorno. Questo valore, comunque, sottostima l'entità massima delle velocità di spostamento, in quanto dove questa è stata superiore, portando allo sviluppo di vere e proprie colate, i capisaldi sono andati perduti.

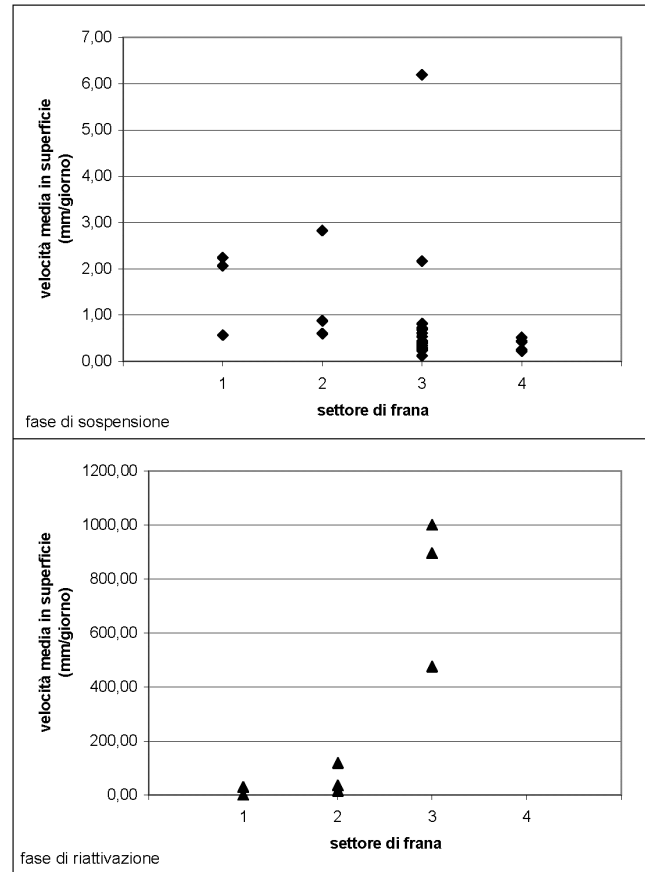


Fig. 6 - Velocità media in superficie misurata sui capisaldi GPS nelle fasi di sospensione e inizio riattivazione dei fenomeni, nei diversi settori di frana. 1: zona di coronamento; 2: zona d'alimentazione; 3: zona d'accumulo; 4: piede.

Mean velocity recorded on the topographic surface with GPS benchmarks during suspended phase and early reactivation phase in the different sectors of the landslide. 1: crown zone; 2: source area; 3: accumulation zone; 4: toe.

I livelli di falda nella fase di sospensione sono quanto mai vari. In condizioni naturali, questi vanno da -16 m fino a falda pressoché subaffiorante, con fluttuazioni di oltre 2 m (Fig. 7). I valori intorno a circa 25 m di profondità, a cui corrispondono fluttuazioni di 3 e 4 m, si riferiscono alla frana di Ca' Lita ove la falda è stata abbassata forzatamente a partire da 16 m, ad opera di un campo di pozzi drenanti di grande diametro, operanti attualmente con pompe sommerse. Il dato comprova l'efficacia dell'intervento, in quanto la fluttuazione verso l'alto segue l'andamento delle

precipitazioni, seguito dall'abbattimento al valore di pescaggio delle pompe (25 m di profondità), dopo l'attivazione delle medesime.

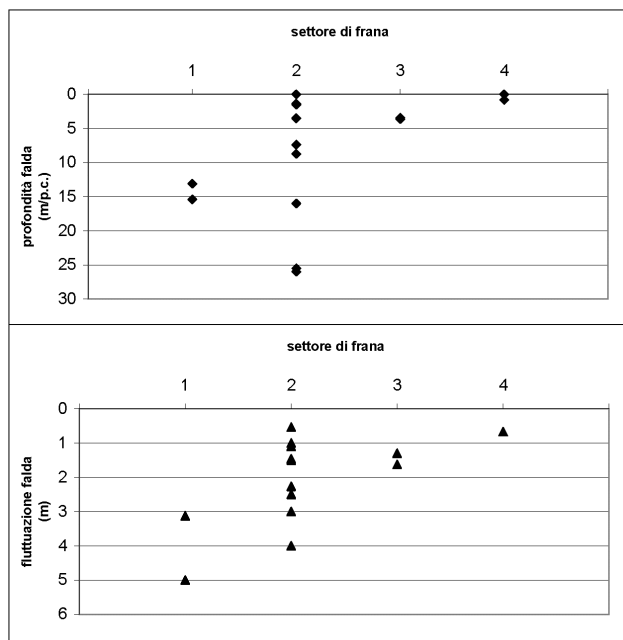


Fig. 7 - Profondità della falda e fluttuazione della tavola d'acqua nella fase di sospensione e inizio riattivazione dei fenomeni, nei diversi settori di frana. 1: zona di coronamento; 2: zona d'alimentazione; 3: zona d'accumulo; 4: piede.

