



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - DICEA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

RELAZIONE TRA SPOSTAMENTI E PRECIPITAZIONI NELLA FRANA DEL TESSINA (ALPAGO, ITALIA)

Relatore

Prof. Simonetta Cola

Correlatore

Prof. Fabio Gabrieli

Prof. Livio Corain

Laureando

Luca Vettore matr. 1035484

Anno Accademico 2012/2013

Desidero ringraziare innanzitutto la Professoressa Simonetta Cola e il Professor Fabio Gabrieli, per aver suscitato in me interesse per la materia ed avermi aiutato, con la loro disponibilità e professionalità, nella realizzazione di questa tesi.

Rivolgo inoltre un sentito ringraziamento al Professor Livio Corain, per essersi reso disponibile ad aiutarmi, con la sua competenza, nella progettazione ed interpretazione delle analisi statistiche, ed avermi insegnato l'applicazione di questa materia nel campo ingegneristico.

Un particolare ringraziamento va ai miei genitori, perché grazie al loro eterno sostegno economico e morale sono riuscito ad arrivare a questo traguardo, e a Giulia, per essermi sempre vicina ed avere le parole giuste in ogni momento.

Inoltre, un ruolo fondamentale nella mia carriera universitaria l'hanno svolto i miei amici, i miei compagni di rievocazioni storiche e quelli universitari, che ringrazio per avermi sopportato, sostenuto ed aver colorato questi cinque anni rendendoli indimenticabili.

Luca Vettore

INTRODUZIONE**1. LA FRANA DEL TESSINA**

1.1	Inquadramento territoriale.....	1
1.2	Generalità del fenomeno franoso.....	2
1.3	Cenni storici.....	5
1.4	Interventi effettuati.....	9

2. ATTIVITA' DI MONITORAGGIO

2.1	Generalità.....	14
2.2	Tipologie strumentali.....	15
2.3	Monitoraggio nella frana del Tessina.....	16
2.3.1	Sistemi di monitoraggio automatico.....	16
2.3.2	Sistemi di monitoraggio manuale.....	20

3. MONITORAGGIO FOTOGRAMMETRICO

3.1	Installazione e strumentazione.....	23
3.2	Pregi e difetti.....	26
3.3	Analisi degli spostamenti.....	27
3.3.1	Analisi visiva delle fotografie.....	29
3.3.2	Analisi statistiche degli spostamenti rilevati.....	36
3.4	Correlazione tra spostamenti ed eventi pluviometrici.....	46
3.4.1	Rappresentazioni grafiche.....	46
3.4.2	Soglia pluviometrica.....	50
3.4.3	Analisi statistiche.....	57
3.5	Osservazioni finali.....	70

4. ANALISI DI PIAN DE CICE

4.1	Pian de Cice.....	73
4.2	Monitoraggio effettuato nel periodo 01/10/12-30/08/13.....	78
4.2.1	Misure inclinometriche.....	80
4.2.2	Misure pluviometriche.....	82
4.2.3	Misure piezometriche.....	82
4.2.4	Analisi qualitativa delle relazioni tra i parametri misurati.....	83

4.3	Analisi statistiche.....	88
4.3.1	General Linear Model.....	89
4.3.2	Regressione Logistica Binaria.....	92
4.3.3	Cross Correlation.....	93
4.3.4	Regressione Lineare Multipla.....	97
4.4	Osservazioni finali.....	103

5. CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

INTRODUZIONE

Questo lavoro di tesi si colloca all'interno di un'ampia attività di studio della frana del Tessina svolta negli anni dall'Università di Padova, ed in particolare prosegue l'elaborazione dei dati ottenuti da un sistema di monitoraggio fotogrammetrico installato nel 2011, e da un inclinometro e piezometro installato nel 2012 nell'area denominata Pian de Cice in sinistra orografica.

La frana del Tessina, situata in provincia di Belluno, è un fenomeno molto ampio ed in continua evoluzione dal 1960, anno del suo primo movimento, ricoprendo un ruolo fondamentale per la sicurezza degli abitati di Funes e Lamosano, situati a valle. Nel corso degli anni sono stati tentati numerosi interventi di stabilizzazione ma, data l'importanza dei volumi di materiale coinvolti, sono risultati utili solamente le attività di monitoraggio e di studio del fenomeno.

In particolare l'Università degli studi di Padova ha iniziato un'attività di monitoraggio fotogrammetrico nel 2011 con la quale, grazie all'installazione di due fotocamere digitali in prossimità della parte superiore della frana, si hanno a disposizione delle fotografie giornaliere che possono essere elaborate per ottenere ulteriori informazioni sugli spostamenti e sull'evoluzione del fenomeno franoso nel tempo. Nel Settembre 2012 è stato installato, nella zona denominata Pian de Cice, un inclinometro e piezometro all'interno di un foro di sondaggio preesistente che ha permesso di raccogliere i dati orari di spostamento e livello di falda.

L'obiettivo principale di questo elaborato è quello di ricercare la presenza di eventuali correlazioni tra gli spostamenti della frana e le precipitazioni, a partire dalle informazioni ottenute dai sistemi di monitoraggio sopracitati. Per fare questo si esegue un'analisi visiva delle fotografie raccolte ed un'elaborazione dei parametri misurati dall'inclinometro e dal piezometro, per poi realizzare delle analisi statistiche volte a fornire informazioni più precise.

Si organizza il lavoro di ricerca in capitoli, con una prima parte di natura bibliografica volta alla descrizione del contesto, ed una seconda parte di elaborazione dei dati:

Nel primo capitolo si descrive la storia della frana, le sue caratteristiche principali e gli interventi eseguiti sia a scopo di stabilizzazione che di monitoraggio. Grazie a tali informazioni è possibile comprendere l'importanza dello studio del fenomeno ed avere un quadro completo della sua evoluzione negli anni.

Nel secondo capitolo viene fatta una breve introduzione sul monitoraggio, trattandone le caratteristiche principali ed i parametri da considerare in fase di progettazione e gestione di un sistema di monitoraggio. In particolare si espongono i sistemi e gli strumenti utilizzati nella

frana del Tessina durante gli anni di studio, evidenziandone i risultati e le informazioni raccolte.

Nel terzo capitolo si tratta inizialmente il sistema di monitoraggio fotogrammetrico installato nella frana del Tessina, esponendone le caratteristiche ed i principali pregi e difetti, e successivamente si volgono due analisi:

- Analisi degli spostamenti: partendo dall'osservazione in sequenza delle fotografie ottenute nel periodo che va dal 18/11/2011 al 30/08/2013, si ricerca il meccanismo di spostamento del corpo di frana e la sua evoluzione nel tempo. Per confermare tali osservazioni si eseguono delle analisi statistiche che consentono inoltre di mettere in relazione gli spostamenti osservati della parte di monte con quelli della parte di valle.
- Correlazione Spostamenti/Precipitazioni: grazie ai dati pluviometrici raccolti dalla stazione meteorologica di Roncadin, vicino a Chies d'Alpago, è possibile realizzare delle rappresentazioni grafiche per valutare, qualitativamente, se essi sono relazionabili con gli spostamenti osservati dalle fotografie oppure no. Per confermare tali osservazioni si eseguono delle analisi statistiche che forniscono inoltre maggiori informazioni sulle eventuali correlazioni.

A fronte dei risultati ottenuti in questo capitolo è possibile fare alcune osservazioni sia sul sistema di monitoraggio fotogrammetrico, sia sulla bontà del metodo di analisi utilizzato per lo studio del comportamento della frana e per la ricerca di eventuali correlazioni tra gli spostamenti e le precipitazioni.

Nel quarto capitolo si riprende quanto svolto da Matteo Darienzo durante un lavoro di tesi triennale, ricercando la presenza di correlazione tra i parametri misurati dagli strumenti installati nel settore di Pian de Cice, i quali vengono inoltre messi in relazione con gli spostamenti osservati nelle fotografie per la zona 9, rappresentante un versante dell'area in esame, per determinare quali variabili li influenzano.

Dopo una breve introduzione sulle caratteristiche della zona, si espone l'elaborazione dei dati misurati, con i quali si realizzano alcune rappresentazioni grafiche e delle analisi statistiche suddivise in due "blocchi" in funzione del tipo di variabile:

- Variabile in forma dicotomica: si esegue un confronto a coppie tra le medie (GLM) ed una regressione logistica binaria per ricercare eventuali correlazioni tra i parametri misurati dagli strumenti (livello di falda, spostamenti e precipitazioni) e

gli spostamenti osservati nelle fotografie in relazione alla zona 9. Tali analisi permettono quindi di individuare quali parametri influenzano la visione di spostamenti superficiali.

- Variabile in forma continua: si eseguono diverse regressioni lineari multiple per ricercare l'effetto che precipitazioni e livello di falda hanno sugli spostamenti misurati e l'effetto che le piogge cumulate (a diverse ore) hanno sull'oscillazione di falda. Avendo osservato in passato un certo ritardo tra le tre variabili si realizzano inoltre delle Cross Correlazioni, che permettono di valutare tale ritardo e modificare il metodo di calcolo delle cumulate per realizzare ulteriori regressioni lineari multiple.

A fronte dei risultati ottenuti in questo capitolo è possibile fare alcune osservazioni sia sul sistema di monitoraggio inclinometrico piezometrico, sia sulle variabili che influenzano la nascita di spostamenti profondi e superficiali in riferimento al settore di Pian de Cice.

Nel quinto capitolo si espongono le osservazioni raccolte nei capitoli precedenti, che consentono di trarre una conclusione sul metodo di analisi utilizzato e sulla presenza di correlazione tra gli spostamenti della frana e le precipitazioni.

Come anticipato, questa tesi fa parte di un progetto più ampio di studio del comportamento della frana, e pertanto è ragionevole pensare che i risultati ottenuti possano essere utilizzati per analisi future, le quali permetteranno di comprendere meglio l'evoluzione del fenomeno nel tempo.

1. LA FRANA DEL TESSINA

In questo capitolo si presenta il fenomeno franoso situato in provincia di Belluno noto come la grande frana del Tessina, dal nome del torrente il cui alveo è stato sommerso dal materiale di colata. Si trattano inizialmente gli aspetti generali, riguardanti l'inquadramento territoriale e le caratteristiche proprie del corpo di frana, e successivamente si espongono i fatti storici principali e gli interventi effettuati durante tutto il periodo di attività; tali informazioni sono frutto di anni di monitoraggio e studi, che hanno permesso di comprendere l'evoluzione del fenomeno e forniscono il quadro generale all'interno del quale si colloca questo lavoro di tesi.

1.1 Inquadramento territoriale

Belluno, a causa della sua morfologia e geologia, è la provincia del Veneto maggiormente colpita da fenomeni franosi, che hanno provocato ingenti danni al patrimonio culturale ed ambientale del territorio. In particolare, la zona maggiormente interessata dai dissesti è quella dell'Alpago, in quanto si presenta come una vasta conca chiusa da un anfiteatro montuoso, formato dal versante bellunese delle Prealpi Carniche e dalle Prealpi Bellunesi, ed è inoltre soggetta a forti periodi piovosi (Figura 1.1).



Figura 1.1: Vista tridimensionale dell'Alpago (www.alpagonia2000.bl-it.com)

Uno dei più rilevanti movimenti franosi fu sicuramente quello che portò allo sbarramento della valle di Santa Croce determinato dalla frana di Fadalto, causando la deviazione del fiume Piave verso il Vallone Bellunese e quindi nel Canale di Quero, risalente ad oltre 11700 anni fa. In seguito l'area Paludi (confine tra l'Alpago e il comune di Ponte nelle Alpi), che presentava un livello inferiore rispetto all'attuale di 150 m, andò a colmarsi per depositi successivi di materiali alluvionali e smottamenti. Cedimenti successivi hanno portato poi al completamento e alla formazione di buona parte delle valli che oggi caratterizzano tutta l'area. Come si può notare in Figura 1.2 questa modellazione non è ancora terminata a causa della presenza di numerose frane come: la frana di Lamosano, che sta spostando l'intero abitato, la frana di Borsoi, la frana di Poiatte, la frana di Buscole e la frana del Tessina.



Figura 1.2: Distribuzione delle frane nell'Alpago (G. Dal Farra, Genio civile di Belluno)

1.2 Generalità del fenomeno franoso

Situata nel comune di Chies d'Alpago, ed in particolare a ridosso degli abitati di Funes, Lamosano e San Martino, quella del Tessina è una delle più importanti frane d'Europa che nel corso degli anni ha raggiunto dimensioni notevoli.

Essendo una colata, cioè un tipo di movimento franoso nel quale il materiale si comporta come un fluido viscoso, il suo sviluppo è in continua evoluzione, infatti inizialmente l'area coinvolta era molto piccola ma ad oggi il corpo di frana supera i 2 chilometri di lunghezza: ha origine ai piedi del monte Teverone a 1148 m s.l.m. e si sviluppa in direzione Nord-Sud per

1250 metri, lambisce da vicino l'abitato di Funes dove svolta in direzione sud-ovest per altri 750 m in direzione dell'abitato di Lamosano fino a quota 640 m s.l.m..

Sin dall'inizio del dissesto è stato possibile individuare tre distinte zone in funzione della loro morfologia (Figura 1.3):

- 1) ZONA SORGENTE: posta tra quota 1200 e 1000 m s.l.m. circa, in continua espansione e nella quale il fenomeno si esplica prevalentemente sotto forma di scivolamenti rotazionali e colamenti. (comprende l'accumulo superiore)
- 2) CANALE COLLETTORE: costituito da un ripido canale di scarico, posto tra la quota 1000 e 900 m s.l.m., che mette in comunicazione l'accumulo superiore con quello inferiore.
- 3) ACCUMULO INFERIORE: con lunghezza di oltre 2 km, lungo il quale si sviluppa la colata, tra quota 900 e l'abitato di Lamosano (610 m s.l.m.).



Figura 1.3: Suddivisione del corpo di frana in funzione della morfologia (Google Earth)

L'area in esame è caratterizzata da una grande varietà di dissesti, sia di carattere gravitazionale (crolli e scivolamenti di masse) sia idrogeologico (erosione e fluidificazione), dovuti alla presenza del Flysch: roccia sedimentaria stratificata composta da alternanza di arenarie, marne ed argille che in presenza d'acqua si comporta come un fango molto sciolto (Figura 1.4). L'influenza dell'acqua è garantita dalla sorgente Pelegona, la quale è sempre attiva e scorre lungo buona parte del corpo di frana.



Figura 1.4: Particolare di Flysch in stato roccioso (a) e in stato fangoso (b) (Foto realizzata da me)

Il meccanismo di movimento può essere riassunto come segue:

- I distacchi si susseguono nel tempo, accompagnati da un progressivo arretramento del margine superiore (coronamento).
- Le porzioni distaccate tendono a disgregarsi e a formare delle masse di detrito e fango, le quali percorrono con velocità medio-alte il canalone che porta a Funes; solitamente subiscono un rallentamento in corrispondenza dell'allargamento presente a monte della strada Funes-San Martino provocando un innalzamento del fondo del torrente Tessina in quanto l'energia delle acque di magra non è in grado di asportare il materiale.
- In presenza di precipitazioni prolungate si ha un aumento di fluidità del materiale il quale riesce a raggiungere la strada che collega Funes con San Martino e raramente anche l'abitato di Lamosano.

1.3 Cenni storici

La prima testimonianza di movimento della frana, con conseguente danneggiamento di opere idrauliche, risale al 20 Settembre 1960 tuttavia, l'effettivo inizio del dissesto si verificò il 30 Ottobre successivo. A seguito di intense e prolungate precipitazioni dei giorni precedenti (398,7 mm in Ottobre'60) avvenne il distacco di circa 1 milione di m³ di materiale sulla parte meridionale del monte Teverone a quota 1100 m s.l.m., distribuito su un fronte di circa 300 m e con uno spessore di 20 m. Tale materiale si incanalò nella valle danneggiando la strada Pedol-Funes e provocando l'innalzamento del livello di base dell'alveo del torrente Tessina, attualmente completamente coperto (Figura 1.5).



Figura 1.5: Vista della frana nel 1960 (www.funes.bl.it e G. Dal Farra, *Genio Civile di Belluno*)

Nel dicembre 1962 si registrò una ripresa del fenomeno, causata da abbondanti precipitazioni nel mese precedente (251,2 mm in Novembre'62), che portò la colata a lambire l'abitato di Funes situato a valle.

Ulteriori riprese si verificarono nel Dicembre 1963, dove la colata percorse anche 70-80 cm/giorno, e nel Marzo 1964 dove, a seguito dello scioglimento delle nevi e delle abbondanti precipitazioni, si registrò una velocità di circa 100 m/giorno ed un innalzamento del livello d'alveo di ulteriori 20 m in prossimità di Funes; durante questi eventi la colata si propagò verso valle avvicinandosi anche all'abitato di Lamosano. Oltre all'allarme nella popolazione, questi eventi provocarono ingenti danni alle infrastrutture: venne danneggiato l'acquedotto di

Montanes, che dovette essere riparato ed in parte sostituito, venne distrutta una briglia in legno a monte di Lamosano realizzata nel 1961 ed il ponte collegante Funes e Pedol.

La situazione andò via via stabilizzandosi negli anni, nonostante la nicchia di distacco si sia ampliata gradualmente verso Est e verso Nord durante i periodi piovosi provocando colate modeste. È interessante osservare che la frana non ha registrato variazioni durante la disastrosa alluvione del Bellunese nel Novembre 1966.

Negli anni successivi non si sono verificati particolari movimenti ma solamente delle riattivazioni con fenomeni di instabilità ridotti, fino al Dicembre 1991 quando, probabilmente in concomitanza di una leggera scossa sismica, nacquero delle fessurazioni seguite dal collasso di circa 2 milioni di m³ di materiale dal settore sinistro della zona di alimentazione della frana.

Nell'Aprile 1992, dopo un periodo particolarmente piovoso (160 mm in 15 giorni) e lo scioglimento delle nevi, si è verificato uno scorrimento rotazionale con superficie ipotizzabile tra i 20 e 30 m di un volume di circa 1 milione di m³ di materiale in sinistra idrografica il quale, fortemente rimaneggiato e fluidificato per l'aumento del contenuto d'acqua, si propagò verso valle lungo l'asta del torrente alimentando il corpo della colata.

Verso fine mese la massa incanalata aumentò la velocità (10m/h) e si diresse verso il lato sinistro della valle lambendo l'abitato di Funes ed innalzando di altri 4 m il fondo preesistente. Data la vicinanza della colata, il paese venne evacuato e si procedette alla realizzazione di un argine in blocchi di cemento e terre armate da parte del Genio Civile di Belluno (Figura 1.6).

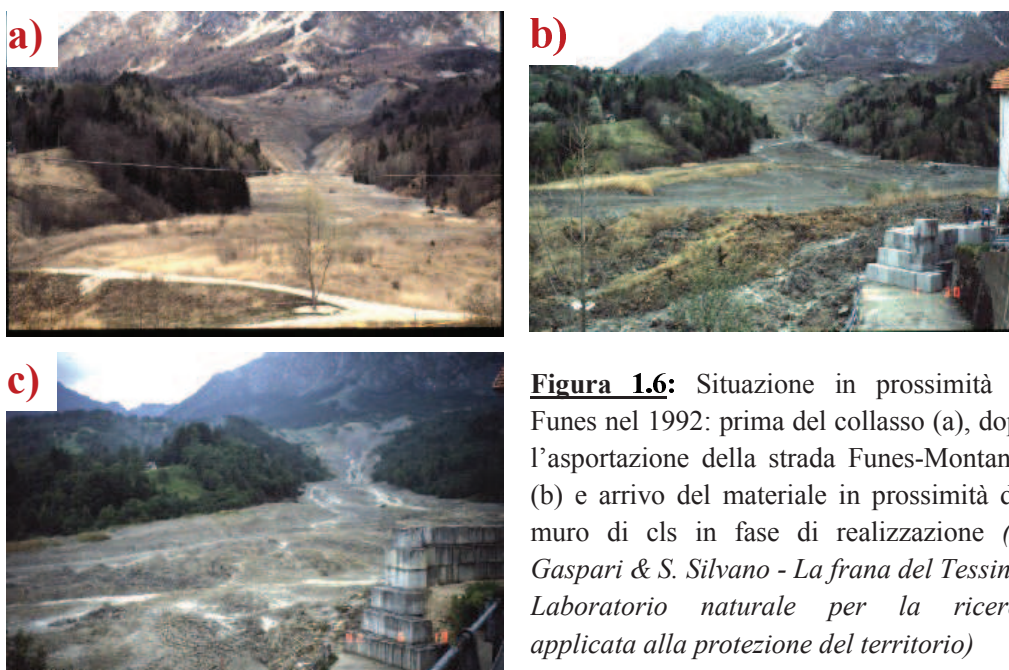


Figura 1.6: Situazione in prossimità di Funes nel 1992: prima del collasso (a), dopo l'asportazione della strada Funes-Montanes (b) e arrivo del materiale in prossimità del muro di cls in fase di realizzazione (E. Gaspari & S. Silvano - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Durante il mese successivo la colata provocò la disgregazione ed il movimento del materiale precedentemente accumulato, convogliandolo verso valle con una velocità di 10 m/giorno provocando un'ulteriore innalzamento del livello di fondo in prossimità di Funes di circa 3 m. Date le elevate velocità si ipotizzò che la colata, nel giro di 2 settimane, avrebbe raggiunto gli abitati di Lamosano e Tarcogna; per questo venne realizzato un muro di cemento armato ed un terrapieno di terre armate come protezione.

Riassumendo, l'evento del 1992 ha comportato, oltre all'allargamento dell'area sorgente, notevoli modifiche del ripiano superiore e l'espansione del materiale a monte di Funes su tutta la valle del Tessina, con un suo ulteriore riempimento per spessori superiori ai 10 m. Inoltre la colata ha parzialmente riempito la depressione presso Col, avanzando poi nella strettoia poco a monte dell'abitato di Tarcogna, depositando materiali per uno spessore superiore ai 7 m e fermandosi in prossimità dell'abitato di Lamosano. Quest'ultimo era, ed è tuttora, soggetto ad un movimento franoso con spostamenti annuali di circa 2 cm e con una direzione simile a quella della colata, pertanto si temeva che la spinta del materiale potesse aggravare tale situazione.

Un altro evento importante si verificò nel Maggio 1995 dove, a seguito di un'abbondante precipitazione e probabilmente delle vibrazioni generate dalle esplosioni per la costruzione della galleria drenante, ci fu la mobilitazione di circa 2-2,5 milioni di m³ di materiale che si propagò verso valle con una velocità di circa 30 m/giorno innalzando il fondo di ulteriori 3 m e raggiungendo, dopo 15 giorni, la stretta in corrispondenza di Lamosano (Figura 1.7).



Figura 1.7: Materiale di colata in prossimità di Lamosano nel 1995 (*E. Gaspari & S. Silvano-La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Altri eventi importanti si verificarono nel Settembre 1988 e nel Novembre 2004 durante il quale vennero registrate, presso l'abitato di Funes, velocità di colata maggiori del metro orario oltre ad un innalzamento dell'alveo del Tessina di un paio di metri.

Nel 1960 l'abitato di Funes si trovava ad una quota superiore di 50 m rispetto al fondo d'alveo mentre oggi, dopo i successivi accumuli di materiale di colata, è pressoché a livello.

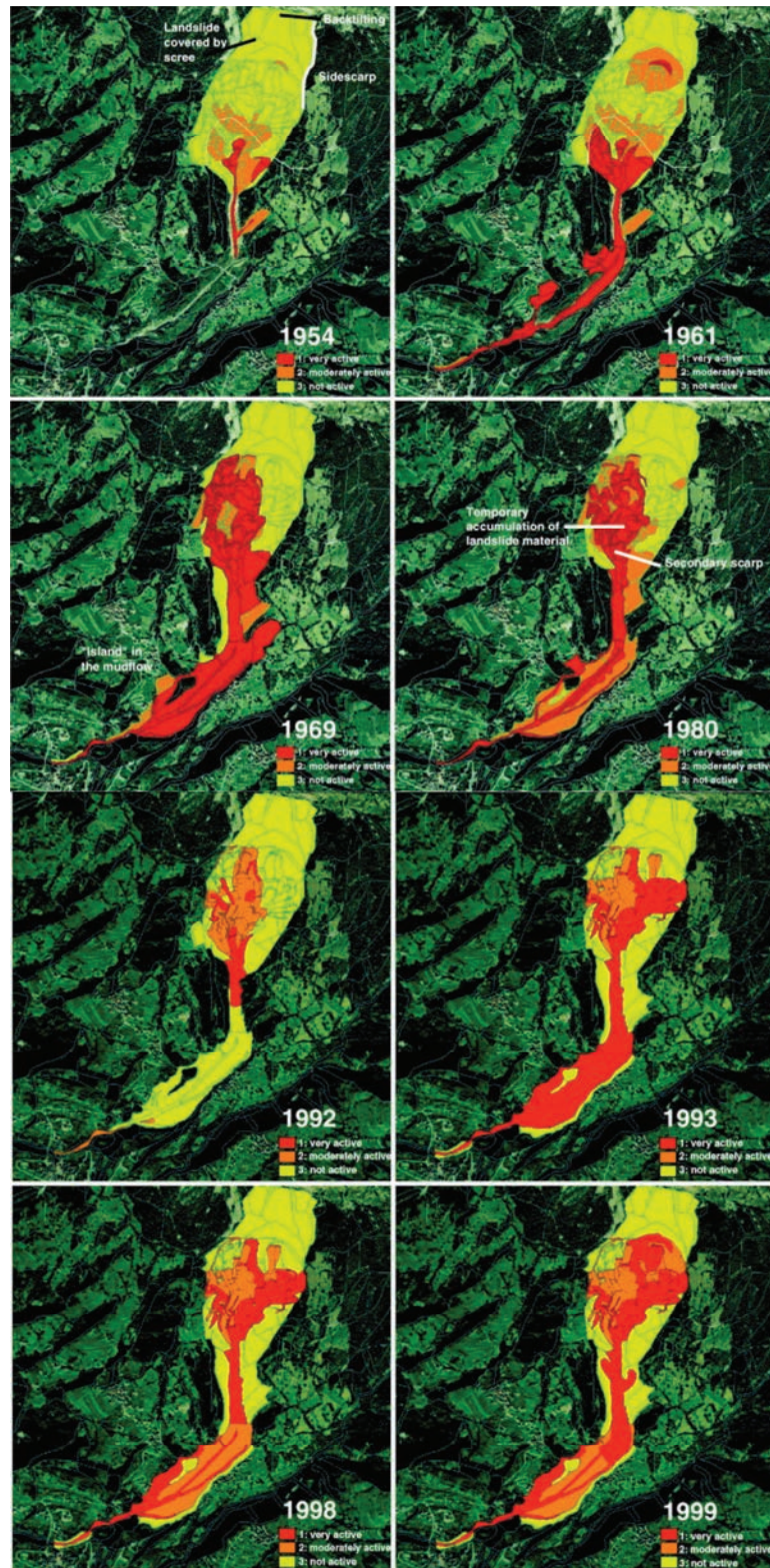


Figura 1.8: Evoluzione della frana dal 1954 al 1980 e dal 1992 al 1999 (C.J. Van Westen -Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models)

La situazione negli ultimi anni sembra stabilizzata, tuttavia si registrano ancora movimenti franosi ma di piccola intensità che interessano in particolar modo la parte alta, quella della sorgente, e della mediana, che ha visto l'asportazione più volte della strada di collegamento tra Pedol e Funes come avvenuto nel Maggio 2013.

Nonostante il corpo centrale sia stabile, ci sono due aree che destano particolare preoccupazione: quella di "Pian de Cice" (1) e di "Moda" (2) che hanno evidenziato spostamenti in accelerazione, seppur di lieve intensità, suggerendo la possibilità di un futuro collasso (Figura 1.9). Se questo dovesse avvenire, soprattutto in riferimento a Pian de Cice, comporterebbe la mobilitazione di importanti volumi di materiale con dinamica diversa dalla colata ed un notevole aggravio delle condizioni di rischio per gli abitati di Funes e Lamosano.



Figura 1.9: Vista aerea del corpo di frana con individuazione della zona di Pian de Cice e Moda

1.4 Interventi effettuati

Nel corso degli anni furono effettuati diversi interventi di natura idraulica e strutturale per ripristinare il corso del torrente Tessina e contenere il materiale di frana ma, data l'importanza dei volumi coinvolti, essi si rivelarono inefficaci comportando un grande spreco di denaro.

Nel 1961, subito dopo il primo grande movimento, il Corpo Forestale dello Stato realizzò una grossa briglia di ritenuta in gabbionate nei pressi dell'abitato di Funes ed una briglia ad arco a monte di Lamosano, che però furono entrambi distrutte nell'evento del 1964.

Nei vent'anni successivi furono effettuati diversi interventi volti soprattutto alla canalizzazione e convogliamento delle acque: si realizzarono delle briglie in legno, dei canali drenanti rivestiti, delle reti di drenaggio e dei lavori di captazione e derivazione delle sorgenti Pelegona e Moda (Figura 1.10).

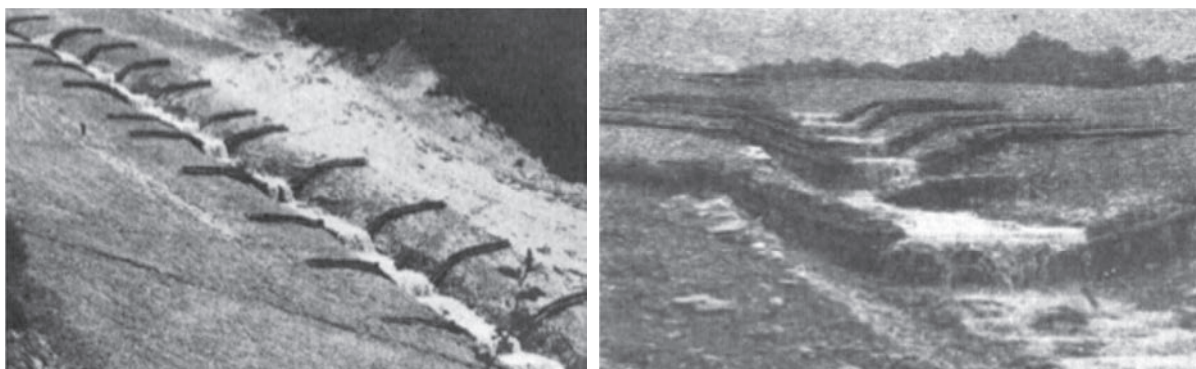


Figura 1.10: Briglie in legname e materassi sul Tessina, distrutte dall'arrivo delle colate (G. Brandalise - *Analisi degli spostamenti della frana del Tessina da una sequenza di immagini digitali*)

Tutti questi interventi però furono solamente uno spreco economico e di materiale in quanto furono inefficaci e distrutti nel tempo.

Dopo l'evento del 1992, per fronteggiare al meglio l'emergenza, si costituì un'unità di crisi con sede a Lamosano composta dal Genio Civile di Belluno, dai Vigili del fuoco, da un gruppo di ricercatori del CNR-IRPI di Padova e dal Ministero della Protezione civile. Per tre mesi l'unità monitorò il movimento franoso e si istituì, per la prima volta in Italia, un Piano di Protezione Civile integrato ad un sistema d'allarme, che in caso di elevata pericolosità avrebbe portato all'evacuazione della popolazione.

Come anticipato, per proteggere l'abitato di Funes, si realizzò un argine di sicurezza in blocchi di calcestruzzo e terra armata; lo stesso intervento fu attuato per gli abitati di Lamosano e Tarcogna (Figura 1.11).



Figura 1.11: Muro in blocchi in calcestruzzo eretto in prossimità dell'abitato di Funes nel 1992

Nel 1993, per individuare altri interventi di stabilizzazione della frana, la Regione affidò l'incarico ad Edoardo Semenza e Floriano Villa, i quali presentarono due differenti ipotesi di intervento basate su diverse interpretazioni delle caratteristiche idrogeologiche dell'area ed in particolare in funzione della provenienza delle acque, responsabili della mobilitazione del materiale:

- **SEMENZA**: Ipotizzò che le acque afferenti al corpo di frana provenissero direttamente dal monte Teverone, il quale raccoglie tutte le precipitazioni convogliandole, attraverso fessure e condotti carsici, fino ad un livello impermeabile che provocherebbe il trabocco dell'acqua così raccolta, e la successiva infiltrazione nell'ammasso in movimento. Per ovviare a questo effetto, propose la realizzazione di una galleria drenante.
- **VILLA**: Ritenne che il bacino del monte Teverone non fosse in grado di raccogliere e fornire una quantità d'acqua sufficiente per alimentare il movimento franoso, per questo ipotizzò che l'apporto maggiore fosse da attribuire principalmente al bacino laterale della valle di Montanés, i cui contributi penetrerebbero in profondità del corpo di frana da Ovest o Nord-Ovest, alimentando anche la sorgente Pelegona. Per captare quest'acqua propose la realizzazione di pozzi drenanti verticali di grande diametro.

Anche se secondo il modello di Villa la realizzazione di una galleria drenante avrebbe avuto solo la funzione di regolarizzare le portate delle sorgenti, smussandone i picchi, ma non quella di eliminare completamente la presenza d'acqua nell'area di frana, si procedette comunque alla sua realizzazione sulla base delle indicazioni di Semenza (Figura 1.12).

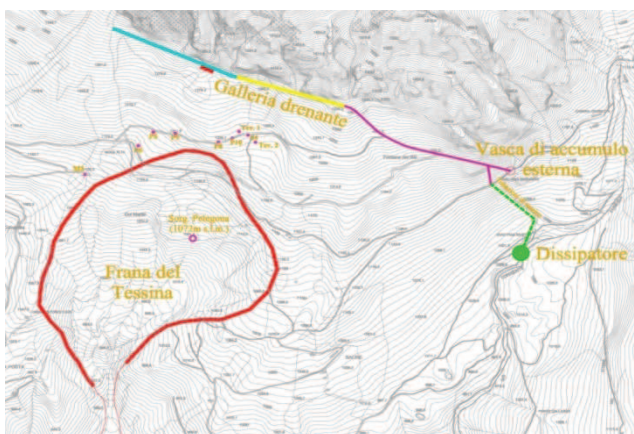


Figura 1.12: Inquadramento della galleria drenante (*Genio Civile di Belluno*) e foto del suo interno (www.iqtconsulting.it)

La galleria, costruita tra il 1995 e il 1997, presenta una lunghezza di 1244 m, sezione di scavo di 14 m², pendenza di fondo di 0,035 % e quota di imbocco situata a 1143 m s.l.m. Essa è stata quasi interamente scavata nei calcari del monte Teverone, con un orientamento Est-Ovest, ed è composta dall'imbocco e dal corridoio sotterraneo, completo di una condotta di scarico a sezione semicircolare per l'afflusso delle acque drenate da convogliare nel serbatoio di accumulo.

Lo scavo è stato realizzato con fori pilota in pre-avanzamento, profilato con fori e cariche esplosive secondo la tecnologia “smoothblasting” ed inoltre, al fine di aumentare la capacità drenante dell'opera, è stata eseguita una serie di dreni suborizzontali, rivolti verso l'interno del massiccio del monte Teverone per una lunghezza complessiva di 18712 m. Tale intervento è stato introdotto per deprimere localmente le sovrappressioni idrauliche e permettere un agevole lavoro di scavo della galleria. Successivamente è stato effettuato un intervento di miglioramento dello stato della pavimentazione e dell'efficacia della canaletta di scarico per facilitare l'allontanamento delle acque drenate.

Per quanto la galleria abbia avuto un effetto drenante, con portate costanti oscillanti tra 30 e 350 l/s rispettivamente in corrispondenza a periodi poco piovosi e a seguito di prolungate precipitazioni, non è risultata efficace nella risoluzione del problema, in quanto non intercetta tutta la circolazione idrica sotterranea proveniente dal monte Teverone (Figura 1.13).

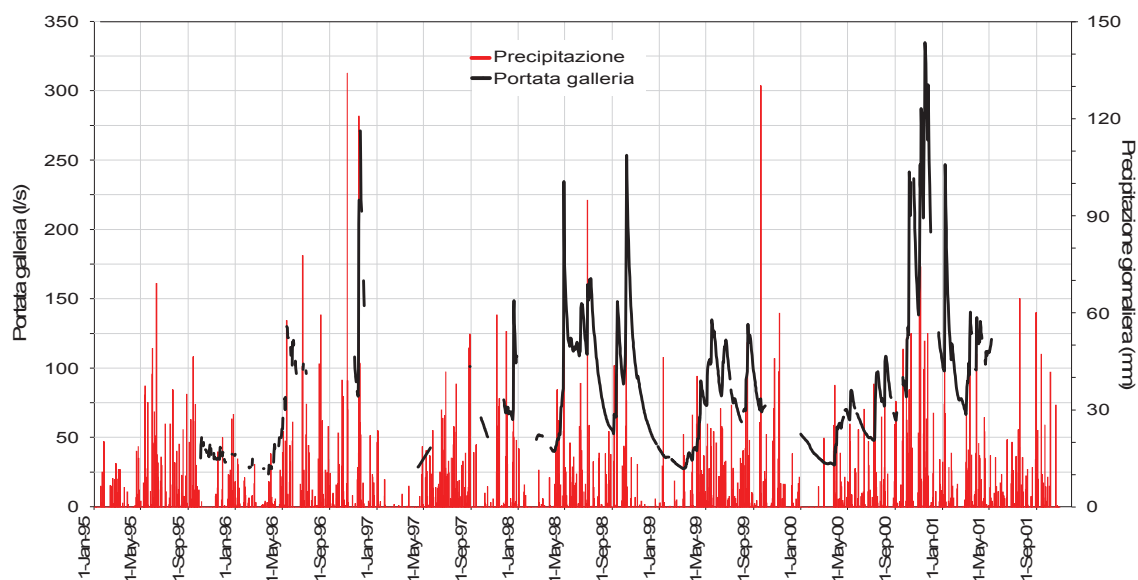


Figura 1.13: Portata della galleria e precipitazioni dal 1995 al 2001 (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

L'intervento però non fu del tutto inutile, infatti grazie alla costruzione di una piccola centrale idroelettrica sul torrente Funesia (ricettore di scarico della galleria), il comune di Chies ha potuto sfruttare le portate drenate per la produzione di corrente elettrica (1721000 kWh all'anno).

2. ATTIVITA DI MONITORAGGIO

Oltre agli interventi sopracitati, nella frana del Tessina è stata eseguita negli anni una grande attività di monitoraggio volta allo studio del fenomeno e alla prevenzione del rischio. I risultati ottenuti hanno permesso di comprendere meglio sia le caratteristiche fisico/meccaniche del fenomeno franoso, sia il suo comportamento ed evoluzione nel tempo.

