

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale -
ICEA**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**STUDIO STATISTICO DELL'INNESCO
DEI MOVIMENTI FRANOSI DELLA
FRANA DEL TESSINA DA ANALISI DI
IMMAGINI**

**Statistical study of Tessina landslide triggering events by means of
images analysis**

Relatore:

Dott. Ing. FABIO GABRIELI

Laureando:

ZOPPÉ MARCO

matr. 1043409

Anno Accademico 2014/2015

La frana del Tessina

La frana del Tessina

INDICE

PRESENTAZIONE.....	5
1. FRANA DEL TESSINA.....	9
1.1 Introduzione.....	9
1.2 La frana del Tessina.....	13
1.3 Inquadramento idrogeologico.....	18
1.4 Origine del dissesto.....	20
1.5 Movimenti franosi recenti.....	25
1.6 Danni causati.....	29
1.7 Interventi.....	30
1.8 La galleria drenante.....	32
1.9 Materiale detritico.....	35
2. MONITORAGGIO PER IL CONTROLLO DELL'EVENTO FRANOSO.....	37
2.1 Introduzione.....	37
2.2 Monitoraggio nella frana del Tessina.....	39
2.2.1 Sistemi di monitoraggio automatico.....	39
2.2.2 Sistemi di monitoraggio manuale.....	41
2.3 Monitoraggio fotogrammetrico.....	43
2.3.1 Ubicazione del punto di monitoraggio.....	44
2.3.2 Scelta degli strumenti.....	45
2.3.3 Realizzazione.....	46
2.3.4 Progettazione.....	48
2.3.5 Gestione del monitoraggio.....	50
2.3.6 Pregi e difetti.....	51
3. DATASET DA ANALISI DI IMMAGINI E MISURE PLUVIOMETRICHE.....	53
3.1 Introduzione.....	53
3.2 Analisi visiva delle fotografie.....	53
3.3 Analisi dei dati pluviometrici e individuazione degli eventi.....	58
3.4 Dataset completo.....	61

La frana del Tessina

4. ANALISI DEI DATI.....	65
4.1 Introduzione.....	65
4.2 Risultati delle analisi precedenti.....	65
4.3 Modello di regressione del fenomeno franoso.....	67
4.3.1 Zone 1, 2, 3, 4.....	68
4.3.2 Zone 7, 8, 9.....	75
4.4 Soglia pluviometrica (modello intensità-durata).....	77
4.5 Carta del rischio.....	91
4.5.1 Zone 1, 2, 3, 4.....	91
4.5.2 Zone 7, 8, 9.....	104
4.5.3 Carta del rischio intensità-durata per l'intera area di frana...	109
4.5.4 Indici di performance dei modelli ottenuti.....	111
4.5.5 Software per le carte del rischio.....	116
5. CONCLUSIONI.....	119
BIBLIOGRAFIA.....	123

La frana del Tessina

PRESENTAZIONE

Il monitoraggio di corpi franosi risulta essere uno dei lavori più complessi che l'ingegnere geotecnico si trova a dover svolgere sempre più frequentemente. Il territorio italiano è disseminato da numerosi versanti in continuo stato di movimento e la determinazione di quest'ultimo e delle possibili conseguenze è di grande importanza e di difficile previsione, soprattutto se si vuole ottenere un'aspettativa il più precisa possibile.

Lo scopo della seguente tesi è quello di analizzare gli spostamenti della frana del Tessina ubicata nel comune di Chies d'Alpago, in provincia di Belluno, ed in particolare la correlazione di quest'ultimi con gli eventi meteorologici che interessano l'area, così da individuare alcuni sistemi di possibile previsione e di allarme per la frana in esame.

Lo studio è stato svolto utilizzando le informazioni ricavate dalla stazione meteorologica posta nelle vicinanze e da un apposito sistema di monitoraggio basato sull'interpretazione di immagini digitali che consente di identificare eventuali spostamenti superficiali.

Tali immagini sono ricavate tramite l'utilizzo di due fotocamere poste in prossimità dell'area dissestata e puntate con inquadratura fissa sulla frana. L'automazione del processo consente di scattare ed archiviare una foto al giorno per ogni fotocamera. Quest'ultime contribuiscono a comporre il sistema di monitoraggio.

E' stato utilizzato un programma di analisi statistiche denominato Minitab che consente di generare modelli di previsione sulla base di dati acquisiti dai sistemi di monitoraggio. In particolare, con l'aiuto del sistema di analisi, è possibile identificare quali sono i parametri caratteristici di un evento che maggiormente influenzano l'innesco del fenomeno e qual è il rischio di evento franoso corrispondente al valore assunto dai diversi fattori.

In questo progetto si è tenuto sotto controllo il periodo temporale che va dal 19 novembre 2011 al 20 giugno 2013 e segue il lavoro precedentemente eseguito dal collega Vettore Luca che si è preoccupato di studiare la presenza di eventuali legami tra gli spostamenti della frana e le precipitazioni registrate attraverso una metodologia differente da quella usata nella seguente ricerca sperimentale.

La frana del Tessina

L'elaborato finale è organizzato in capitoli, con una prima parte di natura bibliografica volta alla descrizione del contesto, ed una seconda parte di elaborazione dei dati:

- *Capitolo 1*: presentazione e descrizione della frana del Tessina attraverso l'inquadramento idrogeologico, la cronistoria degli eventi verificatisi nel corso degli anni a partire dal 1960, i danni provocati dal dissesto oltre che agli interventi eseguiti a scopo di stabilizzazione;
- *Capitolo 2*: breve introduzione del monitoraggio, delle caratteristiche principali e dei parametri da considerare in fase di progettazione e gestione. Si espongono i sistemi e gli strumenti utilizzati nella frana del Tessina durante gli anni di studio ed in particolare il sistema di monitoraggio fotogrammetrico realizzato in sito, specificandone il punto di ubicazione, la scelta degli strumenti, la realizzazione e la gestione della rete uniti ad alcuni aspetti di carattere generale;
- *Capitolo 3*: preparazione e composizione del dataset, contenente tutte le informazioni e misure necessarie, utilizzato nelle analisi statistiche effettuate. Questo è stato realizzato riprendendo quanto svolto da Luca Vettore andando ad integrare le informazioni relative all'analisi visiva delle fotografie con i dati pluviometrici raccolti dalla stazione meteorologica di Roncadin di Chies d'Alpago;
- *Capitolo 4*: analisi dei dati, volta inizialmente a identificare quali variabili avessero maggiore effetto sull'intensità di precipitazione con lo scopo di generare un modello in grado di prevedere se una data intensità di pioggia potesse causare un movimento in base alla rilevanza assunta dai fattori indipendenti significativi. Successivamente si sono determinate le soglie pluviometriche di innesco per le variabili intensità – durata. Infine si sono generate delle carte del rischio per poter valutare la potenzialità di un dato fattore nel generare un franamento e valutarne quindi l'influenza sul movimento stesso.
- *Capitolo 5*: esposizione delle osservazioni e dei risultati raccolti nei capitoli precedenti a seguito delle varie analisi svolte, che consentono di trarre conclusioni sui metodi di analisi e di monitoraggio utilizzati e sulla correlazione tra gli spostamenti della frana e le precipitazioni.

La frana del Tessina

Concludendo, 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 anche per analisi future.

La frana del Tessina

La frana del Tessina

1. FRANA DEL TESSINA

1.1 Introduzione

Una frana è un fenomeno di equilibrio instabile che genera un movimento verso valle di una massa rocciosa, terra o detrito distaccatosi da un versante montuoso o da sponde fluviali per azione erosiva degli agenti fisici.

Le frane differiscono tra loro a seconda dei fattori considerati: tipo e cause del movimento, durata e ripetitività del movimento, tipo e proprietà meccaniche del materiale interessato, caratteristiche e preesistenza o meno della superficie di distacco o di scorrimento. In base alla tipologia del movimento si possono classificare in:

- *frane di crollo*: caratterizzate dal distacco di una massa di terreno o di roccia da un versante molto ripido o sporgente e che si muove per caduta libera con rotolamenti e/o rimbalzi. Queste frane si presentano con tempi estremamente ridotti;
- *scorrimenti*: caratterizzati da deformazione di taglio e spostamento lungo una o più superfici di rottura a diversa profondità nel terreno. La massa dislocata si muove lungo tale superficie che rappresenta quindi il limite tra la zona che è instabile e quella che invece è stabile. A seconda della morfologia della superficie di separazione, si possono distinguere due tipi di scorrimenti: rotazionali (superficie curva) o traslazionali (superficie piana o leggermente ondulata);
- *colamenti*: si ha una deformazione continua nello spazio di materiali lapidei e sciolti. Il movimento, quindi, non avviene sulla superficie di separazione fra massa in frana e materiale in posto, ma è distribuito in modo continuo anche nel corpo di frana. I colamenti coinvolgono sia materiali rocciosi o detritici, che sciolti, ed in questo caso l'aspetto del corpo di frana è chiaramente quello di un materiale che si è mosso come un fluido.

Generalmente l'Italia è un territorio caratterizzato dalla presenza di un numero elevatissimo di frane a causa della conformazione geologica dello stesso, giovane ed in via di sollevamento. A seguito di eventi scatenanti come precipitazioni intense di lunga durata, attività sismiche, sollecitazioni cicliche, sovraccarichi, il nostro

La frana del Tessina

Paese si colloca tra i primi al mondo nella classifica dei danni sia in termini sociali, ambientali, economici che, soprattutto, in perdita di vite umane.

Una delle regioni maggiormente colpite da dissesti franosi è la regione del Veneto, ed in particolare la provincia di Belluno, la cui morfologia e geologia del territorio montano la rendono molto vulnerabile e predisposta a questo tipo di evento, come è testimoniato dai numerosi fenomeni avvenuti in passato o ancora attivi.

Tra le varie zone della provincia di Belluno, quella dell'Alpago, a causa della tipologia di terreni affioranti e dell'elevata piovosità, è la più coinvolta e martoriata dai movimenti franosi. Quest'ultimi, assieme ai fenomeni erosivi dei torrenti, hanno caratterizzato maggiormente l'evoluzione dei versanti della zona, irregolari e sviluppati su una generale situazione di instabilità con ripidi pendii e forti dislivelli. Quest'area si presenta come una vasta conca chiusa da un anfiteatro montuoso, formato dal versante bellunese delle Prealpi Carniche e dalle Prealpi Bellunesi (*Figura 1.1*).



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







Uno dei più rilevanti movimenti franosi che si ricordano è quello che portò allo sbarramento della valle di Santa Croce dovuto alla frana di Fadalto, che causò la deviazione del fiume Piave verso il Vallone Bellunese e quindi nel Canale di Quero, risalente ad oltre 11700 anni fa. Cedimenti postumi hanno portato inoltre al

La frana del Tessina

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 continua ad avvenire. Nella cartina sono riportati tutti i movimenti franosi che attualmente interessano la zona dell'Alpago. Sono censiti tra i fenomeni attivi, o in momentanea quiescenza, 500 movimenti franosi che coinvolgono oltre 7 milioni di mq di superficie, su 170,69 kmq (G. Dal Farra, Genio Civile Belluno, 2009). Tra questi è indicata la grande Frana del Tessina, che negli ultimi vent'anni ha creato allarmi e disagi alle popolazioni, in particolare, agli abitati di Lamosano e Funes.