Groundwater depth and water table variations during suspended phase and early reactivation phase in the different sectors of the landslide. 1: crown zone; 2: source area; 3: accumulation zone; 4: toe.

4.3. Zona di accumulo

Vi è una marcata differenziazione sia nella profondità delle superfici di scorrimento, sia nella velocità dei movimenti (Fig. 5). Le prime si attestano infatti tra i 5 e i 30 m di profondità, e spesso si rinvenivano più superfici sovrapposte in senso verticale rilevate da un medesimo inclinometro o cavo TDR. Le superfici fino a 10-12 m di profondità sono da riferirsi al movimento del cosiddetto strato areato, che le numerose indagini sismiche a rifrazione condotte sui medesimi siti hanno ben evidenziato. Quest'ultimo deriva spesso dalla deposizione di corpi di colata nelle fasi di riattivazione, che poi subiscono movimenti residuali anche in fase di sospensione. Dall'analisi delle carote di sondaggio, è stato invece notato che le superfici più profonde (fino a 30 m), si impostano solitamente al contatto tra masse limo-argillose con sparsi inclusi litoidi a diverso grado di addensamento, che corrispondono presumibilmente al contatto tra corpi di paleofrana sovrapposti e di diversa età. Le velocità di movimento residuale nelle fasi di sospensione sono solitamente nell'ordine di 2 mm/giorno, e si riferiscono al movimento più superficiale dello strato areato. Per quanto è stato possibile verificare in alcuni

inclinometri resi inservibili in poco più di una settimana, nella fase di incipiente riattivazione (vale a dire quando le colate dall'area sorgente hanno cominciato a sovrapporsi all'accumulo, innescandone la riattivazione), come anche nella fase terminale dell'evento di riattivazione (vale a dire quando il grosso dei movimenti è cessato ma l'accumulo è ancora molto ricco in acqua), il tasso di movimento lungo le superfici profonde è stato nell'ordine dei 30 mm/giorno.

I dati relativi ai movimenti in superficie nelle fasi di sospensione rilevati con GPS sono quasi sempre stati nell'ordine di 1-2 mm/giorno, quindi simili ai valori ottenuti in foro (Fig. 6). Nella fase di riattivazione, lo scivolamento di masse lungo superfici profonde a causa della spinta o del trascinamento operato dalle colate provenienti da monte, che hanno permesso comunque la preservazione dei capisaldi, è avvenuta con tassi tra 500 e circa 1000 mm/giorno. Per alcuni capisaldi non raggiungibili perché coinvolti in colate vere e proprie, si sono stimate velocità tra 5 - 10 m/giorno.

In questo settore, durante la fase di sospensione i valori di falda si mantengono comunque molto alti, mediamente intorno a 4 m dal piano campagna, registrando fluttuazioni che talora portano la falda in condizioni subaffioranti (Fig. 7).

4.4. Settore di piede

Le superfici di scorrimento attive dal punto di vista strumentale nelle fasi di sospensione si pongono a profondità tra 15 e poco oltre 20 m (Fig. 5). Tale profondità corrisponde spesso al contatto tra terreni a diverso grado d'addensamento, ovvero al contatto tra corpi di frana sovrapposti. Comunque, il tasso di movimento lungo tali superfici nella fase di sospensione è estremamente limitato, inferiore a 1 mm/giorno.

I movimenti superficiali misurati con GPS confermano tale stima nella fase di sospensione. Non si hanno dati riferiti a riattivazioni del piede di frana (Fig. 6). A seguito di osservazioni macroscopiche eseguite dagli scriventi, nel corso di riattivazioni non monitorate l'avanzamento del piede ha raggiunto anche i 10 m/giorno (Ca' Lita nell'aprile 2004), oppure è stato limitato a 10 m complessivi (Valoria nel 2001).

È interessante notare come nei due casi monitorati la falda al piede di frana si mantenga anche durante fasi di sospensione pressoché sub-affiorante se non addirittura prevalente sul piano di campagna, a seguito di fluttuazioni piuttosto rapide (Fig. 7).