In questo capitolo si introduce brevemente il monitoraggio delle frane, le sue caratteristiche e gli strumenti tipicamente utilizzati, ed in particolare si espongono in dettaglio le varie tecniche applicate nello studio della frana del Tessina; all'interno di questo contesto si colloca il monitoraggio fotogrammetrico ed inclinometrico, punti di partenza delle analisi effettuate per la ricerca delle correlazioni tra spostamenti e precipitazioni.

2.1 Generalità

Il monitoraggio rappresenta un'attività di controllo, che permette di studiare ed analizzare un fenomeno in evoluzione mediante l'utilizzo di strumenti automatici e manuali.

Per realizzare una rete di monitoraggio è necessario preliminarmente eseguire delle verifiche geologiche e geotecniche, per individuare i parametri da monitorare che caratterizzano il fenomeno, impiantistiche, informatiche e gestionali per ottimizzare l'installazione e la gestione della strumentazione.

I parametri di interesse possono essere suddivisi in due tipologie:

- Parametri diretti: grandezze che descrivono in modo diretto il comportamento del fenomeno franoso.
- Parametri indiretti: grandezze che rappresentano le condizioni al contorno del fenomeno franoso o che possono essere analizzate in correlazione con altre grandezze.

Gli elementi primari che regolano la progettazione dell'attività di monitoraggio sono:

- **Scopo**: Può essere di protezione civile, volto all'avvertimento e alla salvaguardia della popolazione, di sicurezza per infrastrutture, opere o impianti o semplicemente di studio.
- **Frequenza di rilievo**: viene definita in funzione dello scopo di monitoraggio, delle responsabilità connesse all'analisi delle misure, dell'evoluzione dei fenomeni e dei periodi di osservazione.

- **Tipologia di sistema di monitoraggio:** varia in funzione dello scopo del monitoraggio, della disponibilità economica e dell'ubicazione del sito. Può essere manuale, automatica o varia.

Per quanto riguarda le frane, è necessario inizialmente individuare il tipo di movimento (crollo, rotazione, colamento..), lo stato di attività (attiva, inattiva, riattivata...), la sua distribuzione (in avanzamento, retrogressiva..) e le caratteristiche geologiche e geotecniche, per realizzare un'adeguata progettazione e gestione del sistema di monitoraggio. È possibile riassumere questi concetti attraverso il seguente schema:



2.2 Tipologie strumentali

Le tipologie strumentali utilizzabili nel monitoraggio di un fenomeno franoso possono essere suddivise in funzione dei parametri da misurare come: spostamenti, pressioni neutrali, livelli di falda, rotazioni, deformazioni e parametri meteorologici. Tra i principali strumenti di misura si possono citare:

- Distometri: consentono di misurare le variazioni di distanza tra due punti fissi rappresentati, ad esempio, dalle pareti di una grossa frattura in roccia.
- Estensimetri: Consentono di misurare lo spostamento relativo tra due punti di misura posti ai due lati di una frattura.
- Inclinometri: Consentono di determinare la superficie di rottura e gli spostamenti orizzontali mediante l'inserimento, all'interno di un tubo a sezione circolare, di sonde che trasmettono le variazioni della verticale.

- Piezometri: Consentono di misurare la quota della falda e le pressioni neutrali mediante l'inserimento dello strumento nel corpo di frana.
- Teodolite: Consente di determinare angoli azimutali, zenitali e distanze mediante l'utilizzo di mire ottiche.
- Distanziometro: Consente di misurare le deformazioni orizzontali con elevata precisione, mediante l'utilizzo di un raggio laser.
- GPS: Consente di determinare la distanza tra due punti e quindi risalire alle coordinate di una rete di capisaldi.

2.3 Monitoraggio nella Frana del Tessina

A seguito della riattivazione del 1992 l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica di Padova fu incaricato, dall'allora Ministero della Protezione Civile, di ideare e progettare un sistema di monitoraggio ed allarme per la messa in sicurezza degli abitati di Funes e Lamosano. La filosofia con cui venne concepito tale sistema prevedeva di controllare la zona sorgente, a scopo di studio, e la colata con finalità di allarme, differenziando quindi gli strumenti utilizzati.

2.3.1 Sistemi di monitoraggio automatico

Questi sistemi consentono la misura dei parametri senza l'intervento di un operatore e per questo sono molto utilizzati quando i punti di misura si trovano in aree difficilmente raggiungibili o rischiose, quando la frequenza di lettura richiesta è troppo elevata per misure manuali o quando siano abbinati a sistemi di allarme.

Nel caso in esame venne installata una serie di sensori e strumenti che, tramite centraline periferiche, segnalavano ad una stazione centrale variazioni e movimenti sia della colata che della zona sorgente. Dopo l'elaborazione, la stazione centrale segnalava eventuali situazioni di allarme ai Vigili del Fuoco di Belluno.

Nella zona di alimentazione furono installati due sistemi estensimetrici a filo a base multipla, di lunghezze 280 m e 390 m, per la misura continua dei movimenti superficiali ed una serie di 12 centraline; tale sistema venne distrutto nell'evento del 1993 (Figura 2.1).

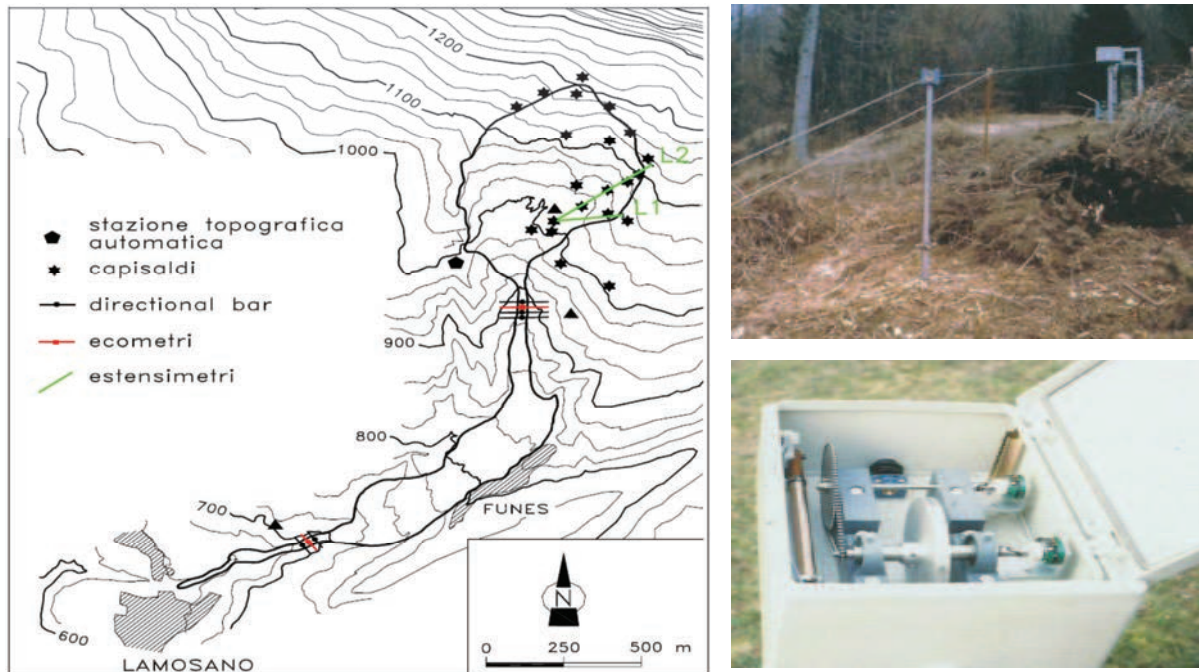


Figura 2.1: Disposizione dei sistemi di monitoraggio automatico e particolare di un estensimetro a base multipla e di una centralina di misura (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Sempre nella parte superiore fu installato un sistema topografico con ricerca automatica dei capisaldi per la misura di spostamenti superficiali, che rimase attivo fino alla fine del 2009.

Le misure ottenute permisero di riconoscere delle fasi di accelerazione e prevedere i collassi di alcune aree, in particolare per quanto riguarda gli eventi del 1993 e 1995 per i quali sono riportati alcuni dei grafici più significativi (Figura 2.2):

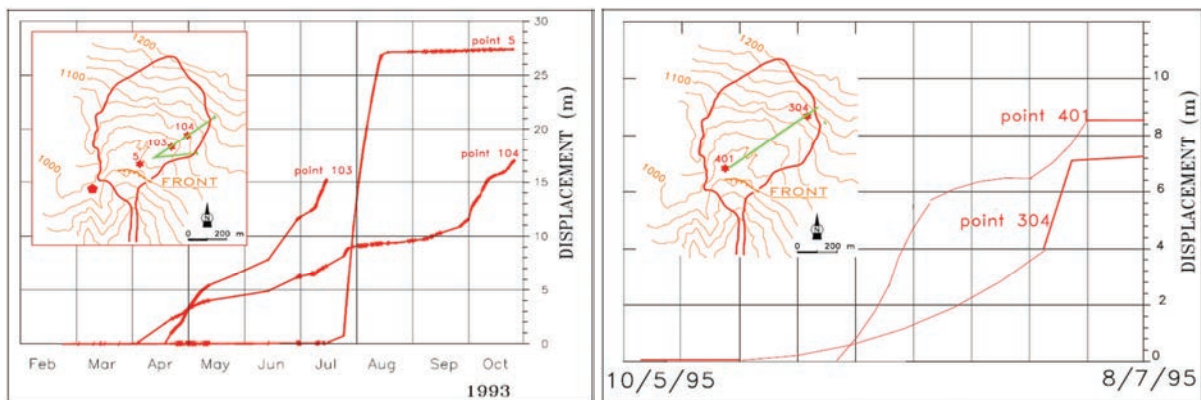


Figura 2.2: Andamento degli spostamenti per alcuni punti significativi (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

In entrambi gli eventi fu possibile definire con una certa precisione l'evoluzione del fenomeno: inizialmente si mobilitarono le aree in prossimità della scarpata principale e solo dopo alcuni giorni i punti posti in prossimità della scarpata secondaria che raccorda la zona superiore con la colata.

L'andamento degli spostamenti nel triennio 1997-1999, consentì una zonizzazione della frana in 4 aree caratterizzate da velocità di spostamento diverse (Figura 2.3).

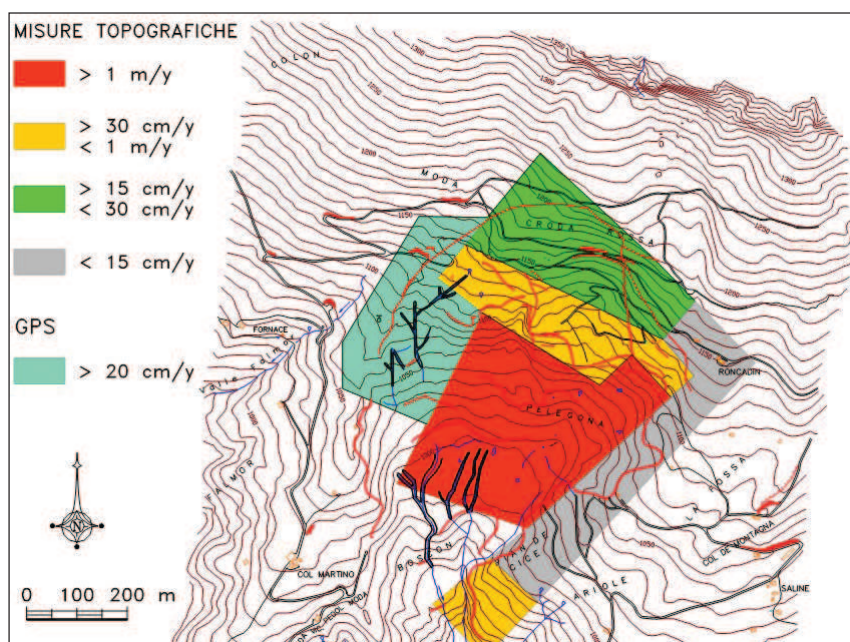


Figura 2.3: Suddivisione dell'area sorgente in zone caratterizzate da valori di velocità simili (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

1. Fascia sinistra idrografica tra Roncadin e Pian de Cice, caratterizzata da spostamenti inferiori a 15 cm/anno
2. Zona di coronamento con spostamenti compresi tra i 30 e i 100 cm/anno
3. Zona a monte della scarpata principale con spostamenti compresi tra i 15 e i 30 cm/anno
4. Zona di accumulo superiore con spostamenti maggiori di 1m/anno

Nel corpo della colata furono invece attrezzate due stazioni di controllo a monte di Funes e Lamosano: una costituita da tre aste direzionali (aste di qualche metro appese ad un cavo teso trasversalmente al corpo di frana) ed un ecometro ad ultrasuoni (strumenti per la misura della quota d'alveo) e l'altra da due aste ed un ecometro (Figura 2.4).



Figura 2.4: Particolare di un'asta direzionale (a) e tre aste direzionali ed un ecometro per il controllo della colata a monte di Funes (b) (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Nel caso di transito di materiale le aste subiscono un'inclinazione lungo la direzione di scorrimento; qualora tale inclinazione risulti maggiore di 20° per un periodo superiore ai 16 s, viene inviato un allarme attraverso la chiusura di un contatto al mercurio che viene confermato dal segnale degli ecometri, i quali rilevano l'andamento della quota del fondo d'alveo (Figura 2.5)

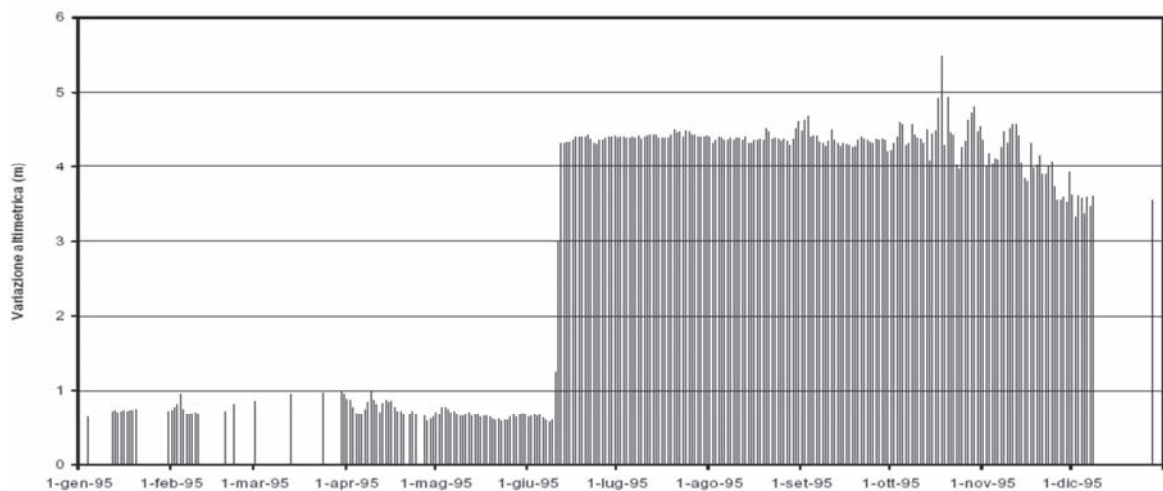


Figura 2.5: Variazioni di quota del fondo d'alveo a monte di Lamosano durante tutto il 1995 (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Ai sistemi sopraesposti furono affiancate tre telecamere per la registrazione ed il controllo visivo dei movimenti in corrispondenza delle zone ritenute più critiche: la prima venne installata presso il ponte vecchio di Lamosano, la seconda a Funes e la terza in una zona stabile in destra orografica a 1000 m s.l.m. puntata verso il coronamento della frana.

Dal 18 Maggio 1992 fu installata inoltre una telecamera all'infrarosso termico in località di Funes per il controllo notturno della colata.

2.3.2 Sistemi di monitoraggio manuale

Questi sistemi necessitano dell'intervento di un operatore e vengono tipicamente utilizzati quando la tipologia ed il numero di strumenti installati, nonché le condizioni al contorno (accessibilità, gestione ecc...) la frequenza di lettura e le disponibilità economiche, impediscono l'installazione di sistemi automatici.

Come dispositivi di misura manuale furono utilizzati: inclinometri (alcuni dotati di cavi TDR), estensimetri a filo, piezometri (alcuni elettrici), capisaldi GPS, un misuratore di portata all'uscita della galleria drenante e due stazioni metereologiche per la registrazione delle precipitazioni. Parte di questi strumenti furono installati a seguito degli eventi del 1992 soprattutto nella zona di scarpata e nel settore di Pian de Cice, e sono tuttora attivi.

Spostamenti superficiali

Gli spostamenti superficiali vennero misurati sia con sistemi topografici tradizionali sia con sistemi GPS, in riferimento a due zone: la prima identificabile come sorgente ed accumulo superiore, dove vennero eseguite misure topografiche automatiche e GPS, e la seconda coincidente con i tratti di colata a monte e valle di Funes, dove furono installati dei capisaldi topografici per la misura manuale.

Le misure GPS, in accordo con le topografiche automatiche, permisero di confermare l'attività dell'area di Moda e della destra orografica, ed il costante movimento della scarpata principale e della zona a monte.

Le misure topografiche manuali invece, registrarono osservazioni dell'ordine degli errori strumentale e quindi non furono rilevati spostamenti che potessero essere collegati ad un reale movimento della colata.

Spostamenti profondi

Tali spostamenti vennero misurati mediante l'uso di inclinometri classici e con cavi TDR i quali permisero di rilevare uno spostamento continuo di Pian de Cice (5-7 cm/anno) ed una superficie di scorrimento ben definita alla profondità di circa 26 m.

Nel periodo 1997-1999 furono effettuate due campagne, con l'impiego di una sonda televisiva, per verificare l'agibilità di oltre 20 pozzi realizzati nei primi anni'90 i quali risultarono rotti ad una profondità variabile tra i -20 e -68 m.

Misura delle precipitazioni e dei livelli piezometrici

Le misure pluviometriche vengono raccolte dalle stazioni limitrofe alla frana situate a Chies, Roncadin, Funes e Degnona/Moda, mentre per osservare il livello di falda furono realizzati, per conto della Regione Veneto, 14 sondaggi. Nel Novembre 1995 l'IRPI-CNR di Padova installò piezometri elettrici nei pozzi ancora agibili ubicati su Pian de Cice i quali furono monitorati in continuo.

Nel periodo 1994-1997, in corrispondenza della costruzione della galleria drenante, vennero registrati dei valori inferiori rispetto ai precedenti indicando quindi un'efficace azione drenante iniziale da parte della galleria, sia sul monte Teverone sia sull'accumulo di frana (Figura 2.6).

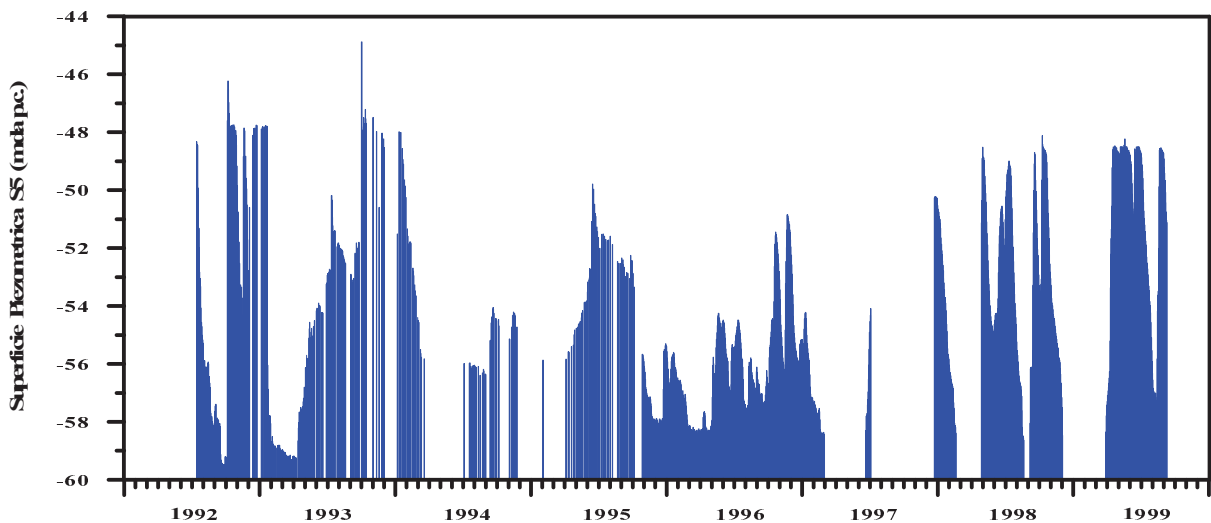


Figura 2.6: Andamento della falda nel periodo che va dal 1992 al 1999 (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Misure di portata in galleria

I dati raccolti dimostrano la presenza di una portata minima costante pari a 30/40 l/s, rispetto la quale si hanno frequenti variazioni con picchi giornalieri che raggiungono anche i 250 l/s. L'analisi idrologica ha evidenziato che esiste un ritardo di circa 6 ore fra l'inizio delle precipitazioni e l'incremento delle portate in galleria ed un ritardo rispettivamente di circa 9 e 12 ore fra l'inizio delle precipitazioni e l'aumento dei livelli di falda. Una risposta così veloce sia da parte della galleria che della superficie piezometrica è indice di una circolazione idrica per fessurazione, entro l'ammasso roccioso, particolarmente attiva e dovuta alle numerose fratture presenti in tutta l'area.

Interferometria SAR

Questa tecnica, che venne applicata tra il 25 Settembre e il 13 Ottobre 2000, si basa su misure da postazioni remote che permettono di descrivere il comportamento di tutti i punti della superficie osservata, senza il bisogno della presenza di un operatore.

Il radar è un sensore che invia impulsi a microonde verso la scena osservata, registra coerentemente il segnale retrodiffuso, e deriva l'informazione sulla distanza dei diversi retrodiffusori nella scena dal calcolo del ritardo temporale tra segnale inviato ed eco ricevuto (Figura 2.7).

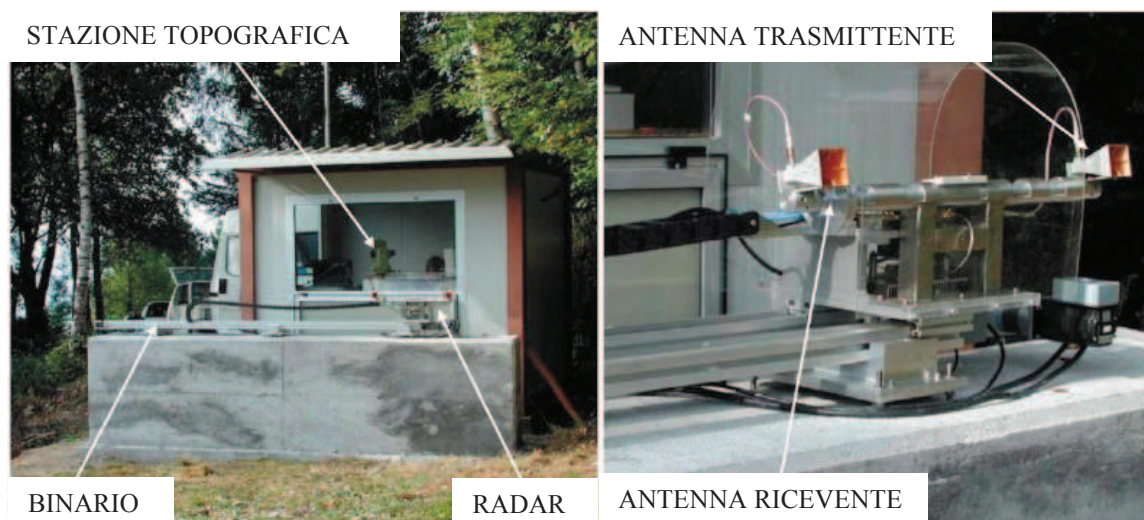


Figura 2.7: Posizionamento del sistema SAR con dettaglio dell'antenna trasmittente. La stazione topografica fu utilizzata per confermare le misurazioni (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Grazie a questa tecnica è stato possibile ottenere una mappa delle deformazioni superficiali dell'area indagata con una precisione millimetrica e verificare la bontà delle misurazioni eseguite mediante rilievo topografico (Figura 2.8).

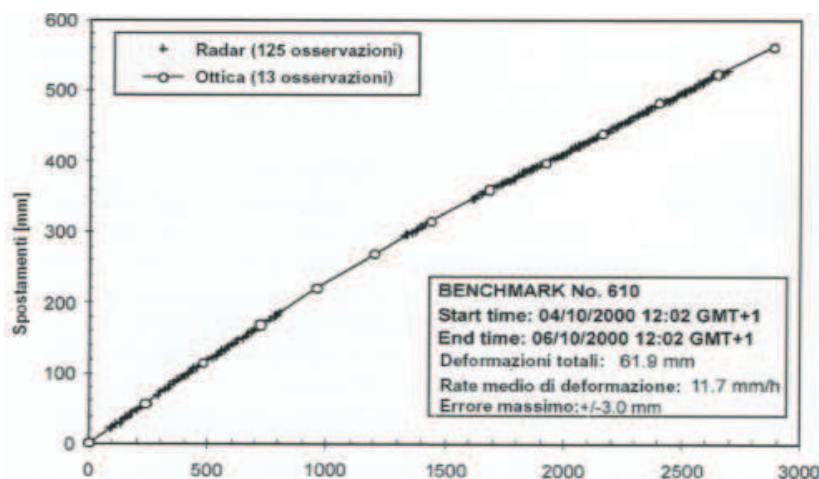


Figura 2.8: Confronto tra SAR e rilievo topografico per l'andamento tempo/deformazioni di un caposaldo (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

3. MONITORAGGIO FOTOGRAMMETRICO

Oltre alle strumentazioni precedentemente esposte, dal 2011 è presente un sistema di monitoraggio basato sull'acquisizione di immagini digitali da due fotocamere, che possono essere successivamente elaborate al fine di determinare gli spostamenti della colata. Questo sistema è di tipo misto, cioè si ha l'acquisizione automatica dei dati ma è necessario l'intervento dell'operatore per la loro raccolta, in quanto non è possibile l'accesso remoto per mancanza di copertura telefonica nella zona.

Negli anni scorsi, grazie al buon numero di fotografie raccolte ed alla loro alta risoluzione, è stato possibile determinare direzione ed intensità (in pixel) degli spostamenti di alcuni *target* individuati nelle foto mediante un programma basato sul *Particle Image Velocimetry* (PIV) realizzato dal Dottor Fabio Gabrieli e Mirco Motta. Tale programma ha prodotto buoni risultati che sono stati sufficientemente esposti in alcune tesi triennali (*Stevanato, 2010; Pacagnella, 2012; Gidoni, 2012; Dainese, 2012; Zoppé, 2012; De Fanti, 2012; Brandalise, 2013*).

In questo capitolo si descrive il sistema di monitoraggio fotogrammetrico in uso nella frana del Tessina, ed in particolare si riporta l'analisi eseguita a partire dall'osservazione in sequenza di tutte le fotografie raccolte durante il periodo di attività.

In primo luogo si espone il procedimento seguito per il trattamento e l'osservazione delle foto, che ha permesso di individuare gli spostamenti ed i meccanismi evolutivi del fenomeno franoso, per poi procedere ad un'analisi statistica volta a confermare quanto rilevato.

Successivamente si utilizzano le informazioni sugli spostamenti per ricercare, attraverso delle rappresentazioni grafiche ed analisi statistiche, eventuali correlazioni con gli eventi pluviometrici registrati durante il periodo in esame dalla stazione meteorologica di Roncadin, vicino a Chies d'Alpago.

Per tali analisi si dispone delle precipitazioni orarie raccolte dalla stazione di Roncadin fino al 20/06/2013 e di un totale di 1070 foto raccolte nel periodo che va dal 18/11/2011 al 30/08/2013, delle quali però se ne utilizzano 845 a causa del disturbo di vari fattori.

3.1 Installazione e strumentazione

Una volta definito lo scopo del monitoraggio, ed aver quindi individuato la strumentazione adeguata per conseguirlo, è necessario verificare la presenza di una zona idonea per l'installazione e la gestione del sistema, che garantisca accessibilità e comodità nelle operazioni da svolgere.

Nel caso del Tessina la scelta dell'ubicazione è stata leggermente vincolata dalla presenza, in sinistra orografica (zona Moda), di una stazione del CNR, la quale ha fornito degli elementi utili all'installazione ed è inoltre facilmente raggiungibile per eventuali interventi di manutenzione e prelievo di dati.

Da questa posizione, situata a 1005 m s.l.m. in destra orografica della frana, è possibile osservare gran parte del dissesto ed in particolare il coronamento in sinistra orografica, l'accumulo superiore e l'inizio del canalone di convogliamento verso valle (Figura 3.1).



Figura 3.1: Vista della zona sorgente della frana dalla stazione di monitoraggio fotogrammetrico (*Foto scattata da una delle fotocamere*)

Come si osserva in Figura 3.2, la stazione si trova in una zona boschiva ed è quindi priva di copertura di rete telefonica, impedendo così l'installazione di un sistema di controllo remoto, ed inoltre, la crescita della vegetazione davanti alle fotocamere rende inutilizzabili le foto soprattutto nel periodo primaverile/estivo.



Figura 3.2: Vista della stazione di monitoraggio fotogrammetrico (*Foto da me realizzata*)

Il sistema di monitoraggio è composto da:

- 2 Fotocamere digitali Canon EOS 550D per l'acquisizione delle immagini.
- Un computer per l'archiviazione delle foto e l'invio di una mail di conferma di funzionamento del sistema.
- 2 webcam per la sorveglianza della stazione.

ed è stato assemblato dal Dottor Fabio Gabrieli e dagli allora tesisti Lorenzo Pacagnella e Giovanni Gidoni, i quali hanno installato le due fotocamere, assieme ad una vaschetta di sali anti-umidità, all'interno di cassette IP66 50x70 cm posizionate sotto delle lamiere inclinate per proteggerle dagli eventi atmosferici. Una cassetta è stata posizionata sopra un muretto in calcestruzzo adiacente l'edificio (a), mentre l'altra è stata installata nella sommità di un pilastro in calcestruzzo presente in loco (b) (Figura 3.3).

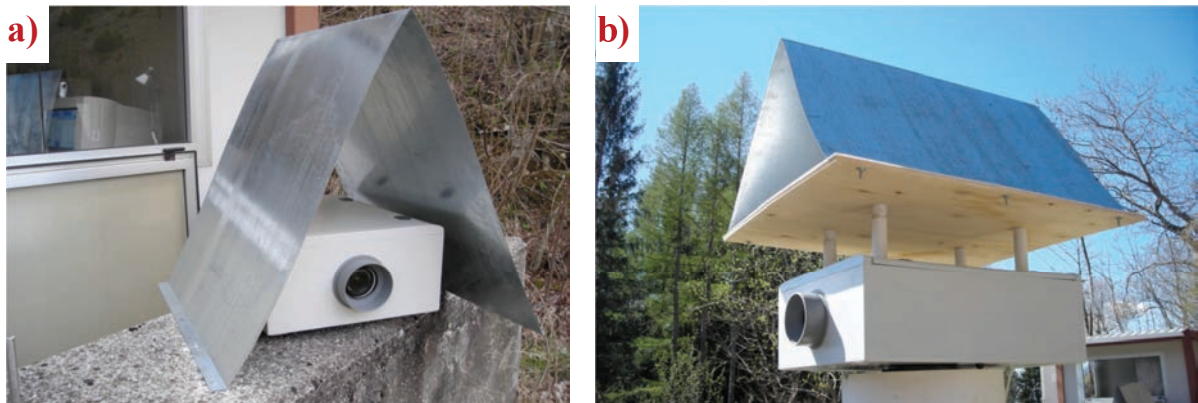


Figura 3.3: Particolare delle due fotocamere e dei loro sistemi di protezione dagli agenti esterni (*Foto da me realizzata*)

Le due fotocamere, leggermente convergenti sul corpo di frana, sono collegate al computer ed alla rete elettrica mediante un cavo di alimentazione, il quale è stato interrato per proteggerlo dal passaggio di persone, animali e dagli eventi atmosferici. All'interno della stazione sono presenti due webcam di sorveglianza, una rivolta verso l'esterno e una verso la porta di ingresso, che scattano una foto al rilevamento di movimento e la inviano per mail agli interessati.

Essendo un fenomeno in lenta evoluzione il sistema è stato settato in modo tale che, alle 12:00 di ogni giorno, le due fotocamere scattino una foto ciascuna e le salvino all'interno del computer in una cartella giornaliera per facilitarne poi il trattamento. Successivamente, grazie ad un software, viene inviata una mail con la conferma o il fallimento dello scatto delle fotografie a determinati contatti, in modo da tenere sotto controllo il funzionamento del processo.

Durante il periodo di attività sono stati necessari numerosi sopralluoghi di controllo e manutenzione volti soprattutto: alla ricalibratura delle fotocamere, al ripristino di componenti danneggiati da fattori esterni (animali, eventi meteorologici...), alla riprogrammazione software ed alla rimozione della vegetazione dal campo visivo delle fotocamere.

3.2 Pregi e difetti

Come anticipato, questo sistema di monitoraggio, ed in particolare il suo contributo nella determinazione degli spostamenti mediante un apposito software, è stato oggetto di numerose tesi triennali nelle quali sono stati messi in evidenza i suoi pregi e difetti principali:

Pregi

Dato il costo ed il tipo di strumentazione e di infrastrutture necessarie, questo metodo risulta essere pratico, economico e di semplice installazione.

Mediante opportuni software è possibile determinare gli spostamenti del materiale grazie all'ottima risoluzione delle fotocamere, che permette inoltre di apprezzare l'evoluzione del dissesto anche solo osservando le immagini in sequenza.

Grazie al software di invio mail è possibile accertare il funzionamento del sistema ed individuare eventuali intrusioni in prossimità della strumentazione.

La zona in cui è installata l'attrezzatura, risulta essere facilmente accessibile per l'eventuale manutenzione e raccolta dati ed inoltre, grazie alle infrastrutture già presenti, l'installazione è stata facilitata anche se leggermente vincolata.

Difetti

Il principale difetto rilevato da tutti gli autori è la dipendenza dagli agenti atmosferici: in presenza di nebbia, neve e tal volta pioggia, le foto sono parzialmente o totalmente inutilizzabili per qualsiasi scopo ed inoltre la strumentazione può subire delle modifiche dei suoi settaggi (ad es. perdita di messa a fuoco nelle fotocamere); tutta via, con delle semplici ed adeguate precauzioni, è possibile limitare tali problemi proteggendo la strumentazione.

Non essendo un sistema di monitoraggio automatico è necessario recarsi in loco per scaricare i dati, i quali quindi risultano retrodatati e non in tempo reale; pertanto tale sistema non può essere utilizzato, ad esempio, per scopi di allertamento.

L'ubicazione della strumentazione, essendo in zona boschiva, risente della presenza di vegetazione la quale, crescendo, ostruisce spesso la visuale delle fotocamere rendendo

totalmente o parzialmente inutilizzabili le foto; si rende quindi necessario recarsi in loco per interventi di rimozione o prevedere un riposizionamento degli strumenti.

3.3 Analisi degli spostamenti

A partire dall'osservazione di tutte le fotografie raccolte si vogliono individuare gli spostamenti ed i meccanismi evoluti del fenomeno franoso, e verificarli infine mediante delle analisi statistiche. Come anticipato precedentemente, il sistema scatta ogni giorno due foto (una per ciascuna fotocamera) che vengono archiviate all'interno del computer in una cartella giornaliera nominandole "IMG_0001" e "IMG_0002".

Come primo passo per l'analisi è necessario estrarre le foto da ogni cartella e rinominarle in funzione della data di scatto e della fotocamera che le ha scattate. Per fare questo si utilizza un programma in *Matlab* realizzato dal Dottor Fabio Gabrieli che permette di creare due nuove cartelle, chiamate "Left" e "Right", all'interno delle quali vengono spostate e rinominate le fotografie nel seguente modo: "Anno-Mese-Giorno_left" per le foto scattate dalla fotocamera posta sul pilastrino (IMG_0001) e "Anno-Mese-Giorno_right" per quelle scattate dalla fotocamera posta sopra il muretto (IMG_0002).

In ciascuna delle due cartelle create è possibile individuare i periodi di non funzionamento del sistema (nei quali una o entrambe le fotocamere non hanno funzionato) e scartare le fotografie inutilizzabili a causa di neve, nebbia o scarsa luminosità (Figura 3.4).



Figura 3.4: Foto scattate dalle fotocamere in presenza di neve e nebbia: il corpo di frana è interamente nascosto

Si modificano alcune foto scure attraverso l'applicazione di un filtro, mediante il software *Microsoft Office Picture Manager*, per migliorarne la luminosità rendendole maggiormente comprensibili.

Essendo il fenomeno in esame complesso e di ampie proporzioni, ed essendo inoltre le foto molto risolte, si suddivide ognuna di esse in due parti (Parte A e Parte B) attraverso la funzione *Crop* del software *IrfanView*, la quale consente di tagliare e zoomare la parte desiderata impostando la coordinata del punto di taglio e le dimensioni dell'immagine risultante (Figura 3.5).