Figura 1.2 - Cartina e relativa legenda dei movimenti franosi in Alpago (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno)

	Piccole frane superficiali
	Frane chiaramente circoscritte
	Aree con numerose frane e/o numerosi fenomeni di dilavamento
	Tratti di alveo con recenti fenomeni di erosione (incisione e/o erosione di sponda)
	Area di recente accumulo alluvionale lungo i corsi d'acqua. Per alvei molto larghi: area di recente accumulo fuori dal letto abituale.
	Aree interessate da recenti accumuli su coni e falde detritiche; accumuli dovuti a trasporto in massa.

La frana del Tessina

Nel settore settentrionale del bacino dell'Alpago sono presenti numerose frane di differente tipologia. Le più diffuse sono quelle di natura complessa, cioè ottenute dalla combinazione, in sequenza temporale, di due o più tipi di movimento, caratterizzate generalmente da spostamenti rototraslazionali in prossimità della nicchia di distacco e da un'evoluzione per colamento nelle porzioni inferiori.

Solitamente esse si sviluppano in corrispondenza degli affioramenti flyschoidi che presentano caratteristiche geotecniche e geomeccaniche particolarmente scadenti. Il Flysch dell'Alpago è una roccia sedimentaria composta da alternanze di banchi calcarei ed arenarie e prevalenti marne ed argille. La stratificazione è piuttosto fitta con livelli di spessore variabile dal metro ai 10-15 cm (Fondazione G. Angelini, 2011). Un esempio di affioramento flyschoidi presente nella zona è riportato in *Figura 1.3-a* in cui risultano evidenti gli strati sporgenti calcarenitici che sono più resistenti all'erosione rispetto alle marne e alle argille. In presenza di questo tipo di roccia la formazione dei dissesti franosi è dovuta al fenomeno di frantumazione, disgregazione ed erosione degli strati di arenarie. A seguito del crollo le argille e marne trascinate verso valle si imbevono d'acqua aumentando il proprio livello di fluidificazione dando così origine alle colate (*Figura 1.3-b*).



Figura 1.3 - Versante della frana di Borsoi in Alpago, caratterizzato dalla presenza del Flysch in stato roccioso (a) e in stato fangoso (b) (foto da me realizzate)

Questo fenomeno evolve nel tempo e può durare anche parecchi anni come avviene per la frana del Tessina, dove la formazione di tale roccia interessa principalmente il settore settentrionale dell'area dissestata.

La frana del Tessina

1.2 La frana del Tessina



Figura 1.4 - Vista frontale della frana dall'abitato di Funes (internet, www.alpago.bl.it)

Il dissesto franoso “Frana del Tessina” (*Figura 1.4*) è ubicato nel comune di Chies d’Alpago, lungo il corso del torrente Tessina. Si tratta di un fenomeno complesso innescatosi nell’ottobre del 1960 e caratterizzato dalla presenza di frane rototraslazionali nella parte alta del bacino, che si sviluppa ad una quota di 1250 metri circa, verso le pendici del Monte Teverone, seguite da colamenti che interessano la porzione inferiore dell’area.

Il fenomeno, come si nota dalla *Figura 1.5*, presenta enormi dimensioni ed attualmente è il movimento franoso maggiore dell’arco alpino con una lunghezza di oltre 2 chilometri fino all’abitato di Lamosano posto a quota 650 metri, una larghezza massima in prossimità del punto di distacco di 600-650 metri, una lunghezza complessiva del coronamento apicale di circa 2200 metri, un’area interessata di circa 500000 mq ed un volume totale movimentato stimato in circa 13-14 milioni di mc (G. Dal Farra, Genio Civile Belluno, 2009).

La frana del Tessina



Figura 1.5 - Visione satellitare della frana del Tessina in cui sono riportate alcune quote rappresentative del dissesto (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno - indicazioni sulla foto da me riportate)

Questa frana, come detto, è un fenomeno complesso e può essere suddiviso in tre distinte entità (*Figura 1.6*): un'area sorgente posta tra quota 1250 e 920 metri circa, in continua evoluzione, nella quale il fenomeno si esplica prevalentemente sotto forma di scivolamenti rotazionali, anche di notevole profondità, e colamenti fino a formare un grosso deposito temporaneo dove il materiale si disarticola e si rimescola acquistando un notevole contenuto d'acqua (accumulo superiore); un'area di accumulo posta tra quota 900 e 650 circa dove il materiale fluisce e si deposita (accumulo inferiore); una zona intermedia, di separazione delle due aree che, in occasione di eventi franosi, funge da canale di convogliamento del materiale (P. Gasparetto, 2001).

A valle di Funes, nel canale mediano di scolo, la frana si suddivide in un ramo principale, in direzione dello scivolo in calcestruzzo, posto sotto la passerella di Lamosano, ed in un ramo laterale defluito in un avvallamento verso il nucleo di "Col".

La frana del Tessina



Figura 1.6 - Visione satellitare della frana del Tessina in cui sono indicate le diverse aree e la postazione di monitoraggio (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno - indicazioni sulla foto da me riportate)

Gli eventi franosi verificatosi nel corso degli anni, che hanno portato allo stato morfologico attuale dell'area dissestata, presentano scarsa correlazione con fenomeni potenzialmente innescanti, del tipo di forti piovosità o dello scioglimento rapido della neve. Infatti si registrano eventi in qualsiasi condizione climatica e in qualsiasi periodo dell'anno.

Questi movimenti sono dovuti principalmente all'orientamento dei piani di stratificazione, disposti prevalentemente verso valle, alla scarsa resistenza meccanica della roccia, formata da alternanze di marne ed argilla, e all'influenza disgregatrice dell'acqua che ha anche determinato, prima il rigonfiamento e poi la fluidificazione della frazione argillosa che ha agito da lubrificante tettonico.

La frana del Tessina

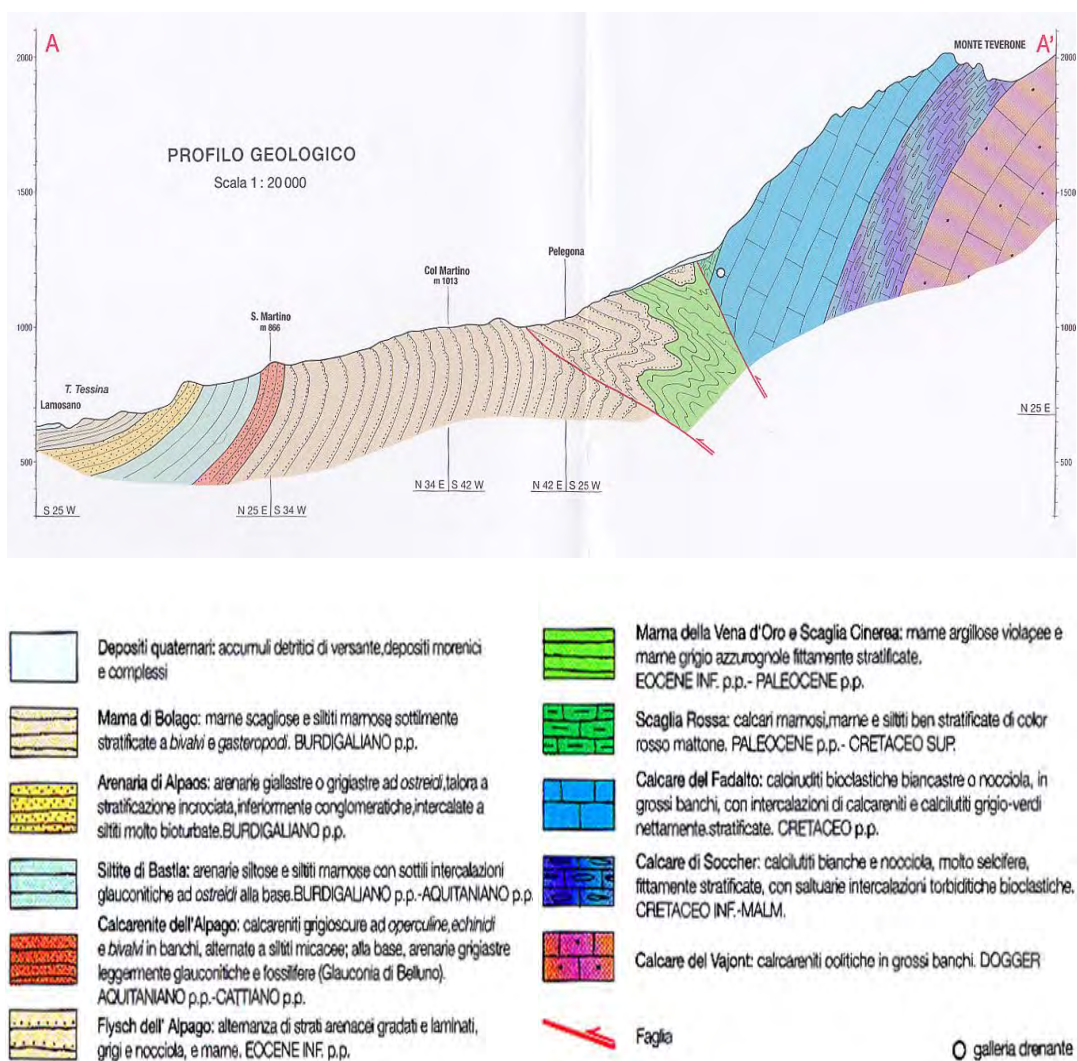


Figura 1.7 - Profilo geologico della frana del Tessina e relativa legenda (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno)

Dal profilo geologico della frana fornitomi dal Genio Civile di Belluno, riportato in Figura 1.7, si possono vedere i primi strati calcarei nei quali l'acqua affluita (pioggia, neve) penetra, e la successiva zona composta da marna in cui c'è fuoriuscita di acqua che incontrando il Flysch dell'Alpago lo fa muovere, formando così i primi "cucchiari" di materiale.

La disponibilità d'acqua per fluidificare il materiale è garantita dalla presenza di una copiosa sorgente, la sorgente Pelegona, sempre attiva situata nel cuore dell'area sommitale.

Per questo tra il 1994 e il 1997 fu costruita una galleria drenante all'interno dell'ammasso calcareo a monte della frana (Figura 1.8). La galleria, pur drenando considerevoli quantità d'acqua in quanto raccoglie portate anche superiori a quelle attese, non pare in grado di svolgere quell'azione stabilizzante per la quale era stata

La frana del Tessina

progettata. Ciò è dimostrato dal fatto che il regime delle portate di alcune sorgenti presenti nell'area instabile non si sono modificate in modo sostanziale e che, anche in questi ultimi anni, si sono susseguite numerose riattivazioni dei movimenti, come si nota dalla *Tabella 1*, anche se non si è mai raggiunto lo stesso livello di pericolosità del 1992 (S. Cola, P. Simonini et al., 2009).