5. Discussione

La transizione da fase di sospensione a fase di riattivazione avviene sì per via graduale ma comunque piuttosto rapida, con velocità che incrementano in un intervallo temporale di 15-30 giorni da mm fino anche a metri al giorno. Questo fa sì che, spesso, la frequenza d'acquisizione di dati su strumenti quali inclinometri, TDR o capisaldi GPS, che nei casi ottimali è stata settimanale, non sia sufficiente per

fornire una risoluzione precisa dell'evento di riattivazione, e per permettere correlazioni immediate tra spostamenti e fluttuazioni dei valori piezometrici (che invece sono quasi tutti ottenuti tramite trasduttori di pressione in alcuni casi dotati di moduli GSM per la trasmissione in remoto). Va anche detto che i sistemi in foro (inclinometri, cavi TDR e piezometri con trasduttore) permettono di seguire abbastanza bene i movimenti e le fluttuazioni di falda di entità strumentale che si hanno nella fase di sospensione dei fenomeni e nelle fasi iniziali delle riattivazioni, ma vanno a rottura non appena la riattivazione procede e gli spostamenti aumentano di intensità. Il monitoraggio di capisaldi GPS in modalità differenziale RTK, permette invece di seguire solo movimenti superiori a qualche cm di entità, e pertanto comincia ad avere un valore aggiunto nelle fasi iniziali delle riattivazioni e durante le riattivazioni stesse, ammesso ma non concesso che i capisaldi risultino raggiungibili dall'operatore.

I sistemi che si sono adottati hanno indubbiamente dei limiti, ma è pur vero che sono quelli più comunemente applicati. È in ogni caso opportuno discutere brevemente la loro effettiva funzionalità, anche tenendo presente che altri strumenti sono utilizzabili. Tra questi si vogliono ricordare alcuni sistemi che gli autori stessi hanno utilizzato, anche su alcune delle frane qui discusse. In primo luogo l'interferometria differenziale, sia da terra che da satellite. Una ricerca recentemente conclusa ha evidenziato i limiti ed i pregi di entrambe tali tecniche su fenomeni franosi di questo tipo (Barbieri et al., 2004a; Barbieri et al., 2004b). Il problema principale evidenziato da satellite è stato quello della decorrelazione tra scene successive, che porta a rilevanti problematiche di perdita di coerenza e di difficoltà a quantificare movimenti superiori a qualche cm nel periodo tra due acquisizioni SAR confrontate. L'interferometria da terra, non ha invece evidenziato particolari limiti tecnici, ed è pertanto una metodica già applicabile con buona confidenza. Ad oggi, però, i costi di mantenimento di un sistema dedicato ad un fenomeno specifico sono giustificati solo in particolari situazioni di valore o rilevanza dei beni esposti, cosa che non si verifica nei casi di studio qui presentati. Un'altra tecnica certamente promettente per seguire le deformazioni in superficie è quella del laser scanner aviotrasportato. Sulla frana di Ca' Lita sono state eseguite due acquisizioni da elicottero che, a breve, permetteranno di quantificare gli spostamenti complessivi nell'anno 2004-2005. È chiaro che, con fondi sufficienti, questa tecnica potrebbe permettere di monitorare anche quotidianamente l'intero corpo di frana. Vi sono poi sistemi in foro quali inclinometri automatici tipo il SIA (Lollino et al., 2001) o inclinometri fissi tipo il DMS (Giuffredi et al., 2004). Questi hanno il vantaggio di permettere un'alta frequenza di acquisizione, ma non risolvono il problema della scarsa durata dei sistemi in foro durante le riattivazioni. Tra l'altro, sistemi simili a questi ultimi sono in corso di sperimentazione sulla frana di Lezza Nuova in collaborazione con l'Università di Ferrara.