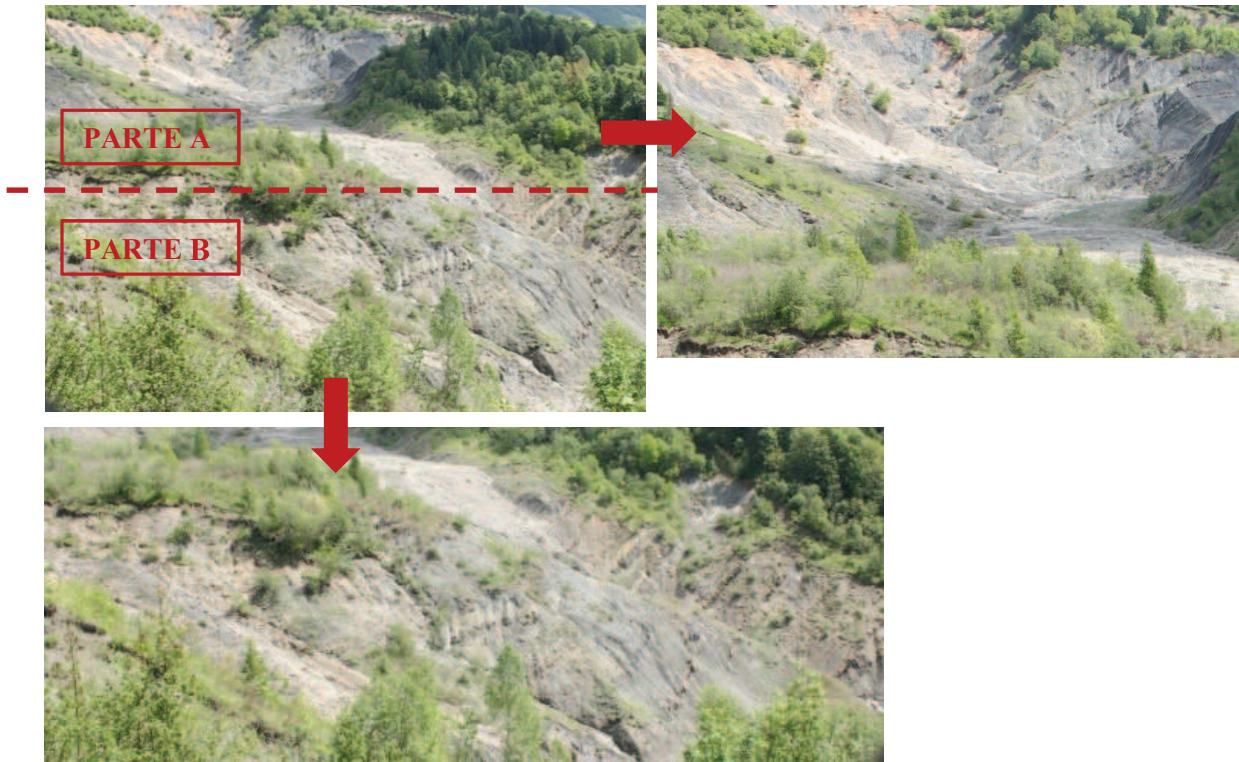


Figura 3.5: Suddivisione di una fotografia scattata dalla fotocamera di sinistra (posta sopra il pilastrino) e particolare delle due parti ottenute.

A causa di perdite di inquadratura subiti dalla fotocamera di sinistra durante alcuni periodi, è necessario modificare i parametri di *Crop* per rendere le foto perfettamente sovrapponibili.

Da questa operazione si ottengono quindi due ulteriori fotografie, rinominate e salvate all'interno di due cartelle "Parte A" e "Parte B", create sia all'interno della cartella "Left" sia in quella "Right".

Per garantire una maggiore precisione nell'individuazione dei movimenti e della loro evoluzione, si suddividono le due parti in zone caratterizzanti la morfologia della frana (5 per la Parte A e 4 per la Parte B) come indicato in Figura 3.6.



Figura 3.6: Zonizzazione delle due parti del corpo di frana in una fotografia scattata dalla fotocamera di sinistra (posta sopra il pilastro)

Grazie a questa fase preliminare, si ha ora a disposizione, per ognuna delle due fotocamere, una serie ordinata di foto relative alla parte alta della frana (Parte A) e una relativa alla parte bassa (Parte B), utilizzabili per l'analisi visiva degli spostamenti.

3.3.1 *Analisi visiva delle fotografie*

Analizzando separatamente le serie di immagini delle due fotocamere si osservano gli spostamenti delle diverse zone facendo scorrere, ad una ad una, le fotografie raccolte nell'arco temporale che va dal 18 Novembre 2011 al 30 Agosto 2013 e si annotano tutte le informazioni in un foglio Excel così fatto (Tabella 3.1):

LEFT													
ANNO	MESE	DATA	ORA	PARTE A					PARTE B				TOTALE
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2011	DICEMBRE	01/12/2011	13:05	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
		02/12/2011	13:05	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
		03/12/2011	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
		04/12/2011	13:05	x	x	x	x	x	0	0	0	0	X
		05/12/2011	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
		06/12/2011	13:05	x	x	x	x	x	0	0	0	0	X
		07/12/2011	13:05	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
		08/12/2011	13:05	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

RIGHT													
ANNO	MESE	DATA	ORA	PARTE A					PARTE B				TOTALE
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2011	DICEMBRE	01/12/2011	13:05	0	0	0	1	0	0	P	P	P	P
		02/12/2011	13:05	0	0	0	1	0	0	P	P	P	P
		03/12/2011	13:05	x	x	x	x	x	0	P	P	P	X
		04/12/2011	13:05	x	x	x	x	x	0	P	P	P	X
		05/12/2011	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
		06/12/2011	13:05	x	x	x	x	x	0	P	P	P	N
		07/12/2011	13:05	0	0	0	1	0	0	P	P	P	1
		08/12/2011	13:05	0	0	0	1	0	0	P	P	P	1

Tabella 3.1: Estratto del foglio di calcolo realizzato durante l'analisi visiva delle fotografie

dal quale è possibile conoscere:

- Presenza o assenza giornaliera di spostamento della singola zona (presenza spostamento=1, assenza spostamento=0).
- Numero di zone mobilitate per ogni giorno (Totale)
- Giorni in cui il sistema non ha funzionato (assenza di fotografia indicata con il simbolo “-“).
- Giorni in cui è presente neve (segnati con la lettera NE e colorando la data di blu).
- Giorni in cui è presente nebbia (segnati con lettera N).
- Giorni in cui la foto è risultata scura (segnati con la lettera S).
- Giorni in cui non è stato possibile capire l'evoluzione della frana (segnati con la lettera X), dovuti principalmente ai cambi di luminosità.
- Giorni in cui il corpo di frana non è visibile per la presenza di vegetazione (segnati con la lettera P).

Si inizia l'analisi con l'osservare, facendole scorrere in sequenza, le fotografie scattate dalla fotocamera di sinistra (posta sul pilastrino) la quale, a parte una perdita di inquadratura e messa a fuoco durante il periodo che va dal 07/01/12 al 10/04/12, inquadrando da una posizione più elevata il corpo di frana, consente una visione migliore dell'area in esame ed inoltre, durante il periodo di osservazione, ha funzionato abbastanza regolarmente senza prolungati "periodi ciechi".

Successivamente si analizza la serie di fotografie scattate dalla fotocamera di destra (posta sul muretto) la quale presenta numerosi "periodi ciechi" causati sia dal non funzionamento del sistema, sia soprattutto dalla crescita di vegetazione davanti all'obbiettivo che impedisce di osservare la parte inferiore del corpo di frana.

Integrando e confrontando le informazioni raccolte dalla fotocamera di sinistra con quelle raccolte dalla fotocamera di destra è possibile diminuire notevolmente i "periodi ciechi", correggere alcune osservazioni fatte sugli spostamenti e realizzare un foglio di calcolo finale contenente il comportamento della frana durante il periodo di osservazione.

Per apprezzare gli spostamenti si osservano le foto facendole scorrere in sequenza a coppie successive, o a gruppi qualora ci fosse qualche insicurezza sui movimenti; questa operazione si ripete più volte prestando particolare attenzione ad ogni singola zona. Si segnala che, durante il periodo che va dal 07/01/12 al 10/04/12, l'individuazione degli spostamenti risulta difficile a causa di una perdita di fuoco e spostamento di inquadratura della fotocamera di sinistra (posta sopra il pilastrino).

Grazie alla sua semplicità, quest'analisi risulta un buon punto di partenza per lo studio degli spostamenti in un fenomeno franoso, in quanto è possibile individuare immediatamente il meccanismo di movimento e la sua evoluzione nel tempo solamente scorrendo le foto scattate; tali informazioni rappresentano un buon punto di partenza per le analisi future. Avendo a disposizione fotografie molto risolte, ed avendole suddivise in due parti, è stato possibile facilitare il lavoro concentrando l'attenzione su porzioni di frana ridotte, aumentando quindi la precisione dell'osservazione. La bontà dell'analisi dipende in gran parte dalla qualità delle immagini, da fattori esterni, dalla vicinanza del fenomeno da studiare ed in buona parte dall'operatore, il quale deve svolgere un'osservazione quanto più precisa possibile facendo scorrere ripetutamente le fotografie a coppie, focalizzandosi sulle zone individuate; questa operazione non risulta essere difficoltosa né richiede grandi strumentazioni, ma si presenta solamente laboriosa in termini di tempo.

La maggiore difficoltà riscontrata nell'analisi visiva degli spostamenti è il cambio di luminosità, che induce l'osservatore ad interpretare come movimento un cambio locale di colore.

Come anticipato inoltre, non si dispone della serie continua di foto a causa di problemi tecnici sopraggiunti, e molte di esse sono state scartate per l'impossibilità di essere utilizzate a causa di eventi metereologici come neve, nebbia, piogge o scarsa luminosità; questo comporta la presenza di grandi "periodi cechi" i quali provocano la visione di spostamenti considerevoli tra le date antecedenti e quelle successive, e non consentono di stabilire se essi si manifestino durante tale periodo o se avvengono in meno tempo (ad esempio in un paio di giorni).

Nel caso in esame si riconosce il meccanismo di movimento illustrato in Figura 3.7: il materiale derivante dalle zone 1,2,3 e 4 confluisce verso la zona 5, caratterizzata da una minor pendenza, dove si accumula per poi venire spinto a valle dalle successive colate di monte. In particolare si osserva che la zona 3 spinge frontalmente il materiale della zona 5, mentre le zone 2 e 4 vi confluiscono lateralmente da destra e sinistra; sembrerebbe quindi che tale zona si mobiliti preferibilmente a seguito dell'arrivo del materiale dalla zona 3. Una volta raggiunto un certo "grado di riempimento", il successivo arrivo di materiale provoca la mobilitazione dell'intera zona (zona 5) la quale si sposta verso valle lungo il canalone (zona 6).

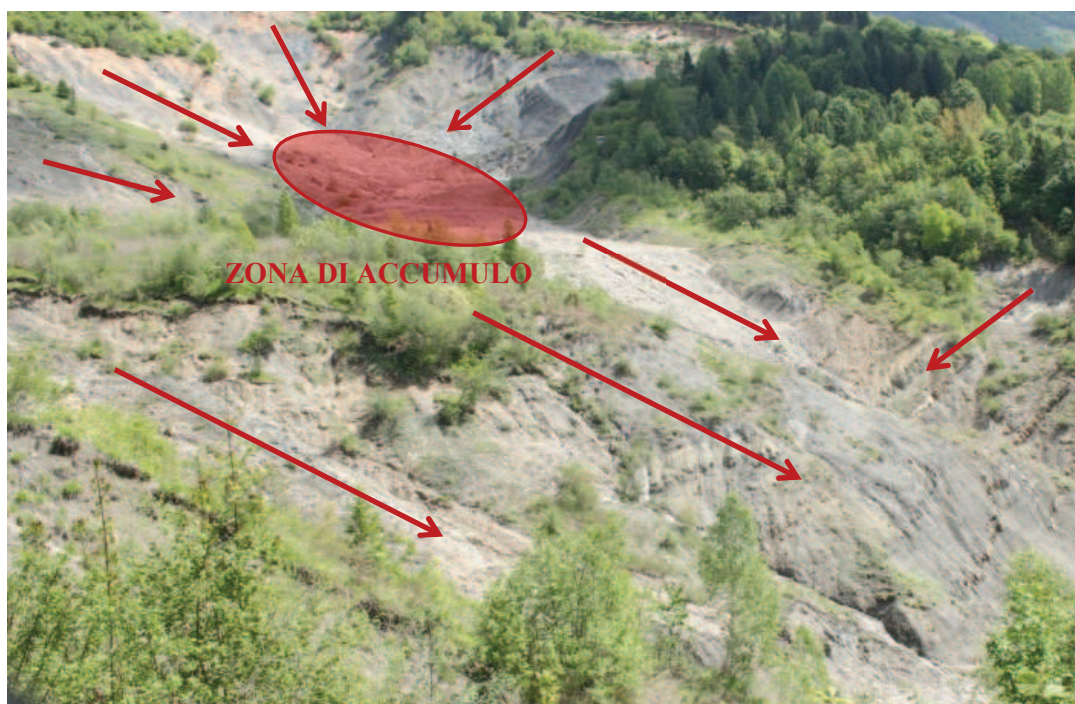


Figura 3.7: Rappresentazione del meccanismo di movimento osservato su una fotografia scattata dalla fotocamera di sinistra (posta sopra il pilastrino)

Le zone 7, 8 e 9 presentano movimenti apparentemente indipendenti, caratterizzati da scivolamenti e colate, essendo situate in parti esterne al meccanismo sopraccitato.

In particolare, a seguito di un recente sopralluogo in destra orografica, si è individuata un'altra porzione di frana indipendente da quella inquadrata nelle fotografie, ma che apporta materiale lungo un canalone, la cui parte finale è rappresentata dalla zona 8 (Figura 3.8).



Figura 3.8: Versante di alimentazione della zona 8 (a) e particolare del versante in zona 9 (b) (foto da me realizzate)

Si nota che la zona 9, versante di Pian de Cice, è fortemente soggetta a fenomeni di erosione nella parte alta e che le masse mobilitate scivolano all'interno di "canali naturali" delimitati da creste rocciose sporgenti, evidenziando la diversa natura del terreno componente in versante (Figura 3.8). Tale comportamento è simile a quello della zona 4 nella quale si nota l'erosione della sommità alberata, ed il fluire del materiale all'interno di un canale delimitato da sponde rocciose.

La zona 3, rappresentante il coronamento, risulta fortemente soggetta ad erosione, crolli localizzati e, analogamente alla zona 4, manifesta movimenti di intensità tale da rimuovere parti di versante alberate, convogliandole poi verso valle.

Nei mesi di Aprile, Maggio, Novembre 2012 e Maggio 2013, solamente osservando due foto in sequenza, è possibile vedere degli spostamenti di grandi masse di materiale indicando quindi dei periodi di accelerazione, probabilmente dovuti alle abbondanti precipitazioni cadute in quei mesi; il materiale assume una consistenza fangosa con una matrice granulare di diversa pezzatura, e scivola lungo i versanti stabili fino a giungere nell'accumulo superiore.

Dalle foto inoltre è possibile individuare numerosi ruscellamenti di materiale fangoso molto liquido che si manifestano sia durante gli spostamenti che nei periodi di scioglimento delle nevi, e la creazione di un "imbuto" a monte della zona 5 durante il mese di Ottobre 2012, il quale viene chiuso dall'apporto successivo del materiale di colata convergente lateralmente dalle zona 2 e 4 e frontalmente dalla zona 3. Alla fine del mese di Maggio 2013

si nota chiaramente lo “svuotamento” della zona d’accumulo (zona 5) ed il successivo arrivo del materiale nel canalone (zona 6) come una massa di fango molto viscoso.

Grazie al foglio di calcolo ottenuto, è possibile realizzare un cromogramma che consente, attraverso l’uso dei colori, di individuare i periodi di maggior attività della frana in funzione del numero di zone mobilitate e della continuità di movimento. Per fare questo si utilizza la funzione “formattazione condizionale” di Excel che permette di colorare diverse caselle in funzione del contenuto:

- Rosso: Presenza di spostamento (casella contenente 1)
- Giallo: assenza di spostamento (casella contenente 0)
- Bianco: assenza della fotografia o dell’informazione di spostamento

ottenendo così una rappresentazione grafica del comportamento della frana durante il periodo analizzato (Tabella 3.2):

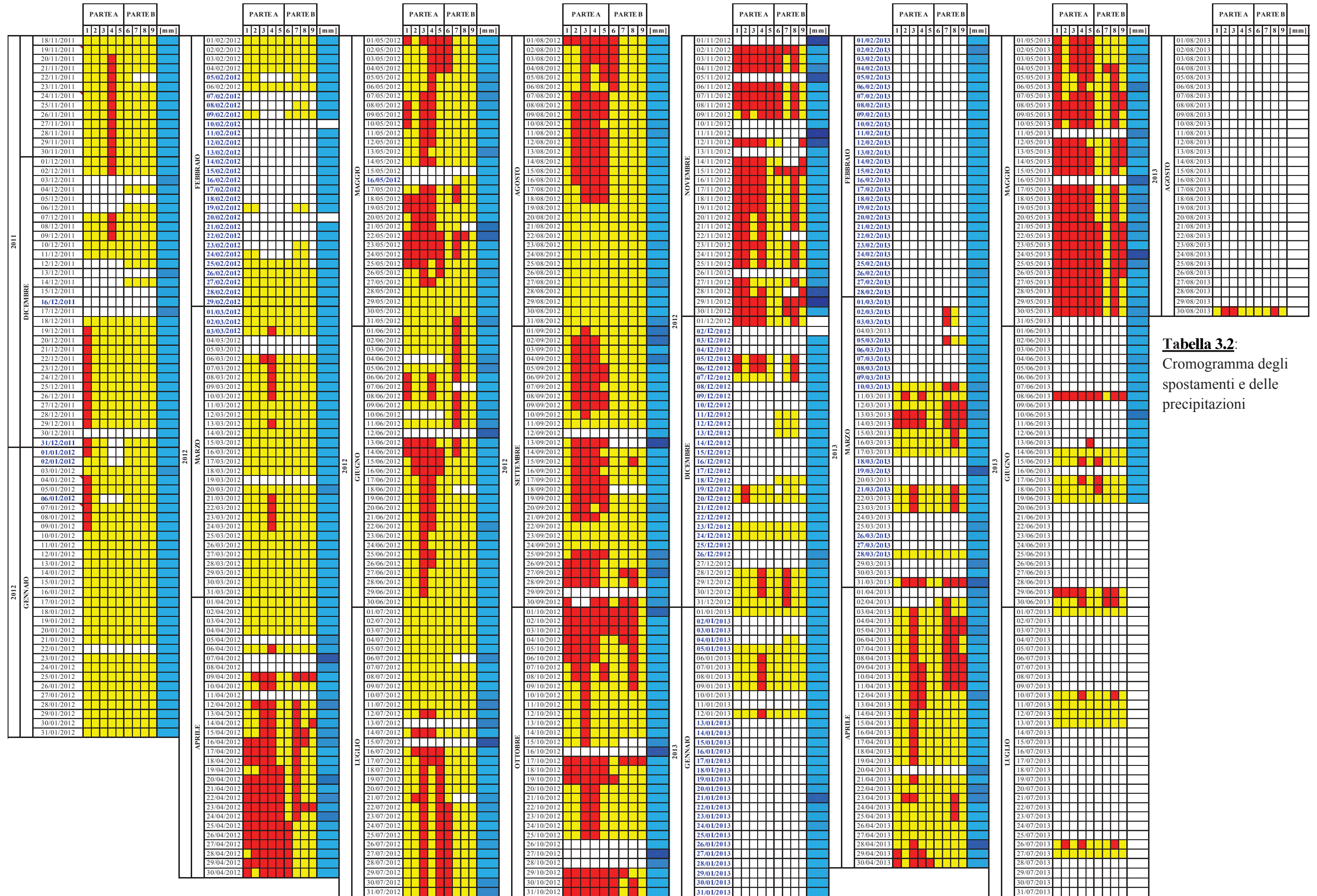


Tabella 3.2:
Cromogramma degli spostamenti e delle precipitazioni

Da tale rappresentazione è possibile apprezzare il meccanismo di movimento sopracitato infatti, nei periodi di maggior attività della frana, si osserva che dopo la mobilitazione delle zone di monte si ha il movimento della zona 5 e successivamente quello della zona 6; tale evento è molto evidente nel Aprile 2012 (Tabella 3.3).

È possibile notare inoltre che, a differenza dei periodi precedenti caratterizzati da inattività con spostamenti isolati di singole zone, a partire dall'Aprile 2012 si verificano mobilitazioni di numerose zone della frana distribuite in tutto l'arco temporale successivo. Tra questi si distinguono i momenti di maggiore attività, identificati considerando uno spostamento di almeno 3 zone o comunque periodi di spostamento prolungato (si sono omessi eventuali giorni isolati di inattività):

- Dal 09/04/12 al 28/05/12
- Dal 13/06/12 al 22/06/12
- Dal 16/07/12 al 18/08/12
- Dal 02/09/12 al 01/12/12
- Dal 31/03/13 al 13/04/13
- Dal 29/04/13 al 30/05/13

ANNO	MESE	PARTE A					PARTE B			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2012	APRILE									

Tabella 3.3: Estratto del cromogramma (Aprile 2012)

Tra tutti, i periodi più attivi per mobilitazione del maggior numero di zone e continuità di movimento, risultano essere Ottobre, Novembre 2012 e Maggio 2013.

Nei mesi di Gennaio e Febbraio 2013, a causa della presenza della neve, non è stato possibile utilizzare tutte le informazioni derivanti dalle fotografie ed inoltre, tra Giugno ed Agosto 2013, il sistema non ha funzionato con continuità, lasciando ampi “periodi ciechi”.

Si rilevano due principali periodi di inattività del movimento franoso: dal 30/06/12 al 11/07/12 e dal 19/08/12 al 31/08/12 ; tali periodi corrispondono ai mesi estivi durante i quali solitamente non avvengono grandi precipitazioni, suggerendo quindi una qualche correlazione piogge/spostamenti. Si osserva inoltre che le zone di monte si mobilitano più frequentemente di quelle di valle, concorde a quanto esposto nell’analisi visiva delle fotografie: esse inizialmente depositano il materiale nell’accumulo superiore (zona 5) e successivamente lo spingono verso valle interessando il canalone (zona 6).

Generalmente è possibile affermare che una volta che una zona si mobilita, continua il suo spostamento per diversi giorni, rari sono i casi in cui si osserva un movimento isolato seguito da periodi di inattività.

3.3.2 *Analisi statistiche degli spostamenti rilevati*

Per verificare la bontà del lavoro svolto nell'analisi visiva della fotografie, e confermare il meccanismo di movimento individuato, si utilizzano delle analisi statistiche che consentono di ricercare le dipendenza tra gli spostamenti delle diverse zone.

In particolare si vuole confermare la dipendenza del movimento della zona 5 da quello delle zone situate a monte e la dipendenza del movimento della zona 6 da quello della zona 5 ed ovviamente anche da quelle di monte; per fare questo si utilizza il software *Minitab*, il quale permette di realizzare con semplicità molte analisi statistiche.

Test Chi-quadrato per l'indipendenza

Questo metodo statistico inferenziale consente di verificare la presenza di dipendenza, o indipendenza, tra due variabili categoriali attraverso la verifica d'ipotesi:

H_0 : ($X \perp Y$): le due variabili categoriali sono indipendenti

H_1 : ($X \not\perp Y$): le due variabili categoriali sono dipendenti

Preliminarmente è necessario realizzare delle tabelle di contingenza con r righe e c colonne, nelle quali siano presenti i conteggi degli eventi che si manifestano quando le due variabili assumono determinati valori (frequenze congiunte). Per fare questo si utilizza un foglio di calcolo in Excel nel quale, a partire dalle informazioni di spostamento raccolte nell'analisi visiva delle foto, si realizzano delle "tabelle pivot", cioè tabelle a doppia entrata (riga e colonna) nelle quali si calcolano le frequenze congiunte tra gli spostamenti della zona 5 e quelli delle zone situate più a monte (zona 1,2,3,4); lo stesso si fa per la zona 6. Si riportano di seguito le tabelle realizzate per entrambe le zone:

FREQUENZE OSSERVATE Zona 5-Zona 1			
	Sp_5		
Sp_1	0	1	Tot.
0	238	53	291
1	59	61	120
Tot.	297	114	411

FREQUENZE OSSERVATE Zona 5-Zona 2			
	Sp_5		
Sp_2	0	1	Tot.
0	246	35	281
1	51	78	129
Tot.	297	113	410

FREQUENZE OSSERVATE Zona 5-Zona 3			
	Sp_5		
Sp_3	0	1	Tot.
0	186	5	191
1	111	108	219
Tot.	297	113	410

FREQUENZE OSSERVATE Zona 5-Zona 4			
	Sp_5		
Sp_4	0	1	Tot.
0	170	21	191
1	127	93	220
Tot.	297	114	411

FREQUENZE OSSERVATE Zona 6-Zona 1			
	Sp_6		
Sp_1	0	1	Tot.
0	266	23	289
1	89	32	121
Tot.	355	55	410

FREQUENZE OSSERVATE Zona 6-Zona 2			
	Sp_6		
Sp_2	0	1	Tot.
0	260	23	283
1	94	32	126
Tot.	354	55	409

FREQUENZE OSSERVATE Zona 6-Zona 3			
	Sp_6		
Sp_3	0	1	Tot.
0	185	7	192
1	167	48	215
Tot.	352	55	407

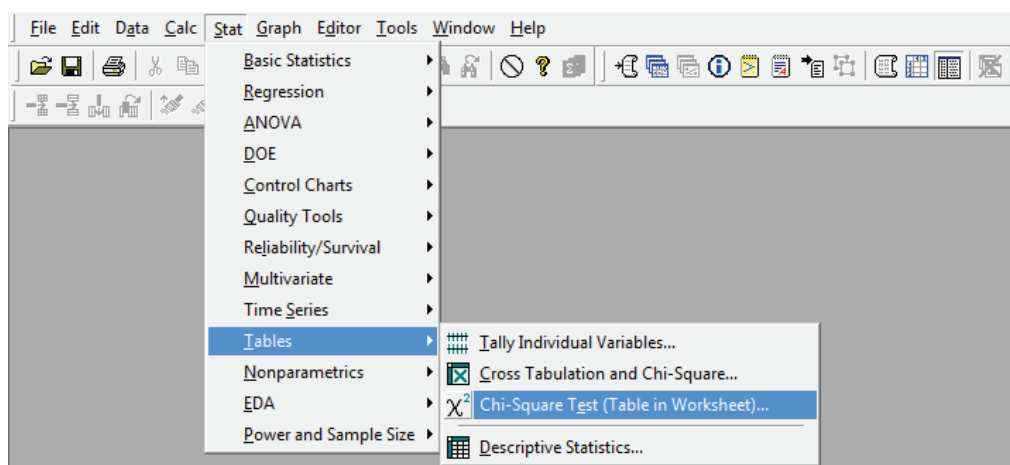
FREQUENZE OSSERVATE Zona 6-Zona 4			
	Sp_6		
Sp_4	0	1	Tot.
0	175	14	189
1	175	41	216
Tot.	350	55	405

FREQUENZE OSSERVATE Zona 6-Zona 5			
	Sp_6		
Sp_5	0	1	Tot.
0	288	5	293
1	62	50	112
Tot.	350	55	405

Tabella 3.4: Tabelle di contingenza delle zone 5 e 6

Una volta fatto questo si importano i valori delle frequenze congiunte all'interno del software *Minitab* e si esegue il seguente procedimento:

- 1) Dal menù Stat → Tables si seleziona Chi-Square Test



- 2) Nella finestra Chi-Square Test si inseriscono le colonne contenenti le frequenze congiunte e si esegue l'analisi, ottenendo il seguente output (per comodità si riporta quello tra la zona 5 e la zona 1):

Chi-Square Test: Sp_1 (0); Sp_1 (1)

Expected counts are printed below observed counts
Chi-Square contributions are printed below expected counts

Sp_1 (0)	Sp_1 (1)	Total	
1	238	53	291
210,28	80,72		
3,653	9,517		
2	59	61	120
86,72	33,28		
8,858	23,078		
Total	297	114	411

Chi-Sq = 45,106; DF = 1; P-Value = 0,000

Il software fornisce il parametro Chi-Sq che rappresenta il valore della statistica test osservata, determinato mediante la relazione:

$$\chi^2 = \sum_{celle} \frac{(f_0 - f_e)^2}{f_e} \quad (3.1)$$

nella quale f_0 rappresenta la frequenza osservata (presente nella tabella di contingenza) e f_e rappresenta la frequenza attesa determinata mediante la seguente relazione:

$$f_e = \frac{tot.riga \times tot.colonna}{n} \quad (3.2)$$

Se il valore della statistica test risulta maggiore del valore critico presente nelle tavole statistiche (Tabella 3.5) fissato un livello di significatività $\alpha=0,05$ e determinato i gradi di libertà, l'ipotesi nulla di indipendenza delle variabili deve essere rifiutata, ed è quindi possibile affermare che le variabili sono dipendenti tra loro. I gradi di libertà vengono calcolati mediante la seguente relazione:

$$g.d.l. = (r - 1)(c - 1) \quad (3.3)$$

dalla quale si ottiene, per ogni test Chi-quadrato, un valore del g.d.l. pari ad 1, essendo le tabelle di contingenza composte da due colonne e due righe.

Tavola distribuzione CHI-QUADRATO

Gradi di libertà	Livello di Probabilità α									
	1.00	0.99	0.95	0.90	0.25	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005
1				0.02	1.32	2.71	3.84	5.02	6.64	7.88
2	0.01	0.02	0.10	0.21	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.07	0.12	0.35	0.58	4.11	6.25	7.82	9.35	11.35	12.84
4	0.21	0.30	0.71	1.06	5.39	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86
5	0.41	0.55	1.15	1.61	6.63	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.68	0.87	1.64	2.20	7.84	10.65	12.59	14.45	16.81	18.55

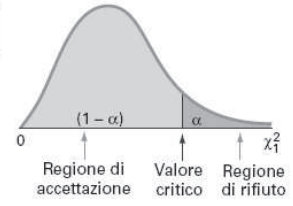


Tabella 3.5: Tavole statistiche per la distribuzione chi-quadrato

Si riportano di seguito i valori della statistica test ottenuti nell'analisi di dipendenza tra le zone di monte e le due zone di valle 5 e 6, i quali si confrontano successivamente con il valore critico per stabilire se l'ipotesi nulla va rifiutata o meno.

VALORI CHI-QUADRATO ZONA 5				Valore critico
Zona	Chi-quadrato	p-value	g.d.l.	3,84
1	45,106	0,000	1	Rifiutata
2	102,071	0,000	1	Rifiutata
3	111,432	0,000	1	Rifiutata
4	49,901	0,000	1	Rifiutata
VALORI CHI-QUADRATO ZONA 6				Valore critico
Zona	Chi-quadrato	p-value	g.d.l.	3,84
1	25,098	0,000	1	Rifiutata
2	22,34	0,000	1	Rifiutata
3	30,281	0,000	1	Rifiutata
4	11,506	0,000	1	Rifiutata
5	127,28	0,000	1	Rifiutata

Tabella 3.6: Valori della statistica test per ogni zona analizzata e confronto con il valore critico

Si osserva che l'ipotesi nulla deve essere sempre rifiutata, ed è quindi possibile affermare che esiste una dipendenza tra gli spostamenti delle singole zone di monte e quelli delle zone di valle analizzate (5 e 6); tale affermazione è supportata dal valore della statistica test, il quale risulta elevato per tutte le analisi effettuate (solitamente è sufficiente che esso sia maggiore di 10).

In particolare, in base ai valori del parametro Chi-Sq, lo spostamento della zona 5 risulta maggiormente dipendente dallo spostamento delle zone 2 e 3, mentre la zona 6 dallo spostamento della zona 5, com'era lecito aspettarsi.

Tali risultati sembrerebbero rispecchiare quanto emerso dall'analisi visiva delle fotografie infatti, come esposto precedentemente, la zona 6 entra in movimento all'arrivo del materiale dalla zona 5 mentre quest'ultima si mobilita grazie alla spinta ricevuta frontalmente dalla zona 3 dalla



quale, essendo essa molto vasta e caratterizzata apparentemente da una maggior pendenza, è ragionevole pensare che il materiale arrivi con maggiore energia rispetto alla zona 2, situata leggermente sulla destra orografica.

Si osserva inoltre che per la zona 6 la seconda zona da cui risulta maggiormente dipendente è la 3, cioè quella maggiormente influente sulla zona 5, in perfetto accordo con quanto esposto precedentemente; pertanto sembrerebbe possibile riassumere un meccanismo principale di questo tipo:



Regressione Logistica Binaria

Questo modello statistico inferenziale, a differenza del test Chi-quadrato nel quale si esaminano ad uno ad uno gli effetti delle singole variabili sulla risposta, consente di eseguire un'analisi multivariata, cioè permette di valutare l'effetto simultaneo delle variabili sulla risposta, la quale è espressa in forma dicotomica. Anche in questo caso si utilizza il software *Minitab*, che permette di verificare quali spostamenti delle zone di monte hanno effetto sugli spostamenti delle zone di valle (zona 5 e zona 6).

Essendo la risposta in forma dicotomica si ottiene una relazione non lineare tra le variabili, impedendo l'applicazione del metodo dei minimi quadrati a meno di eseguire una trasformazione che renda lineare la relazione nei termini dei parametri (*Berry & Feldman, 1985*). Per fare questo è possibile ricorrere ad una trasformazione logaritmica della variabile dipendente, ottenendo il seguente modello:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0 \quad p_i(Y = 1) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik})}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik})}} \quad (3.4)$$

$$H_1: \exists \beta_j \neq 0$$

$$\log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} \dots \beta_k X_{ik} \quad (3.5)$$

nel quale il termine β_0 rappresenta l'intercetta, i termini β_k i coefficienti dei singoli regressori e gli X_{ik} le variabili indipendenti (regressori).

Nella verifica d'ipotesi H_0 rappresenta l'ipotesi nulla relativa alla nullità dell'effetto dei regressori, la quale viene rifiutata se, fissato un livello di significatività $\alpha=0,05$, il termine p-value della statistica test G risulta minore di tale valore, consentendo di affermare che esiste

almeno una variabile che ha effetto significativo sulla risposta (almeno uno dei regressori ha coefficiente β diverso da zero).

Essendo la variabile risposta espressa in forma dicotomica, essa definisce l'appartenenza ad un gruppo (o all'altro), pertanto i valori che vengono assegnati ai livelli sono arbitrari. Ciò che interessa, dunque, non è il valore atteso (predetto), ma la probabilità che un dato soggetto appartenga almeno ad uno dei due gruppi.

Un modo per risolvere il problema dell'assegnazione dei gruppi è quello di sostituire la probabilità con l'*Odds*.

Tale parametro consente di rappresentare la probabilità tramite il rapporto delle frequenze osservate in un livello, con quelle osservate nell'altro (rappresenta quindi il rapporto di probabilità di due eventi complementari).

Per esprimere la relazione tra due categorie in funzione di un'altra variabile (valutare cioè l'associazione tra due variabili) è possibile utilizzare un altro indice chiamato *Odds Ratio*, il quale si ottiene facendo un rapporto tra gli *Odds* di una variabile (ad esempio la Y) ottenuti per ciascun livello della seconda variabile (ad esempio la X).

Ci si domanda quindi quale sia la relazione tra il rapporto (*Odds*) della “presenza di spostamento” e “assenza di spostamento” in zona i quando la zona j si mobilita, e della “presenza di spostamento” e “assenza di spostamento” in zona i quando la zona j è ferma. Per fare questo si utilizza una tabella di contingenza all'interno della quale si determinano le frequenze congiunte.

FREQUENZE OSSERVATE Zona i-Zona j			
	Spostamenti zona i		
Spostamenti zona j	1	0	Tot.
1	a	b	-
0	c	d	-
Tot.	-	-	-

$$OR = \frac{Odds\ 1}{Odds\ 2} = \frac{a/b}{c/d} \tag{3.6}$$

Se tale valore risulta pari ad 1 significa che il rischio di avere l'evento ($Y=1$) non è modificato dalla variabile, se invece assume valori maggiori di 1, il rischio aumenta, minori di 1, diminuisce; maggiore è l'*Odds Ratio*, maggiore è la probabilità che gli spostamenti della zona i si verifichino a causa dello spostamento della zona j, rispetto a quelli che si verificano quando la zona j è ferma. Si riporta un esempio:

FREQUENZE OSSERVATE Zona 5-Zona 6			
	Spostamenti zona 6		
Spostamenti zona 5	1	0	Tot.
1	Sp ₅ (1)Sp ₆ (1)	Sp ₅ (1)Sp ₆ (0)	-
0	Sp ₅ (0)Sp ₆ (1)	Sp ₅ (0)Sp ₆ (0)	-
Tot.	-	-	-

$$OR = \frac{a/b}{c/d} = \frac{Sp_5(1)Sp_6(1)/Sp_5(1)Sp_6(0)}{Sp_5(0)Sp_6(1)/Sp_5(0)Sp_6(0)} = 3$$

$$\frac{Sp_5(1)Sp_6(1)}{Sp_5(1)Sp_6(0)} = 3 \frac{Sp_5(0)Sp_6(1)}{Sp_5(0)Sp_6(0)}$$

L'*Odds Ratio* risulta pari a 3 il che significa che la probabilità di osservare lo spostamento della zona 6 quando la zona 5 si muove è pari a 3 volte la probabilità di osservare spostamento della zona 6 quando la zona 5 appare ferma.

Una volta calcolato l'*Odds* è possibile quindi determinarne il logaritmo, ovvero il logit:

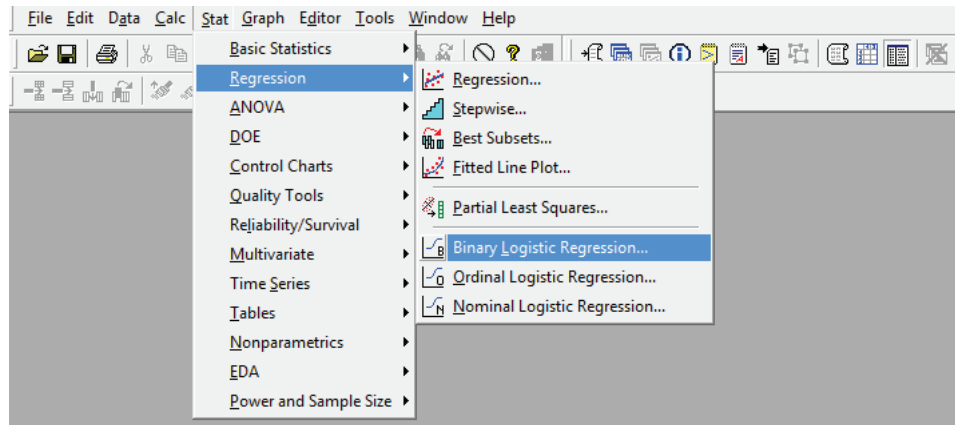
$$\log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \log\left(\frac{\text{probabilità che } Y=1}{\text{probabilità che } Y=0}\right) \quad (3.7)$$

I parametri β stimati sono pari al logaritmo dell'*Odds Ratio* della variabile corrispondente e pertanto rappresentano la variazione della variabile risposta all'aumento unitario della variabile indipendente corrispondente; se l'*Odds Ratio* assume valore maggiore di uno, indicando quindi che una variazione della variabile aumenta la probabilità di avere l'evento, il coefficiente risulta positivo. La stima dei coefficienti dei regressori, a differenza della regressione lineare nella quale si utilizza il metodo dei minimi quadrati, si esegue attraverso un processo iterativo chiamato stima di massima verosimiglianza, che stima i parametri del modello in modo da massimizzare la funzione (*log-likelihood function*) ed indicare quanto è probabile ottenere il valore atteso di Y dati i valori delle variabili indipendenti. È importante sottolineare che la probabilità, il *logit* e l'*odds*, sono tre differenti modi per esprimere la stessa cosa.