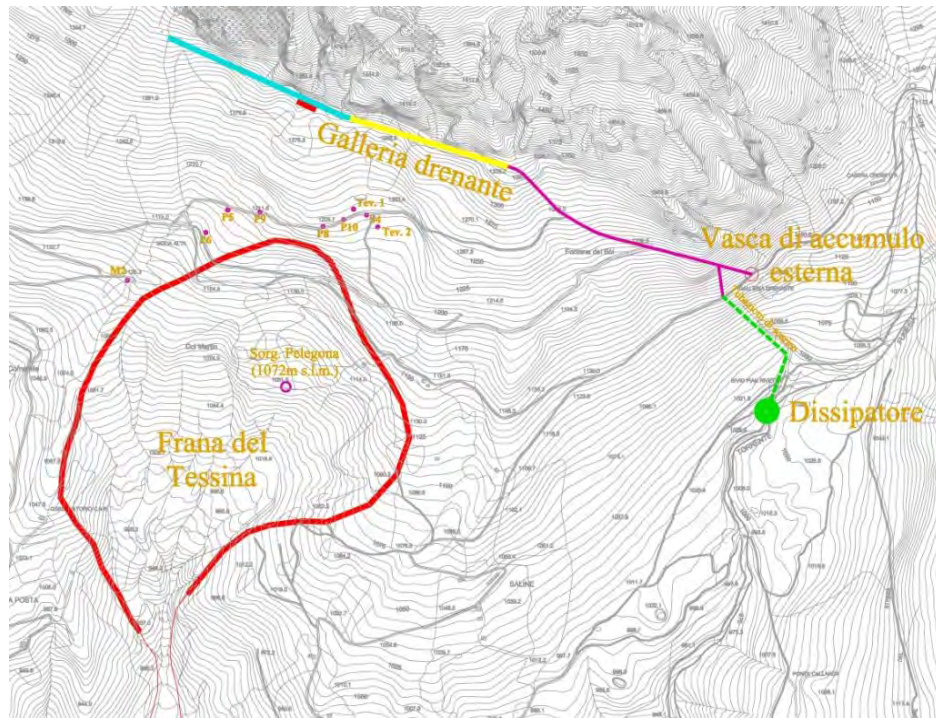


Figura 1.8 - Posizione della galleria drenante e vista mappale della frana (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno)

Contemporaneamente fu installato un sistema di monitoraggio e un sistema di allarme per i movimenti della colata.

La frana è stata sin dalla sua origine oggetto di numerosi studi ed interventi, che tuttavia non hanno ancora portato ad una soluzione definitiva del problema sia in termini di sicurezza per gli abitanti che di pianificazione territoriale.

La frana del Tessina

1.3 Inquadramento idrogeologico

L'area franosa del Tessina si trova immediatamente sotto il versante meridionale del Monte Teverone (2328 metri s.l.m.). La linea di spartiacque superficiale, che separa gli afflussi che si dirigono verso sud da quelli che scendono dal versante nord-orientale del Teverone a formare la valle Chialedina, è chiaramente definita dalla linea di cresta che unisce il Monte Teverone con il Monte Cimon (2345 metri) verso nordovest e, sempre nella stessa direzione, con il monte Lastramor (2302 metri). La costiera montuosa continua poi verso nord con il Monte Nudo (2430 metri) e si dirige verso ovest a raggiungere il Cimon di Valbona (2318 metri). Questa costiera costituisce il versante naturale che alimenta il Venà di Montanès, una delle principali linee di drenaggio della zona.

Infatti il Monte Teverone è limitato ai lati da due grosse incisioni vallive, che ricevono la maggior parte degli afflussi di provenienza meteorica e le acque di sorgente che affiorano ai lati di queste due incisioni. Esse sono rappresentate, verso est dal Venà di Funès, verso ovest dal Venà di Montanès.

Considerando solo lo spartiacque superficiale, esso dovrebbe versare i suoi afflussi nella porzione di frana del Tessina, sopra una superficie di circa 500000 mq, che a fronte di un afflusso meteorico massimo di 2000 mm annui registrano così un contributo totale di 1 milione di mc. Di quest'ultimi, una volta considerate la condensazione e l'evapotraspirazione, solo il 35 % può essere considerato afflusso che penetra nel massiccio calcareo alimentando le acque sotterranee, che potrebbero così disporre di un totale di 11 l/sec, quantitativo modesto.

Se invece esaminiamo un bacino laterale del Teverone, ad esempio il Venà di Montanès, vediamo che la sua alimentazione, con le stesse caratteristiche pluviometriche e le medesime percentuali di afflussi in sotterraneo, ha una potenzialità 10 volte maggiore, pari a 110/120 l/sec, e potrebbe pertanto costituire una vera minaccia per la stabilità della zona di frana, rendendola altamente vulnerabile per infiltrazione laterale di grosse masse di acqua, che in caso di forti precipitazioni potrebbero raggiungere alcune centinaia di l/sec ben in grado di sconvolgere una situazione già al limite della stabilità.

La frana del Tessina

Se esaminiamo poi anche la caratteristica del bacino alimentatore del Venà di Funès possiamo trarre le medesime considerazioni, avendo esso potenzialità di afflussi sostanzialmente identiche a quelle del Venà di Montanès.

La condizione idrogeologica di tutta l'area al contorno della zona che è stata direttamente interessata dal dissesto, risulta di particolare importanza per poter definire i diversi ruoli che hanno avuto le due incisioni laterali e la reale importanza, per le caratteristiche di vulnerabilità e soprattutto per le condizioni di stabilità della Valle del Tessina, che ha l'acqua di precipitazione meteorica, di infiltrazione e di trabocco, che proviene direttamente dal versante del Monte Teverone sovrastante.

L'emergenza più importante e più nota presente nel corpo di frana è però la sorgente Pelegona che si trova alla quota di 1030/1040 metri s.l.m. La sua posizione è di poco al di sotto del ciglio di frana, in pieno materiale detritico, e proviene per la gran parte da direttrici idriche profonde che causano il trasferimento di ingenti masse di acqua sotterranea nel corpo di frana. Questa abbondante presenza d'acqua causa dapprima il deperimento delle caratteristiche meccaniche degli stessi livelli marnoso argillosi, già rovesciati o fratturati per cause tettoniche, e successivamente favorisce il collasso periodico di più o meno grandi porzioni di versante e progressivo ampliamento della grande conca formatasi negli anni.

La sorgente mantiene caratteristiche di portata nel complesso uniformi, con punte considerevoli nei giorni di maggior piovosità, mettendo in evidenza una certa indipendenza dalle condizioni stagionali e dall'andamento delle precipitazioni meteoriche. Questo comportamento può essere dovuto alla presenza di una via di alimentazione vicina, che assicura alla sorgente un quantitativo idrico costante indipendente dalla variabilità degli apporti al bacino alimentatore.

Le indagini geofisiche eseguite hanno messo anche in luce che ulteriori apporti idrici pervengono nella Valle del Tessina lungo direttrici con andamento prevalentemente nord-sud, e sono quindi collegate direttamente con il versante del Monte Teverone. Ma quest'ultime appaiono di interesse secondario rispetto a quelle precedentemente descritte, e sembrano avere carattere temporaneo, dovuto alla coincidenza di eventi meteorici particolarmente intensi e prolungati (F. Villa, L. Colombo, A. Veroli, 1993).

La frana del Tessina

1.4 Origine del dissesto



Figura 1.9 - Visione della frana nel 1960 (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno)

Il dissesto idrogeologico del bacino del torrente Tessina, ha avuto inizio nell'ottobre 1960, dopo un periodo di precipitazioni abbondanti (ottobre 1960 - mm 398,7) che portarono ad una progressiva diminuzione delle resistenze frenanti, per lo scalzamento che al piede operavano le acque torrentizie o sorgive, interessando un volume di circa 1 milione di mc su un fronte di distacco di 300 metri di ampiezza e 20 metri di spessore sul versante meridionale del Monte Teverone tra quota 980 e 1015 metri s.l.m. (*Figura 1.9*) (G. Dal Farra, Genio Civile Belluno, 2009; Fondazione G. Angelini, 2011). Erano attive, comunque, precedenti condizioni d'instabilità. Le prime segnalazioni di movimenti con danni ad opere idrauliche sono del settembre del 1960.

Una ripresa del fenomeno si ebbe nel dicembre del 1962 sempre in concomitanza di notevoli precipitazioni (novembre 1962 - mm 251,2). In questa fase, la massa in frana, fluidificata dalle acque sorgive e meteoriche, si è evoluta in una colata lungo la valle, fino a lambire l'abitato di Funes.

Nel 1963 viene segnalata una nuova riattivazione del fenomeno che riguardava un'area di 50000 - 60000 mq (1,5 milioni di mc di materiale circa) compresa tra le

La frana del Tessina

Stalle Moda e la sorgente Pelegona. Vennero segnalati movimenti nella scarpata principale di 70 - 80 cm/giorno. La colata di fango si estendeva per oltre 2 km e si fermava a circa 350 metri a monte del vecchio ponte sul Tessina a Lamosano (Fondazione G. Angelini, 2011).

Il movimento è ripreso nella primavera del 1964 durante il disgelo dopo abbondanti precipitazioni (aprile 1964 - mm 114), manifestandosi un'ulteriore colata che dopo aver raggiunto un'altezza notevole di fronte all'abitato di Funes, ha continuato la sua discesa verso valle aumentando lo sviluppo longitudinale della vecchia colata di 350 metri (G. Dal Farra, Genio Civile Belluno, 2009).

La nicchia di distacco, è andata ampliandosi gradualmente verso est e verso nord nel corso degli anni ad ogni periodo piovoso, senza risentire in modo particolare dell'alluvione del 1966.

Negli anni successivi si sono verificati ulteriori movimenti franosi di debole attività e ridotte dimensioni; nel 1969, 1973, 1975, 1977.

Nel 1987 risultava colmata l'originaria valle del torrente Tessina per un volume stimato di 7 - 8 milioni di mc, una lunghezza di oltre 2500 metri, ed una larghezza media di 150 metri con uno spessore di circa 80 metri (G. Dal Farra, Genio Civile Belluno, 2009).

Uno degli eventi franosi più importanti fu certamente il distacco di una porzione di versante in località Roncadin avvenuto nel 1992, che alimentò una colata di enormi proporzioni e mise in movimento circa 3 milioni di mc, dei quali circa 700000 mc si staccarono dal versante ed altri furono movimentati lungo il canale. La colata continuò a muoversi da aprile fino alla fine di giugno, grazie anche al succedersi di più eventi meteorici di particolare intensità e durata, e la porzione più fluida raggiunse velocità dell'ordine dei 30 - 40 m/giorno. In tale occasione gli abitanti di Funes furono temporaneamente evacuati (S. Cola, P. Simonini et al., 2009).

Tale evento comportò, oltre all'allargamento dell'area sorgente, notevoli modifiche al ripiano superiore, l'espansione della colata a monte dell'abitato di Funes su tutta la valle del Tessina con un suo riempimento per spessori superiori anche ai 10 metri. Inoltre, la colata riempì parzialmente la depressione presso Col con un pericoloso innalzamento del livello di base, avanzando poi nella strettoia poco a monte dell'abitato di Torcogna, depositando materiali per uno spessore superiore ai 7 metri e fermandosi infine a poche decine di metri dall'abitato di Lamosano

La frana del Tessina

(Fondazione G. Angelini, 2011). Quest'ultimo, rimane anche ora come un tempo, soggetto ad un movimento franoso con spostamenti annuali di circa 2 cm e con una direzione simile a quella della colata. Per questo motivo si temeva che la spinta del materiale potesse aggravare tale situazione.