Ritornando ai sistemi di cui si sono precedentemente presentati i risultati, vale la pena fare alcune ulteriori considerazioni. Come noto, il basso costo di installazione-gestione di una rete capisaldi GPS monitorata in modalità RTK, consente una sua rapida integrazione durante fasi parossistiche, permettendo di seguire un grande numero di zone, anche marginali al fenomeno e altrimenti non monitorate. Parimenti tale sistema però soffre della saltuarietà delle misure e della perdita - o non raggiungibilità - dei capisaldi in caso di colate senso stretto. Per esperienza diretta, si è inoltre evidenziato un netto decremento della precisione di acquisizione su capisaldi coperti da vegetazione e in scarpata e su quelli che ricadono nelle vicinanze di reti di servizio elettriche o telefoniche. È chiaro che installazioni di GPS permanenti risolverebbero il problema della saltuarietà, ma i costi ancora molto elevati dei sistemi operanti in fase, su cui è possibile effettuare la correzione differenziale necessaria ad avere precisioni centimetriche, porterebbero inevitabilmente a monitorare pochissimi punti, che quindi andrebbero selezionati e trattati come rappresentativi di tutto il fenomeno, cosa peraltro difficilmente assumibile in frane di grandi dimensioni e complessità.

Va anche detto che talvolta i dati GPS possono essere integrati da dati ottenuti con strumenti artigianali, semplici e a basso costo, che possono comunque dare notevoli informazioni, anche ai fini di salvaguardia di vite umane e a manufatti. Strumenti di questo tipo sono estensimetri a corda installati in corrispondenza di trincee gravitative (utilizzati a Ca' Lita), estensimetri graduati o vetrini su crepe in manufatti, segni con spray, file di paletti allineati ed equidistanziati, fotografie, filmati etc.

Per quanto riguarda l'utilizzo di cavi TDR accoppiati a tubi inclinometrici, già altri studi avevano evidenziato una loro maggiore durata rispetto le deformazioni profonde (Corsini et al., 2005). Nella frana di Ca' Lita e in quella di Valoria questo è stato confermato, in quanto i cavi sono giunti a rottura per deformazioni stimate oltre 30 - 50 cm, quindi ben superiori a quelle di un tubo inclinometrico. Da contro, i cavi TDR forniscono un dato preciso solo circa la profondità delle superfici di scorrimento, ma l'indicazione di entità di deformazione è essenzialmente qualitativa.

Riguardo i piezometri utilizzati, la loro funzione può essere duplice: correlare gli afflussi meteorici e le variazioni di falda, e le fluttuazioni di falda a movimenti nel versante. Mentre la prima cosa è possibile sulla base di dati meteo acquisiti in continuo in vicine stazioni, la seconda, come detto, risulta limitata dalla saltuarietà dei dati di spostamento. In entrambi i casi, la rapida rottura dei sistemi in caso di riattivazione è un fattore limitante. Ciò che è apparso evidente nel presente studio è che per valutare fluttuazioni di falda al coronamento e nel corpo di frana l'acquisizione con intervalli frequenti è di fondamentale importanza. Infatti, analizzando i dati provenienti da piezometri realizzati con tubi fenestrati solo per un certo orizzonte di interesse, ed attrezzati con misuratori di livello

con acquisizione temporale 6-12 ore, si è potuto osservare come questi corpi presentino una risposta rispetto all'afflusso meteorico di 6-36 ore negli ammassi rocciosi al coronamento e fino a 48 ore nella zona d'accumulo e di piede.

5. Conclusioni

Le conclusioni che si possono trarre riguardano sia la fenomenologia franosa considerata, sia la funzione del monitoraggio.

Riguardo il primo aspetto, lo stile complesso e composito delle frane indagate appare ancor più chiaro considerando sia la variabilità di profondità e velocità a cui si sviluppano movimenti di natura sostanzialmente diversa (da scivolamenti in roccia a scivolamenti di terra e colate di terra), sia i diversi tempi di propagazione dei processi di riattivazione, sia la diversità di condizioni idrogeologiche. Appare inoltre chiaro che la distinzione, anche qui utilizzata, tra fase di riattivazione e sospensione di queste frane, non deve intendersi indicativa di un passaggio tra uno stato di movimento e uno stato di immobilità, in quanto è stato ben evidenziato come anche nelle fasi di sospensione permangano movimenti strumentali di una certa entità e

profondità. Il limite che segna il passaggio allo stato di quiescenza, posto a circa 1 anno negli schemi proposti in letteratura (Cruden & Varnes, 1996), appare inadeguato per i casi qui analizzati. Infatti, frane che si sono riattivate anche più di 3 anni fa, presentano ancora evidenti movimenti residuali di tipo prevalentemente strumentale, e non possono pertanto essere considerate quiescenti.