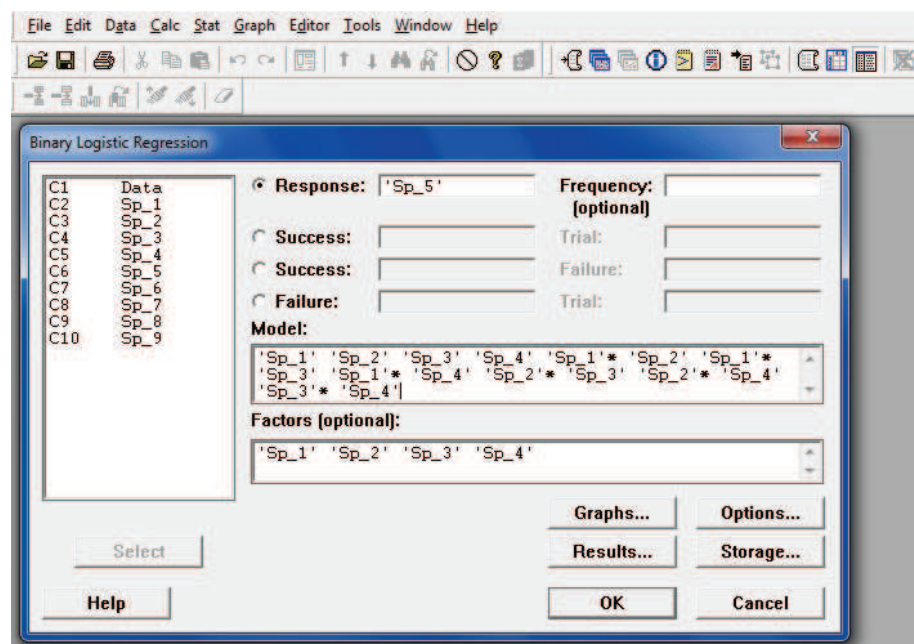
Una volta eseguita la regressione, è possibile rimuovere le variabili che non hanno effetto significativo sulla risposta mediante una procedura di *stepwise*, la quale però non può essere eseguita in modo automatico dal software ed è quindi necessario realizzarla "a mano": si ripete più volte la regressione andando ad escludere di volta in volta le variabili con p-value maggiore del livello di significatività fissato $\alpha=0,05$, fino a restare con le sole variabili significative.

Per iniziare l'analisi è necessario importare su *Minitab* il foglio di calcolo contenente gli spostamenti delle zone ed eseguire il seguente procedimento:

- 1) Dal menù Stat → Regression si seleziona Binary Logistic Regression



- 2) Dal menù Binary Logistic Regression si inserisce come “Response” la variabile dipendente (in questo caso la colonna contenente gli spostamenti della zona in esame) e come “Model” le variabili indipendenti (in questo caso gli spostamenti delle zone di monte e le loro interazioni). Si possono inserire come “Factors” le variabili qualitative (in questo caso gli spostamenti delle zone).



3) Si ottiene il seguente output:

Binary Logistic Regression: Sp_5 versus Sp_1; Sp_2; Sp_3; Sp_4

Link Function: Logit

Response Information

Variable	Value	Count	
Sp_5	1	113	(Event)
	0	297	
	Total	410	

* NOTE * 410 cases were used
 * NOTE * 28 cases contained missing values

Logistic Regression Table

Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	Odds Ratio	95% CI	
						Lower	Upper
Constant	-3,77941	0,547721	-6,90	0,000			
Sp_1							
1	-0,0053512	1,47163	-0,00	0,997	0,99	0,06	17,80
Sp_2							
1	2,39254	1,33484	1,79	0,073	10,94	0,80	149,73
Sp_3							
1	2,76424	0,594751	4,65	0,000	15,87	4,95	50,90
Sp_4							
1	-0,183691	0,467031	-0,39	0,694	0,83	0,33	2,08
Sp_1*Sp_2							
1*1	-1,62872	0,743726	-2,19	0,029	0,20	0,05	0,84
Sp_1*Sp_3							
1*1	0,700239	1,48513	0,47	0,637	2,01	0,11	37,01
Sp_1*Sp_4							
1*1	1,02062	1,65590	0,62	0,538	2,77	0,11	71,25
Sp_2*Sp_3							
1*1	-0,0457481	1,39917	-0,03	0,974	0,96	0,06	14,83
Sp_2*Sp_4							
1*1	-0,600619	1,10240	-0,54	0,586	0,55	0,06	4,76

Log-Likelihood = -156,551
 Test that all slopes are zero: G = 169,680, DF = 9, P-Value = 0,000

4) Dopo aver ripetuto i punti 1), 2), 3) rimuovendo le variabili che presentano via via p-value maggiore, si ottiene l'output definitivo:

Binary Logistic Regression: Sp_5 versus Sp_2; Sp_3

Link Function: Logit

Response Information

Variable	Value	Count	
Sp_5	1	113	(Event)
	0	297	
	Total	410	

* NOTE * 410 cases were used
 * NOTE * 28 cases contained missing values

Logistic Regression Table

Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	Odds Ratio	95% CI	
						Lower	Upper
Constant	-3,77772	0,458245	-8,24	0,000			
Sp_2							

1	1,44687	0,281315	5,14	0,000	4,25	2,45	7,38
Sp_3							
1	2,96203	0,488780	6,06	0,000	19,34	7,42	50,40

Log-Likelihood = -161,024

Test that all slopes are zero: G = 160,735, DF = 2, P-Value = 0,000

Si ripete lo stesso procedimento per la zona 6 non considerando le interazioni tra le zone di monte, in quanto risultano non significative per lo spostamento della zona 5.

Essendo il p-value della statistica test minore del livello di significatività fissato, è possibile affermare che almeno uno dei regressori ha effetto significativo sulla risposta; in particolare per le zone in esame risultano significativi gli spostamenti delle seguenti zone:

Regressori significativi per la ZONA 5			
Zona	β	p-value	Odds ratio
2	1,447	0	4,25
3	2,962	0	19,34

Regressori significativi per la ZONA 6			
Zona	β	p-value	Odds ratio
5	3,838	0	46,45

Tabella 3.7: Variabili significative per le zone 5 e 6

Dai risultati appena esposti è possibile affermare che per la zona 5 hanno effetto significativo i movimenti delle zone 2 e 3, mentre per la 6, solamente quello della zona 5; questi risultati confermano quanto emerso nel test chi-quadrato. In particolare, osservando i valori degli *Odds Ratio*, si osserva che essi risultano essere molto maggiori



dell'unità, indicando quindi un aumento di probabilità di osservare spostamento delle zone in esame per effetto dello spostamento delle zone di monte ottenute dalla regressione. In particolare è possibile affermare che:

- Gli spostamenti della zona 3 aumentano maggiormente la probabilità di osservare lo spostamento della zona 5 rispetto a quelli della zona 2. Questo risultato sembrerebbe corretto in quanto la zona 3 spinge frontalmente la zona 5 facendola entrare in movimento verso valle, mentre la zona 2 agisce lateralmente.

- Gli spostamenti della zona 5 aumentano fortemente la probabilità di osservare lo spostamento della zona 6. Anche questo risultato sembrerebbe corretto in quanto tale zona, essendo situata subito a valle della zona 5, entra in movimento a seguito dell'arrivo del materiale da monte.

Al termine delle analisi eseguite è possibile affermare che, essendo i risultati concordi tra loro e con quanto emerso dall'osservazione delle fotografie, questo procedimento risulta un valido metodo di studio per individuare il meccanismo di movimento di un fenomeno franoso di questo tipo.

3.4 Correlazione tra spostamenti ed eventi pluviometrici

Essendo la frana in esame una colata si vogliono ricercare eventuali correlazioni tra gli spostamenti rilevati dalle fotografie e gli eventi pluviometrici, utilizzando i dati raccolti dalla stazione meteorologica di Roncadin, vicino a Chies d'Alpago.

Presentandosi il fenomeno molto vario ed esteso, un'eventuale correlazione risulterebbe di particolare interesse dal punto di vista previsionale e quindi di sicurezza per gli abitati di Funes e Lamosano.

Dai dati orari disponibili (dal 01/09/11 al 20/06/13) si determinano le precipitazioni giornaliere, considerando le 24 ore a partire dalle 12:00 in modo tale da tener conto di tutte le piogge precedenti allo scatto delle foto. Supponendo che la frana non si mobiliti immediatamente dopo l'evento piovoso, ma richieda più tempo a causa della circolazione idrica sotterranea, si prendono in esame anche le precipitazioni cumulate a 2,3,4,5,6,7,8,9 e 10 giorni. Nell'analisi non si considera l'influenza della presenza e dello scioglimento delle nevi in quanto non facilmente quantificabile.

Con questi dati è possibile realizzare diverse rappresentazioni grafiche, che consentono di valutare qualitativamente la presenza di una relazione tra gli spostamenti osservati nelle fotografie e le precipitazioni, ed eseguire delle analisi statistiche per ottenere dei risultati più precisi.

3.4.1 Rappresentazioni grafiche

Per una prima ricerca qualitativa della presenza di relazione tra spostamenti ed eventi pluviometrici si realizzano delle rappresentazioni grafiche, calcolando le precipitazioni giornaliere a partire dalle 12:00 per considerare tutta la pioggia scesa prima dello scatto della fotografia. Si riporta in Figura 3.9 l'andamento di tali precipitazioni per tutto il periodo in esame.

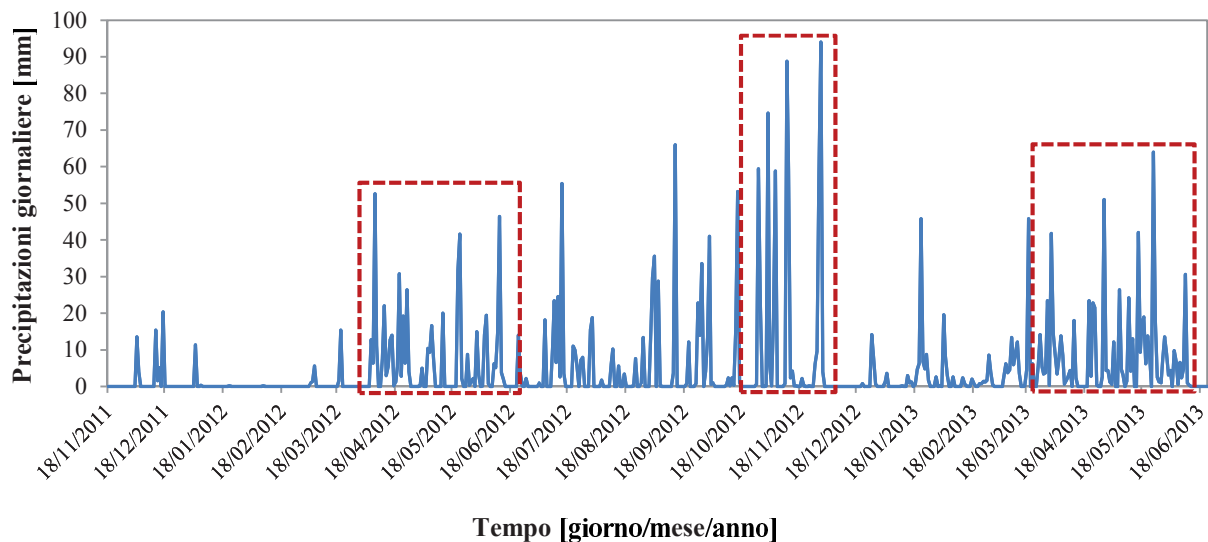


Figura 3.9: Andamento delle precipitazioni giornaliere dal 18/11/2011 al 18/06/2013

Si evidenzia un periodo caratterizzato da piogge intense compreso tra Ottobre e Dicembre 2012, e due periodi di piogge intense e prolungate durante Aprile e Giugno 2012 e 2013.

Grazie a questi dati è possibile integrare il cromogramma precedentemente realizzato per individuare, attraverso i colori, come essi sono distribuiti rispetto ai periodi di maggior attività della frana; per fare questo si utilizza la funzione “formattazione condizionale” di Excel con la quale si assegna alle caselle una gradazione di blu in base al valore di pioggia contenuto.

Dal cromogramma riportato in Tabella 3.2 è possibile osservare che i valori di picco delle precipitazioni sono concentrate nel mese di Novembre 2012, nel quale si rileva anche la mobilitazione di molte zone della frana, mentre nell’Aprile e Maggio 2012 e 2013, altri periodi caratterizzati da numerosi spostamenti, sono presenti rilevanti eventi piovosi distribuiti durante tutto l’arco temporale. Tali osservazioni riassumono quanto rilevato nell’analisi del cromogramma dei soli spostamenti e dal “diagramma pluviometrico”, indicando quindi la presenza di una certa relazione generale tra spostamenti e piogge.

Un’altra rappresentazione che consente di individuare, anche se in modo qualitativo, la relazione tra precipitazioni e movimenti della frana è quella riportata in Figura 3.10 nella quale si considerano le piogge mensili, calcolate come somma delle piogge giornaliere, e gli spostamenti totali della frana durante il singolo mese, i quali in realtà rappresentano solamente il numero di zone movimentate e non lo spostamento vero e proprio; essendo tali valori bassi (massimo 9), essi si incrementano di una certa quantità per rendere più comprensibile la lettura del diagramma.

Relazione tra spostamenti e precipitazioni nella frana del Tessina (Alpago, Italia)

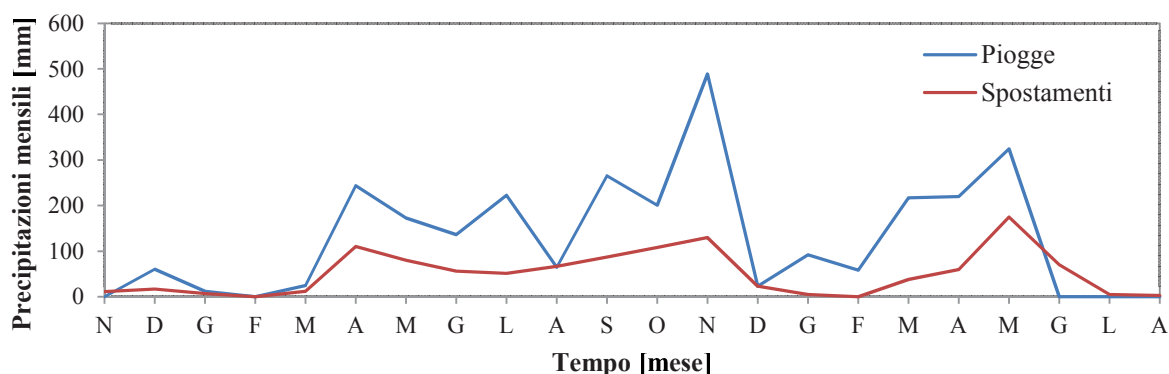


Figura 3.10: Andamento delle precipitazioni mensili e degli spostamenti, calcolati come numero di zone mobilitate mensilmente

Osservando gli andamenti è possibile affermare che, generalmente, quando si ha un aumento di precipitazione, si ha un aumento del numero di zone mobilitate, suggerendo quindi la presenza di una relazione tra le due variabili; tale relazione sembrerebbe rispettata anche per i periodi in cui le piogge diminuiscono.

Essendo disponibili i dati pluviometrici dell'intero 2012 è possibile osservare come questi si distribuiscono nell'arco dell'anno e confrontarli con la distribuzione degli spostamenti della frana (sempre riferiti al numero di zone mobilitate) nello stesso periodo; per fare questo si sono realizzati due grafici a torta mediante Excel (Figura 3.11):

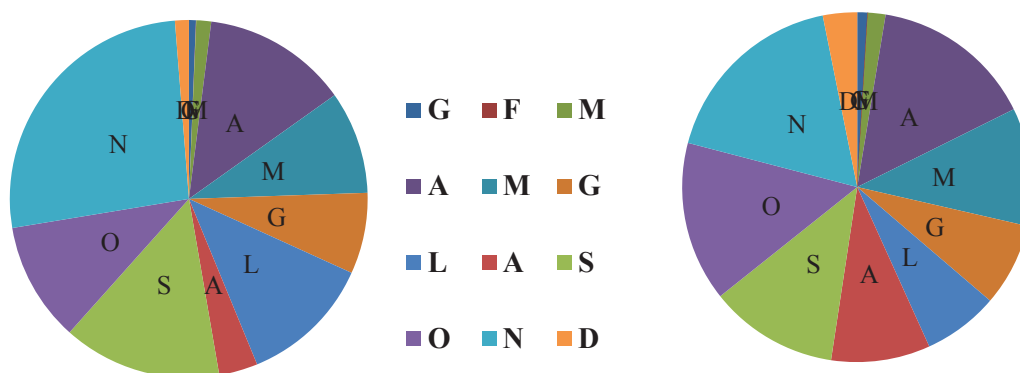


Figura 3.11: Distribuzione delle precipitazioni e del numero di zone mobilitate nel 2012

i quali consento di osservare, attraverso l'ampiezza dei settori circolari, se nei periodi molto piovosi si mobilitano più zone rispetto a quelli non piovosi. In accordo con il diagramma precedente è possibile affermare che durante i mesi di Novembre, Aprile e Maggio si hanno sia il maggior numero di giorni piovosi, sia il maggior numero di zone mobilitate. Anche questi risultati sono solamente qualitativi in quanto basati sull'osservazione della distribuzione dei dati.

Di più interessante interpretazione è il grafico riportato in Figura 3.12, che riporta l'andamento delle piogge giornaliere cumulate e rappresenta la presenza di spostamento tramite il valore di pioggia del giorno corrispondente.

Per realizzarlo è necessario plottare i valori di pioggia giornalieri cumulati, ottenuti sommando alla precipitazione giornaliera quella del giorno precedente, e successivamente inserendo, come grafico a dispersione, i valori di pioggia dei giorni in cui si è osservato il movimento della zona; per facilitare la lettura del grafico, tali valori vengono incrementati ottenendo delle serie separate per le diverse zone.

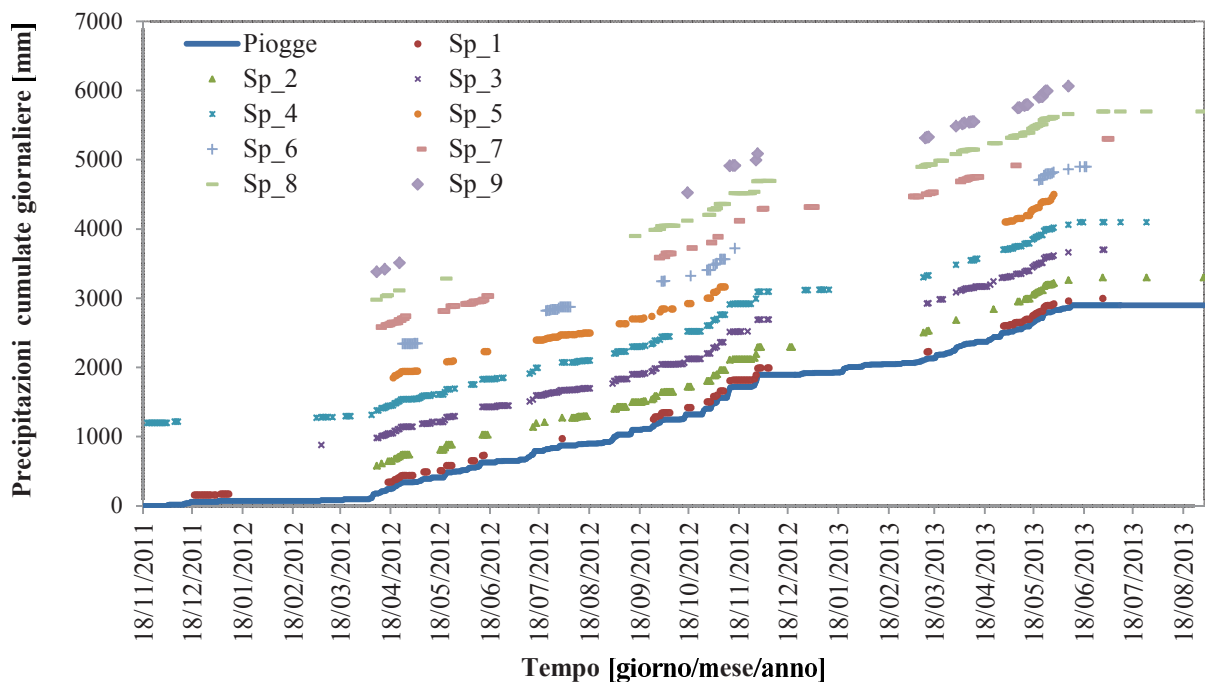


Figura 3.12: Distribuzione degli spostamenti delle singole zone durante tutto il periodo, in relazione alle precipitazioni giornaliere cumulate

È possibile quindi individuare i periodi di maggior attività della frana e confermare le osservazioni fatte in precedenza.

Si nota che la curva diventa una retta nei mesi finali; questo non indica una precipitazione costante ma è dovuto al fatto che non sono presenti i dati pluviometrici per i mesi successivi a Giugno 2013.

Si osserva che i maggiori periodi di attività si concentrano attorno alla fine del 2012 e tra Aprile e Giugno 2012 e 2013, cioè in prossimità dell'aumento di pendenza della curva di precipitazione cumulata; tra Dicembre 2012 e Marzo 2013 tale curva presenta una forte diminuzione di pendenza in corrispondenza della quale, praticamente nessuna zona si mobilita. Questo risultato suggerisce quindi una relazione piogge/spostamenti ed in

particolare che, ad un aumento di precipitazione, corrisponde un'attivazione multipla della frana.

In Figura 3.13, ottenuta ingrandendo un periodo del grafico precedente, è possibile apprezzare il comportamento delle singole zone ed in particolare che:

- La zona 5 inizia a muoversi sempre dopo l'attivazione delle zone di monte (1,2,3,4).
- La zona 6 inizia a muoversi sempre dopo la zona 5.
- Le zone 3 e 4 presentano movimenti praticamente contemporanei.
- La zona 9 si sposta molto raramente.

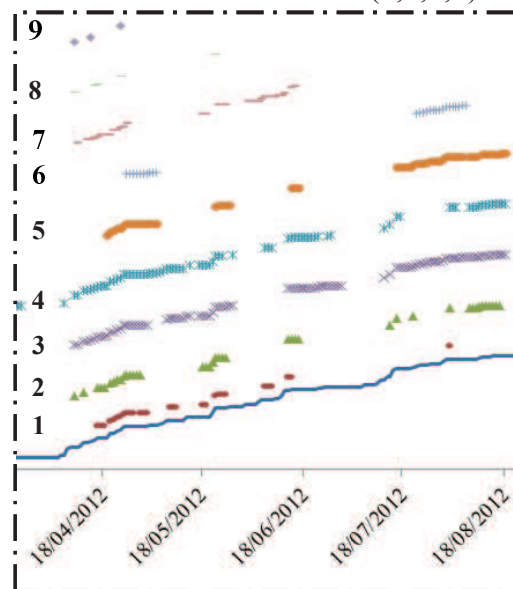


Figura 3.13: Particolare della Figura 3.10

Tali osservazioni sono in perfetto accordo con quanto esposto nei paragrafi precedenti, e pertanto è possibile affermare che questa rappresentazione grafica consente di riassumere bene sia il comportamento delle zone di valle rispetto a quello delle zone di monte, sia l'influenza delle piogge sul comportamento complessivo.

3.4.2 Soglia pluviometrica

Nelle frane di tipo colata il materiale si comporta come un liquido viscoso, il quale modifica le sue caratteristiche e la sua velocità in funzione di numerosi fattori, primo fra questi il contenuto d'acqua.

Nel caso in esame tale fattore è determinato in prevalenza dall'apporto meteorico che oltre ad alimentare la circolazione idrica sotterranea, porta alla fluidificazione il Flysch, con conseguente aumento dell'instabilità del versante.

Essendo possibile osservare una certa relazione tra gli eventi meteorologici e gli spostamenti osservati delle singole zone, risulta interessante individuare la soglia pluviometrica, la quale può essere molto utile per i sistemi di previsione e di allertamento della popolazione.

Una soglia è un valore minimo o massimo, di un determinato parametro o quantità, necessario affinché si inneschi un certo fenomeno o si abbia un cambiamento della condizione iniziale (*White et al., 1996*). Nel caso della soglia pluviometrica ci si riferisce ad un valore di intensità di pioggia minima necessaria per determinare l'innesco della frana (*Vincenzi et al.*) che può essere definita su base fisica od empirica (*Corominas, 2000; Crosta & Frattini, 2001; Aleotti 2004; Wieczorek & Galde, 2005*).

Nel primo caso si utilizzano dei modelli numerici, che tengono conto del rapporto fra precipitazioni, pressione neutra, suzione e stabilità dei versanti (*Montgomery & Dietrich, 1994; Wilson & Wieczorek, 1995; Crosta 1998*), mentre nel secondo caso si utilizzano analisi basate sulle relazioni tra le caratteristiche delle precipitazioni ed i fenomeni di smottamento (*Campbell, 1974; Caine, 1980; Cancelli & Nova, 1985; Wieczorek, 1987*). Essendo l'approccio fisico molto più complesso, soprattutto per il fatto che la sua affidabilità dipende dal dettaglio di conoscenza dei diversi aspetti che governano la stabilità del versante, notevole diffusione hanno i metodi empirici di più facile utilizzo.

Le soglie pluviometriche ottenute attraverso quest'ultimi, vengono distinte in base a (*Guzzetti et al., 2007*):

- a) Estensione dell'area geografica: soglie globali (*Caine, 1980; Innes, 1983; Clarizia et al., 1996; Crosta & Frattini 2001; Guzzetti et al., 2008*), regionali (*Cannon & Ellen, 1985; Larsen & Simon, 1993; Glade, 1998*) o locali (*Wieczorek, 1987; Pasuto & Silvano 1998; Marchi et al., 2002; Bertoldo & Bottino, 2006*)
- b) Dati pluviometrici considerati: specifici eventi pluviometrici (*Corominas & Moya, 1999*), precipitazioni precedenti agli eventi innescanti (*Campbell, 1975; Wieczorek & Sarmiento, 1988; Terlien, 1997; 1998; Glade et al., 2000; Chleborad, 2003*) e altri eventi (*Reichenbach et al., 1998; Jakib & Weatherly, 2003*).

I parametri pluviometrici considerati con maggiore frequenza sono l'intensità di precipitazione (I), la durata (D) e la quantità di precipitazione (giornaliera, antecedente, cumulata, cumulata normalizzata) degli eventi (*Guzzetti et al., 2007*).

È evidente che i risultati ottenibili dall'approccio empirico, non considerando aspetti geologici, geotecnici e geomorfologici, sono in grado di fornire solo indicazioni generali sulla risposta di una determinata porzione di territorio alle precipitazioni, per questo le relazioni ottenute possono assumere valore significativo per ambiti territoriali circoscritti e con caratteristiche omogenee; inoltre la loro affidabilità è influenzata dal numero di eventi che possono essere considerati e dall'attendibilità dei dati pluviometrici a disposizione.

La formulazione di una soglia pluviometrica di tipo empirico prevede la costruzione di una curva in un piano cartesiano, semilogaritmico o logaritmico, che mette in relazione la durata e l'intensità di pioggia secondo la seguente espressione (Caine, 1980):

$$I = c + \alpha D^{\beta} \quad (3.8)$$

dove:

I= intensità di pioggia [mm/giorno]

D=durata di pioggia [giorni]

$c > 0$, α , β , = parametri

Dalle equazioni delle numerose soglie presenti in letteratura è possibile osservare che il parametro c risulta nullo, mentre β assume valore negativo, presentando un andamento come in Figura 3.14:

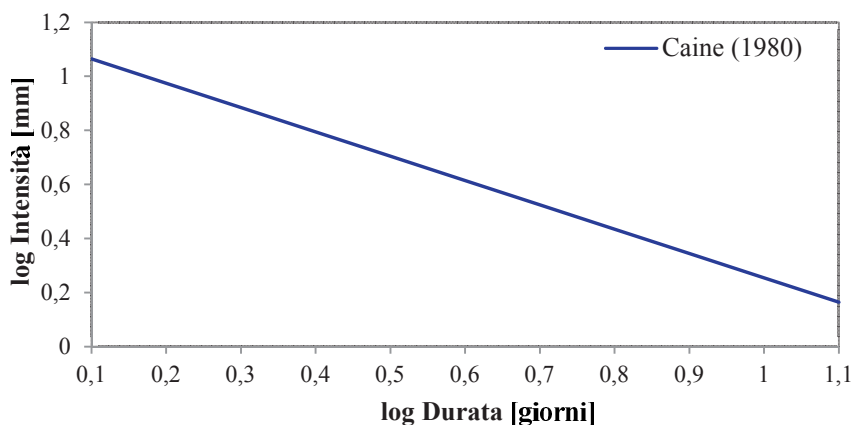


Figura 3.14: Soglia pluviometrica di Caine (1980)

Nel caso in esame si determina la soglia pluviometrica per ogni zona (1,2,3...9) identificata nelle foto, al fine di avere un'idea più precisa del comportamento della frana soggetta a precipitazioni; per fare questo si aggiungono al foglio Excel realizzato per gli spostamenti le colonne contenenti i valori di pioggia giornalieri e cumulati a 2,3,4,5,6,7,8,9 e 10 giorni.

Tramite le funzioni presenti in Excel è possibile estrapolare, in riferimento ad ogni zona, solamente i valori di pioggia nei giorni con spostamento, i quali vengono divisi per il numero di giorni cumulati ottenendo delle intensità giornaliere; in questo modo non si tiene conto però della distribuzione delle precipitazioni durante il periodo cumulato ma se ne considera un valore medio (Figura 3.15):

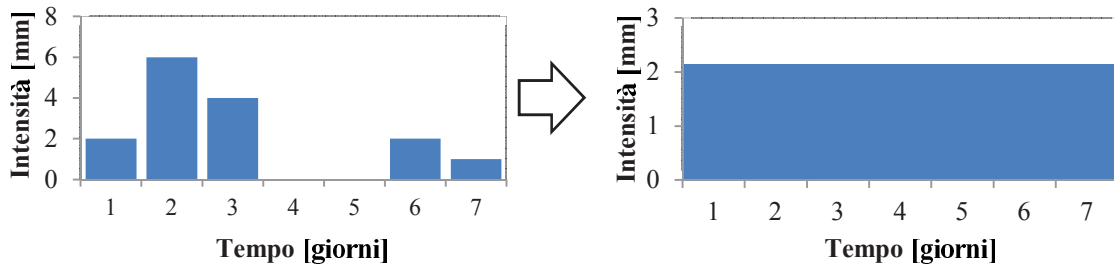


Figura 3.15: Schema illustrativo del trattamento delle precipitazioni

Questo rappresenta un limite nelle informazioni ricavabili dalla soglia, in quanto non si è in grado di sapere cosa accade i giorni precedenti all’evento franoso né la durata degli eventi pluviometrici necessari alla mobilitazione della zona in esame. Per fare questo sarebbe necessario andare a conteggiare i giorni di pioggia precedenti all’evento, sommare le intensità e realizzare con questi la soglia pluviometrica.

Un altro limite che è possibile individuare in questo procedimento è che, prendendo in considerazione le piogge che avvengono in corrispondenza di uno spostamento (1), non si considerano gli spostamenti che avvengono dopo i periodi piovosi (2), perdendo informazioni (Figura 3.16).

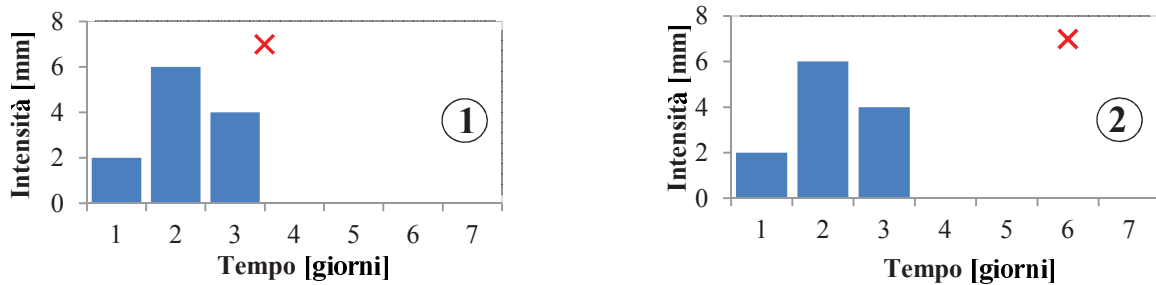


Figura 3.16: Schema illustrativo del trattamento degli spostamenti

Con i dati raccolti si ottiene un foglio di calcolo così strutturato:

PRECIPITAZIONI ZONA n										
Data	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g

dal quale, sempre utilizzando le funzioni di Excel, si ricerca per ogni riga (e quindi per ogni giorno) il valore di cumulata massima e la corrispondente durata, raccogliendoli in un ulteriore tabella; in questo modo si va a ricercare la retta di pendenza massima che congiunge il valore di pioggia cumulata corrispondente allo spostamento, con l’intersezione tra il numero di giorni cumulati e la curva di precipitazione, come illustrato in Figura 3.17.

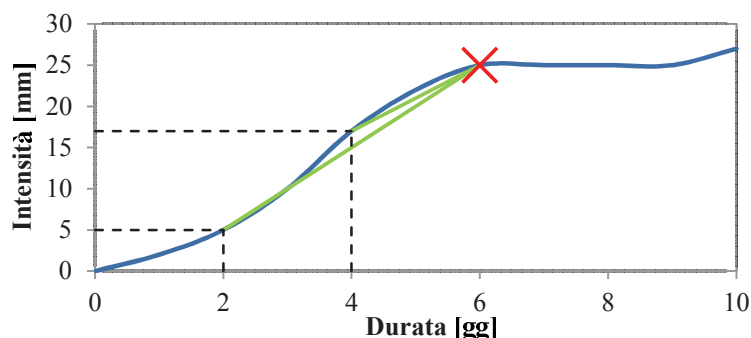
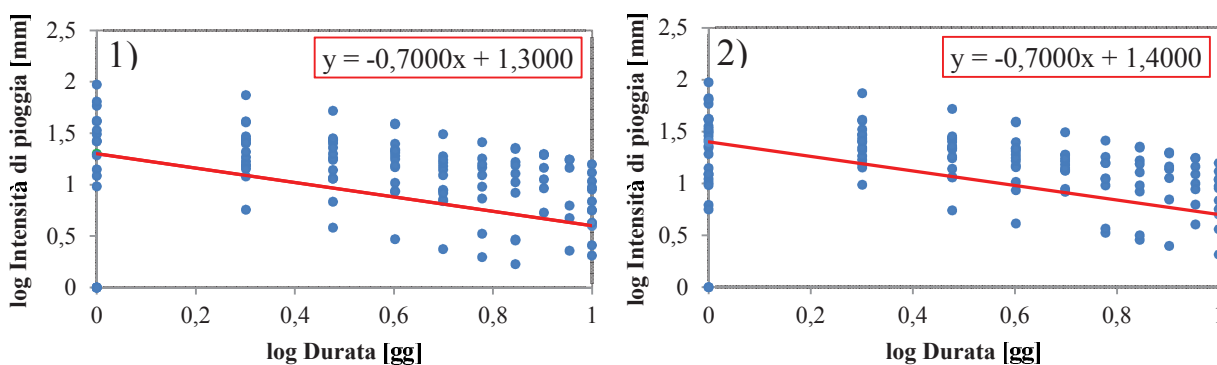


Figura 3.17: Schema illustrativo del metodo utilizzato per la determinazione delle precipitazioni considerate

Convertendo tali valori in logaritmo, e plottandoli in un grafico a dispersione, è possibile ottenere la soglia pluviometrica e la sua corrispondente equazione; per fare questo si utilizza la funzione “linea di tendenza” di tipo lineare, in quanto sia la durata che l’intensità sono espressi in forma logaritmica, e la si posiziona “manualmente” nel limite inferiore della nuvola di punti trascurando i valori molto discostati (*outliers*).

Attraverso semplici passaggi matematici è possibile ricondursi all’equazione in forma esponenziale, ottenendo un’espressione simile a quelle presenti in letteratura.