Nel 1995 si manifestava una riattivazione del fenomeno. Dopo una prima colata lungo il canale di frana si associò la rimobilizzazione del corpo di frana, con ulteriori colamenti sovrapposti agli accumuli precedenti. Con l'impulso ricevuto anche parte degli accumuli del '92 si rimisero in movimento. Il materiale mobilitato raggiunse i 2 - 2.5 milioni di mc e la colata percorse oltre 300 metri in dieci giorni, innalzando ulteriormente il fondovalle di almeno 3 metri e raggiungendo, dopo 15 giorni, la stretta in corrispondenza dell'abitato di Lamosano. Seguiva un vistoso abbassamento della zona apicale (G. Dal Farra, Genio Civile Belluno, 2009; Fondazione G. Angelini, 2011).

Particolarmente gravoso è stato anche l'evento del settembre 1998 per la mobilizzazione di circa 1 milione di mc di materiale.

Nella *Tabella 1* si riporta una cronistoria sintetica degli eventi che hanno interessato il colamento del Tessina. Tale sintesi è stata elaborata a partire dalla raccolta dei documenti esistenti e dai risultati del monitoraggio eseguito negli ultimi anni per conto del Genio Civile di Belluno.

Tabella 1 - Cronistoria delle riattivazioni (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno, 2009)

DATA	MAT. MOBIL. (milioni di mc)	PRECIPITAZIONI LIQUIDE (mm)	FUS. NEVE	AREE COINVOLTE	
				ZONA SORG.	COLATA
ottobre-60	1	399 (ott)		X	X
dicembre-62		251 (ott)		X	X
dicembre-63	1.5	289 (nov)		X	X
aprile-64		114 (apr)	X	X	X
ottobre-64	modesto	308 (ott)		X	
agosto-65	modesto	219 (ago)		X	
novembre-66	modesto	290 (ott)-433 (nov)		X	
giugno-68	modesto	173 (mag)-274 (giu)		X	
novembre-68		339 (nov)		X	X
giugno-69	modesto	223 (giu)		X	
maggio-73		152 (apr)	X	X	X
marzo-75	modesto	240 (mar)		X	X
aprile-75		176 (apr)	X	X	X

La frana del Tessina

settembre-75		196 (ago)		X	X
gennaio-77	modesto	297 (gen)		X	X
giugno-87	modesto	194 (mag)		X	X
agosto-90	modesto	105 (ago)		X	X
apr.-lug. 92	2.5-3	160 (nei 15 gg prec.)	X	X	X
lug.-ago. 93	0.025	176 (nei 45 gg prec.)		X	X
mag.-giu. 95	1.5-2	213 (30 gg prec.)- 348 (30 gg succ.)		X	X
aprile-98		100 (nei 10 gg prec.)	X	X	
set.-ott. 98	1	255 (nei 25 gg prec.)		X	X
ott.-nov. 00					
aprile-01					
mag.-giu. 04		136 (nei 16 gg precedenti)	X	X	
ott.-nov. 04	1	193 (nei 15 gg precedenti)		X	X
apr.-mag. 05		263 da 8 a 25 aprile	X	X	
set.-ott. 05	<1	229 in ago, 276 in sett, 501 in ott		X	X
giugno-08	<1	365 dal 15.05.08 al 18.06.08		X	
gennaio-09	<1	439 dal 25.11.08 al 02.01.09	X	X	X

Nella *Figura 1.10*, dal confronto visivo delle immagini, si possono notare l'evoluzione temporale del fenomeno franoso e le conseguenze che a livello ambientale hanno comportato i vari eventi verificatisi nel corso degli anni. Lo scenario morfologico è notevolmente cambiato. I fenomeni hanno causato un notevole ingrandimento dell'area dissestata ed un progressivo aumento del coronamento apicale, che è arretrato, a causa della rimobilizzazione dell'accumulo che ha interessato l'area di Roncadin, avvicinandosi alla parete del Monte Teverone, con un conseguente riempimento della valle. Quest'ultimo aspetto è evidenziato dal fatto che l'abitato di Funes, elevato di circa 40 - 50 metri rispetto l'alveo del Tessina agli inizi degli anni '60, ora si trova allo stesso livello del torrente.

La frana del Tessina

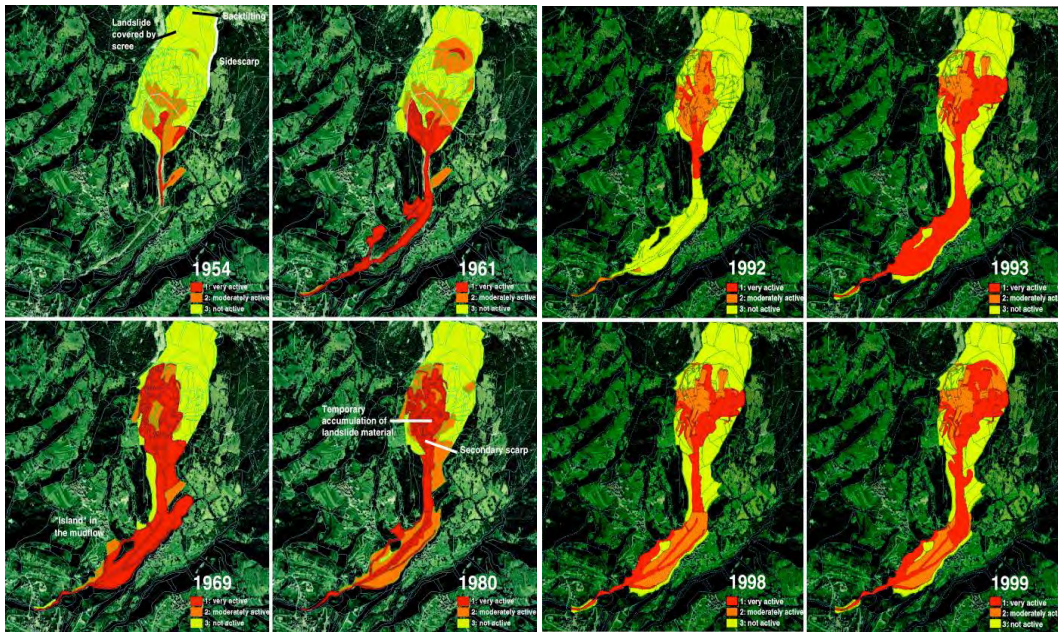


Figura 1.10 - Evoluzione della frana dal 1954 al 1980 e dal 1992 al 1999 (C.J. Van Westen -Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs)

Infine, come si vede dalla *Figura 1.11*, dal confronto tra il diagramma pluviometrico ed i principali periodi di riattivazione della frana, pur osservando che quest'ultimi si sono verificati in corrispondenza di eventi meteorologici abbastanza importanti avvenuti prevalentemente in autunno o in primavera a seguito di piogge intense e prolungate e allo scioglimento della copertura nevosa, non appare esserci correlazione diretta tra i quantitativi di precipitazione e le velocità di movimento.

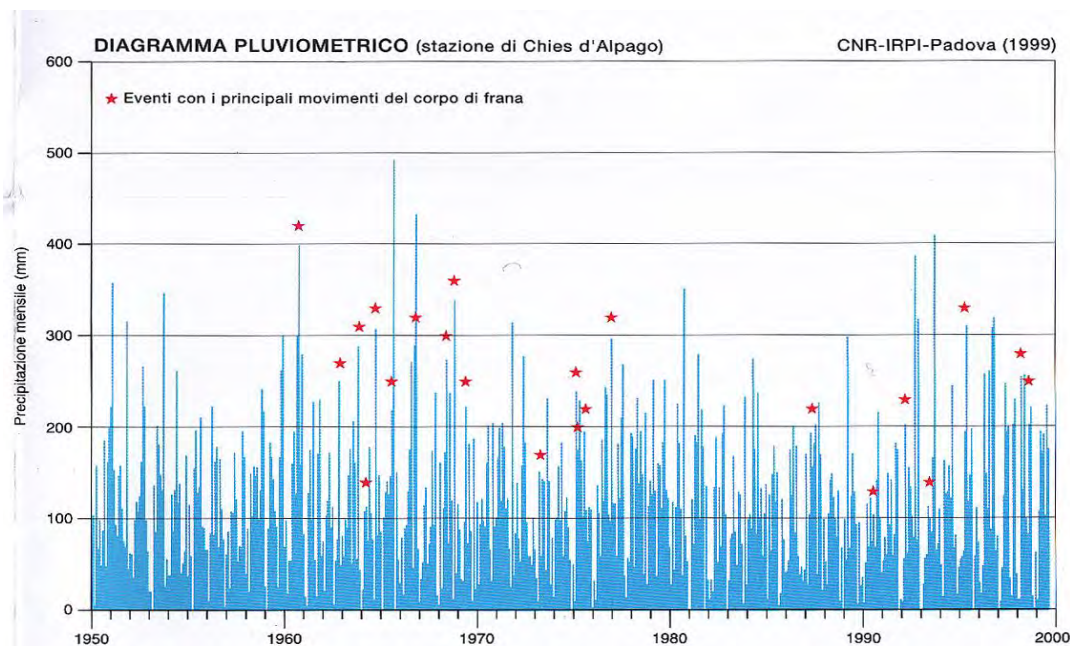


Figura 1.11 - Diagramma pluviometrico (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno)

La frana del Tessina

1.5 Movimenti franosi recenti

La situazione negli ultimi anni sembra essersi stabilizzata, nonostante si registrino ancora movimenti franosi di piccola intensità che interessano in particolar modo la parte alta della sorgente e la mediana, che ha visto per diverse volte l'asportazione della strada di collegamento tra Pedol e Funes come avvenuto nel maggio 2013 e nel novembre 2014.

Dalle informazioni ricevute dall'Arch. G. Dal Farra e come raffigurato nella *Figura 1.12*, anche il settore di "Moda" (*Figura 1.13 (2)*), dove sono ubicate le due fotocamere a disposizione, è interessato da alcuni spostamenti che non lo rendono perfettamente stabile e fisso nel tempo. Tale zona non aveva dato segno di movimento fino al 1998, anno in cui, a seguito della riattivazione dell'accumulo superiore, si sono registrati importanti movimenti ancor oggi attivi. Infatti, dai sopralluoghi effettuati, si sono notate delle zone di distacco nei dintorni della postazione a conferma di quanto riportato.