In considerazione di ciò, appare importante che i sistemi di monitoraggio di questi fenomeni tendano, dopo una prima fase in cui sono funzionali a chiarire i meccanismi di sviluppo e riattivazione, a diventare funzionali ad un sistema di allertamento e di allarme, specie in riferimento a quei settori dei corpi di frana che vanno ad interferire con elementi vulnerabili, ingenerando situazioni di rischio. In alternativa, qualora siano in corso interventi di mitigazione strutturale, appare ragionevole indirizzare gli sforzi di una seconda fase di monitoraggio alla verifica dell'efficacia delle opere realizzate. Per entrambe le funzioni, comunque, gli strumenti, che possono anche essere relativamente pochi in numero, devono necessariamente consentire un'acquisizione automatica e una trasmissione in remoto. Su questi aspetti si concentreranno i futuri sviluppi di ricerca applicativa nei siti di studio presentati.

Bibliografia

- Barbieri M., Corsini A., Casagli N., Farina P., Coren F., Sterzai P., Leva D., Tarchi D., 2004a. Space-borne and ground-based SAR interferometry for landslide activity analysis and monitoring in the Apennines of Emilia Romagna (Italy): review of methods and preliminary results. FRINGE 2003 workshop SP550 Proceedings. ESA-ESRIN Frascati (Italy) 1-5 December 2003. European Space Agency CD-rom ISBN 92-9092-861-1.
- Barbieri M., Canuti P., Casagli N., Coren F., Sterzai P., Corsini A., Farina P., Pellegrini M., Ronchetti F., Tarchi D. 2004b. Monitoraggio dei Centri Abitati a Grande Rischio da Frana nella Regione Emilia Romagna (SAR-RER). Rapporto Finale. Regione Emilia Romagna, Servizio di Protezione Civile, 205 pp.
- Barla G., Gelati R., Sfondrini G., 1987. Study on the major rock complexes of the Northern Apennines. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, 32, 197-241.
- Bertolini G., Pellegrini M., Tosatti G. (eds.), 2001. Le frane della Regione Emilia Romagna oggetto di interventi di Protezione Civile nel periodo 1994-1999. *Quad. Geol. Appl.* 8(1-2).
- Bieniawski Z.T., 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley Interscience Publ., New York.
- Corsini A., Pasuto M., Soldati A., Zannoni A., 2004. Field monitoring of the Corvara landslide (Dolomites, Italy) and its relevance for hazard assessment. *Geomorphology*, 66(1-4), 149-166.
- Cruden D.M. & Varnes D.J., 1996. Landslide Types and Processes. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Spec. Rep. 247, 3, 36-75, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, D.C.
- Elmi C., Fini A., Francia R., Lizzani A., Genevois R., 1993. Large landslides in flysch formations in the Northern Apennines, Italy. Analysis and comparison of the geomorphological features and geotechnical behaviour. In: Chowdury & Sivakumar (eds.), *Environmental Management, Geo-water & Engineering aspects*, Balkema, Rotterdam, 299-304.
- Esu F., 1977. Behaviour of slopes in structurally complex formations. In: *Proceedings of International Symposium on the Geotechnics of Structurally Complex Formations*, Vol. 2, Capri, Italy, 292-304.
- Garberi M.L., Palumbo A., Pizziolo M. con contributi di Baldelli C., Barchiesi P., Bertolini G., De Nardo M.T., 1999. I numeri sulle frane. Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico e Geologico, Bologna, pp. 94.
- Giuffredi F., Zanolini L., Fogliano L., Lovisolo M., 2004. Application of the new multi-parametric differential system D.M.S. for monitoring stability of deep slides in the upper part of Nure's valley – Piacenza. Conference abstracts, 32 IGC, Florence, Italy.
- Lollino G., Brunamonte F., Larini G., Malaguti C., 2001. La sperimentazione del sistema inclinometrico automatizzato nel monitoraggio in continuo della frana di Corniglio (Parma) e ricerca di correlazioni significative fra le precipitazioni e la riattivazione del novembre 1994. *Quad. Geol. Appl.*, 8(2), 159-188.
- Mandrone G., Torta D., 2000. Modello previsionale per l'innescio di frane da scivolamento planare nelle Langhe: monitoraggio del livello della falda e sua correlazione con i dati meteorologici. *Congr. Nat. Geol. "Il territorio fragile"*, Roma, 7-10 Dicembre 1999.
- Manzi V., Leuratti E., Lucente C.C., Medda E., Guerra M., Corsini A., 2004. Historical and recent hydrogeological instability in the Monte Modino area: Valoria, Tolara and Lezza Nuova landslide reactivations (Dolo – Dragone valleys, Modena Apennines, Italy). *GeoActa*, 3, 1-13.
- Marinos P., Hoek E., 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 60, 85-92.