Si espongono di seguito i risultati ottenuti sia per le singole zone, sia considerando la frana nel complesso (T), attribuendo come valori di pioggia quelli registrati nei giorni in cui si ha il movimento di almeno una zona:



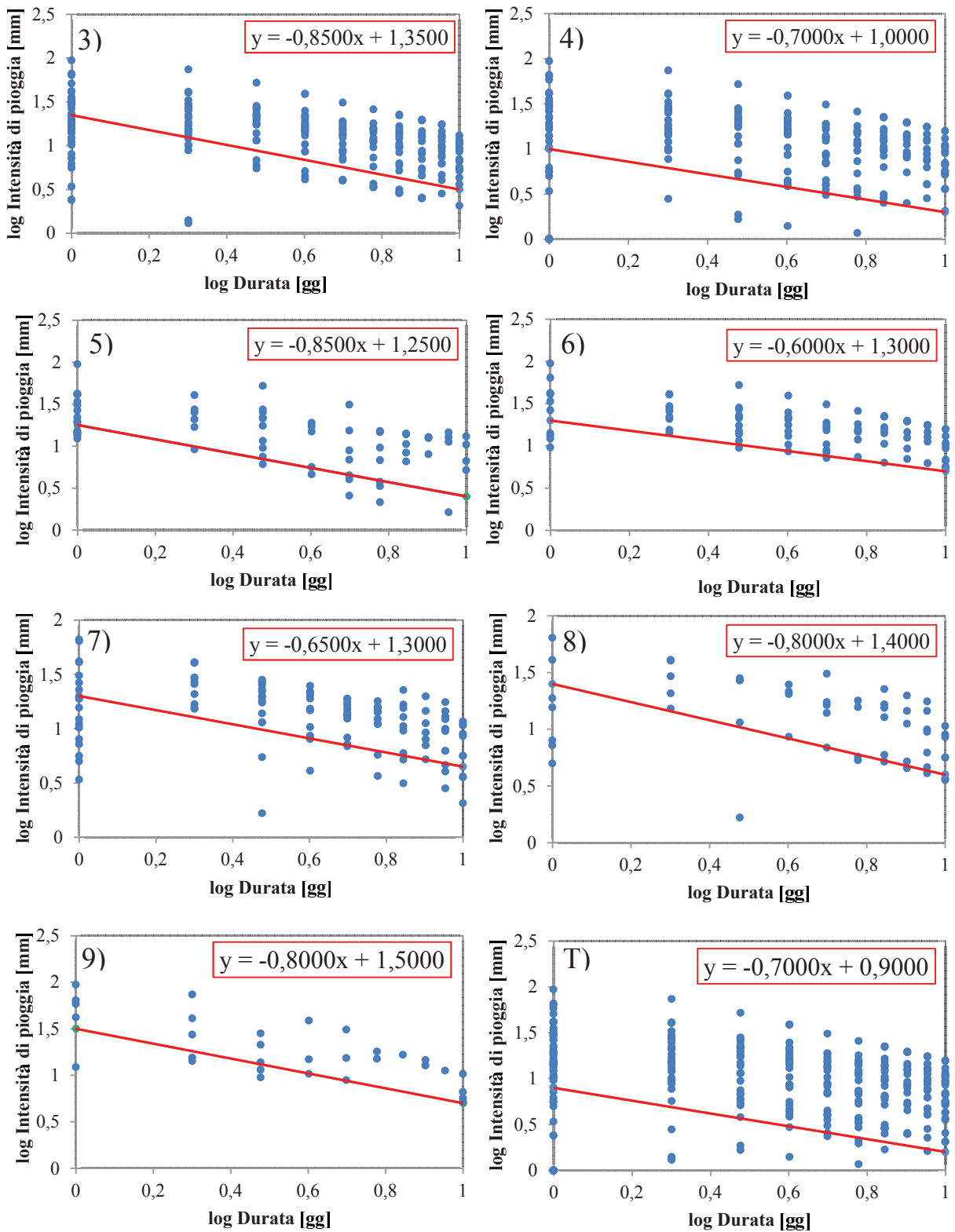


Figura 3.18: Soglie pluviometriche delle singole zone e della frana nel suo insieme (T)

SOGLIE PLUVIOMETRICHE		
Zona	Equazione lineare	Equazione esponenziale
1	$y=0,7x+1,3$	$I=19,95D^{-0,7}$
2	$y=-0,7x+1,4$	$I=25,12D^{-0,7}$
3	$y=-0,85x+1,35$	$I=22,39D^{-0,85}$
4	$y=-0,7+1$	$I=10D^{-0,7}$
5	$y=-0,65x+1,3$	$I=19,95D^{-0,65}$
6	$y=-0,8x+1,4$	$I=25,12D^{-0,8}$
7	$y=-0,85x+1,25$	$I=17,78D^{-0,85}$
8	$y=-0,6x+1,3$	$I=19,95D^{-0,6}$
9	$y=-0,8x+1,5$	$I=31,62D^{-0,8}$
Tot	$y=0,7x+0,9$	$I=7,94D^{-0,7}$
Caine	$y=-0,9x+1,155$	$I=14,82D^{-0,9}$
Paronuzzi	$y=-0,507x+1,679$	$I=47,742D^{-0,507}$

Tabella 3.8: Equazioni delle soglie pluviometriche in forma lineare ed esponenziale

È possibile infine plottare le equazioni ottenute in un unico grafico per individuare quali zone entrano in movimento per prime e quali richiedono maggiori intensità di precipitazione:

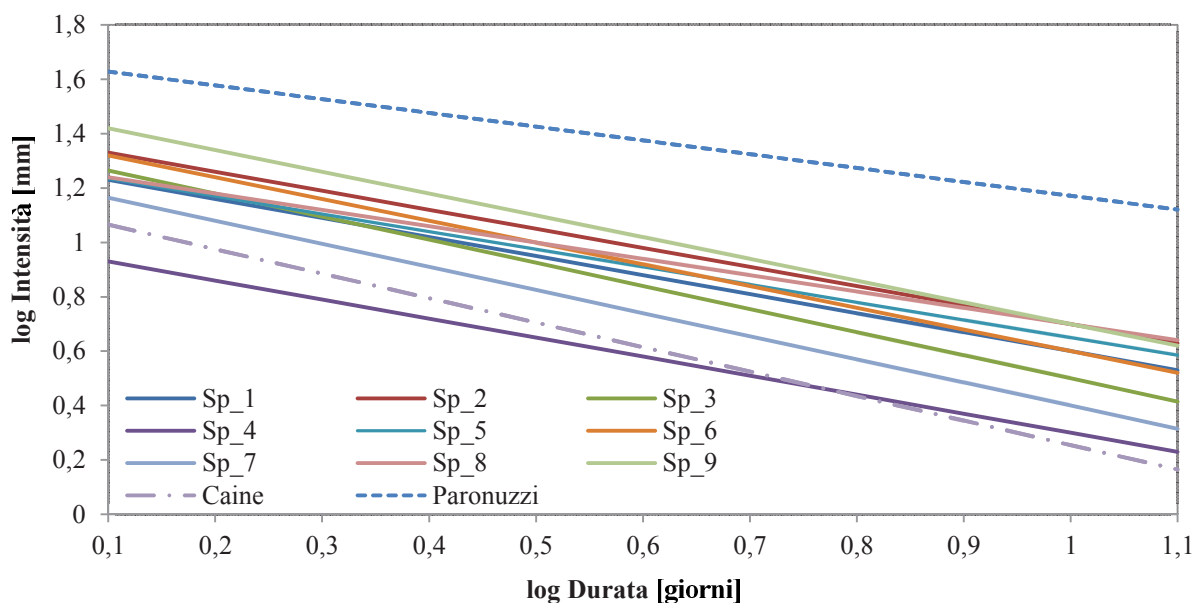


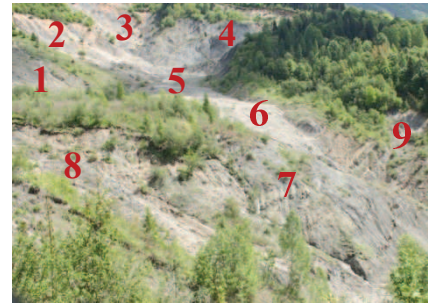
Figura 3.19: Soglie pluviometriche delle singole zone comparate con la soglia di Caine (globale) e Paronuzzi (locale)

Nel grafico si è inserita anche la soglia determinata da Caine nel 1980 (per frane di tipo debris flows e superficiali) con valenza globale, e quella proposta da Paronuzzi nel 1998 (per frane tipo debris flow) riferita alle Alpi Nord Orientali italiane.

Si può notare che, essendo la soglia di Paronuzzi una soglia locale, si colloca nella parte alta del grafico mentre quella di Caine, essendo globale, si posizione nella parte inferiore

rispettando il fatto che essa rappresenta il limite inferiore sotto il quale l'innescò della frana ha scarsissime probabilità di verificarsi.

Le soglie ottenute si collocano all'interno del "fuso" delimitato dalle due rette sopracitate tranne che per la soglia della zona 4 che, per durate minori di 5 giorni, rappresenta il limite inferiore più piccolo, indicando che tale zona si mobilita per intensità di pioggia molto basse.



Come ci si aspettava, tutte le curve risultano inclinate verso l'asse delle ordinate indicando che, ad un incremento della durata, il valore minimo di intensità di precipitazione che può scatenare la frana decresce.

3.4.3 *Analisi statistiche*

Anche in questo caso si è deciso di ricorrere alla statistica per ottenere delle informazioni più precise riguardo al comportamento della frana soggetta a precipitazioni; in particolare si analizza, mediante il software *Minitab*, l'eventuale relazione tra le piogge e gli spostamenti delle singole zone individuati durante l'osservazione delle fotografie raccolte.

General Linear Model

Come prima analisi si realizza un confronto a coppie tra le medie (GLM) mediante il software *Minitab* che consente di eseguire i confronti simultaneamente (a differenza di un test t) mediante il comando *General Linear Model*, il quale fornisce in output il seguente coefficiente:

$$\tau = \frac{\bar{P}_{(S=0)} - \bar{P}_{(S=1)}}{2} \quad (3.9)$$

dove i due termini al numeratore sono dati rispettivamente dalla media degli eventi pluviometrici che si hanno quando non si osservano spostamenti della zona in esame e dalla media degli eventi pluviometrici quando la zona in esame appare in movimento.

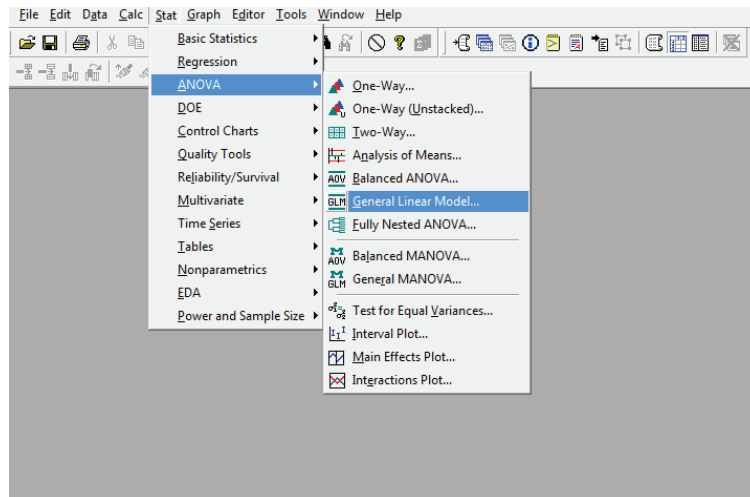
Dal segno e dal valore di tale coefficiente è possibile individuare quali eventi hanno mediamente effetto sullo spostamento delle singole zone: se esso risulta negativo è possibile affermare che la precipitazione ha mediamente effetto sullo spostamento della zona in esame, mentre se risulta positivo no. In particolare, confrontando diversi coefficienti negativi, maggiore è il valore assoluto, maggiore è l'effetto esercitato mediamente sulla zona.

Come anticipato le colate possono essere innescate da piogge che non originano sempre uno spostamento immediato, ma vanno ad alimentare delle sorgenti sotterranee provocando movimenti ritardati anche di alcuni giorni; per questo si sceglie di considerare, oltre alle piogge giornaliere, le precipitazioni cumulate di 2,3,4,5,6,7,8,9 e 10 giorni.

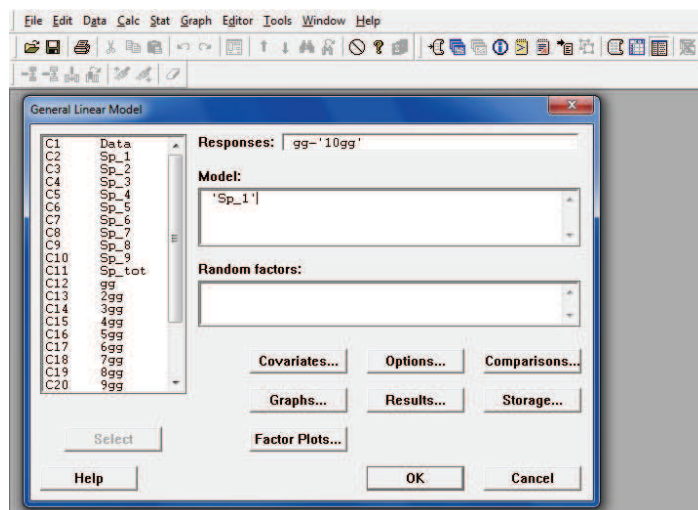
Come fase preliminare dell'analisi si prepara il *dataset* da utilizzare, ottenuto eliminando le righe prive di informazioni dal foglio Excel contenente gli spostamenti delle singole zone, integrandolo con i valori di precipitazioni giornaliere e cumulati.

Successivamente lo si importa all'interno del programma e si settano i parametri come segue:

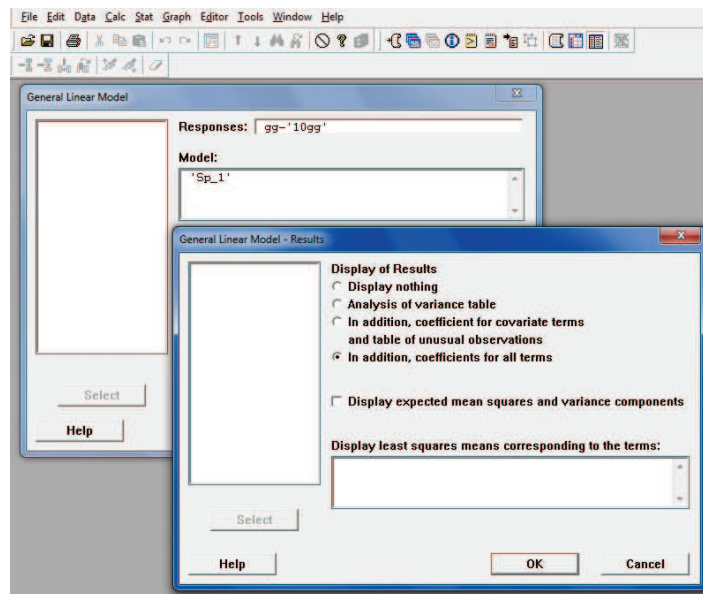
- 1) Dalla finestra Stat → ANOVA si seleziona General Linear Model



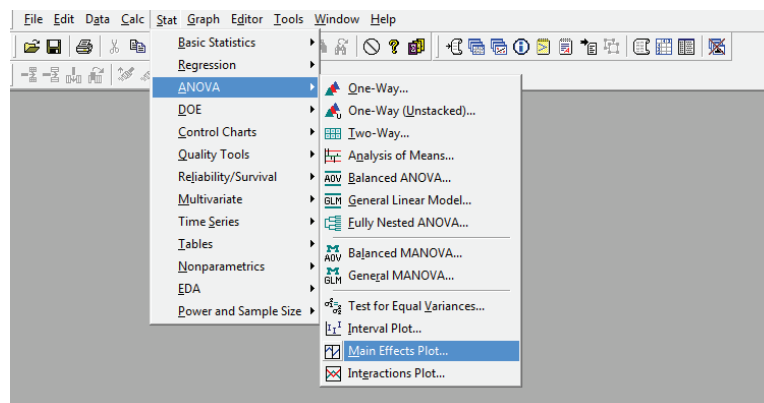
- 2) Si inseriscono nella casella "Responses" le colonne contenenti le variabili indipendenti (in questo caso i valori pluviometrici) e nella casella "Model" la colonna contenente la variabile dipendente (in questo caso gli spostamenti della zona in esame)



- 3) Dalla finestra “Results” si seleziona la quarta voce “in addition, coefficient for all terms” per ottenere in output il coefficiente sovraesposto.



- 4) È possibile ottenere una rappresentazione grafica del coefficiente selezionando “Main Effects Plot” dal menù Stat→ANOVA



Si ripete lo stesso procedimento per ogni zona, andando a modificare di volta in volta il “Model”.

Il programma restituisce il seguente output (per comodità si riporta e commenta solamente quello riferito alla zona 1 ed alla precipitazione giornaliera):

General Linear Model: gg versus Sp_1

Factor	Type	Levels	Values
Sp_1	fixed	2	0; 1

Analysis of Variance for gg, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Sp_1	1	989,7	989,7	989,7	9,40	0,002
Error	416	43823,0	43823,0	105,3		
Total	417	44812,7				

S = 10,2637 R-Sq = 2,21% R-Sq(adj) = 1,97%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,8782	0,5521	8,84	0,000
Sp_1	-1,6923	0,5521	-3,07	0,002



τ

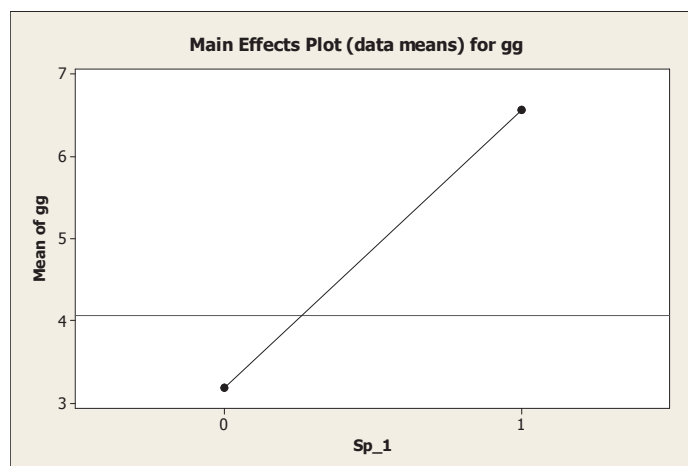


Figura 3.20: Rappresentazione grafica del coefficiente τ

Si osserva che il coefficiente τ assume valore negativo, indicando quindi che la media delle piogge registrate quando la zona appare in movimento è maggiore di quella quando essa è ferma; tale comportamento è visibile nel Main Effects Plot (Figura 3.20), dove la retta assume pendenza positiva. In base a quanto detto, è possibile quindi affermare che le piogge giornaliere hanno mediamente effetto sullo spostamento della zona 1.

Si espongono i valori e gli andamenti dei coefficienti dei singoli confronti a coppie, i quali si sono divisi per il numero di giorni di pioggia cumulata in modo da ottenere una precipitazione media giornaliera (i dati in tabella risultano ancora divisi per 2):

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 1										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-1,692	-5,608	-9,753	-13,385	-15,281	-16,958	-19,524	-22,080	-23,370	-25,115
τ/gg	-1,692	-2,804	-3,251	-3,346	-3,056	-2,826	-2,789	-2,760	-2,597	-2,512

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 2										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-2,938	-7,561	-12,094	-16,165	-19,014	-21,605	-24,134	-26,004	-27,555	-28,541
τ/gg	-2,938	-3,780	-4,031	-4,041	-3,803	-3,601	-3,448	-3,251	-3,062	-2,854

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 3										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-2,182	-5,790	-9,359	-13,085	-16,062	-19,304	-23,177	-26,510	-28,664	-30,300
τ/gg	-2,182	-2,895	-3,120	-3,271	-3,212	-3,217	-3,311	-3,314	-3,185	-3,030

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 4										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-1,365	-4,476	-7,573	-10,258	-12,222	-14,068	-16,182	-18,039	-19,445	-20,192
τ/gg	-1,365	-2,238	-2,524	-2,565	-2,444	-2,345	-2,312	-2,255	-2,161	-2,019

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 5										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-1,067	-3,086	-6,484	-9,672	-13,049	-15,624	-18,043	-20,328	-21,684	-22,770
τ/gg	-1,067	-1,543	-2,161	-2,418	-2,610	-2,604	-2,578	-2,541	-2,409	-2,277

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 6										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-0,546	-2,348	-4,936	-8,520	-11,577	-14,531	-17,708	-20,554	-23,280	-24,609
τ/gg	-0,546	-1,174	-1,645	-2,130	-2,315	-2,422	-2,530	-2,569	-2,587	-2,461

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 7										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-3,195	-7,575	-11,169	-12,708	-14,539	-15,936	-17,528	-17,875	-17,958	-18,595
τ/gg	-3,195	-3,788	-3,723	-3,177	-2,908	-2,656	-2,504	-2,234	-1,995	-1,860

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 8										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-2,520	-6,098	-10,355	-14,209	-17,657	-20,242	-24,082	-27,846	-31,829	-34,303
τ/gg	-2,520	-3,049	-3,452	-3,552	-3,531	-3,374	-3,440	-3,481	-3,537	-3,430

COEFFICIENTI PIOGGE / SPOSTAMENTI ZONA 9										
	1g	2g	3g	4g	5g	6g	7g	8g	9g	10g
τ	-5,875	-11,451	-15,658	-19,008	-21,656	-22,758	-23,974	-26,802	-28,281	-30,745
τ/gg	-5,875	-5,726	-5,219	-4,752	-4,331	-3,793	-3,425	-3,350	-3,142	-3,075

Tabella 3.9: Valori dei coefficienti ottenuti per ogni coppia spostamento di zona/precipitazione cumulata. In rosso si evidenziano i valori massimi

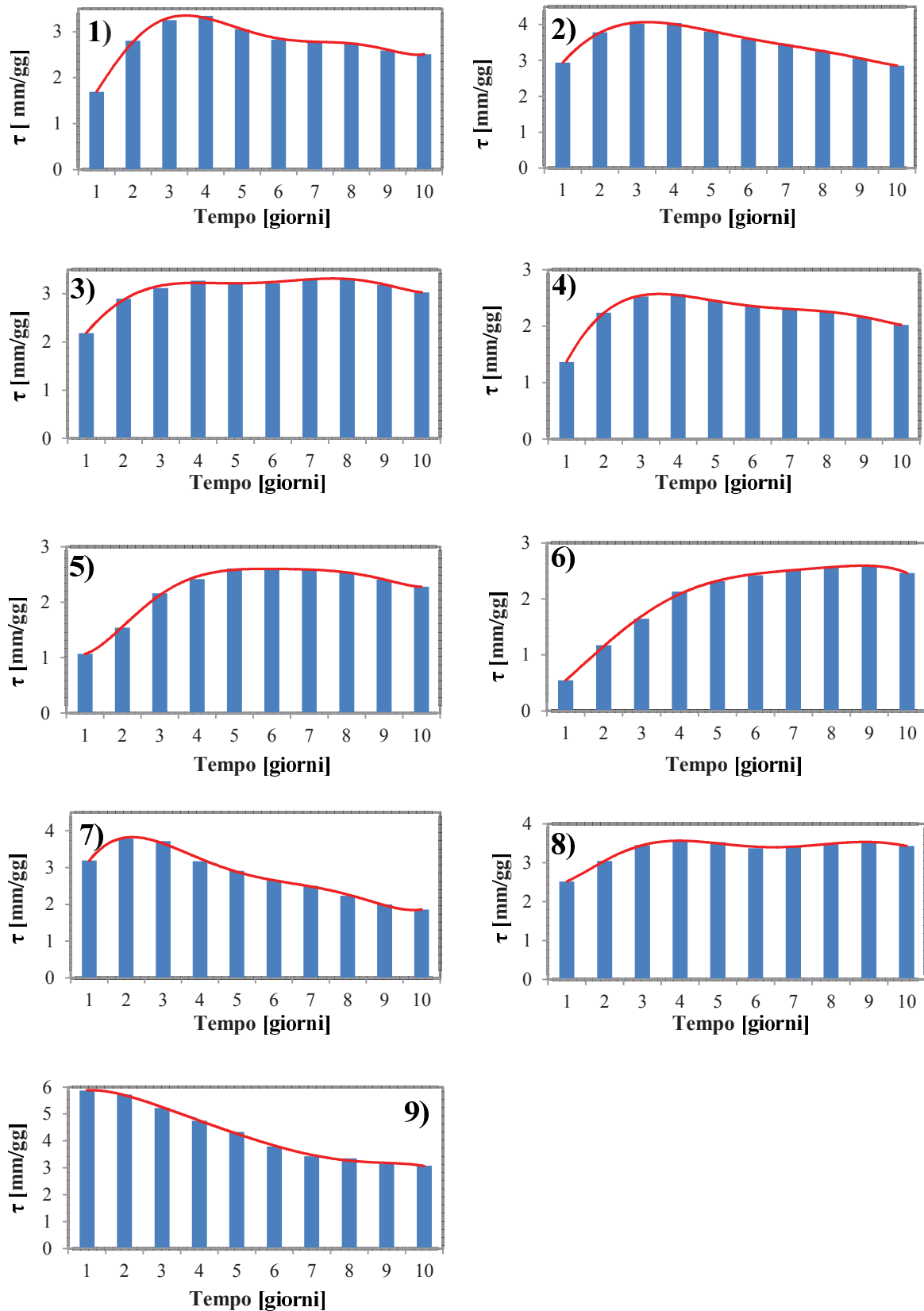


Figura 3.21: Andamento dei coefficienti ottenuti per ogni coppia spostamento di zona/precipitazione in funzione del numero di giorni cumulati

Dall'analisi appena conclusa è possibile osservare che, dato che i coefficienti τ risultano essere tutti negativi, esiste un certo effetto da parte delle precipitazioni sugli spostamenti delle singole zone ed in particolare, osservando i valori assoluti dei coefficienti ed il loro andamento al variare dei giorni cumulati, è possibile affermare che:

- **Zona 1:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 3-4 giorni
- **Zona 2:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 3-4 giorni
- **Zona 3:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 7-8 giorni
- **Zona 4:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 3-4 giorni
- **Zona 5:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 5-6 giorni
- **Zona 6:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 8-9 giorni
- **Zona 7:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 2-3 giorni
- **Zona 8:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 4-5 giorni
- **Zona 9:** risulta mediamente influenzata dalle precipitazioni cumulate in 1-2 giorni

Osservando i grafici precedentemente esposti è possibile individuare la “gerarchia” dell’influenza delle piogge sulle singole zone. Ad esempio è possibile affermare che per la zona 1 hanno maggiore influenza le piogge cumulate di durata intermedia mentre per la zona 9 quelle di durata inferiore.



Si osserva inoltre che la zona 5 e la zona 6 presentano una distribuzione simile dei coefficienti (crescente all'aumentare dei giorni cumulati), con valore massimo traslato verso destra; in particolare il massimo della zona 6 risulta ad una cumulata maggiore di quello della 5, indicando il ritardo di movimento di quest'ultima.

Le zone 7 e 9 presentano invece un andamento decrescente del coefficiente all'aumentare dei giorni cumulati, ad indicare quindi un'influenza da piogge più recenti.

Le zone 1, 2, 4 e 8 presentano un andamento caratterizzato da una fase di crescita seguita da una decrescita dopo aver superato il valore massimo del coefficiente, indicando una maggior dipendenza dalle piogge cumulate di durata intermedia.

La zona 3 presenta un andamento del coefficiente quasi costante, non caratterizzato da nessun trend evidente di crescita o decrescita, infatti i valori ottenuti per cumulate da 4 a 9 giorni sono molto simili tra loro.

Questo risultato sembrerebbe indicare l'assenza di un'influenza da parte delle precipitazioni, suggerendo invece che la zona si sposti a seguito di crolli e fenomeni di

erosione (si è indicato comunque la cumulata 8 come influente, in quanto fornisce il coefficiente maggiore), in accordo con quanto visto nelle fotografie.

La zona maggiormente influenzata da piogge recenti risulta essere la 9, la quale si presenta con un'inclinazione di versante subverticale e pertanto il risultato sembrerebbe corretto, ed inoltre, osservando il valore del coefficiente, esso risulta maggiore rispetto agli altri indicando quindi la presenza di una relazione più forte piogge/spostamenti.

Tutti i risultati ottenuti sembrerebbero rispecchiare le caratteristiche fisiche del corpo di frana, infatti si può affermare che le zone più pendenti sono influenzate da piogge cumulate di breve durata (zona 1,2,4,7,8,9) mentre quelle più pianeggianti necessitano di maggior tempo per essere mobilitate (zona 5).

Queste informazioni risultano essere molto importanti sia per lo studio dell'evoluzione del fenomeno franoso nel tempo, sia a scopo di allertamento.

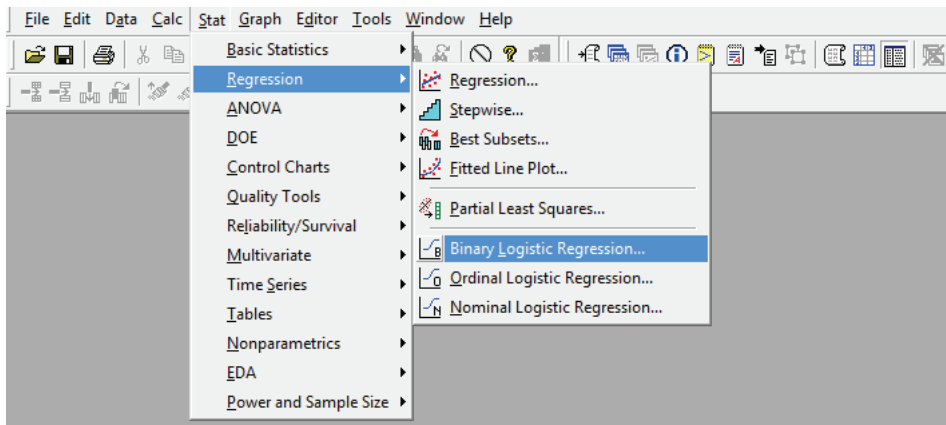
Regressione Logistica Binaria

Essendo gli spostamenti delle singole zone espressi in forma dicotomica anche in questo caso si può utilizzare la regressione logistica binaria, che permette di individuare quali precipitazioni hanno effetto significativo sulla visione degli spostamenti delle singole zone ed in particolare se la loro variazione comporta un aumento o una diminuzione di probabilità di osservare lo spostamento. Per le zone di valle 5 e 6 si inseriscono in quest'analisi anche gli spostamenti delle zone a monte in quanto influenti su di esse.

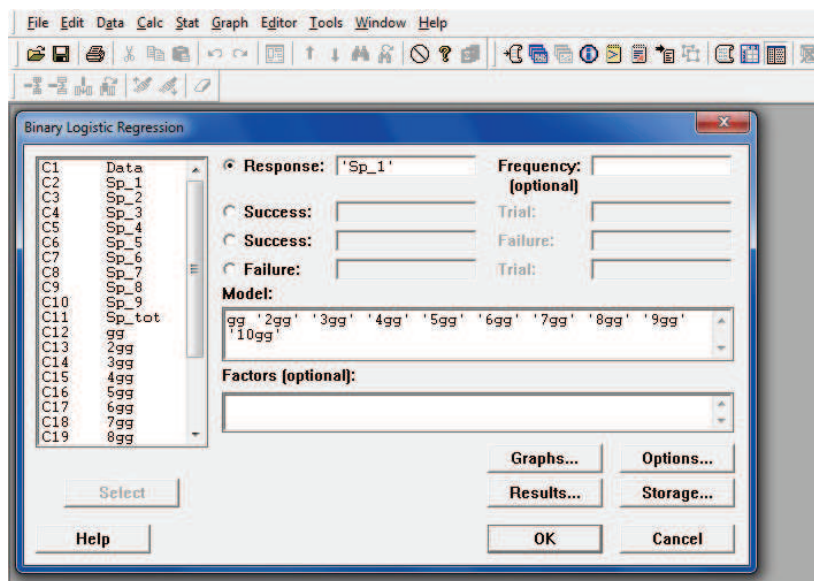
Come nel caso precedente, una volta eseguita la regressione, è possibile rimuovere le variabili che non hanno effetto significativo sulla risposta mediante una procedura di *stepwise*, la quale però non può essere eseguita in modo automatico dal software ed è quindi svolta "a mano": si ripete più volte la regressione andando ad escludere di volta in volta le variabili con p-value maggiore, fino a restare con le sole variabili significative (aventi p-value minore del livello di significatività fissato $\alpha=0,05$).

Per iniziare l'analisi è necessario importare su *Minitab* il foglio di calcolo contenente gli spostamenti delle zone e le precipitazioni, ed eseguire il seguente procedimento:

1) Dal menù Stat→Regression si seleziona Binary Logistic Regression



2) Dal menù Binary Logistic Regression si inserisce come “Response” la variabile dipendente (in questo caso la colonna contenente gli spostamenti della zona in esame) e come “Model” le variabili indipendenti (in questo caso le piogge cumulate e gli spostamenti delle zone di monte per le zone 5 e 6).



3) Si ottiene il seguente output:

Binary Logistic Regression: Sp_1 versus gg; 2gg; ...

Link Function: Logit

Response Information

Variable	Value	Count	
Sp_1	1	122	(Event)
	0	296	
	Total	418	

Relazione tra spostamenti e precipitazioni nella frana del Tessina (Alpago, Italia)

* NOTE * 418 cases were used
 * NOTE * 20 cases contained missing values
 Logistic Regression Table

Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	Odds Ratio	95% CI	
						Lower	Upper
Constant	-2,34391	0,224291	-10,45	0,000			
gg	-0,0257181	0,0181061	-1,42	0,155	0,97	0,94	1,01
2gg	0,0022605	0,0169896	0,13	0,894	1,00	0,97	1,04
3gg	0,0060540	0,0153287	0,39	0,693	1,01	0,98	1,04
4gg	0,0135937	0,0147529	0,92	0,357	1,01	0,98	1,04
5gg	0,0077297	0,0152870	0,51	0,613	1,01	0,98	1,04
6gg	-0,0090611	0,0145728	-0,62	0,534	0,99	0,96	1,02
7gg	0,0003769	0,0142072	0,03	0,979	1,00	0,97	1,03
8gg	0,0164833	0,0146236	1,13	0,260	1,02	0,99	1,05
9gg	-0,0183000	0,0150825	-1,21	0,225	0,98	0,95	1,01
10gg	0,0234363	0,0098978	2,37	0,018	1,02	1,00	1,04

Log-Likelihood = -199,137

Test that all slopes are zero: G = 106,515, DF = 10, P-Value = 0,000

- 4) Dopo aver ripetuto i punti 1), 2), 3) rimuovendo le variabili che presentano via via p-value maggiore, si ottiene l'output definitivo:

Binary Logistic Regression: Sp_1 versus 4gg; 10gg

Link Function: Logit

Response Information

Variable	Value	Count
Sp_1	1	123 (Event)
	0	296
Total		419

* NOTE * 419 cases were used
 * NOTE * 19 cases contained missing values

Logistic Regression Table

Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	Odds Ratio	95% CI	
						Lower	Upper
Constant	-2,32169	0,220925	-10,51	0,000			
4gg	0,0178820	0,0056622	3,16	0,002	1,02	1,01	1,03
10gg	0,0168568	0,0032476	5,19	0,000	1,02	1,01	1,02

Log-Likelihood = -202,061

Test that all slopes are zero: G = 103,125, DF = 2, P-Value = 0,000

Si ripete lo stesso procedimento per tutte le zone ottenendo i seguenti risultati (Tabella 3.10):

REGRESSORI ZONA 1			
Giorno	β	p-value	Odds ratio
4	0,018	0,002	1,02
10	0,017	0,000	1,02

REGRESSORI ZONA 2			
Giorno	β	p-value	Odds ratio
5	0,031	0,000	1,03
10	0,016	0,000	1,02

REGRESSORI ZONA 3			
Giorno	β	p-value	Odds ratio
8	0,039	0,000	1,04
10	0,017	0,009	1,02

REGRESSORI ZONA 4			
Giorno	β	p-value	Odds ratio
1	-0,039	0,028	0,96
3	0,03	0,005	1,03
9	0,019	0,000	1,02

REGRESSORI ZONA 5			
Reg.	β	p-value	Odds ratio
Sp_2	1,491	0,000	4,44
Sp_3	2,935	0,000	18,81
4gg	-0,024	0,032	0,98
5gg	0,021	0,049	1,02

REGRESSORI ZONA 6			
Reg.	β	p-value	Odds ratio
Sp_2	-1,065	0,018	0,34
Sp_5	3,85	0,000	46,97
9gg	0,016	0,001	1,02

REGRESSORI ZONA 7			
Giorno	β	p-value	Odds ratio
3	0,02	0,022	1,02
5	0,015	0,024	1,02

REGRESSORI ZONA 8			
Giorno	β	p-value	Odds ratio
10	0,035	0,000	1,04

REGRESSORI ZONA 9			
Giorno	β	p-value	Odds ratio
1	0,037	0,014	1,04
10	0,021	0,000	1,02

Tabella 3.10: Regressori significativi per lo spostamento di ogni singola zona

Dai risultati appena esposti si osserva che per le zone 1, 3, 5, 6 e 9 tra i regressori significativi compaiono gli stessi termini risultati maggiormente influenti dai confronti a coppie, ed inoltre per le zone 5 e 6, risultano avere effetto significativo gli spostamenti delle stesse zone ottenute dalla regressione logistica sugli spostamenti.



Per le altre zone si ottengono dei risultati leggermente discordi da quelli ottenuti dai confronti a coppie, ma comunque accettabili, ad eccezione della zona 8, la quale risulta in questo caso influenzata da piogge cumulate a 10 giorni, mentre nel GLM risultava influenzata da piogge cumulate più recenti.

Per molte zone risulta avere effetto significativo la pioggia cumulata a 10 giorni; tale risultato può essere dovuto al fatto che, analizzando uno spazio temporale maggiore, vi sia più probabilità di trovare uno spostamento e pertanto la variabile viene trascurata in sede di interpretazione degli output.

Per quanto riguarda i valori dell'*Odds ratio* è possibile osservare che essi risultano essere molto maggiori dell'unità in corrispondenza degli spostamenti come regressori, e molto vicini all'unità quando si considerano le precipitazioni, indicando quindi un aumento di probabilità di osservare lo spostamento delle zone in esame per effetto dello spostamento

delle zone di monte e/o delle precipitazioni; in base a ciò inoltre, è possibile affermare che le piogge non comportano un forte aumento della probabilità di spostamento delle zone in esame a differenza dello spostamento delle zone di monte.

In alcuni casi (zona 4, 5 e 6) l'*Odds Ratio* assume valori minori all'unità, indicando quindi che la variazione del corrispondente regressore diminuisce la probabilità di vedere lo spostamento della zona in esame (infatti il coefficiente β risulta negativo); tale risultato sembrerebbe essere accettabile in quanto i regressori avente coefficiente negativo non sono risultati significativi nelle analisi precedenti.

Si riassumono di seguito i risultati ottenuti per ogni zona:

- Zona 1: Risulta significativa la pioggia cumulata a 4 giorni, stesso risultato ottenuto nel GLM, e la cumulata a 10 giorni che, per quanto esposto precedentemente, è possibile trascurare. Osservando l'*Odds Ratio* è possibile affermare che l'aumento unitario della cumulata a 4 giorni aumenta la probabilità di osservare lo spostamento della zona in esame.
- Zona 2: Risulta significativa la pioggia cumulata a 5 giorni, diversa da quella ottenuta nel GLM ma comunque considerata accettabile differendo solamente di un giorno. Osservando l'*Odds Ratio* è possibile affermare che l'aumento unitario della cumulata a 5 giorni aumenta la probabilità di osservare lo spostamento della zona in esame.
- Zona 3: Risulta significativa la cumulata ad 8 giorni, risultato analogo al GLM. Osservando l'*Odds Ratio* è possibile affermare che l'aumento unitario della variabile aumenta la probabilità di osservare spostamento della zona in esame.
- Zona 4: Risulta significativa la cumulata a 3 giorni, concorde all'analisi GLM, la precipitazione giornaliera e quella cumulata a 9 giorni. Osservando l'*Odds Ratio* è possibile affermare che l'aumento unitario della cumulata a 3 giorni aumenta la probabilità di osservare spostamento della zona in esame, mentre un aumento della pioggia giornaliera la diminuisce. La cumulata a 9 giorni sembrerebbe discorde con i risultati ottenuti.
- Zona 5: Risulta significativo lo spostamento della zona 2, della zona 3, la cumulata a 5 giorni, perfettamente concorde alle analisi precedenti, e la cumulata a 4 giorni la quale, presentando un *Odds Ratio* negativo, indica una non influenza sulla visione dello spostamento. In particolare è possibile affermare che l'aumento unitario dello spostamento delle zona 2, quello della zona 3 e della cumulata a 5 giorni aumenta la probabilità di osservare spostamento della zona in esame, mentre quello della

cumulata a 4 la diminuisce. Gli spostamenti della zona 3 aumentano maggiormente la probabilità di spostamento della zona 5, rispetto a quelli della zona 2. Questo risultato è analogo a quello ottenuto dalla regressione logistica eseguita considerando solamente gli spostamenti.