La frana del Tessina

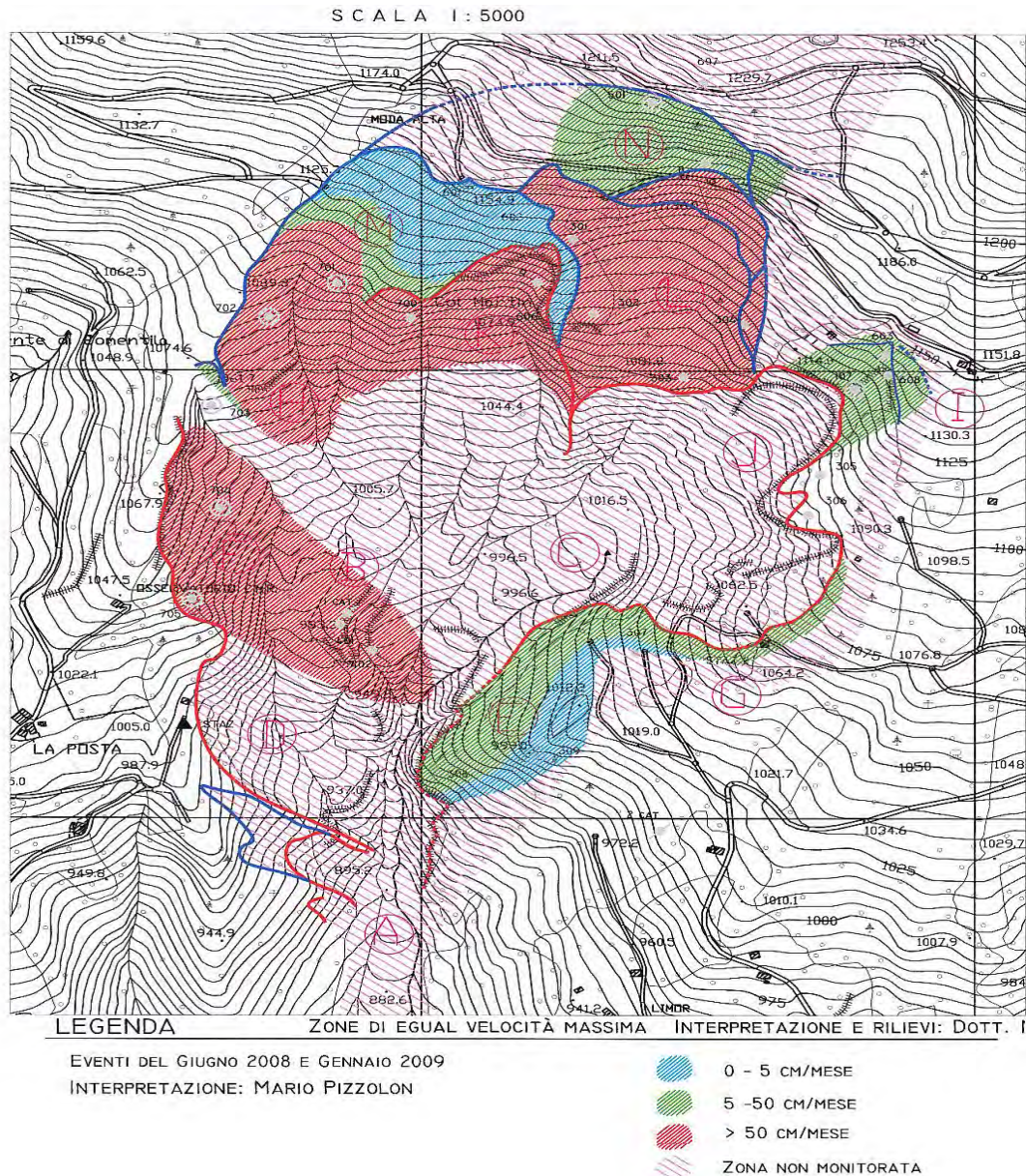


Figura 1.12 - Caratterizzazione dei movimenti della frana del Tessina sulla base delle velocità raggiunte durante i periodi di maggior movimento (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno, 2009)

Inoltre, recentemente, un'area in sinistra orografica, denominata "Pian de Cice" (Figura 1.13 (I)), fino ad ora considerata stabile, ha evidenziato spostamenti in accelerazione, suggerendo la possibilità di un futuro collasso.

Ciò desta particolare preoccupazione poiché un eventuale collasso potrebbe comportare l'instabilità di nuove aree e aumenterebbe di molto il volume delle masse colate in movimento verso valle e verso l'abitato di Funes, con grave rischio per l'incolumità degli abitanti, oltre che modificare completamente la morfologia della zona data l'enorme proporzione della colata.

La frana del Tessina

Per tale motivo in quest'area è stata focalizzata l'attività di monitoraggio con lo scopo di eseguire nuove indagini geofisiche integrative per una ricostruzione in dettaglio del sottosuolo dell'intero blocco instabile.



Figura 1.13 - Vista aerea del corpo di frana con indicazione della zona di Pian de Cice (1) e Moda (2)



Figura 1.14 - Stato attuale della frana, aprile 2014 (foto da me realizzata)

La frana del Tessina

Infine, anche per i movimenti franosi recenti, trova conferma quanto detto precedentemente e cioè, osservando la *Figura 1.15* dove sono messi a confronto i periodi di massimo movimento della frana (individuati come da legenda) con le precipitazioni nel periodo gennaio 2008 - agosto 2009, si nota una scarsa correlazione tra movimenti franosi e fenomeni di forte piovosità o di scioglimento rapido della neve.

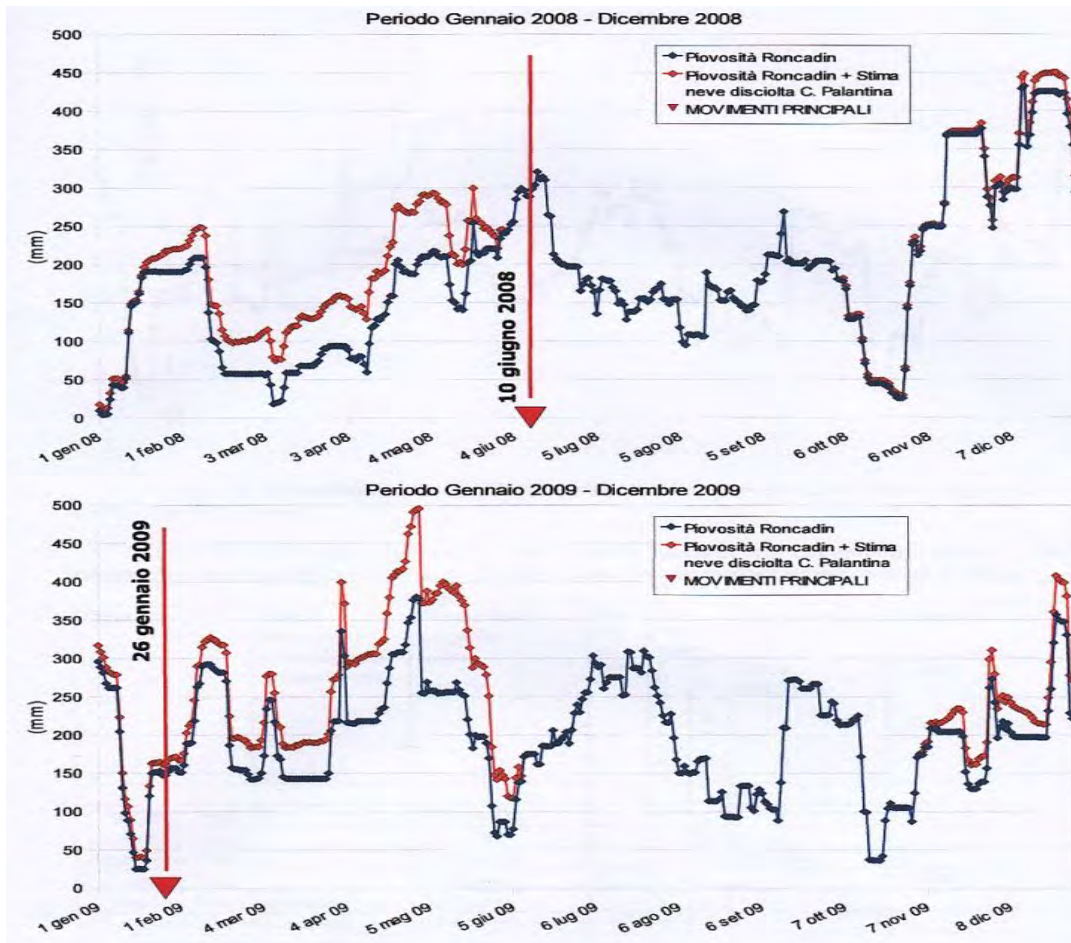


Figura 1.15 - Cumulata mobile sui 30 giorni della piovosità (stazione di Roncadin) e della neve disciolta (stazione di Casera Palantina) (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno)

La frana del Tessina

1.6 Danni causati

I vari eventi verificatisi negli anni hanno causato un progressivo aumento dei danni di carattere ambientale, sociale ed economico: sono state coinvolte alcune abitazioni, la pubblica viabilità (asportata la strada con il relativo ponte che, come si vede dalla *Figura 1.9*, collegava il centro di Funes con quello di S. Martino), la valle è quasi totalmente riempita dal materiale franato, si è resa necessaria la predisposizione ed, occasionalmente l'attuazione, di piani di evacuazione con notevoli disagi per la popolazione e danni non quantificabili per il turismo. Oltre a questo, le conseguenze dei vari fenomeni si riscontrano anche negli interventi di sistemazione realizzati al fine di rallentare e limitare l'entità del fenomeno franoso. Questo perché, come si vede nella *Figura 1.16*, ogni qual volta si hanno precipitazioni atmosferiche di una certa entità si ha come conseguenza una ripresa del scivolamento che porta al danneggiamento dell'opera realizzata.



Figura 1.16 - Briglia danneggiata dalla ripresa dei movimenti (internet, www.tesaf.unipd.it)

La frana del Tessina

1.7 Interventi

L'azione di contrasto e mitigazione del fenomeno, eseguita in passato e tuttora attiva, è contenuta in quattro categorie:

- *ricognitiva* con attività di monitoraggio, di studio e definizione delle strategie da adottare;
- *cautelativa* per garantire la pubblica incolumità con formazione di impianti d'allarme, di piani di esodo, di protezione civile, concepiti a diversi livelli di attivazione secondo le dimensioni dei movimenti;
- *passiva* rivolta a contenere l'area interessata dai movimenti fangosi per la difesa degli abitati e delle infrastrutture con particolare riguardo a nodi viabilistici vulnerabili;
- *strutturale* intesa al tentativo di regimare il movimento, con l'obiettivo di limitare il numero e le dimensioni dei collassi, poiché non appare realistico sostenere l'ipotesi del blocco permanente. L'attività di tipo strutturale ha definito interventi mirati alla raccolta e regimazione delle acque superficiali, poiché a tale presenza è imputabile la causa del movimento franoso (G. Dal Farra, Genio Civile Belluno, 2009).

Nel corso degli anni furono effettuati diversi interventi di natura idraulica e strutturale per ripristinare il corso del torrente 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 un'altra ad arco a monte di Lamosano, che però furono entrambe distrutte nell'evento del 1964. Negli anni successivi furono effettuati diversi interventi di sistemazione al fine di rallentare e limitare l'entità del fenomeno franoso, tra cui lavori di captazione e deviazione delle acque sorgive, briglie e canalizzazioni negli ammassi di colamento (*Figura 1.17*). Altri importanti interventi sono stati eseguiti per rimuovere il materiale di deposito per la messa in sicurezza dell'area in prossimità dell'abitato di Funes. Tali interventi hanno comportato anche una serie di aspetti positivi tra cui il graduale ripristino ambientale della valle e la creazione di un invaso per eventuali nuovi apporti di materiale dall'area sommitale.