- Zona 6: Risulta significativo lo spostamento della zona 5, la cumulata a 9 giorni, in accordo con le analisi precedenti, e lo spostamento della zona 2 la quale, presentando un *Odds Ratio negativo*, risulta non influenzare la visione di spostamento della zona in esame. In particolare è possibile affermare che l'aumento unitario dello spostamento delle zona 5 e della cumulata a 9 giorni aumenta la probabilità di osservare lo spostamento della zona in esame, mentre quello dello spostamento della zona 2 la diminuisce.
- Zona 7: Risulta significativa la pioggia cumulata a 3 e 5 giorni, diverse da quella ottenuta nel GLM ma comunque accettabili essendo precipitazioni recenti. Osservando l'*Odds Ratio* è possibile affermare che l'aumento unitario della cumulata a 3 e 5 giorni aumenta la probabilità di osservare spostamento della zona in esame.
- Zona 8: Risulta significativa solamente la pioggia cumulata a 10 giorni, risultato totalmente diverso da quanto emerso nel GLM ed inoltre non sembra in accordo con la realtà fisica essendo la zona abbastanza pendente.
- Zona 9: Risulta significativa la pioggia giornaliera, in accordo con quanto emerso dal GLM. Osservando il valore dell'*Odds Ratio* è possibile affermare che ad un aumento unitario di tale variabile, si ha un aumento della probabilità di osservare spostamento della zona in esame.

Al termine delle analisi eseguite è possibile affermare che i risultati ottenuti sono concordi tra di loro e con la realtà fisica del fenomeno, confermando la presenza di una certa correlazione tra le precipitazioni e gli spostamenti delle singole zone della frana in funzione delle loro caratteristiche morfologiche.

3.5 Osservazioni finali

Al termine del lavoro svolto è possibile mettere in evidenza alcune osservazioni sia riguardo il metodo di analisi utilizzato che alle correlazioni spostamenti/precipitazioni ottenute.

È possibile riassumere l'operato seguito mediante 4 fasi:

- 1) Acquisizione di immagini digitali attraverso un sistema di monitoraggio fotogrammetrico.
- 2) Elaborazione delle immagini ed utilizzo per un'analisi visiva degli spostamenti.
- 3) Acquisizione dei dati pluviometrici riferiti alla zona ed al periodo in esame.
- 4) Esecuzione di analisi statistiche volte a confermare quanto emerso nel punto 2) e ricerca di eventuali correlazioni Piogge/spostamenti.

Alla base di tutto vi è la necessità di progettare un sistema di monitoraggio che rispecchi i requisiti necessari per la sua realizzazione e gestione, in modo da garantire una serie quanto più completa di dati. Risulta fondamentale assumere alcune precauzioni per limitare l'effetto degli eventi atmosferici e di agenti esterni, come ad esempio l'applicazione di filtri alle fotocamere contro le variazioni di luminosità, o la realizzazione di adeguate protezioni per la strumentazione.

Per quanto riguarda il sistema di monitoraggio fotogrammetrico utilizzato è possibile affermare che esso risulta un buon compromesso tra economicità e semplicità di installazione, necessitando solamente di alcune accortezze nella protezione della strumentazione, e di interventi volti alla rimozione della vegetazione, la quale impedisce la visione della parte inferiore del corpo di frana dalla fotocamera di destra, suggerendone l'installazione in una posizione più elevata. L'attuale posizione delle fotocamere consente di inquadrare un'area molto vasta della parte superiore del corpo di frana, pertanto tale sistema potrà essere sviluppato in futuro per la ricostruzione stereografica della zona, che permetterà di ottenere una misura degli spostamenti.

L'analisi visiva delle fotografie sembrerebbe un buon punto di partenza per lo studio degli spostamenti della frana, in quanto, grazie all'alta risoluzione, è possibile individuare i meccanismi di movimento del materiale e l'evoluzione del dissesto nel tempo solamente scorrendo le immagini in sequenza. Per tale analisi il settaggio del sistema sembrerebbe appropriato ed in particolare, essendo un fenomeno in lenta evoluzione, lo scatto di una fotografia giornaliera risulta sufficiente all'individuazione della maggior parte degli spostamenti.

La bontà dell'analisi dipende in gran parte dalla qualità delle immagini, dalla distanza dal fenomeno da analizzare, dall'influenza degli eventi atmosferici, da eventuali fattori esterni ed inoltre dall'operatore, il quale deve svolgere un'osservazione accurata, facendo scorrere più volte in sequenza le fotografie; questa operazione non risulta essere difficoltosa né richiede grandi tecnologie, ma si presenta solamente laboriosa in termini di tempo a causa dell'elevato numero di fotografie. Lo sviluppo di un software che esegua automaticamente l'individuazione degli spostamenti dalle fotografie permetterebbe di diminuire notevolmente i tempi di analisi.

Una buona soluzione per aumentare la precisione dell'osservazione degli spostamenti, che aumenta però anche il tempo di analisi, è quella di suddividere il corpo franoso in zone ed analizzarle singolarmente.

Al termine dello studio è possibile riassumere lo spostamento della frana mediante il seguente schema:

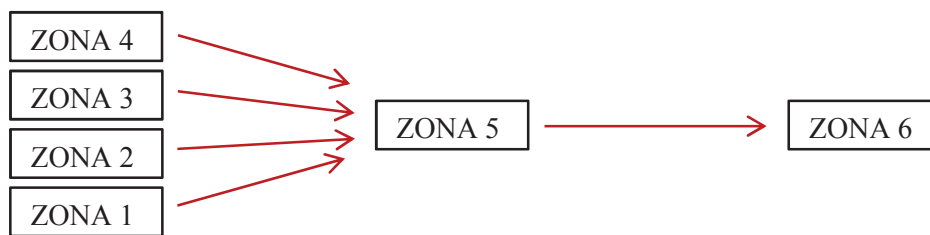


Figura 3.22: Schema riassuntivo del meccanismo di movimento principale presente nel corpo di frana

il quale mostra che le zone di monte depositano materiale nell'accumulo superiore (zona 5) dove, una volta superato un certo "grado di riempimento", viene spinto lungo il canale di valle dalle colate successive. Tale meccanismo non coinvolge le zone 7, 8 e 9, le quali rappresentano dei versanti esterni all'area interessata dalla colata e per questo presentano movimenti isolati.

Oltre al meccanismo sopracitato, durante l'osservazione delle foto è possibile individuare molte zone soggette ad erosione, soprattutto nella zona 3 e 9, l'asportazione di alcuni arbusti e dei ruscellamenti di materiale fangoso molto liquido sia durante gli spostamenti, sia nei periodi di scioglimento delle nevi.

Per confermare quanto emerso dall'osservazione delle foto, e testare quindi la bontà del metodo, si utilizzano delle analisi statistiche che permettono inoltre di ricercare eventuali correlazioni con le precipitazioni. Tali analisi si svolgono mediante l'uso del software *Minitab*, che presenta un'interfaccia abbastanza intuitiva ed è provvisto di un buon *Help* per l'utilizzo.

Come primo passo si esegue un test chi-quadrato ed una regressione logistica binaria, che permettono di ricercare la presenza di eventuali correlazioni tra gli spostamenti delle zone di valle e quelli delle zone di monte.

Grazie al test Chi-quadrato è possibile confermare che lo spostamento della zona 6 risulta dipendente da quello della zona 5, il quale a sua volta risulta dipendente dallo spostamento della zona 2 ed in particolare da quello della zona 3, situata frontalmente. I risultati ottenuti da questa analisi sono confermati anche dalla regressione logistica binaria, la quale permette di affermare che lo spostamento delle zone 2 e 3 aumentano la probabilità di osservare il movimento della zona 5 e che lo spostamento di quest'ultima aumenta la probabilità di osservare lo spostamento della zona 6. Grazie alle analisi svolte, che hanno confermato quanto osservato qualitativamente, è possibile affermare che il metodo di analisi utilizzato rappresenta un buon punto di partenza per lo studio degli spostamenti di un fenomeno di questo tipo, permettendo di individuare il meccanismo di movimento e la sua evoluzione solamente scorrendo in sequenza le fotografie.

Avendo a disposizione anche i dati pluviometrici è possibile realizzare un confronto a coppie sulle medie (GLM) ed una regressione logistica binaria, per ricercare eventuali correlazioni tra gli spostamenti delle singole zone, espressi in forma dicotomica, e le precipitazioni. Tale correlazione è suggerita sia dalla natura del dissesto, sia dall'osservazione di alcune rappresentazioni grafiche ottenute mettendo in relazione le due variabili.

Grazie al GLM è possibile affermare che le precipitazioni hanno mediamente effetto sullo spostamento delle singole zone ed in particolare, ognuna di esse è maggiormente influenzata da un pioggia cumulata di durata differente in funzione della sua morfologia; sulle zone più pendenti hanno mediamente effetto cumulate di breve durata, mentre su quelle pianeggianti cumulate più durevoli. Questi risultati vengono in buona parte confermati dalla regressione logistica la quale, per alcune zone, presenta dei risultati leggermente differenti ma ritenuti comunque accettabili.

In conclusione quindi, nonostante le difficoltà ed i difetti del sistema, tale metodo di analisi sembrerebbe essere adeguato per un primo studio del comportamento di un fenomeno franoso di questo tipo, in quanto consente di individuare il meccanismo di movimento ed il suo evolvere nel tempo semplicemente osservando le fotografie, e ricercare correlazioni con gli eventi pluviometrici attraverso l'esecuzione di semplici analisi statistiche.

4. ANALISI DI PIAN DE CICE

La zona di Pian de Cice ricopre un ruolo fondamentale nell'evoluzione della frana del Tessino in quanto, grazie ai numerosi studi svolti negli anni, sono stati rilevati spostamenti dell'ordine dei 2,8-6,3 cm annui che hanno portato ad uno scivolamento di 50 cm negli ultimi 10 anni.

In alcune relazioni tecniche effettuate per conto della Regione Veneto è stato scritto che *“l'eventuale collasso di questo sperone roccioso potrebbe comportare la mobilitazione di importanti settori dell'accumulo superiore, anche con dinamica diversa da quanto finora avvenuto; ciò comporterebbe un notevole aggravio delle condizioni di rischio per gli abitati di Funes e Lamosano...”*.

In questo capitolo si espongono le caratteristiche principali della zona e l'attività di monitoraggio svolta negli anni, con particolare attenzione alle misure inclinometriche, piezometriche e pluviometriche raccolte nel periodo che va dal 01/10/2012 al 30/08/2013.

Tali dati, assieme agli spostamenti rilevati dall'analisi delle fotografie in riferimento alla zona 9 (corrispondente ad un versante di Pian de Cice), consentono di ricercare eventuali correlazioni mediante l'utilizzo di analisi statistiche; per fare questo si riprende il lavoro svolto da Matteo Darienzo (2012), che ha elaborato per primo le misure strumentali durante un lavoro di tesi triennale.

4.1 Pian De Cice

La zona denominata Pian de Cice è situata nel settore orientale della frana (Figura 4.1) tra quota 900 e 1100 m s.l.m., in un'area soggetta a numerosi fenomeni erosivi da parte della colata, e coinvolge un volume di materiale di circa 600000 m³. Data l'importanza delle dimensioni, e i danni che un'eventuale distacco provocherebbe, l'area è stata oggetto di numerosi studi ed attività di monitoraggio che hanno permesso di determinarne gli spostamenti e le caratteristiche geologiche.



Figura 4.1: Individuazione di Pian de Cice nell'area di frana (Foto da Google Earth)

Nel ricercare la probabile causa di collasso si è osservato che, non essendo possibile trovare una relazione univoca tra spostamenti e precipitazioni, queste non siano motivo di mobilitazione, ma piuttosto si possa verificare la degradazione chimico-fisica del Flysch profondo a causa della circolazione idrica sotterranea e dei ripetuti cicli di imbibimento/essiccazione ed escursione termica stagionale, provocando delle improvvise accelerazioni ed il distacco della frana in pochissimo tempo; per tali motivi risulta maggiormente efficace un intervento di rinforzo interno che incrementi le resistenze e riduca le azioni destabilizzanti nella massa potenzialmente instabile.

A tal proposito, i professori Simonetta Cola e Paolo Simonini dell'Università di Padova, hanno proposto un duplice intervento consistente in una riprofilatura del versante, con asportazione di circa 45000 m³ di materiale per diminuire le forze instabilizzanti, e nell'inserimento di barre di acciaio ad alta resistenza fino a raggiungere il substrato roccioso permettendo un aumento della resistenza a taglio. La modellazione del versante e del successivo intervento (Figura 4.2) ha mostrato un aumento del coefficiente di sicurezza del 12% rispetto alla condizione iniziale.

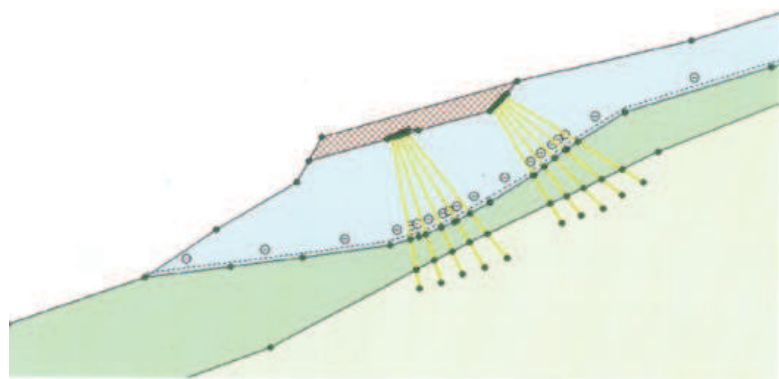


Figura 4.2: Particolare del modello di versante con indicati gli interventi di miglioramento proposti (P. Simonini & S. Cola - La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio)

È stata presentata inoltre un'altra proposta di miglioramento che riguarda la realizzazione di una vasca di accumulo in cemento armato a monte della strada che collega Funes con San Martino (più volte coperta dalla colata) capace di ospitare almeno 250000 m³ di materiale. A seguito di un'analisi condotta considerando l'eventuale distacco di Pian de Cice, è stato possibile osservare che il fronte della colata subisce un arresto in prossimità della vasca, confermando l'efficienza dell'intervento (Figura 4.3).

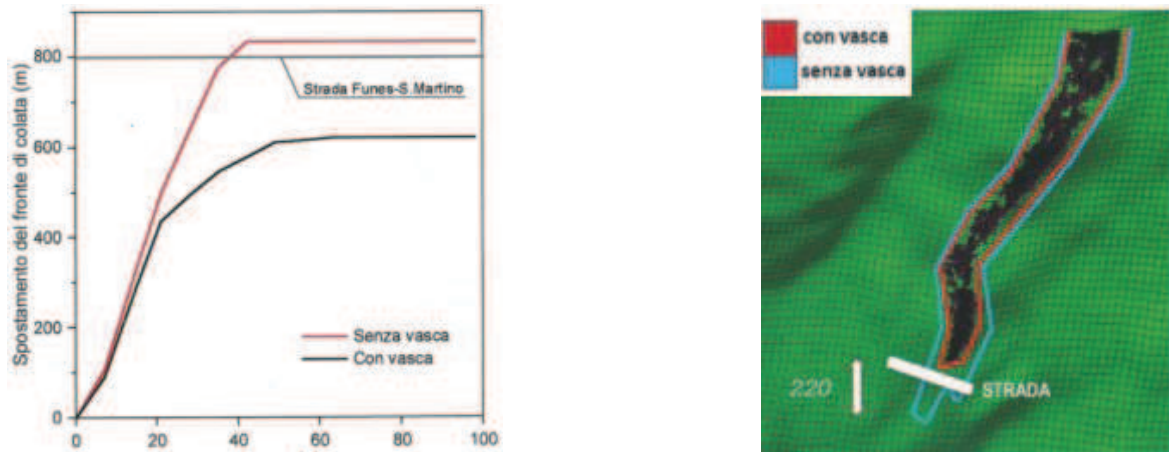


Figura 4.3: Effetto della vasca sulla propagazione della colata da Pian de Cice (P. Simonini & S. Cola - *La frana del Tessino: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Attività di monitoraggio negli anni

Dopo l'evento del 1992 furono eseguiti numerosi sondaggi meccanici attrezzati con piezometri ed inclinometri per monitorare sia il livello di falda, sia gli spostamenti profondi e la posizione della superficie di scorrimento; in particolare a Pian de Cice venne installato un piezometro ed inclinometro (S9) ad una profondità di 50 m a quota 994 m s.l.m. (Figura 4.4) che rilevò, dal 17/02/93 al 06/06/95, uno spostamento totale di 3,90 cm ed una superficie di scorrimento posta a -27 m s.p.c..

Nel 1998 venne posizionato un inclinometro (T1) che evidenziò uno spostamento continuo di Pian de Cice e la presenza di una superficie di

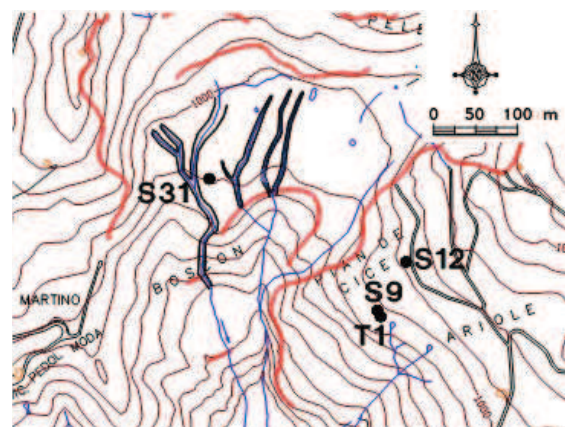


Figura 4.4: Posizione del piezometro ed inclinometro (S9) e dell'inclinometro (T1)

scorrimento ad una profondità di 26 m, confermando quanto rilevato dal sondaggio S9; gli spostamenti lungo tale superficie avvengono in direzione 230° Nord, pressappoco lungo la

linea di massima pendenza, e nel periodo di tempo di 12 mesi a cui si riferisce la Figura 4.5 raggiungono un valore di 3,5 cm.

Nel 1997 fu installato un sistema di monitoraggio basato sulla ricerca automatica di 30 capisaldi, 3 dei quali (307, 308, 309) vennero posizionati su Pian de Cice, che permisero di conoscere il movimento della zona (Figura 4.5).

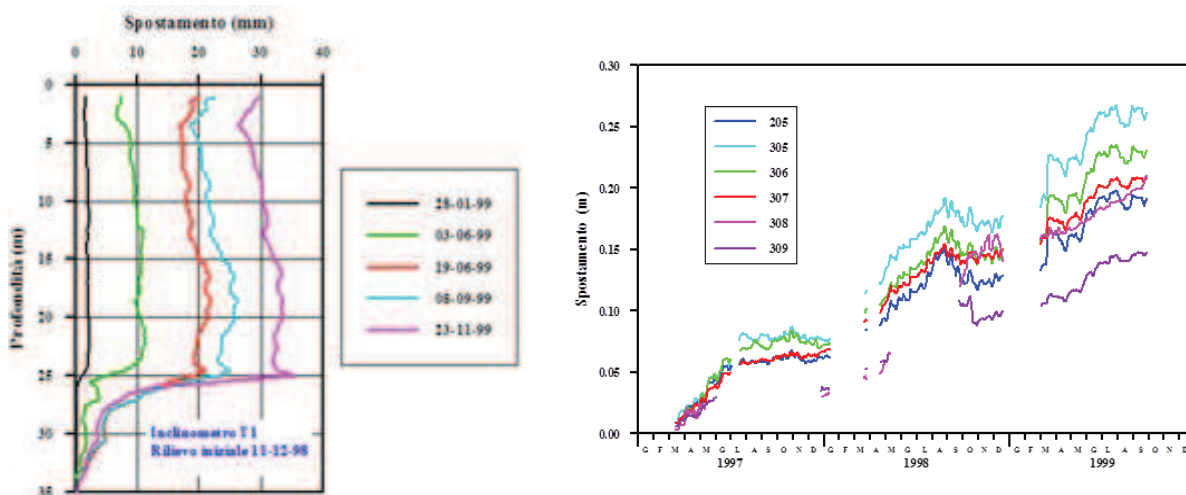


Figura 4.5: Deformazioni dell'inclinometro T1 (sx) e spostamenti dei capisaldi di Pian de Cice (dx) (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Come mostrato in Figura 4.5, nel periodo tra il 1997 e il 1999 la velocità di spostamento, pur variando in modo sensibile, si è mantenuta attorno ai 5-7 cm/anno.

Per individuare eventuali superfici di scivolamento, e monitorare l'entità degli spostamenti in profondità, furono installati 3 tubi inclinometrici (I1, I2, I3) lungo la sezione di massima pendenza del blocco; tali strumenti confermarono quanto rilevato precedentemente, cioè una superficie di scorrimento situata a 26 m di profondità e spostamenti annuali di 4,5 cm con direzione Nord 235°.

Durante il progetto MoVeMit si sono ripresi i controlli topografici per valutare il campo di spostamenti attuale e confrontarlo con quello raccolto in passato, verificando così come superficialmente la situazione sia rimasta invariata.

Vennero inoltre eseguite delle video ispezioni dei tubi inclinometrici per valutare, in modo qualitativo, la deformazione subita negli anni in cui non sono state effettuate misure strumentali; si osservò che il campo deformativo rimase costante.

I risultati della tomografia elettrica (Figura 4.6) mettono in evidenza la diversa composizione del versante: viene indicato con il Giallo ed Arancio i materiali detritici asciutti (depositi glaciali del Piave), con il Viola e Blu i materiali ricchi d'acqua (Flysch di Belluno) e con gli altri colori i termini litologici con contenuti d'acqua intermedi.

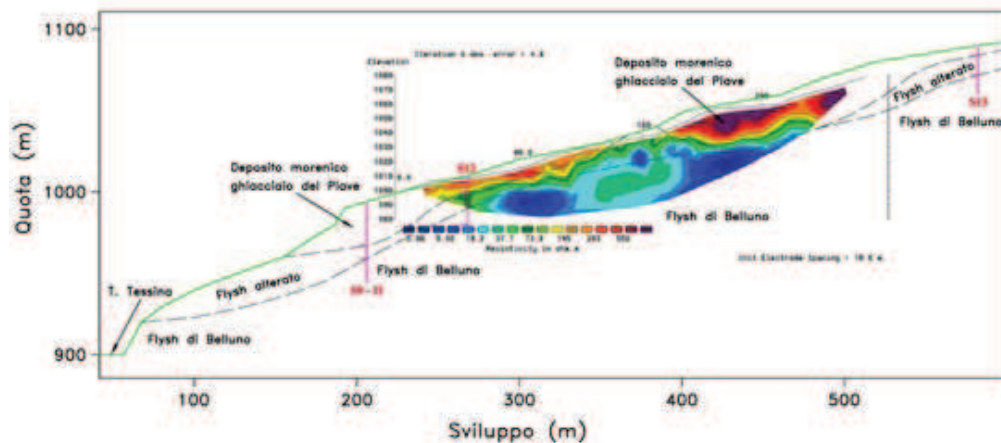


Figura 4.6: Profilo tomografico e schema stratigrafico della sezione longitudinale (G. Marcato & S. Silvano - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

Le misure inclinometriche, la descrizione delle carote recuperate durante l'esecuzione dei sondaggi e le osservazioni sulle formazioni, hanno consentito di ricostruire con sufficiente approssimazione la geometria dell'area da investigare ed i rapporti tra le diverse tipologie litologiche, come illustrato in Figura 4.7.

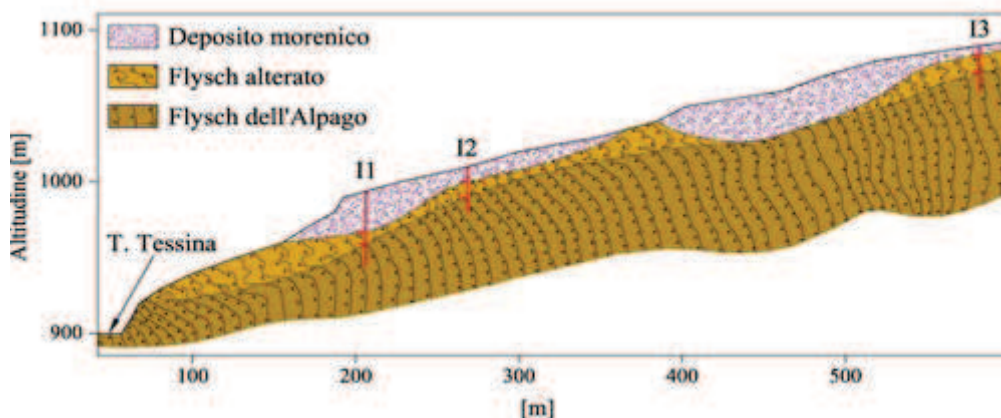


Figura 4.7: Ricostruzione geologica lungo la sezione longitudinale (G. Marcato & S. Silvano - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

La sezione longitudinale mostra due verosimili superfici di scivolamento che tagliano il versante di Pian de Cice a quote diverse, coincidenti con le superfici di contatto tra copertura morenica e Flysch alterato e tra Flysch alterato e substrato roccioso.

La prima superficie è facilmente riconoscibile dal netto cambiamento di materiale, mentre la seconda grazie alle misure inclinometriche.

Per verificare e quantificare la relazione tra le precipitazioni, l'altezza della falda e gli spostamenti, si sono confrontati i dati acquisiti dal piezometro P1 (dotato di trasduttore di pressione e datalogger) con i dati pluviometrici. L'analisi di una serie decennale di

osservazioni mostra oscillazioni molto piccole (minori di 50 cm) della falda che rimane praticamente costante nella zone di contatto tra il materiale morenico e il bedrock costituito dal Flysch.

Ciò indica un'alta conducibilità idraulica del deposito morenico ed un'elevata capacità di dissipare eccessi di pressione nei pori. Si può pertanto concludere che solo eventi particolarmente eccezionali possono attivare fenomeni d'instabilità nella zona.

4.2 Monitoraggio effettuato nel periodo dal 01/10/12 al 30/08/13

Nel Settembre 2012 è stato installato, nel settore di Pian de Cice, un piezometro a fondo aperto ad un profondità di -28,65 m s.p.c. e due sonde inclinometriche (Sonda Alta e Sonda Bassa) aventi le seguenti caratteristiche:

- Lunghezza (L): 1,30 m
- Angolo guida (X): 250° rispetto il Nord
- Angolo vettore spostamento: 168°
(calcolato a -26,5 m s.p.c.)

La testa della Sonda Alta è situata a -25,5 m s.p.c. mentre quella della Sonda Bassa a -27 m s.p.c. in corrispondenza della superficie di scorrimento rilevata nei monitoraggi precedenti.

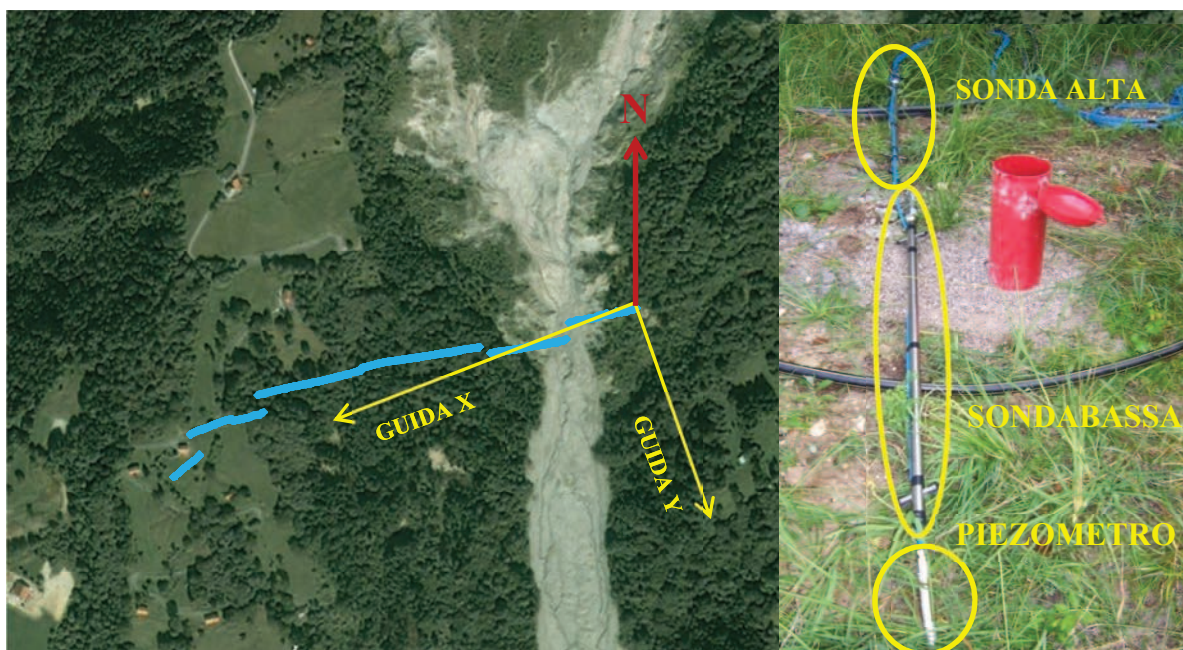
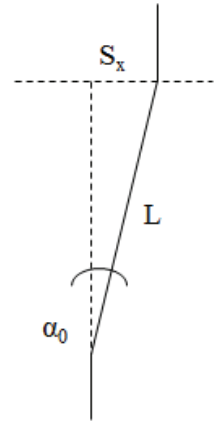


Figura 4.8: Diagramma polare e componenti dello strumento di misura

Probabilmente a causa di errori strumentali, causati da uno scarso ancoraggio al substrato o dalla spirallatura del tubo inclinometrico che ha prodotto la non conformità della direzione di movimento dell'inclinometro, la Sonda Bassa si è rivelata inaffidabile e per questo non considerata nell'analisi dei dati (M. Darienzo, 2012)



L'inclinometro ed il piezometro forniscono rispettivamente i seguenti parametri: le misure orarie degli angoli lungo la direzione X, lungo la direzione Y e l'oscillazione di falda, i quali si elaborano utilizzando delle semplici relazioni trigonometriche, in particolare per la conversione angolo-spostamento, secondo lo schema in Figura 4.9, ottenendo i seguenti parametri:

Figura 4.9: Schema semplificato dell'inclinometro

Spostamento di un'estremità [m]: $S_x = L \sin \alpha(t)$ (4.1)

Scorrimento lungo la direzione X [m]: $\Delta X = L(\sin \alpha_x(t) - \sin \alpha_{x0})$ (4.2)

Scorrimento lungo la direzione Y [m]: $\Delta Y = L(\sin \alpha_y(t) - \sin \alpha_{y0})$ (4.3)

Scorrimento risultate [m]: $\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$ (4.4)

dove $\alpha(t)$ e α_0 sono rispettivamente l'inclinazione della sonda al tempo t generico ed alla prima rilevazione di riferimento (01/10/2012).

Si raccolgono tutte le informazioni ottenute in un foglio elettronico che consente, oltre alla realizzazione di alcune rappresentazioni grafiche, di importare i dati all'interno del software *Minitab* per eseguire le analisi statistiche (Tabella 4.1).

Data	$\alpha(t)$ Y	Δy	$\alpha(t)$ X	Δx	Δ	Livello falda	Precipitazione
[gg/mese/anno/ora]	[°]	[m]	[°]	[m]	[m]	[m s.p.c.]	[mm]
01/10/2012 0.00.00	-1,569	-2,806E-07	1,304	1,214E-07	3,058E-07	-19,61	9,20
01/10/2012 1.00.00	-1,569	-2,806E-07	1,304	1,214E-07	3,058E-07	-19,61	11,80
01/10/2012 2.00.00	-1,569	-2,806E-07	1,304	1,214E-07	3,058E-07	-19,61	0,60
01/10/2012 3.00.00	-1,569	-2,806E-07	1,304	1,214E-07	3,058E-07	-19,61	1,60
01/10/2012 4.00.00	-1,568	2,240E-05	1,304	1,214E-07	2,240E-05	-18,63	6,00
01/10/2012 5.00.00	-1,568	2,240E-05	1,304	1,214E-07	2,240E-05	-18,63	5,60

Tabella 4.1: Valori dei parametri misurati e calcolati in riferimento alla Sonda Alta

4.2.1 Misure inclinometriche

Scorrimento lungo la direzione X

- $\alpha_0 = 1,304^\circ$ (01/10/12 – 00:00)
 - $\alpha = -2,974$ (t=11 mesi)
- $\Delta X = 0,0970 \text{ m}$
 $\Delta X \text{ (anno)} \approx 0,0970 \cdot 12/11 = 0,106 \text{ m}$

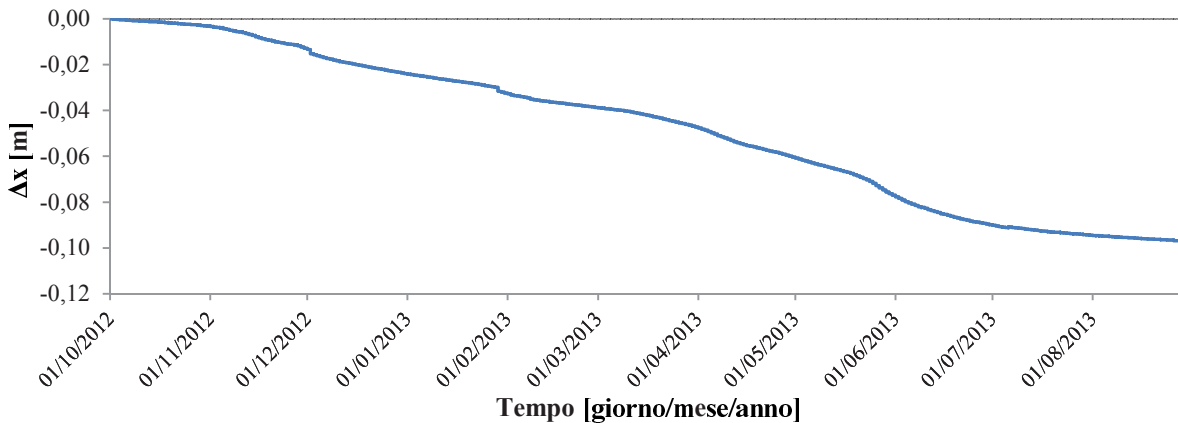


Figura 4.10: Andamento dello spostamento lungo la direzione x durante il periodo analizzato

Scorrimento lungo la direzione Y

- $\alpha_0 = -1,569^\circ$ (01/10/12 – 00:00)
 - $\alpha = -1,538^\circ$ (t=11 mesi)
- $\Delta Y = 0,0007 \text{ m}$
 $\Delta Y \text{ (anno)} \approx 0,0007 \cdot 12/11 = 0,001$

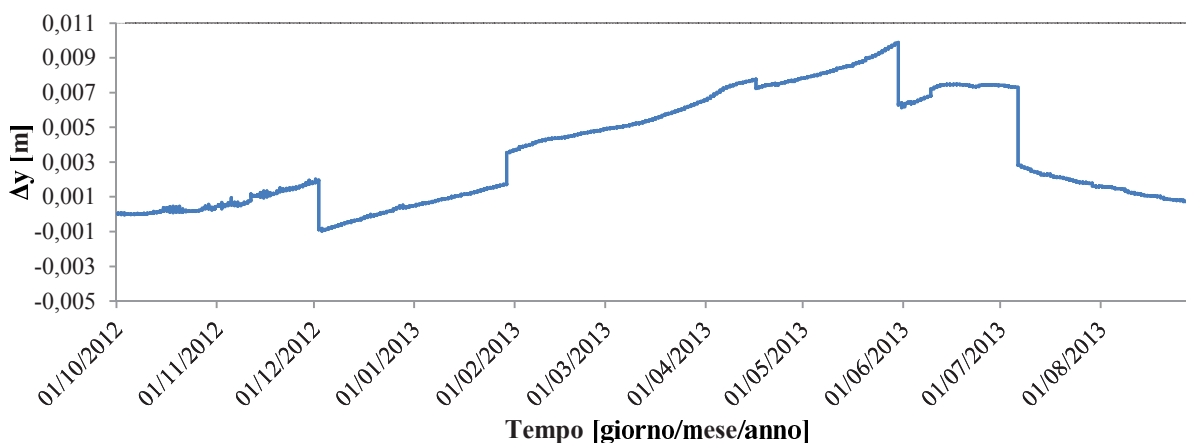


Figura 4.11: Andamento dello spostamento lungo la direzione y durante il periodo analizzato

Si osserva che gli spostamenti lungo la direzione y risultano inferiori rispetto a quelli lungo la direzione x di un ordine di grandezza e presentano un andamento molto irregolare, probabilmente dovuto allo strumento di misura.

Scorrimento risultante

$$\begin{array}{l} \Delta X = 0,0970 \text{ m} \\ \Delta Y = 0,0007 \text{ m} \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \Delta = 0,0970 \text{ m} \\ \Delta (\text{anno}) = 0,0970 \cdot 12/11 = 0,106 \text{ m/anno} \approx 0,03 \text{ cm/gg} \end{array}$$

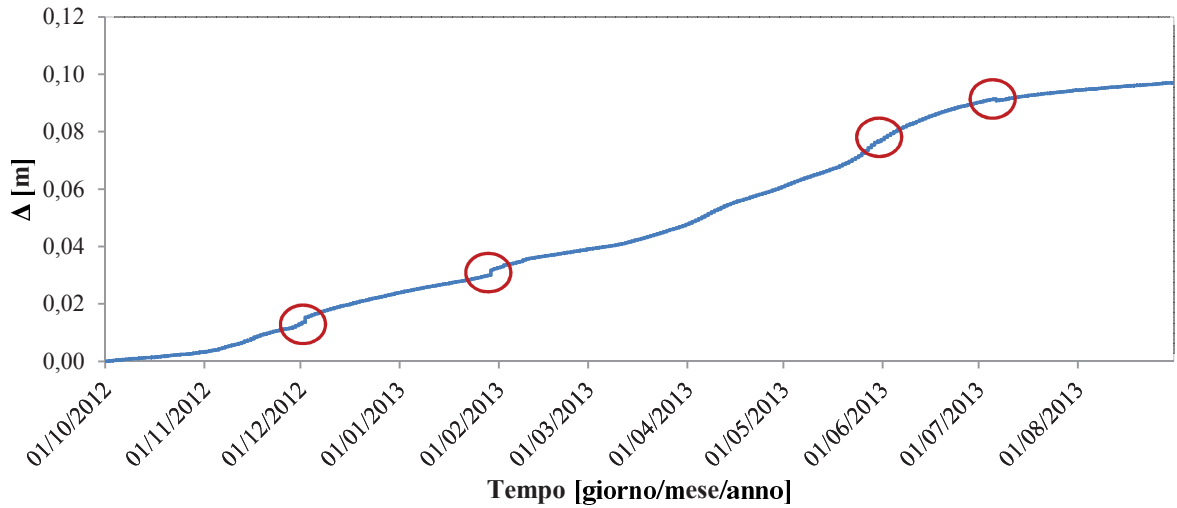


Figura 4.12: Andamento dello spostamento risultante durante il periodo analizzato

Si osserva che l'inclinometro ha rilevato, in questo periodo di osservazione, degli spostamenti dell'ordine dei 10 cm, il che suggerisce un aumento della velocità di movimento rispetto agli anni passati in cui si registravano spostamenti annui di 5 cm. Nel diagramma in Figura 4.12 sono presenti alcuni punti anomali in cui lo spostamento fa un "salto", probabilmente dovuti allo strumento di misura. È possibile notare inoltre che nel periodo che va da Aprile a Giugno 2013 la curva aumenta la sua pendenza, suggerendo quindi un aumento degli spostamenti probabilmente dovuto ad un innalzamento di falda, il quale può essere generato dalle abbondanti precipitazioni presenti in quei mesi.

4.2.2 Misure pluviometriche

Si riportano in Figura 4.13 i dati pluviometrici orari raccolti dalla stazione di Roncadin, vicino a Chies d'Alpago, per il periodo che va dal 01/10/12 al 19/06/13.

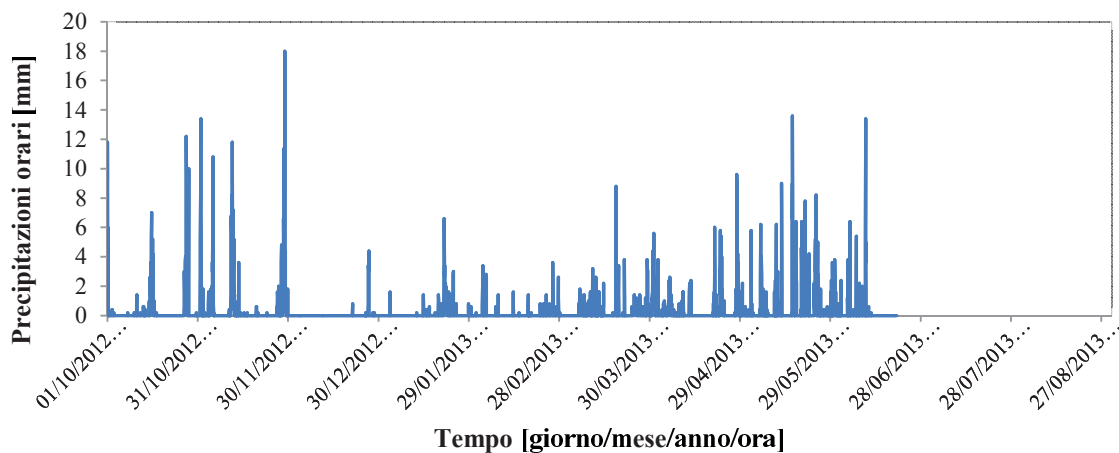


Figura 4.13: Andamento delle precipitazioni durante il periodo analizzato

Come esposto nel capitolo precedente i picchi di precipitazione sono localizzati nel mese di Novembre 2012, mentre tra Aprile e Maggio 2013 si hanno numerosi giorni piovosi con intensità abbastanza elevate; questo conferma quanto esposto precedentemente riguardo agli spostamenti ed inoltre suggerisce un probabile innalzamento di falda.

4.2.3 Misure piezometriche

In Figura 4.14 si rappresentano le misurazioni del livello di falda ottenute dal 01/10/12 al 30/08/13 dal piezometro installato a Pian de Cice.

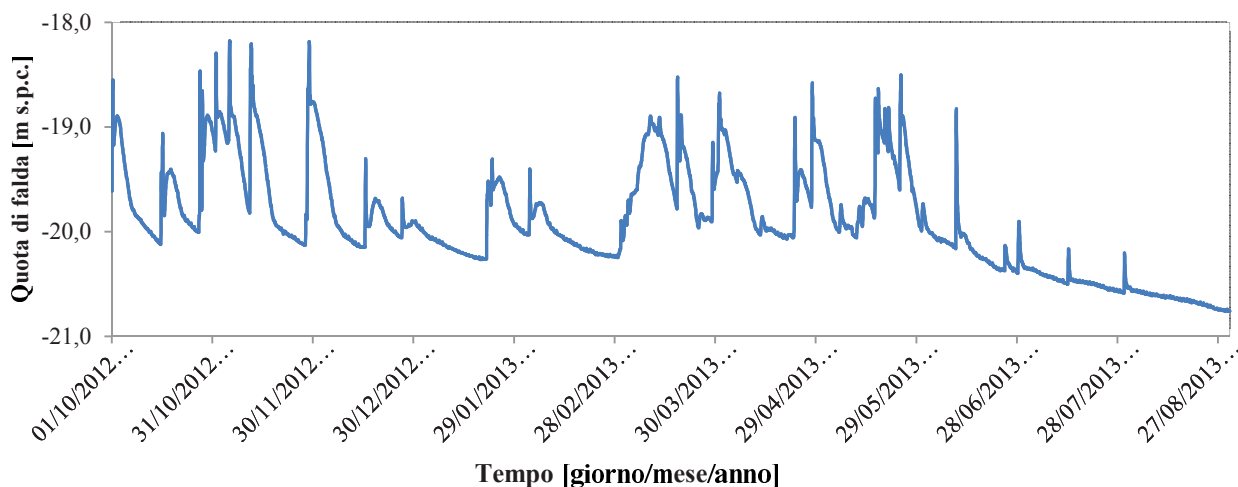


Figura 4.14: Andamento del livello di falda durante il periodo analizzato

È possibile individuare un livello di riposo alla profondità di -20 m s.p.c. con oscillazioni medie di circa un metro ed eccezionalmente due metri, più alte rispetto ai 50 cm rilevati in passato da un piezometro installato più a monte.

Anche non essendo disponibili i dati pluviometrici dei mesi di Luglio ed Agosto 2013, osservando l'andamento della falda, è ragionevole affermare che non siano avvenuti rilevanti eventi piovosi, in accordo anche con quanto evidenziato negli anni precedenti dove nel periodo estivo essi sono stati poco frequenti.

4.2.4 Analisi qualitativa delle relazioni tra i parametri misurati

Dal confronto tra il diagramma in Figura 4.13 e quello in Figura 4.14 è possibile osservare, com'è lecito aspettarsi, che vi è una relazione tra le precipitazioni ed il livello di falda; per osservarla meglio si considera un breve intervallo temporale per apprezzare maggiormente gli andamenti delle due variabili.

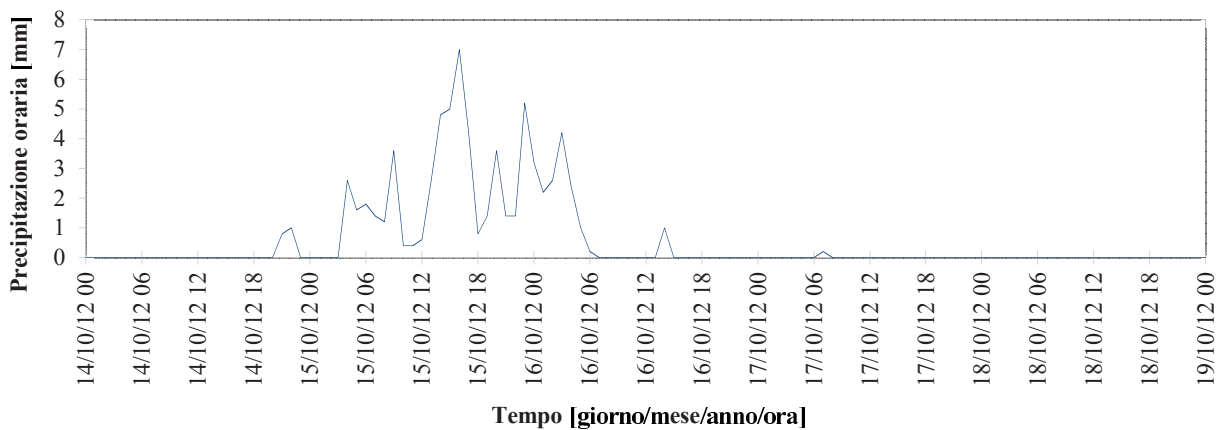


Figura 4.15: Andamento delle precipitazioni nel periodo dal 10/10/2012 al 18/10/2012

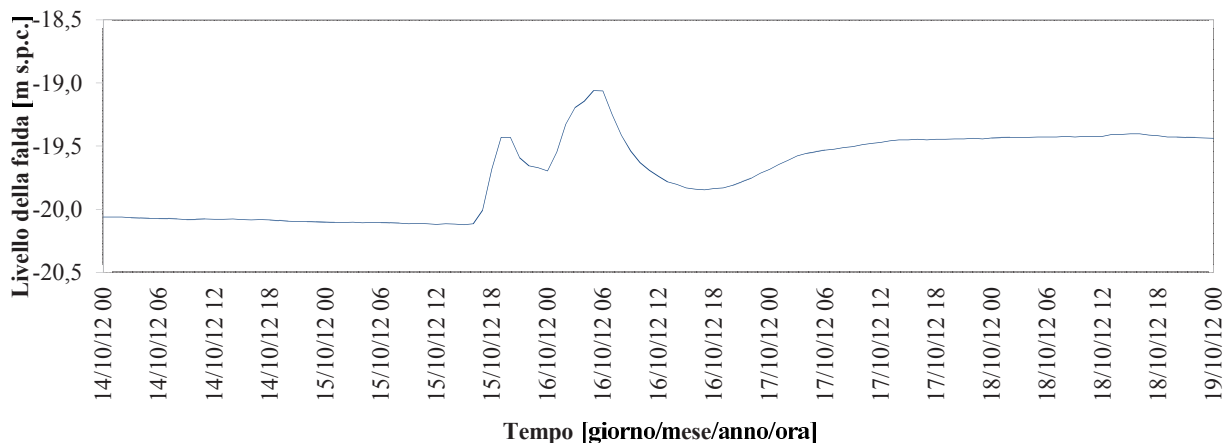


Figura 4.16: Andamento del livello di falda nel periodo dal 10/10/2012 al 18/10/2012

Dalla Figura 4.16 è possibile osservare che l'innalzamento del livello di falda avviene con qualche ora di ritardo dal picco di pioggia e che esso, dopo aver raggiunto un primo massimo, decresce per poi recuperare quota anche in assenza di precipitazione: probabilmente questo comportamento è l'effetto di due fenomeni di filtrazione diversi, legati alle caratteristiche eterogenee ed anisotrope del terreno.

Questa osservazione, in riferimento al periodo analizzato, è concorde a quanto rilevato da un'analisi idrologica eseguita in passato, la quale aveva individuato un ritardo di circa 9/12 ore tra l'inizio delle precipitazioni e l'innalzamento del livello di falda.

Per introdurre nel confronto anche gli spostamenti si considera la velocità, calcolata come differenza tra un valore di spostamento e quello misurato 24 ore prima, in modo da limitare l'oscillazione dei dati che si verifica se si considerano direttamente gli spostamenti orari. Si prendono in esame alcuni mesi del periodo osservato:

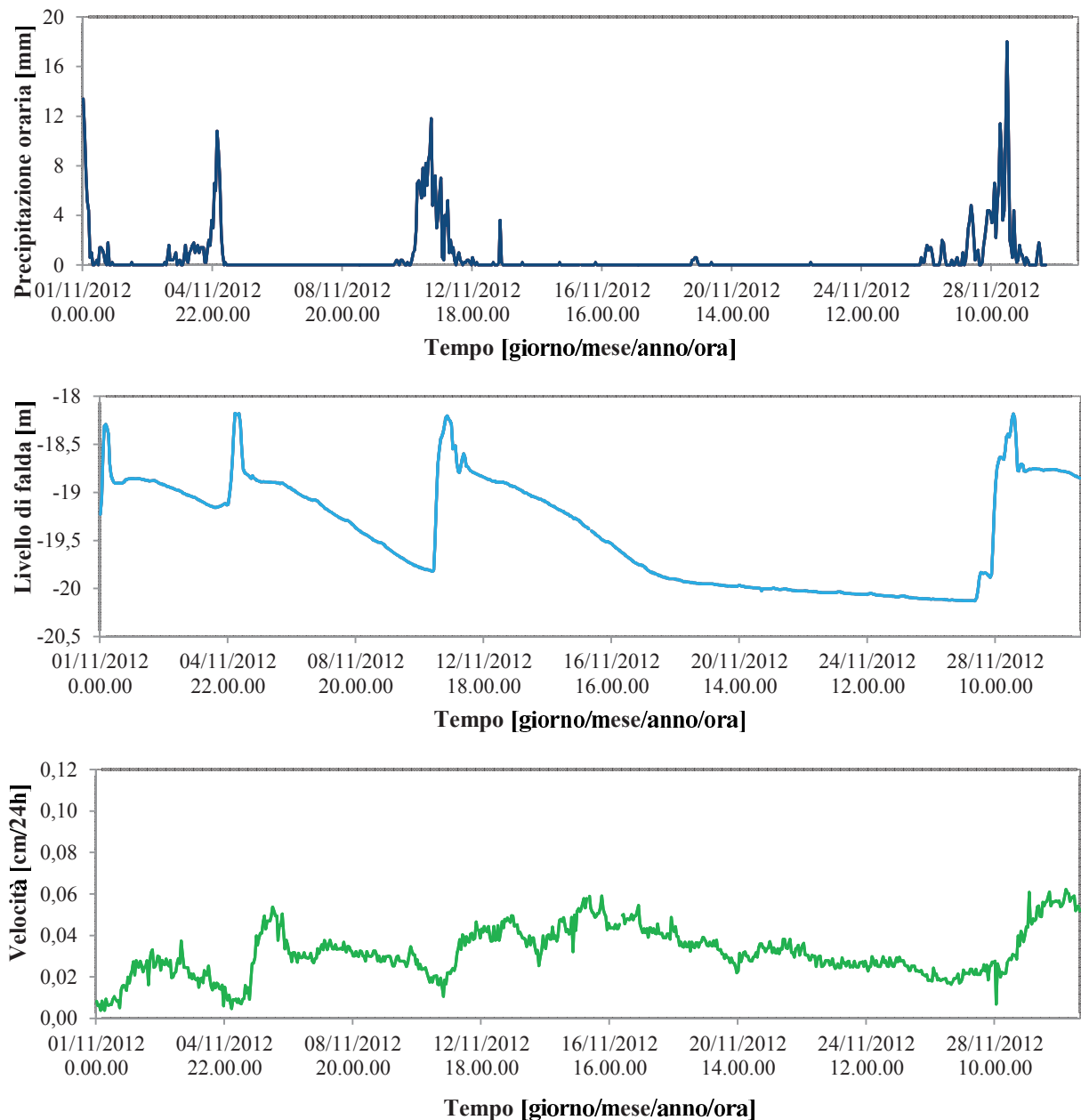


Figura 4.17: Andamento delle precipitazioni, del livello di falda e della velocità nel Novembre 2012

Dal confronto dei tre andamenti è possibile osservare una correlazione tra le precipitazioni ed il livello di falda, evidenziato dalla corrispondenza dei “picchi” delle funzioni. Come anticipato il livello di riposo può essere fissato a -20 m s.p.c., infatti quando le precipitazioni si esauriscono, la falda scende a tale quota fino al successivo evento piovoso. Per quanto riguarda la velocità non si rileva una correlazione netta con le altre variabili, ma solamente dei periodi di accelerazione in corrispondenza dei massimi delle altre funzioni. Questi risultati, anche se qualitativi, consentono di affermare che durante il mese di Novembre, caratterizzato da piogge di elevata intensità e quindi di livello di falda mediamente alto, la velocità risulta abbastanza elevata rispetto ai mesi precedenti (nel mese di Ottobre si aggira sugli 0,01 cm/24h), assumendo valori pari a circa 0,05 cm/24 h.

Relazione tra spostamenti e precipitazioni nella frana del Tessina (Alpago, Italia)

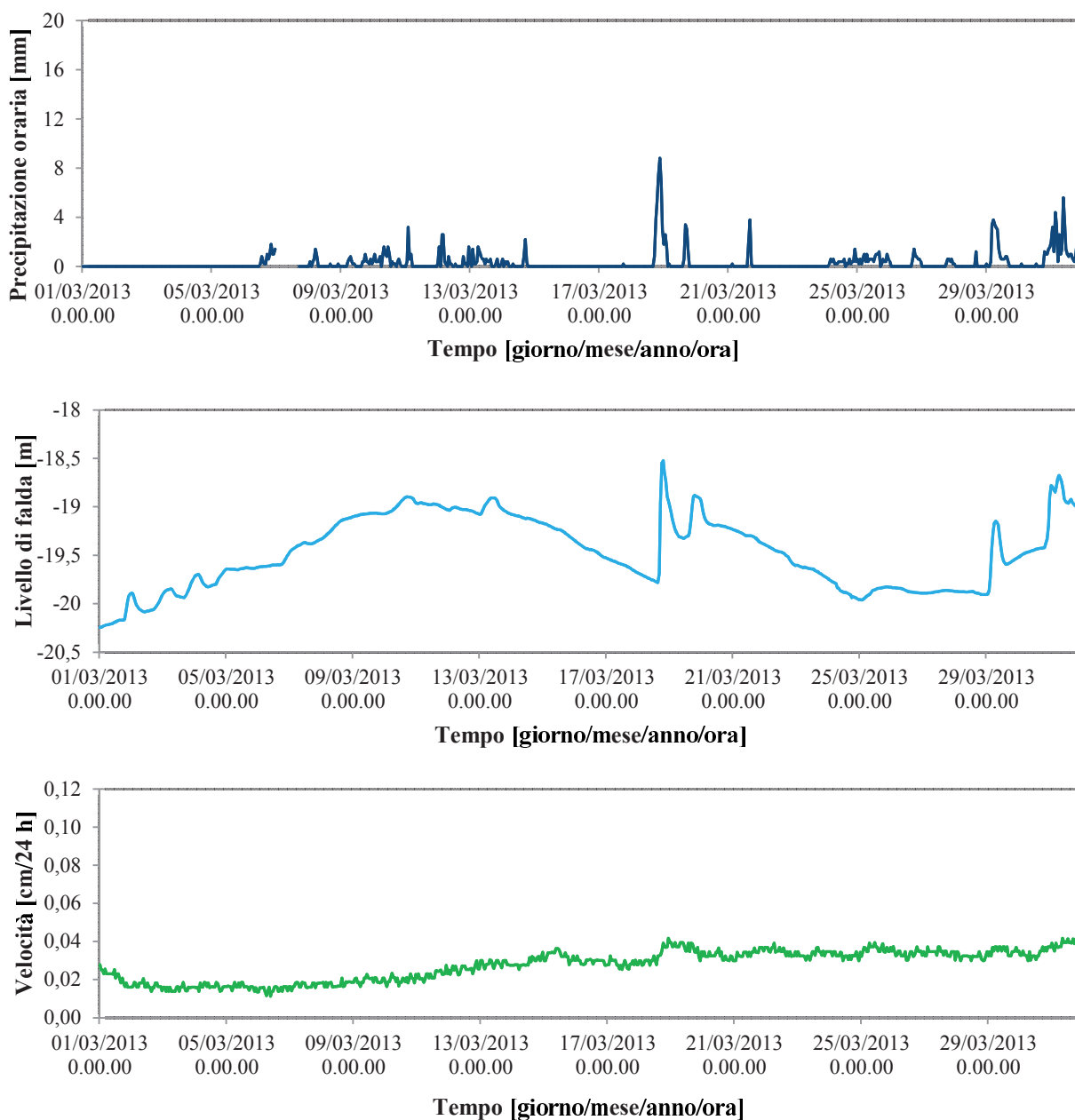


Figura 4.18: Andamento delle precipitazioni, del livello di falda e della velocità nel Marzo 2012

Osservando gli andamenti delle precipitazioni e della falda si osserva che quest'ultima aumenta velocemente anche in assenza di pioggia: questo comportamento è dovuto allo scioglimento delle nevi presenti abbondantemente durante tutto il mese di Febbraio. Le successive piogge mantengono alto il livello di falda, il quale successivamente scende a quota -20 m s.p.c. fino al prossimo evento di pioggia che ne causa un innalzamento. La velocità si mantiene relativamente bassa ad inizio mese per poi crescere, con un certo ritardo dall'innalzamento della falda, fino ad un valore pari a circa 0,03 cm/24 h. Successivamente essa aumenta in corrispondenza del picco di pioggia maggiore, indicando quindi un'influenza di quest'ultimo sul movimento del versante (ed ovviamente sul livello di falda).

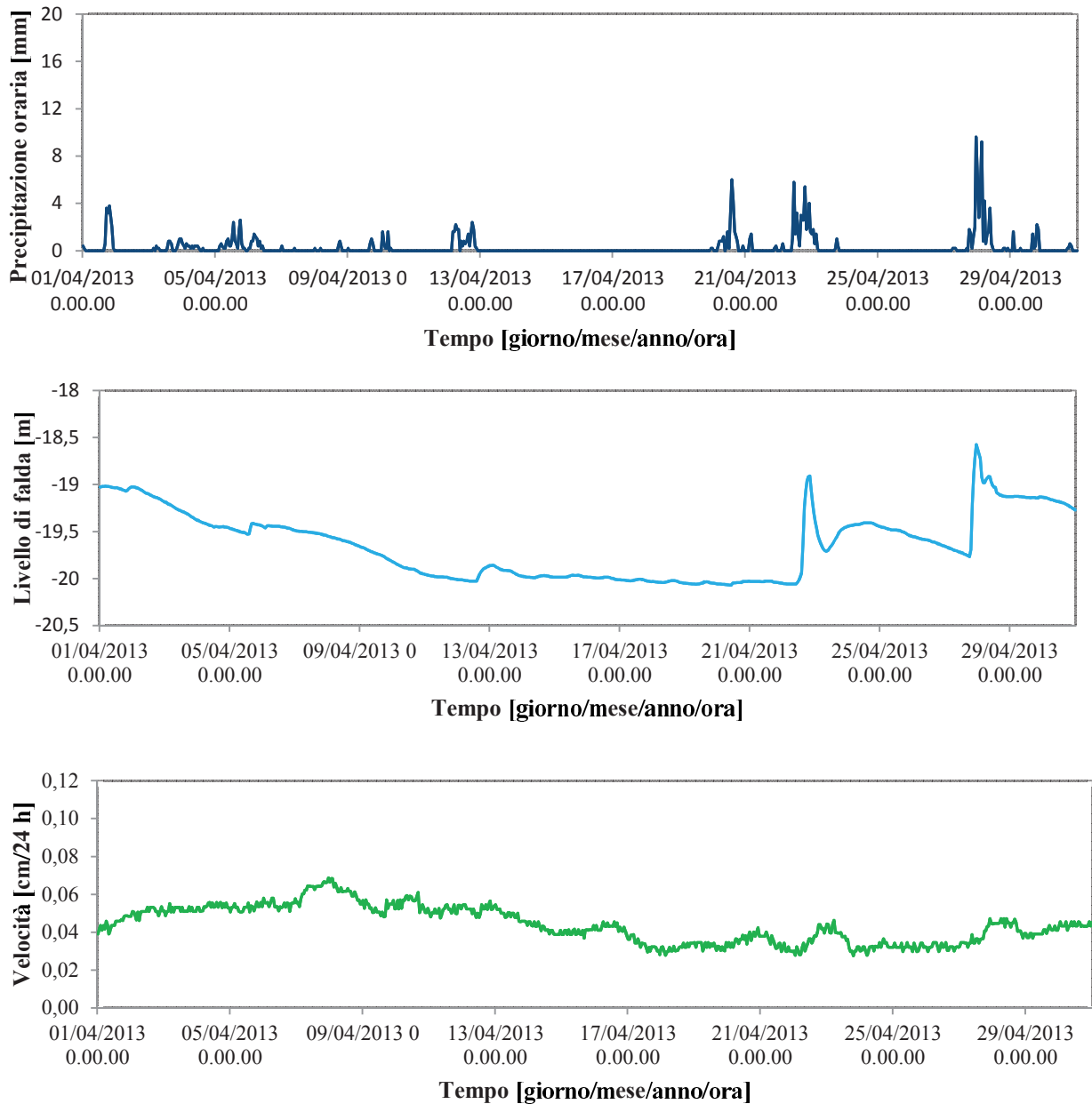


Figura 4.19: Andamento delle precipitazioni, del livello di falda e della velocità nel Aprile 2012

Si osserva che ad inizio mese il livello di falda decresce mentre la velocità, già elevata inizialmente, continua a crescere fino a raggiungere valori pari a circa 0,06 cm/24 h per poi decrescere, verso metà mese, in accordo con l’abbassamento del livello di falda e l’assenza di precipitazioni. Verso fine mese si registrano delle precipitazioni abbastanza elevate che provocano due picchi significativi del livello di falda ed una leggera accelerazione di movimento.

Dalle osservazioni appena esposte è possibile affermare che nel mese di Novembre, Marzo ed Aprile la zona di Pian de Cice si è mossa rapidamente, ed in particolare ha subito un’accelerazione nei mesi di Marzo ed Aprile rispetto al mese di Febbraio, nel quale la velocità media si aggira attorno ai 0,02 cm/24 h.

4.3 Analisi statistiche

Per confermare quanto osservato nel paragrafo precedente, cioè la presenza di una relazione tra spostamenti, livello di falda e precipitazioni, si utilizzano delle analisi statistiche implementate nel software *Minitab*, le quali permettono inoltre di ricercare quali variabili influiscono sulla visione degli spostamenti in riferimento alla zona 9, corrispondente ad un versante di Pian de Cice.



Figura 4.20: Individuazione della zona 9, corrispondente ad un versante di Pian de Cice

Si suddividono le analisi in due parti in funzione del tipo di variabile dipendente: si esegue un confronto tra le medie ed una regressione logistica per valutare l'effetto delle variabili sugli spostamenti osservati dalle fotografie, espressi in forma dicotomica, ed una regressione lineare multipla per ricercare le variabili che hanno effetto significativo sugli spostamenti misurati, espressi in forma continua. Per quantizzare il ritardo presente tra gli andamenti dei parametri si realizzano delle *Cross Correlazioni*, analisi particolarmente adatte allo studio di questo fenomeno.

Preliminarmente è necessario ricavare i valori giornalieri dei dati misurati, considerando le 24 ore a partire dalle 12:00 in modo da tener conto che la fotografia abbia “visto” il parametro.

Per fare questo si procede come segue:

- Spostamenti: l'inclinometro fornisce la misura dello spostamento orario con riferimento al 01/10/12 pertanto, per ottenere quello giornaliero, è necessario sottrarre al valore dello spostamento finale (considerato alle 12:00 del giorno stesso) quello iniziale (considerato alle 12:00 del giorno precedente). Nelle analisi questo parametro viene indicato con “SP”.
- Livello di falda: lo strumento misura la profondità della falda rispetto al piano campagna pertanto, per avere il valore dell'innalzamento o abbassamento giornaliero, si considera come riferimento una profondità media pari a 20 m e si calcolano,

attraverso la differenza i vari dislivelli, e se ne fa la media giornaliera. Tale parametro viene indicato con “FALDA”.

- Abbassamento/Innalzamento: per effettuare delle analisi più mirate, volte ad individuare eventuali correlazioni con l’innalzamento o abbassamento di falda, si raccolgono in due diverse serie i valori positivi (innalzamenti) e negativi (abbassamenti) in valore assoluto. Questi parametri vengono indicati rispettivamente con “ALTA” e “BASSA”.

Gli spostamenti della zona 9 ed i valori pluviometrici, essendo giornalieri, non sono modificati.

Si raccolgono quindi questi dati in un foglio elettronico, il quale viene importato su *Minitab* per l’esecuzione delle diverse analisi (Tabella 4.2):

DATA	SP	FALDA	ALTA	BASSA	PIOGGIA	Sp_9
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	
01/10/2012	6,75E-03	101,60	101,60	-	4,10	0
02/10/2012	7,15E-03	97,52	97,52	-	0,06	0
03/10/2012	1,40E-02	107,49	107,49	-	0,10	0
04/10/2012	1,27E-02	87,30	87,30	-	0,00	0
05/10/2012	1,13E-02	61,86	61,86	-	0,00	0
06/10/2012	1,13E-02	40,82	40,82	-	0,00	0
07/10/2012	1,36E-02	24,15	24,15	-	0,00	0
08/10/2012	1,36E-02	17,16	17,16	-	0,00	0
09/10/2012	9,16E-03	13,00	13,00	-	0,00	0
10/10/2012	1,13E-02	9,10	9,10	-	0,04	0

Tabella 4.2: Valori dei parametri calcolati, utilizzati nelle analisi statistiche

4.3.1 General Linear Model

Come nelle analisi effettuate per la correlazione tra le precipitazioni e gli spostamenti delle singole zone, anche in questo caso si ha una variabile dicotomica ed è quindi possibile applicare i confronti a coppie delle medie tra gli spostamenti osservati per la zona 9 (Sp_9) e quelli misurati dall’inclinometro (SP) per verificare se, quando lo strumento rileva spostamento, questo è visibile in superficie attraverso l’uso delle fotografie oppure avviene solamente in profondità. Si utilizza inoltre quest’analisi per ricercare eventuali correlazioni tra gli spostamenti visibili dalle foto, l’innalzamento del livello di falda e le precipitazioni. Seguendo lo stesso procedimento esposto nel Paragrafo 3.4.3 si ottengono i seguenti output:

General Linear Model: SP [cm] versus Sp_9

Factor	Type	Levels	Values
Sp_9	fixed	2	0; 1

Analysis of Variance for SP [cm], using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Sp_9	1	0,0043182	0,0043182	0,0043182	14,99	0,000
Error	149	0,0429128	0,0429128	0,0002880		
Total	150	0,0472310				

S = 0,0169707 R-Sq = 9,14% R-Sq(adj) = 8,53%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,037523	0,001777	21,12	0,000
Sp_9	-0,006880	0,001777	-3,87	0,000

Si osserva che il coefficiente risulta negativo, ed è quindi possibile affermare che gli spostamenti misurati dall'inclinometro hanno mediamente effetto su quelli osservati nelle fotografie; questo significa che, mediamente, quando lo strumento rileva movimento esso è visibile superficialmente.

General Linear Model: FALDA [cm] versus Sp_9

Factor	Type	Levels	Values
Sp_9	fixed	2	0; 1

Analysis of Variance for FALDA [cm], using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Sp_9	1	21264	21264	21264	10,40	0,002
Error	149	304590	304590	2044		
Total	150	325854				

S = 45,2132 R-Sq = 6,53% R-Sq(adj) = 5,90%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	45,103	4,734	9,53	0,000
Sp_9	-15,267	4,734	-3,23	0,002

Trattandosi di un'oscillazione, essa assume valori positivi e negativi ed è quindi necessario verificare che la media delle oscillazioni quando Sp_9 è pari a 0 o ad 1 sia positiva, per poter interpretare il significato del coefficiente:

Media Falda (Sp_9=0)= 29,84 cm

Media Falda (Sp_9=1)= 60,37 cm

Essendo entrambe le medie positive, e risultando il coefficiente negativo, è possibile affermare che l'oscillazione di falda ha mediamente effetto sugli spostamenti osservati nelle

fotografie; questo significa che, mediamente, quando lo strumento rileva degli innalzamenti di falda avvengono degli spostamenti visibili superficialmente.

Per eseguire un'analisi più mirata, volta ad individuare se lo spostamento è influenzato dall'innalzamento o dall'abbassamento del livello di falda si utilizzano i parametri ALTA e BASSA, considerandone i valori assoluti per interpretare il coefficiente:

General Linear Model: ALTA [cm] versus Sp_9

Factor Type Levels Values
Sp_9 fixed 2 0; 1

Analysis of Variance for ALTA [cm], using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Sp_9	1	4123	4123	4123	2,78	0,098
Error	114	169209	169209	1484		
Total	115	173333				

S = 38,5265 R-Sq = 2,38% R-Sq(adj) = 1,52%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	55,981	4,232	13,23	0,000
Sp_9	-7,054	4,232	-1,67	0,098

General Linear Model: BASSA [cm] versus Sp_9

Factor Type Levels Values
Sp_9 fixed 2 0; 1

Analysis of Variance for BASSA [cm], using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Sp_9	1	70,9	70,9	70,9	0,18	0,670
Error	33	12671,7	12671,7	384,0		
Total	34	12742,6				

S = 19,5957 R-Sq = 0,56% R-Sq(adj) = 0,00%

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	15,863	9,941	1,60	0,120
Sp_9	4,273	9,941	0,43	0,670

Si osserva che il coefficiente ottenuto per “ALTA” è negativo, mentre quello per “BASSA” positivo. È possibile quindi affermare che l’innalzamento della falda ha mediamente effetto sullo spostamento osservato nelle fotografie, mentre l’abbassamento no; questo significa che, mediamente, se il livello di falda di alza, è possibile osservare spostamento, se invece si abbassa la zona appare ferma. In particolare, osservando i due coefficienti in valore assoluto, quello di ALTA risulta maggiore, indicando quindi che c’ è

mediamente più correlazione tra l'innalzamento di falda e la visione di spostamento che tra l'abbassamento di falda e l'assenza di spostamento.

Questo risultato sembrerebbe concorde con quanto avviene fisicamente all'interno del terreno: l'innalzamento del livello di falda provoca un aumento delle pressioni neutrali con conseguente diminuzione delle tensioni efficaci ed aumento delle forze instabilizzanti, portando al movimento di versante.

4.3.2 *Regressione Logistica Binaria*

Essendo gli spostamenti della zona 9 espressi in forma dicotomica, anche in questo caso è possibile utilizzare la regressione logistica binaria per individuare quali variabili hanno effetto significativo su di essi. Analogamente a quanto esposto nel Paragrafo 3.3.2 si esegue la regressione seguita dal processo di *stepwise* manuale, inserendo come variabili indipendenti le piogge, gli spostamenti misurati dall'inclinometro e l'oscillazione di falda, e come variabile dipendente gli spostamenti osservati nelle fotografie per la zona 9. Si ottiene il seguente output:

Binary Logistic Regression: Sp_9 versus SP [cm]; PIOGGIA [cm]

Link Function: Logit

Response Information

Variable	Value	Count	
Sp_9	1	28	(Event)
	0	113	
	Total	141	

* NOTE * 141 cases were used

* NOTE * 193 cases contained missing values

Logistic Regression Table

Predictor	Coef	SE Coef	Z	P	Odds Ratio	95% CI Lower
Constant	-3,14051	0,572478	-5,49	0,000		
SP [cm]	35,0807	12,3738	2,84	0,005	1,71933E+15	50412,93
PIOGGIA [cm]	0,553705	0,180012	3,08	0,002	1,74	1,22

Predictor Upper

Constant

SP [cm] 5,86379E+25

PIOGGIA [cm] 2,48

Log-Likelihood = -58,451

Test that all slopes are zero: G = 23,655, DF = 2, P-Value = 0,000

Si osserva che il p-value della statistica test G risulta essere minore del livello di significatività fissato $\alpha=0,05$, ed è quindi possibile affermare che almeno una delle variabili ha effetto significativo sulla risposta; in particolare risulta significativa sia la variabile pioggia che la variabile spostamento misurato dall'inclinometro. Questo risultato indica che gli

spostamenti superficiali, visibili nelle fotografie, avvengono in concomitanza con quelli profondi e sono influenzati dalla pioggia, la quale esercita un'azione di dilavamento ed erosione portando alla mobilitazione del versante.

Per quanto riguarda gli *Odds Ratio*, si osserva un valore anomalo in corrispondenza dello spostamento, probabilmente dovuto ad un errore computazionale del software, ed un valore maggiore all'unità per le piogge, indicando che una variazione unitaria di tale parametro comporta un aumento di probabilità di vedere spostamenti in superficie.

Avendo osservato qualitativamente un certo ritardo tra le precipitazioni, l'innalzamento del livello di falda e gli spostamenti, si esegue una *Cross Correlation* che permette di stimare tale ritardo a partire dalla forma delle funzioni in esame.