La frana del Tessina

Fu realizzato uno scivolo in calcestruzzo, in prossimità della passerella di Lamosano, con sistema di fluidificazione a ugelli che spruzzano acqua ad elevata pressione, per favorire un celere deflusso del fango trasportato dalle colate.



Figura 1.17 - Interventi eseguiti a Lamosano (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno)

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 si preoccupò di monitorare 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.

Tra i vari interventi, con lo scopo di 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 1.18).

La frana del Tessina



Figura 1.18 - Interventi a difesa dell'abitato di Funes (foto da me realizzata)

In seguito all'importante evento del 1992 si iniziarono anche i primi lavori per realizzare una galleria drenante che raccogliesse le acque di tutte le sorgive che uscivano dal monte Teverone.

1.8 La galleria drenante

La galleria drenante (*Figura 1.19*) fu eseguita negli anni 1994 - 1997, con lo scopo di abbassare i livelli di pressione idraulica agenti nel corpo di frana.

L'idea del progetto fu di asportare le acque di circolazione, situate all'interno dell'ammasso roccioso del monte Teverone, in modo da contribuire nell'opera di mitigazione del dissesto.

Il sistema della galleria drenante del Tessina è composto dall'imbocco, posto alla quota di 1142 metri s.l.m., in località Col di Montagna, attiguo alla strada che sale da Funes verso il Venal di Funes, 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 (*Figura 1.8*). Il ricettore delle acque drenate è il torrente Funesia, posto nell'incisione valliva sita nella sinistra orografica del Tessina.

La frana del Tessina

La galleria ha una lunghezza di 1244 metri per una superficie di scavo di 14 mq. La pavimentazione ha la pendenza dello 0,35%.



Figura 1.19 - L'interno della galleria drenante (internet, www.iqtconsulting.it)

Il corridoio fu scavato prevalentemente nel calcare, di aspetto roccioso, ad esclusione di un tratto, lungo 30 metri, posto su marna.

Nell'attuale galleria esistono alcuni dreni, per una lunghezza complessiva di 1812 metri, realizzati in concomitanza con l'avanzamento dei lavori di scavo. Essi furono realizzati per deprimere localmente sovrappressioni idrauliche e permettere un agevole lavoro di scavo della galleria. I tipi di dreni sono:

- *dreni verso nord*, caratterizzati da una direzione di perforazione verso Nord, cioè verso l'interno dell'ammasso roccioso del monte Teverone, e da una inclinazione verso l'alto prossima all'orizzontale, con pendenza di attacco di 10° per contenere l'abbassamento finale e permettere il deflusso idrico per naturale caduta. Questo gruppo di dreni ha lunghezza minima di 100 metri e massima di 150;
- *dreni verso sud*, il secondo gruppo di dreni ha una direzione planimetrica di perforazione verso sud e, quindi, verso l'esterno dell'ammasso roccioso, ed un'inclinazione verso l'alto di circa 45° . Questo per avvicinarsi alla superficie terrestre e captare le falde in prossimità della stessa, alimentate

La frana del Tessina

sempre lungo le discontinuità di giacitura degli strati. Questo gruppo di dreni ha lunghezza massima di 100 metri;

- *dreni verso nord-ovest*, in corrispondenza del fondo della galleria c'è un dreno in direzione nord-ovest, con direzione verso l'alto di circa 45°, allo scopo di interferire con le acque presenti nelle caditoie detritiche presenti in quel tratto.

I fori di drenaggio hanno un diametro minimo di 150 mm da 0 a 10 metri, 110 mm da 10 a 80 metri, 90 mm fino a fondo foro (G. Dal Farra, Genio Civile Belluno, 2009).

Accanto alla galleria drenante fu sviluppata la produzione di energia mediante una centrale idroelettrica con previsioni di una produzione annua pari a 1.721.000 kWh. In realtà la produzione supera i 2.000.000 di kWh (2.075.000 kWh nel 2010, 2.038.000 kWh nel 2011).

Negli anni successivi (2006 – 2008) furono eseguiti alcuni interventi di completamento e potenziamento della galleria drenante, con l'intento di facilitare l'allontanamento delle acque drenate migliorando lo stato della pavimentazione e l'efficienza della canaletta di scarico.

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. Tutto questo in relazione al fatto che non intercetta tutta la circolazione idrica sotterranea proveniente dal monte Teverone (*Figura 1.20*).

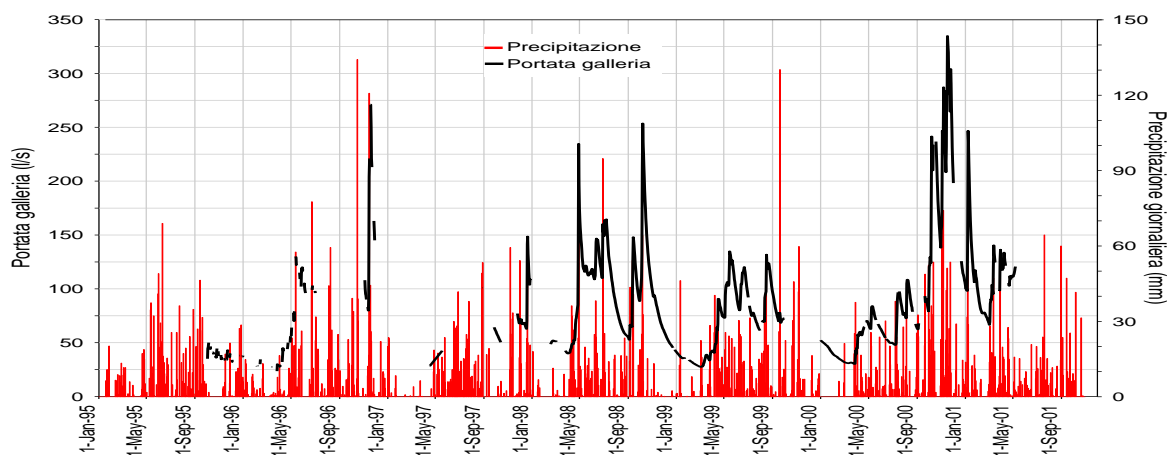


Figura 1.20 - Portata della galleria e precipitazioni dal 1995 al 2001 (A. Pasuto & G. Bossi - La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio)

La frana del Tessina

1.9 Materiale detritico

Il materiale abbandonato dalle colate, come si vede dalla *Figura 1.21*, si presenta come un'intima miscela di ciottoli, ghiaia, sabbia da grossa a fine in una matrice argillosa.



Figura 1.21 - Materiale detritico (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno)

Dall'analisi granulometrica si ottengono elevati valori di materiale passante al vaglio N. 40 (dimensioni della maglia mm 0.42): minimo valore 55%, massimo valore 61%. Queste percentuali si riferiscono al peso del materiale, quindi i rapporti volumetrici sono ampiamente diversificati dai precedenti in quanto la frazione più fine riempie totalmente i vuoti del materiale grossolano. Di conseguenza, il materiale grossolano risulta essere totalmente immerso nella matrice limo-argillosa, con scarsi o nulli contatti tra gli elementi. Questo fatto implica che il comportamento del materiale nella sua globalità sia regolato esclusivamente dalle caratteristiche fisiche e meccaniche della parte più fine argillosa.

Il materiale detritico rimosso dal deposito, a seguito degli interventi eseguiti, può essere riqualificato da materiale di scarto a risorsa, individuando possibili riutilizzi. Il materiale, da analisi chimiche e da prove effettuate, può essere considerato una

La frana del Tessina

materia prima per una serie di attività riconducibili principalmente ai settori della produzione di cementi, dei laterizi e limitatamente delle ceramiche. Ogni possibile utilizzo del materiale comporta una diversa attività di coltivazione del deposito ed una eventuale prelaborazione del materiale stesso: l'industria dei laterizi e della ceramica può lavorare esclusivamente materiali di pezzatura fine, l'industria dei cementi può utilizzare materiali caotici fino a certe determinate dimensioni e caratteristiche e con contenuti d'acqua limitati. Da indagini di mercato svolte, risulta essere l'industria cementizia quella interessata all'utilizzo del materiale. Infatti, una delle materie prime del ciclo produttivo di una cementeria che produce cemento Portland, può avere sia le caratteristiche chimiche che dimensionali del materiale di frana. Il materiale del corpo della colata risulta avere, quindi, buone caratteristiche dal punto di vista chimico e dimensionale, ma un eccessivo contenuto in acqua potrebbe renderlo non compatibile con i cicli produttivi: il contenuto in acqua può raggiungere il valore indicativo massimo di 15% - 18%. Valori maggiori richiederebbero un incremento energetico per disidratare il materiale prima della lavorazione, ma ciò non converrebbe dal punto di vista economico (P. Gasparetto, 2001).

2. MONITORAGGIO PER IL CONTROLLO DELL' EVENTO FRANOSO

2.1 Introduzione

Oltre agli interventi sopracitati, nella frana del Tessina è stata svolta nel corso degli anni un'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 dell'evento franoso, sia il suo comportamento e l'evoluzione nel tempo.

Il termine "monitoraggio" è utilizzato per indicare funzioni, o meglio processi anche complessi, di controllo di un certo fenomeno, o attività.

Il monitoraggio è un intervento "non strutturale" di mitigazione del rischio: in altri termini è un modo di operare che permette di approfondire la conoscenza di un evento e della sua pericolosità, attivando quindi azioni che possano ridurre gli effetti indotti. Qualunque sia l'entità di una rete di monitoraggio essa deriva da una progettazione sviluppata attraverso verifiche geologiche, geotecniche, impiantistiche, informatiche e gestionali.

Le risposte che un sistema di monitoraggio può dare nello studio di un dissesto sono diverse, quali:

- l'identificazione dei parametri geologici e geomeccanici di interesse oltre che al tipo di materiale;
- la comprensione dei meccanismi in atto;
- l'area, la profondità interessata e la frequenza del problema stesso;
- l'interazione dei diversi fattori che incidono sul dissesto;
- l'efficacia delle eventuali opere di stabilizzazione-consolidamento realizzate, senza dimenticare la funzione di previsione, di supporto alle decisioni o alla vera e propria attivazione di piani di emergenza.

Molto spesso la posa di strumentazione di monitoraggio viene effettuata in condizioni di emergenza, a seguito di eventi nuovi o riattivati. In tali condizioni, considerata proprio la finalità emergenziale, i tempi di progettazione e realizzazione del sistema sono necessariamente ridotti.

La frana del Tessina

Le attività di monitoraggio in generale interessano:

- frane più o meno grandi, in tutte le loro diverse tipologie;
- corsi d'acqua che incidono sulle frane o sono influenzati dalle frane;
- opere di consolidamento delle frane;
- strutture antropiche (dighe, edifici, impianti vari, linee elettriche);
- viabilità.

Nel caso si tratti di fenomeni di instabilità di pendio la conoscenza del 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 sono indispensabili allo scopo:

- dell'individuazione dei parametri di maggior rilevanza;
- della scelta della strumentazione da installare;
- delle modalità di esecuzione delle misure;
- della definizione della suscettibilità del territorio a franare, per la valutazione del rischio.

Gli strumenti utilizzabili nel monitoraggio di un fenomeno franoso possono essere suddivisi in funzione dei parametri che devono essere misurati. Riportiamo, per esempio, gli spostamenti, le pressioni neutrali, i livelli di falda, le rotazioni, le deformazioni e i parametri meteorologici. Tra i principali dispositivi di misurazione 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;

La frana del Tessina

- *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.