4.3.3 *Cross Correlation*

Quest'analisi si utilizza per lo studio di serie temporali e rappresenta la misura di similitudine di due segnali come funzione di uno spostamento o traslazione temporale applicata ad uno di essi. Considerando due segnali a valori reali X e Y , che differiscono solamente per uno spostamento sull'asse t , si può calcolare la correlazione incrociata per mostrare di quanto Y deve essere anticipato per renderlo identico ad X . La formula essenzialmente anticipa il segnale Y lungo l'asse t , calcolando l'integrale del prodotto per ogni possibile valore dello spostamento, e quando i due segnali coincidono il valore di $(X \cdot Y)$ è massimizzato:

$$Y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n+k) \quad (4.5)$$

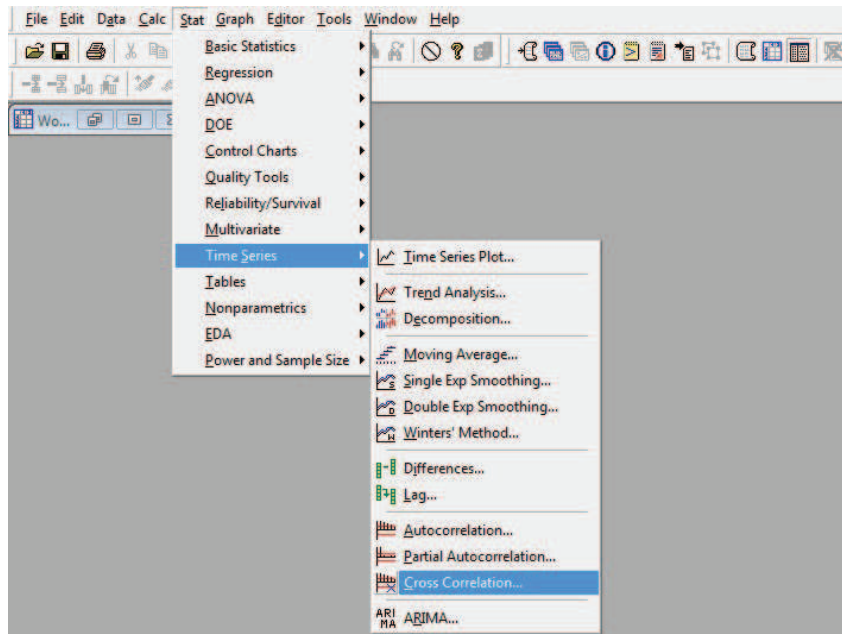
Grazie a quest'analisi quindi è possibile valutare il ritardo che intercorre tra le tre variabili:

- Precipitazione e spostamenti
- Precipitazioni ed innalzamento di falda
- Innalzamento di falda e spostamenti

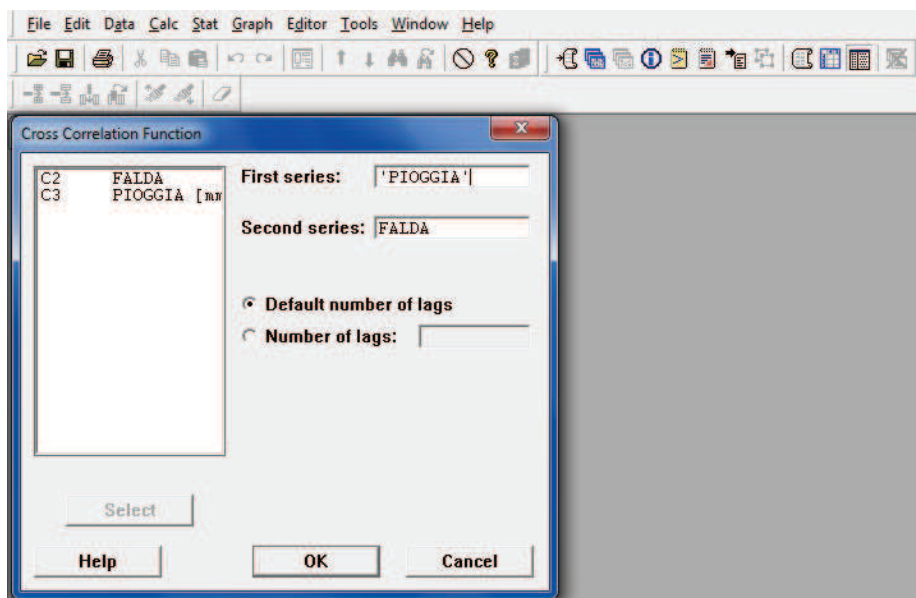
Per eseguire queste operazioni si utilizza ancora una volta il software *Minitab* il quale permette inoltre di normalizzare le funzioni qualora esse si presentino in scale differenti. Si raccolgono i dati in un foglio di calcolo, considerando i valori orari di precipitazione e livello di falda (si considerano i dati misurati dallo strumento, non l'oscillazione rispetto al riferimento), mentre gli spostamenti, presentando i valori orari un'eccessiva oscillazione, si calcolano come differenza tra due valori a distanza di 24 ore.

Dopo aver importato i dati nel software, si svolge il seguente procedimento:

- 1) Dal menù Stat→Time Series si seleziona *Cross correlation*



- 2) Si inserisce in first series e in second series le colonne contenenti i valori delle due serie storiche e si esegue l'analisi.



3) Mettendo in relazione le tre variabili a coppie, si ottengono i seguenti *output*:

Cross Correlation Function: PIOGGIA [mm]; FALDA

CCF - correlates PIOGGIA [mm] (t) and FALDA(t+k)

	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
-2	0,198					XXXXXX					
-1	0,219					XXXXXX					
0	0,240					XXXXXXX					
1	0,264					XXXXXXXXX					
2	0,294					XXXXXXXXXX					
3	0,321					XXXXXXXXXXX					
4	0,336					XXXXXXXXXXX					
5	0,338					XXXXXXXXXXX					
6	0,334					XXXXXXXXXXX					
7	0,329					XXXXXXXXXXX					
8	0,323					XXXXXXXXXXX					
9	0,317					XXXXXXXXXXX					
10	0,309					XXXXXXXXXXX					
11	0,303					XXXXXXXXXXX					
12	0,299					XXXXXXXXXX					

Cross Correlation Function: PIOGGIA [mm]; SP[cm] CORR

CCF - correlates PIOGGIA [mm] (t) and SP[cm] CORR(t+k)

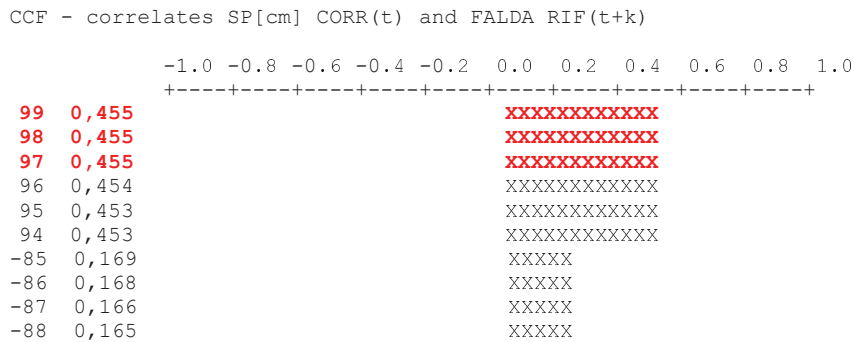
	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
29	0,105					XXXX					
30	0,115					XXXX					
31	0,119					XXXX					
32	0,125					XXXX					
33	0,133					XXXX					
34	0,141					XXXXX					
35	0,149					XXXXX					
36	0,153					XXXXX					
37	0,154					XXXXX					
38	0,152					XXXXX					
39	0,141					XXXXX					
40	0,135					XXXX					
41	0,135					XXXX					
42	0,136					XXXX					
43	0,131					XXXX					
44	0,124					XXXX					

Cross Correlation Function: PIOGGIA [mm]; SP[cm] CORR

CCF - correlates PIOGGIA [mm] (t) and SP[cm] CORR(t+k)

	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
54	0,126					XXXX					
55	0,125					XXXX					
56	0,125					XXXX					
57	0,126					XXXX					
58	0,126					XXXX					
59	0,126					XXXX					
60	0,127					XXXX					
61	0,127					XXXX					
62	0,126					XXXX					
63	0,125					XXXX					
64	0,124					XXXX					
65	0,121					XXXX					
66	0,120					XXXX					
67	0,121					XXXX					

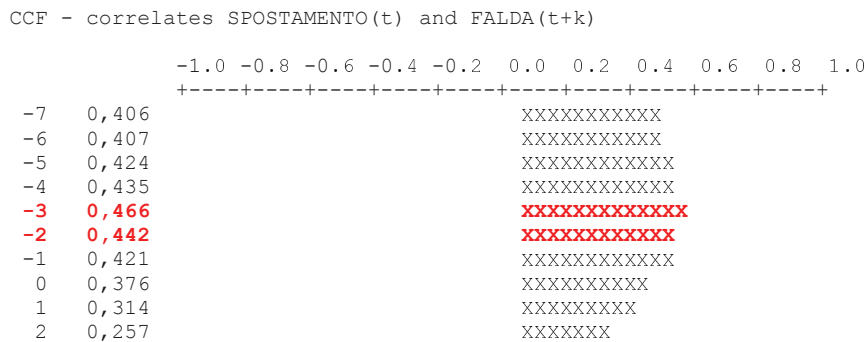
Cross Correlation Function: FALDA RIF; SP[cm] CORR



Si osserva che l’innalzamento del livello di falda avviene con un ritardo di circa 4-5 ore rispetto alla precipitazione oraria, comportamento osservato anche qualitativamente dalle rappresentazioni grafiche. Tale ritardo risulta molto minore rispetto a quello rilevato in passato (9/12 h), probabilmente a causa della nascita di numerose fratture del terreno che facilitano l’infiltrazione delle piogge.

Per quanto riguarda il ritardo tra precipitazioni e spostamento si esegue un’analisi considerando l’intero andamento, ed una escludendo alcuni dati anomali: nel primo caso si ottiene un valore di 36-37 ore, mentre nel secondo un valore di 60-61 ore. Per verificare quale dei due risultati sia corretto si ripete l’analisi considerando i dati giornalieri:

Cross Correlation Function: SPOSTAMENTO; FALDA (giornalieri)



dalla quale si ottiene un ritardo di circa 2-3 giorni; tale risultato suggerisce come corretta la seconda analisi infatti, facendo la differenza tra i ritardi orari ottenuti per precipitazioni-falda e precipitazioni-spostamenti, risulta che tra l’innalzamento della falda e lo spostamento intercorre un tempo pari a 55 ore (2/3 giorni). Per verificare tale risultato si realizza la *cross correlation* tra i dati orari di livello di falda e gli spostamenti, ottenendo però un ritardo pari a circa 99 ore, dato anomalo probabilmente dovuto alla forte oscillazione della funzione spostamento.

Questi risultati suggeriscono una permeabilità verticale abbastanza elevata, valutabile approssimativamente attraverso la seguente relazione:

$$\begin{aligned}
 s &= 28,65 \text{ m} \\
 t &= 5 \text{ h} \\
 i &= 1
 \end{aligned}
 \quad
 k = \frac{v}{i} = \frac{s/t}{1} = \frac{28,5/18000}{1} = 1,58 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \quad (4.6)$$

dalla quale si ottiene un valore paragonabile a quelli caratteristici delle sabbie grossolane.

4.3.4 Regressione Lineare Multipla

Quest'analisi, a differenza della logistica binaria, permette di valutare l'effetto simultaneo che diverse variabili hanno su una risposta espressa in forma continua, e quindi si presta bene a valutare l'effetto dell'oscillazione di falda e delle precipitazioni sullo spostamento misurato dall'inclinometro.

Il modello statistico utilizzato è del tipo:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} + \varepsilon_i \quad (4.7)$$

dove il termine β_0 rappresenta l'intercetta, i termini β_n i coefficienti dei regressori (misurano la variazione della variabile dipendente al variare di un'unità della variabile indipendente, ferme restando le altre variabili indipendenti), gli X_{ni} le variabili indipendenti e il termine ε_i l'errore, assunto indipendente, identicamente normale e di media zero. Per stimare i coefficienti β_n si utilizza il metodo dei minimi quadrati che consente di minimizzare la distanza tra i punti e la retta di regressione. Per la verifica di ipotesi si assume:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$$

$$H_1: \exists \beta_j \neq 0$$

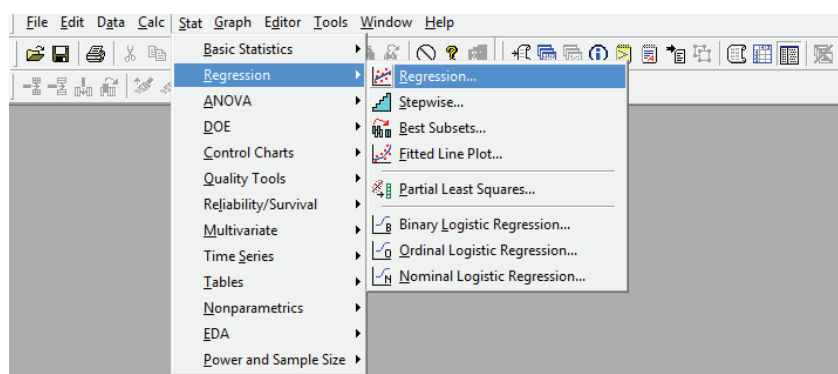
dove H_0 rappresenta l'ipotesi nulla, la quale viene rifiutata se, fissato un livello di significatività $\alpha=0,05$, il termine p-value risulta minore di tale valore, indicando che esiste almeno una variabile che ha effetto significativo sulla risposta (almeno uno dei regressori ha coefficiente diverso da zero). Grazie poi al valore ed al segno del coefficiente β è possibile affermare se la variazione unitaria della variabile comporta un aumento od una diminuzione della risposta.

Il modello di regressione può essere costruito, ossia le variabili esplicative che ne fanno parte possono essere determinate tramite delle procedure: *forward*, *backward* o *stepwise*. Nel caso *forward* si parte stimando un modello che contiene una sola variabile esplicative e si

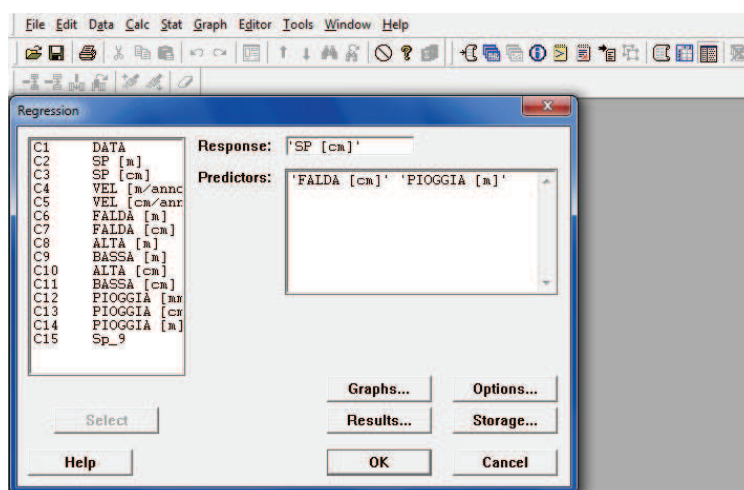
aggiungono una alla volta quelle che presentano un coefficiente significativo; nel caso *backward* si parte da un modello che contiene tutte le variabili esplicative e, di volta in volta, si eliminano quelle che presentano un p-value non significativo. La procedura *stepwise*, utilizzata in questa analisi, alterna in modo più opportuno passi *forward* e passi *backward*. Tale processo si applica all'output della regressione, e permette di ottenere un'equazione con le sole variabili significative per la risposta.

Il procedimento utilizzato è il seguente:

- 1) Dal menù Stat→Regression si seleziona la voce Regression



- 2) Dal menù Regression si inserisce come "Response" la variabile dipendente (in questo caso gli spostamenti misurati) e come "Predictors" le variabili indipendenti (in questo caso le piogge e l'oscillazione di falda) e si esegue l'analisi.



3) Dall'analisi si ottiene il seguente output:

Regression Analysis: SP [cm] versus FALDA [cm]; PIOGGIA [cm]

The regression equation is
 $SP [cm] = 0,0303 + 0,000103 FALDA [cm] - 0,00136 PIOGGIA [cm]$

262 cases used, 72 cases contain missing values

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,030340	0,001601	18,95	0,000
FALDA [cm]	0,00010268	0,00003369	3,05	0,003
PIOGGIA [cm]	-0,0013609	0,0009527	-1,43	0,154

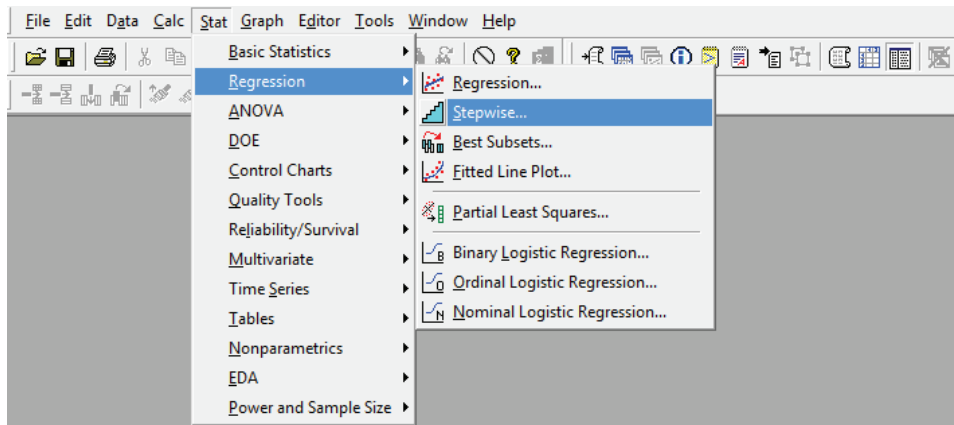
S = 0,0210384 R-Sq = 3,5% R-Sq(adj) = 2,8%

Analysis of Variance

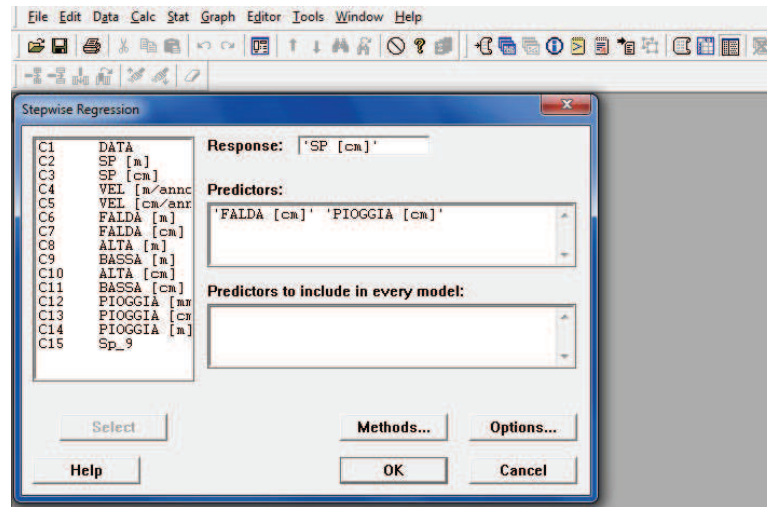
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0,0041912	0,0020956	4,73	0,010
Residual Error	259	0,1146375	0,0004426		
Total	261	0,1188287			

Source	DF	Seq SS
FALDA [cm]	1	0,0032880
PIOGGIA [cm]	1	0,0009032

4) Essendo presenti delle variabili con p-value maggiore del livello di significatività fissato ($\alpha=0,05$), si procede alla loro rimozione mediante la procedura *stepwise* selezionabile dal menù Stat→Regression



- 5) Dal menù *stepwise*, si inserisce come “Response” la variabile dipendente e come “Predictors” tutte le variabili indipendenti.



- 6) Si ottiene il seguente output, nel quale vengono conservate solamente le variabili con p-value minore del livello di significatività ($\alpha=0,05$).

Stepwise Regression: SP [cm] versus FALDA [cm]; PIOGGIA [cm]

Alpha-to-Enter: 0,15 Alpha-to-Remove: 0,15

Response is SP [cm] on 2 predictors, with N = 262
N(cases with missing observations) = 72 N(all cases) = 334

Step	1
Constant	0,02991
FALDA [cm]	0,00009
T-Value	2,72
P-Value	0,007
S	0,0211
R-Sq	2,77
R-Sq(adj)	2,39
Mallows C-p	3,0

- 7) Ripetendo il punto 2) si esegue nuovamente la regressione multipla inserendo come “Predictors” solamente le variabili con p-value significativo. Si ottiene il seguente output finale:

Regression Analysis: SP [cm] versus FALDA [cm]

The regression equation is
SP [cm] = 0,0265 + 0,000161 FALDA [cm]

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,026466	0,001101	24,04	0,000
FALDA [cm]	0,00016078	0,00002177	7,38	0,000

S = 0,0196635 R-Sq = 14,1% R-Sq(adj) = 13,8%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0,021084	0,021084	54,53	0,000
Residual Error	332	0,128368	0,000387		
Total	333	0,149452			

Si osserva che il p-value della statistica test F risulta essere minore del livello di significatività fissato $\alpha=0,05$, ed è quindi possibile affermare che almeno una delle variabili ha effetto significativo sulla risposta; tale variabile risulta essere l'oscillazione del livello di falda ed in particolare, essendo il coefficiente di regressione positivo, ad un suo aumento unitario corrisponde un incremento dello spostamento misurato dall'inclinometro di una quantità pari al valore di β .

Sembrirebbe che l'analisi appena conclusa vada in contraddizione con quanto emerso nella Regressione Logistica Binaria, indicando l'oscillazione di falda come variabile significativa per lo spostamento a differenza delle piogge. Questo però è giustificabile dal fatto che, nella logistica si considerano degli spostamenti rilevati qualitativamente, mentre nella Multipla Lineare si hanno valori di spostamento misurato, e pertanto i risultati ottenuti con quest'ultima analisi possono essere considerati maggiormente affidabili. Inoltre gli spostamenti osservati nelle fotografie rappresentano dei movimenti superficiali, i quali possono essere causati anche direttamente dall'azione erosiva e di dilavamento da parte delle piogge, mentre gli spostamenti profondi, misurati dall'inclinometro, risentono maggiormente dell'innalzamento di falda, il quale provoca un aumento delle pressioni neutrali con conseguente diminuzione delle tensioni efficaci ed un aumento delle forze instabilizzanti, portando al movimento del versante.

Non bisogna però pensare che una variabile escluda l'altra in quanto esse sono, come suggerito dalla Geotecnica e dalle rappresentazioni grafiche, correlate con gli spostamenti secondo il seguente schema:



Figura 4.21: Schema di interazioni tra le variabili

nel quale si evidenzia che l'oscillazione del livello di falda comporta la nascita di spostamento ed è condizionata dalle precipitazioni, le quali inoltre possono portare direttamente alla

mobilitazione del versante esercitando ad esempio delle azioni di dilavamento e degradazione del materiale flyschoidale componente gran parte della zona in esame. Le analisi effettuate non sono quindi sufficienti a studiare interamente il problema, il quale richiederebbe l'applicazione di modelli più complessi detti sistemi di equazioni simultanee.

Disponendo dei valori orari dei tre parametri si eseguono altre regressioni lineari multiple per ricercare quali precipitazioni cumulate, da 2 a 12 ore, hanno effetto sugli spostamenti e sull'oscillazione del livello di falda. Queste analisi iniziali non portano a risultati accettabili dal punto di vista fisico, infatti si ottengono alcuni coefficienti negativi considerando come risposta la falda, mentre per gli spostamenti nessuna variabile risulta significativa. Risultati analoghi si hanno se si ripete l'analisi calcolando le cumulate 12 ore prima dell'evento (spostamento od oscillazione del livello di falda), valore del ritardo rilevato in passato.

Avendo determinato i ritardi mediante la *Cross Correlation* si ripete la regressione lineare utilizzando come cumulate quelle calcolate a partire da 5 ore prima dell'evento per l'oscillazione di falda, e 60 ore prima per gli spostamenti. Anche tale analisi però porta a risultati simili ai precedenti, i quali possono essere giustificati dalla complessità del problema e dal modo in cui vengono calcolate le cumulate: una cumulata maggiore, ad esempio ad 8 ore, contiene dentro di sé una cumulata minore, ad esempio quella a 4 ore, più le piogge comprese tra i due limiti dell'intervallo (piogge tra 5-8):

$$Cum8h = Cum4h + P(5 - 8) \quad (4.4)$$

e per questo i valori dei coefficienti ottenuti non rappresentano l'effetto che le variabili hanno sulla risposta, ma devono essere calcolati scomponendo le cumulate. Per quanto riguarda gli spostamenti, l'anomalia dei risultati può essere dovuta anche all'alta oscillazione dei dati orari, infatti utilizzando i valori giornalieri la regressione ha buon esito.

4.4 Osservazioni finali

Suddividendo il lavoro in due parti è possibile sia individuare quali parametri influenzano la visione degli spostamenti superficiali attraverso le foto, sia ricercare eventuali correlazioni tra le precipitazioni, il livello di falda e gli spostamenti misurati dall'inclinometro.

La posizione della strumentazione sembrerebbe adeguata, malgrado alcuni “valori anomali” di spostamento registrati lungo la direzione y che però non influiscono in modo rilevante sullo spostamento risultante.

In primo luogo si ricercano eventuali correlazioni tra gli spostamenti individuati nelle fotografie ed i parametri misurati dallo strumento presente a Pian de Cice (livello di falda, precipitazioni e spostamenti) attraverso un confronto a coppie delle medie ed una regressione logistica binaria, evidenziando che:

- Gli spostamenti profondi misurati dall'inclinometro sono visibili anche in superficie e quindi possono essere apprezzati dalla semplice osservazione in sequenza delle fotografie.
- L'oscillazione di falda, ed in particolare un suo innalzamento, comporta degli spostamenti visibili superficialmente.
- L'incremento di intensità delle piogge giornaliere aumenta la probabilità di osservare degli spostamenti superficiali. Questo risultato è in accordo con il fatto che le piogge creano delle azioni di erosione e dilavamento nel versante.

In secondo luogo si ricerca la presenza di una correlazione tra gli spostamenti misurati e i valori di pioggia e di oscillazione di falda realizzando una regressione lineare multipla, che permette di individuare quale variabile ha maggiormente effetto sulla risposta. In particolare si ottiene che l'oscillazione di falda ha effetto significativo sullo spostamento misurato dall'inclinometro, in perfetto accordo con quanto suggerito dalla geotecnica: un'oscillazione di falda, ed in particolare un suo innalzamento, comporta un aumento delle pressioni neutrali con conseguente diminuzione delle tensioni efficaci e mobilitazione del versante. Quest'ultimo risultato sembrerebbe più affidabile di quello ottenuto nella regressione logistica binaria in quanto derivante da misure continue di spostamento, tuttavia sono entrambi corretti facendo riferimento a due tipi di spostamento differente.

Per cercare di ottenere qualche informazione in più riguardo al comportamento della falda e degli spostamenti in funzione delle precipitazioni, si eseguono diverse regressioni lineari multiple calcolando in modi differenti le cumulate orarie; tali analisi però non forniscono

risultati accettabili ed è quindi possibile affermare che il problema non è risolvibile interamente attraverso le analisi utilizzate, ma necessita di modelli più complessi (sistemi di equazioni simultanee).

Per quanto riguarda il ritardo presente tra le precipitazioni ed il livello di falda è possibile affermare che negli anni, probabilmente a causa della nascita di numerose fratture all'interno del terreno, tale ritardo si sia ridotto, suggerendo quindi una diminuzione del tempo di attivazione del movimento. Tale fenomeno si rispecchia nel valore di spostamento finale ottenuto per il periodo in esame (11 mesi) pari a circa 10 cm, più del doppio di quello misurato in passato.

Alla luce dei risultati ottenuti si può affermare che, grazie all'accoppiamento fotografie/inclinometro e piezometro, è possibile determinare quali variabili influiscono sugli spostamenti profondi e su quelli superficiali, ed in particolare, essendo essi concomitanti, dall'osservazione in sequenza delle fotografie si individuano la maggior parte dei movimenti del versante di Pian de Cice.

L'utilizzo di questo tipo di sistema di analisi risulta essere abbastanza semplice e non richiede particolari strumenti, pertanto rappresenta un buon punto di partenza per lo studio di un fenomeno di questo tipo.

5. CONCLUSIONI

Al termine del lavoro svolto è possibile trarre delle conclusioni sia riguardo al metodo di analisi utilizzato che alla presenza di correlazione tra spostamenti e precipitazioni.

Per conseguire lo scopo prefissato si è suddiviso lo studio in due parti, in funzione del tipo di metodo di acquisizione dei dati:

- 1) Analisi visiva delle fotografie: si sono utilizzati gli spostamenti osservati qualitativamente nelle fotografie ed i dati pluviometrici forniti dall'ARPAV per valutare una loro possibile correlazione.
- 2) Analisi dei dati inclinometrici e piezometrici per il settore di Pian de Cice: i dati di spostamento e di falda misurati nel nuovo sondaggio sono stati messi in correlazione con le osservazioni fotografiche in zona 9 e con i dati di pioggia registrati a Roncadin.

Il sistema di monitoraggio fotografico installato presso la stazione del CNR risulta essere un buon compromesso tra economicità e semplicità di installazione, richiedendo solo delle accortezze nella protezione e settaggio delle strumentazioni. Il problema principale riscontrato nell'analisi visiva delle fotografie è la scarsa visibilità in condizioni meteorologiche avverse, le quali comportano l'impossibilità di vedere il corpo di frana per la presenza di nebbia, neve e condensa sulla lente di protezione, oltre alla perdita di alcune impostazioni come la messa a fuoco. Purtroppo non è possibile evitare questi disagi, ma solo eseguire degli interventi successivi di manutenzione per ripristinare il settaggio della macchina o modificare le protezioni della strumentazione.

Altri fattori di disturbo che influenzano l'analisi delle fotografie sono la variazione di luminosità da un giorno all'altro, che induce ad interpretare come movimento un cambio locale di colore, e la presenza di vegetazione, che cresce davanti all'obiettivo coprendo la visuale della parte inferiore del corpo di frana, soprattutto per la fotocamera di destra. Per ovviare ai problemi di luminosità si può installare un filtro sulle fotocamere o modificare i parametri di esposizione, mentre per la vegetazione, è necessario intervenire con taglio periodico o ubicare la fotocamera di destra in una posizione più elevata.

Nonostante questi elementi di disturbo, la sequenza raccolta dal 18/11/2011 al 30/08/2013 ha permesso di individuare in modo abbastanza agevole l'evoluzione degli spostamenti nella zona sorgente, soprattutto perché, grazie all'alta risoluzione delle fotografie, si sono esaminati in dettaglio parti ridotte di frana senza perdere nitidezza, aumentando così la precisione

dell'osservazione. Grazie a tale procedimento è stato possibile individuare il meccanismo di movimento in atto e valutare qualitativamente la sua possibile evoluzione nel tempo.

Le analisi statistiche compiute hanno confermato molte osservazioni qualitative, permettendo di affermare che questo metodo di analisi, anche se solo qualitativo, risulta essere un buon punto di partenza per lo studio degli spostamenti di un fenomeno di questo tipo, in quanto permette di prendere visione dei meccanismi di movimento delle diverse zone e la successione con cui si presentano. La scelta di questo metodo di analisi dev'essere fatta in funzione del numero e della qualità delle fotografie disponibili, dal tempo a disposizione, dalla vicinanza della strumentazione rispetto al fenomeno da analizzare, dal tipo di fenomeno e dal tipo di informazioni che si vogliono ottenere. La bontà dei risultati dipende in gran parte dalla continuità e risoluzione delle fotografie disponibili e dall'operatore, il quale deve svolgere un'osservazione quanto più precisa possibile, facendo scorrere le immagini in sequenza e focalizzando l'attenzione su parti ridotte di frana.

A partire dagli spostamenti rilevati e dai valori pluviometrici della stazione di Roncadin, si sono realizzate delle rappresentazioni grafiche che mettono in relazione le due variabili, evidenziando così in modo qualitativo la presenza di una relazione piogge/spostamenti, che è stata successivamente confermata anche da due analisi statistiche differenti. È così possibile affermare che la frana, ed in particolare, le singole zone individuate nelle fotografie, si mobilitano a seguito di precipitazioni cumulate di durata differente in funzione della morfologia del territorio: zone più pendenti entrano in movimento con piogge recenti, mentre zone più pianeggianti con piogge più durature.

Il procedimento seguito in questo primo studio per l'individuazione della correlazione tra spostamenti e piogge a partire dalle fotografie non si presenta difficile né richiede grandi tecnologie, ma risulta oneroso solamente in termini di tempo dato l'elevato numero di immagini da scorrere. Le analisi statistiche, avendo chiara la teoria che le precede, risultano essere di facile esecuzione essendo il software *Minitab* abbastanza intuitivo e fornito di un buon *Help* in linea.

Pertanto, il giudizio complessivo sul sistema di monitoraggio e di analisi visivo-statistico è senz'altro buono. Naturalmente le osservazioni fatte sono da considerarsi solamente un punto di partenza e ci si auspica che il sistema di monitoraggio sia completato con una procedura di analisi fotogrammetrica, magari anche riposizionando le fotocamere al fine di ottenere un sistema efficace per ricostruire in modo stereografico la morfologia dell'area di frana e la distribuzione tridimensionale degli spostamenti.

Per quanto riguarda il secondo sistema di monitoraggio utilizzato, composta da un inclinometro e piezometro posti nel nuovo foro di sondaggio al centro di Pian de Cice, è possibile affermare che il suo posizionamento sembra adeguato, malgrado alcuni “valori anomali” di spostamento registrati lungo la direzione y, che però non influiscono in modo rilevante sullo spostamento risultante.

Come ricordato, per un guasto elettronico la sonda bassa non ha fornito dati affidabili e, pertanto, sarebbe utile sostituirla.

Le misure eseguite hanno dimostrato come il settore di Pian de Cice abbia subito in questi anni un'accelerazione: infatti, nel periodo analizzato (dal 10/10/2012 al 30/08/2013) si è misurata una velocità annua di circa 10 cm/anno, pari a più del doppio di quella misurata nel 1997-2007. Per quanto riguarda la falda si sono registrati oscillazioni massime paria 2,7m, anche in questo caso più elevate rispetto alle misure eseguite nel piezometro P1 posto più a monte (lì le oscillazioni erano attorno ai 50 cm).

Si osserva, inoltre, che dopo l'evento piovoso la falda subisce un rapido innalzamento seguito da una leggera diminuzione e, in molti casi, da un ulteriore aumento successivo, anche senza precipitazione: probabilmente questo comportamento è l'effetto di due fenomeni di filtrazioni diversi legati alle caratteristiche eterogenee ed anisotrope del terreno.

Analizzando poi l'andamento dello spostamento, si nota un aumento della velocità nei mesi di Aprile e Maggio, caratterizzati da intense e prolungate precipitazioni. Purtroppo una correlazione tra la velocità calcolata sulle 24 ore e le altre variabili (falda e pioggia) non sembra significativa anche se nei mesi piovosi (Novembre, Marzo ed Aprile) si rilevano valori medi di velocità più elevati rispetto agli altri.

Quanto esposto permette quindi di osservare una correlazione qualitativa tra spostamento, innalzamento di falda e precipitazioni: le precipitazioni alimentano la falda la quale, innalzandosi, provoca un aumento delle pressioni neutrali con conseguente diminuzione delle tensioni efficaci e mobilitazione del versante. Per verificare tali affermazioni è stata eseguita una regressione lineare multipla, considerando lo spostamento come variabile dipendente e l'oscillazione di falda e precipitazione giornaliera come variabili indipendenti. Com'era lecito aspettarsi, tale analisi indica una maggior influenza sullo spostamento da parte dell'innalzamento del livello di falda. Successivamente sono state eseguite diverse regressioni lineari multiple tra gli spostamenti e le piogge cumulate in diversi intervalli: queste analisi, però, non hanno fornito risultati fisicamente accettabili, pertanto è possibile affermare che esse non sono adeguate per trattare questo tipo di problema, che deve invece essere analizzato con dei modelli più complessi (sistemi di equazioni simultanee).

Sono state infine studiate una regressione logistica binaria ed un confronto a coppie tra le medie (GLM), mettendo in relazione i giorni di spostamento determinati attraverso le fotografie per la zona 9 con l'oscillazione di falda e le precipitazioni, per determinare quali variabili influenzano l'osservazione degli spostamenti. Dai risultati ottenuti è possibile affermare che gli spostamenti superficiali avvengono in concomitanza con quelli profondi e risentono dell'innalzamento del livello di falda e della pioggia giornaliera. In particolare, la regressione logistica binaria indica la precipitazione giornaliera quale variabile maggiormente influente sullo spostamento superficiale: questo risultato, seppur differente rispetto a quanto esposto sopra, è comunque accettabile perché gli spostamenti superficiali, diversamente dai profondi, possono essere innescati dall'azione di dilavamento ed erosione esercitata dalle piogge (Figura 5.1).

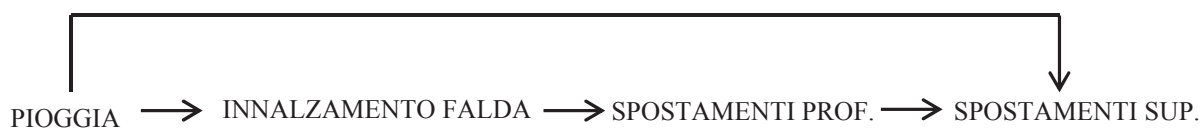


Figura 5.1: Schema di generazione degli spostamenti

Per quanto riguarda il ritardo tra le precipitazioni, l'innalzamento del livello di falda e gli spostamenti, la *Cross Correlation* permette di affermare che, a causa delle numerose fratture presenti nel terreno, l'innalzamento del livello di falda sembra accelerato rispetto a quanto misurato in altre zone in passato: questo fatto provoca un'attivazione anticipata del movimento di versante e quindi degli spostamenti annui maggiori. Infatti nel periodo di osservazione (11 mesi) si sono misurati circa 10 cm di spostamento, pari a quasi il doppio di quelli ottenuti nel 1999.

Alla luce di quanto esposto, è possibile affermare che entrambi i sistemi di monitoraggio forniscono dati sufficienti per lo studio di un fenomeno franoso tipo colata come quello in esame, grazie ai quali si conferma una dipendenza dello spostamento dalle piogge, in funzione della morfologia del territorio e della risposta temporale della falda. La strumentazione utilizzata ed i risultati raccolti possono essere usati in futuro per delle analisi più precise come ad esempio la ricostruzione stereografica della morfologia del bacino e delle sue variazioni nel tempo.

BIBLIOGRAFIA

BRANDALISE G. (2012) – *Analisi degli spostamenti della frana del Tessina da una sequenza di immagini digitali*. Tesi triennale presso il dipartimento ICEA dell'Università degli studi di Padova

CASON ANGELINI E. (2011) – *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*.

CEVASCO A., SACCHINI A., ROBBIANO A. & VINCENZI E. (2010) – *Individuazione delle soglie pluviometriche di innesco di frane superficiali sul territorio comunale di Genova: il caso della Val Bisagno*. In: Italian Journal of Engineering Geology and Environment, pp 36,37

DARIENZO M. (2012) – *Legame tra precipitazioni, livello di falda e velocità di scorrimento del settore di Pian de Cice della grande frana del Tessina (Belluno)*. Tesi triennale presso il dipartimento ICEA dell'Università di Padova

DE FANTI F. (2012) - *Analisi degli spostamenti della frana del Tessina da sequenze multitemporali di immagini*. Tesi triennale presso il dipartimento ICEA dell'Università degli studi di Padova

DOUGLAS C. MONTGOMERY (2005) – *Progettazione e analisi degli esperimenti*. Mc Graw-Hill

GIDONI G. & PACAGNELLA L. (2011) – *Analisi degli spostamenti della frana del Tessina tramite fotogrammetria digitale*. Tesi triennale presso il dipartimento ICEA dell'Università degli studi di Padova

ZOPPE' M. (2011) – *Misura degli spostamenti superficiali della frana del Tessina da analisi di immagini*. Tesi triennale presso il dipartimento ICEA dell'Università degli studi di Padova

Materiale didattico vario

Siti internet consultati

www.bellunovirtuale.com/tessina

www.funes.bl.it

www.wikipedia.org