2.2 Monitoraggio nella frana del Tessina

A seguito della riattivazione del fenomeno 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. Il principio base 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.

2.2.1 Sistemi di monitoraggio automatico

Questi sistemi consentono la misurazione 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 si trovano abbinati a sistemi di allarme.

Nel caso in esame vennero installati 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.

In particolare, nella parte superiore fu installato un sistema topografico con ricerca automatica dei capisaldi per la misura degli spostamenti superficiali, che rimase attivo fino alla fine del 2009. Le misure ottenute permisero di riconoscere le fasi di accelerazione e prevedere i collassi di alcune aree.

L'andamento degli spostamenti nel triennio 1997-1999 consentì una zonizzazione della frana in 4 aree caratterizzate da velocità di spostamento diverse (*Figura 2.1*).

La frana del Tessina

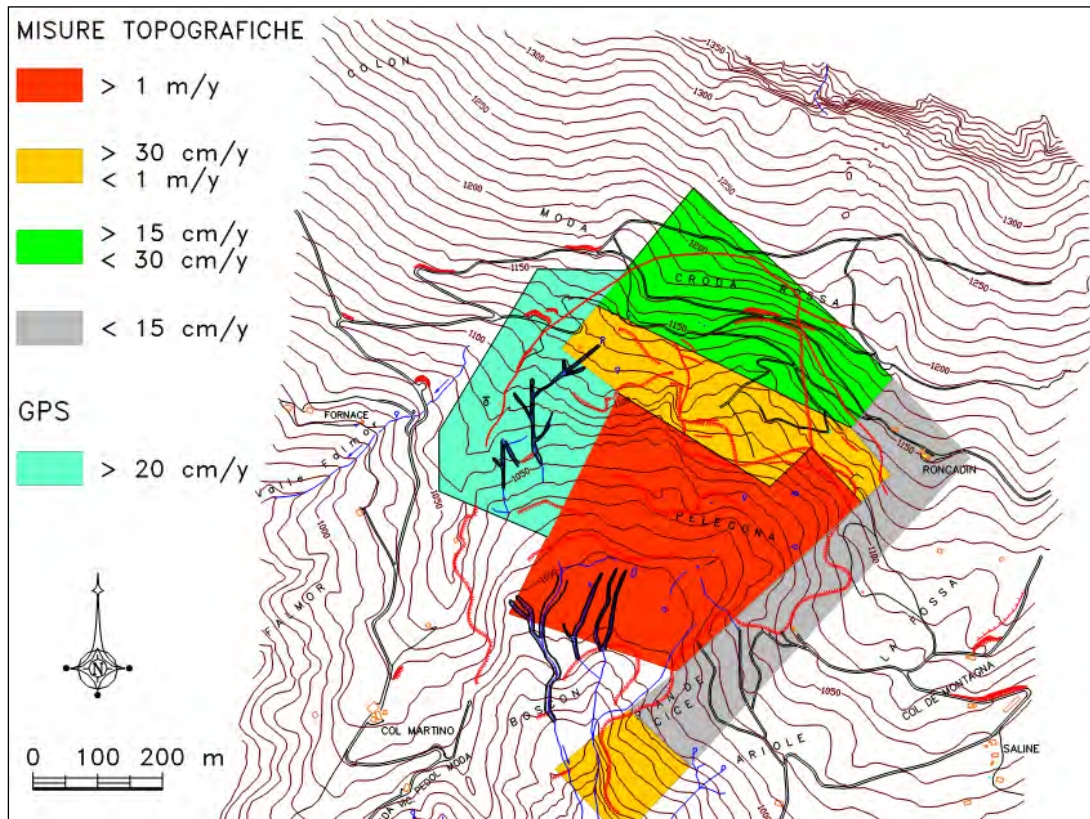


Figura 2.1 - Suddivisione dell'area sorgente in zone caratterizzate da valori di velocità simili (A. Pasuto & G. Bossi - La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio)

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 attrezzate due stazioni di controllo a monte di Funes e Lamosano entrambe costituite da 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) (Figura 2.2). Nel caso di transito di materiale le aste subiscono un'inclinazione lungo la direzione di scorrimento; se tale inclinazione risulta maggiore di 20° per un periodo superiore ai 16 s, viene inviato un segnale di allarme in aggiunta al segnale degli ecometri.

La frana del Tessina

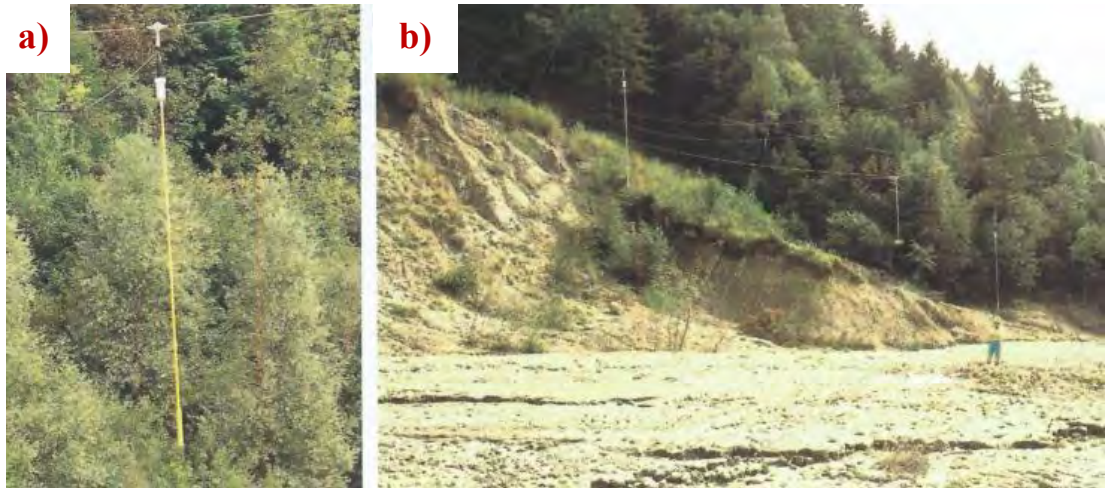


Figura 2.2 - Particolare di un asta direzionale (a) e tre aste direzionali ed un ecometro per il controllo della colata a monte di Funes (b) (A. Pasuto & G. Bossi - La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio)

Ai dispositivi sopraesposti furono affiancate delle telecamere per la registrazione ed il controllo visivo dei movimenti in corrispondenza delle zone ritenute più critiche.

2.2.2 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 scelti: inclinometri, estensimetri a filo, piezometri, capisaldi GPS, un misuratore di portata all'uscita della galleria drenante e due stazioni meteorologiche 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, alcuni, sono attualmente attivi. In particolare, vennero determinati:

1. *Spostamenti superficiali*: misurati sia con sistemi topografici tradizionali sia con sistemi GPS, in riferimento a due zone dove la prima può essere identificabile come sorgente ed accumulo superiore, nella quale 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.

La frana del Tessina

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 strumentali e quindi non furono rilevati spostamenti che potessero essere collegati ad un reale movimento della colata;

2. *Spostamenti profondi*: mediante l'uso di inclinometri classici che 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 20/68 m;

3. *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. Per osservare il livello di falda furono, invece, realizzati dei sondaggi. Nel 1995 l'IRPI-CNR di Padova installò dei piezometri nei pozzi ancora agibili ubicati su Pian de Cice i quali furono monitorati con costanza;

4. *Misure di portata in galleria*: i dati raccolti dimostrano la presenza di una portata minima costante pari a 30/40 l/s, rispetto alla 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. Si presenta inoltre 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.

Un'ulteriore tecnica di misurazione, che venne applicata tra il 25 Settembre e il 13 Ottobre 2000, è l'*interferometria SAR* che 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

La frana del Tessina

inviato ed eco ricevuto (Figura 2.3). Grazie a questa tecnica è stato possibile ottenere una mappa delle deformazioni superficiali dell'area indagata con una precisione millimetrica.

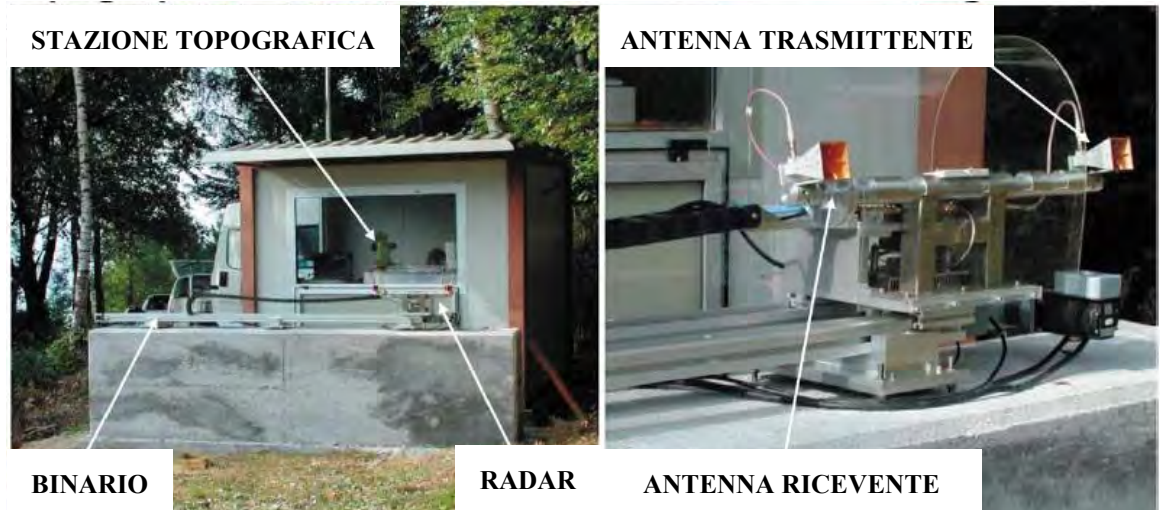


Figura 2.3 - Posizionamento del sistema SAR con dettaglio dell'antenna trasmittente (A. Pasuto & G. Bossi - *La frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio*)

2.3 Monitoraggio fotogrammetrico

Oltre alle strumentazioni precedentemente esposte, dal 2011 è presente un sistema di monitoraggio basato sull'acquisizione di immagini digitali da due fotocamere. Le foto ricavate possono essere successivamente elaborate al fine di determinare, con costi ragionevoli, l'evoluzione del fenomeno franoso in atto, individuandone le fasi di accelerazione o di quiescenza. Questo sistema di monitoraggio, utilizzato anche nella presente ricerca sperimentale, è di tipo misto. Ciò sta a significare che si ha l'acquisizione automatica dei dati ma è altresì 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, questo sistema è stato utilizzato anche in diversi lavori di tesi triennale (Stevanato, 2010; Pacagnella, 2012; Gidoni, 2012; Dainese, 2012; Zoppé, 2012; De Fanti, 2012; Brandalise, 2013) per determinare la direzione e l'intensità (in pixel) degli spostamenti superficiali di alcuni *target* individuati nelle foto mediante il programma *Landslide Displacement Detector*, realizzato dal Dottor Fabio Gabrieli e Mirco Motta, ottenendo dei buoni risultati.

La frana del Tessina

2.3.1 Ubicazione del punto di monitoraggio

La disposizione spaziale del punto di monitoraggio è un elemento importante per poter giungere ad un corretto esame del fenomeno. Esso è generalmente suggerito dalle evidenze morfologiche e dalle condizioni logistiche, ma può essere oltretutto limitato dall'accessibilità e dall'entità del finanziamento disponibile. E' pertanto difficile indicare un criterio generale che possa guidare efficacemente la scelta del punto di monitoraggio, che è quindi un compito che rientra tra le prerogative professionali e l'esperienza del progettista.

Nel nostro caso il punto di misura è ubicato in località Moda (*Figura 2.4*), nello stesso luogo in cui precedentemente era stata collocata la stazione del CNR che, quindi, ha condizionato la scelta a causa della presenza sul luogo di alcuni elementi che, lasciati a nostra disposizione, hanno facilitato la realizzazione della postazione.

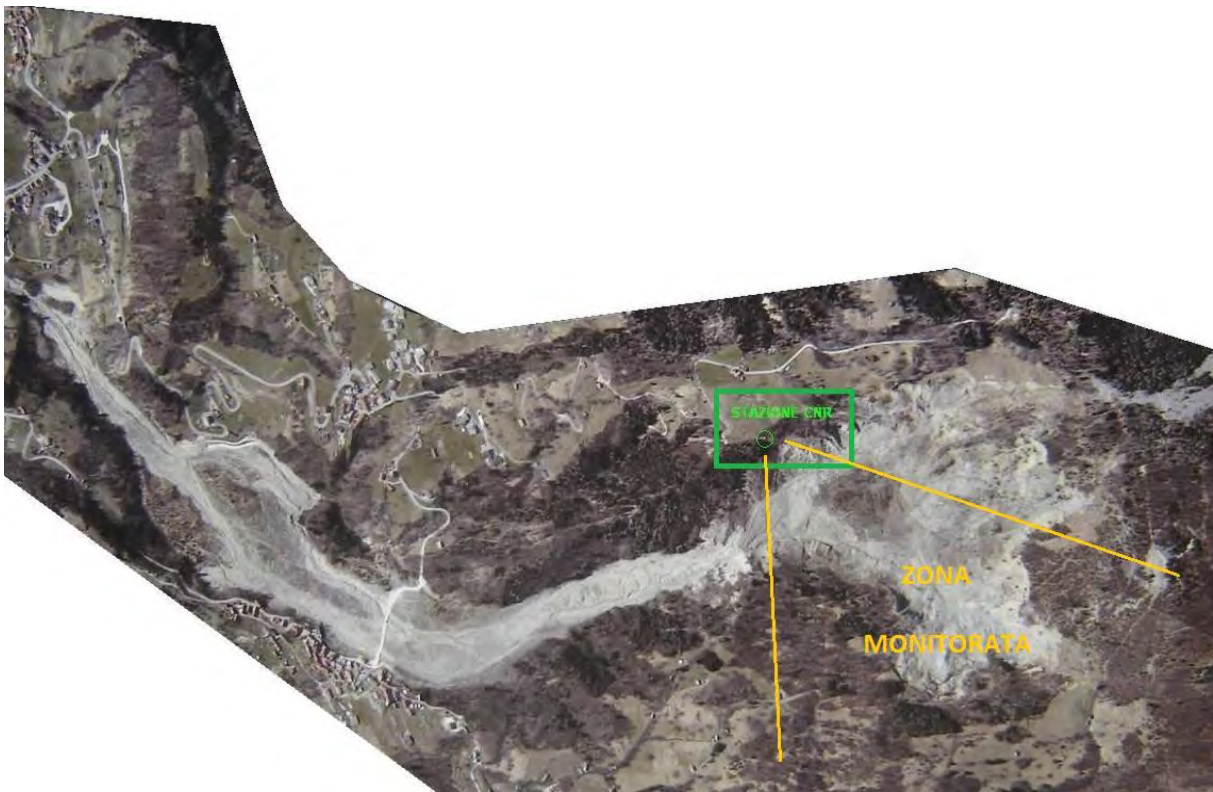


Figura 2.4 - Visione satellitare della frana del Tessina in cui sono messe in evidenza la postazione di monitoraggio e l'area monitorata (G. Dal Farra, Genio Civile di Belluno - indicazioni sulla foto da me riportata)

Da tale posizione, situata a 1005 metri s.l.m. sulla destra orografica della frana, è possibile osservare gran parte del dissesto, come si rileva in maniera incompleta

La frana del Tessina

dalla *Figura 2.5*, ed in particolare la zona di coronamento in sinistra orografica, l'accumulo superiore e la parte superiore del canalone di convogliamento.



Figura 2.5 - Visione parziale dell'area osservata dalle due fotocamere (foto da me realizzata)

Questo punto di misura si trova dunque in corrispondenza di un'area rappresentativa del fenomeno in atto, cioè nella zona in cui avvengono gran parte dei movimenti e colamenti. Quest'ultima è facilmente raggiungibile in automobile tramite la strada che sale dall'abitato di S. Martino (Via Moda) e presenta anche un accesso sufficientemente agevole e in sicurezza.

2.3.2 Scelta degli strumenti

Dopo avere definito quali parametri misurare, l'ubicazione dei punti di misura e la tipologia strumentale più idonea, si è proceduto alla scelta dei dispositivi.

Generalmente, la scelta degli strumenti deve tenere conto oltre che della criticità e durata della misura, dell'accessibilità al punto, dell'intercambiabilità degli strumenti ed anche delle problematiche di installazione, come diametri e modalità

La frana del Tessina

di perforazione richiesti per gli strumenti in foro, materiali d'uso necessari, mezzi d'opera, personale di supporto, protezioni da realizzare, opere civili ed impiantistiche di supporto per i dispositivi in superficie.

In tale occasione si sono scelte di utilizzare due fotocamere Canon EOS 550D che consentono di catturare delle immagini ottimali e d'incorniciare piccoli particolari della scena grazie alla elevata definizione. Sono quindi strumenti di superficie posti in prossimità dell'accesso al punto di monitoraggio e per questo risultano facilmente raggiungibili per eventuali interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria che garantiscano l'efficienza degli stessi. Tali strumenti presentano il vantaggio di essere facilmente impostabili e intercambiabili e non necessitano di una protezione da agenti atmosferici particolarmente laboriosa come descritto nel paragrafo 2.3.3.

2.3.3 Realizzazione

E' la fase finale che comporta l'installazione e il mantenimento in esercizio di una vera e propria rete di monitoraggio.

Gli elementi presenti in sito che contribuiscono a comporre il sistema sono, come si può osservare nella *Figura 2.6*, un piccolo edificio prefabbricato di circa 7 mq, nel quale sono presenti un computer e due webcam di sorveglianza, un muretto di cemento armato posto in prossimità dell'edificio e due pilastri, anch'essi in cemento armato, sui quali sono fissate le due fotocamere.

La frana del Tessina



Figura 2.6 - Stazione di monitoraggio (foto da me realizzata)

La disposizione in opera dell'impianto di monitoraggio è avvenuta a metà novembre del 2011 dal Dottor Fabio Gabrieli a dagli allora tesisti Lorenzo Pacagnella e Giovanni Gidoni. In tale data sono state installate le due fotocamere (*Figura 2.6*); la prima sul muretto adiacente l'edificio e la seconda su uno dei due pilastri presenti. Queste distano 12,43 metri l'una dall'altra e puntano in maniera leggermente divergente sul corpo franante. Sono collegate tramite un cavo di alimentazione, interrato per proteggerlo dal passaggio di persone ed animali, alla corrente e al computer così da poter trasmettere e salvare le immagini scattate in esso. Da questo computer inoltre, grazie al collegamento ad una connessione internet, arriva la conferma via e-mail, a tutti gli utenti interessati dei dati rilevati, della corretta esecuzione del procedimento indicando se e quante foto sono state eseguite (*esempio e-mail: "2 foto eseguite correttamente. Saranno trasferiti al server ftp circa 21091 kB di immagini"*).

Come sopra accennato, tali strumenti necessitano di protezione da pioggia, neve, vento e qualsiasi altra condizione meteorologica che potrebbe danneggiarli. Per questo, come raffigurato in *Figura 2.7*, le fotocamere sono state poste all'interno di cassette IP66, 50 x 70 cm sulle quali si sono fissate delle lamiere inclinate per aumentare il grado di protezione e consentire alla neve di scivolare su di esse.

La frana del Tessina



Figura 2.7 - Protezioni per le due fotocamere (foto da me realizzata)

Inizialmente si è anche reso necessario il taglio di alcuni alberi ed arbusti che ostacolavano la visuale della frana.

2.3.4 Progettazione

La progettazione di un sistema di monitoraggio deve prendere avvio da alcuni elementi di base che orientano le scelte successive. In particolare possono essere assunti come primari lo scopo, la frequenza delle letture e la tipologia del sistema.

Lo scopo per cui è stato realizzato questo sistema di monitoraggio, come già detto in precedenza, è quello di valutare e analizzare gli spostamenti della frana. Il monitoraggio ha quindi finalità di studio.

Nel caso di sistema rivolto a tali finalità, si dovranno seguire le risultanze degli studi preliminari e le finalità dello studio. Si dovrà porre attenzione alla significatività e criticità delle misure.

La frana del Tessina

La definizione della frequenza di rilievo è in funzione di diversi parametri tra cui lo scopo del monitoraggio, l'evoluzione dei fenomeni, i periodi di osservazione. Per sistemi a scopo di studio la frequenza può essere molto variabile. Nel nostro caso la frequenza è pari ad una lettura al giorno, effettuata a mezzogiorno, quindi non particolarmente elevata. Ciò significa che ogni giorno il sistema scatta e archivia automaticamente due immagini, una per ogni fotocamera. Per frequenza elevata s'intende, a titolo indicativo, una frequenza pari ad una lettura ogni due ore, modificabile fino a 15-30 minuti in casi particolari o in condizioni di allarme. Ultimamente, da luglio 2014, il sistema è stato migliorato aumentandone la frequenza e facendo variare il grado di luminosità delle immagini. In particolare, le foto vengono scattate ogni due ore a partire dalle 8.00 fino alle 18.00 e, per ogni lettura, vengono eseguite tre foto con diversa luminosità da ogni fotocamera. Così facendo sarà possibile, per le future analisi, ridurre i "periodi ciechi" dovuti al problema di luminosità riscontrati.

La tipologia del sistema di monitoraggio utilizzato è, come detto, di tipo misto e cioè comprende parte di strumentazione a lettura manuale e parte a lettura automatica. Si fa uso di questo metodo di lavoro quando, in sistemi automatici, vi sia necessità di ricorrere anche a strumenti che non consentono letture automatiche, oppure quando il sistema viene suddiviso, per comodità di gestione, in sottosistemi in parte automatici ed in parte manuali. Viene utilizzato anche quando, in sistemi manuali, vi siano strumenti che necessitano di essere letti con frequenza elevata, ma i dati non devono essere resi disponibili in tempo reale, per cui in sistemi manuali si inseriscono unità di acquisizione automatiche remote. Nel nostro caso è stato realizzato un sistema che consente automaticamente di effettuare con frequenza giornaliera ed archiviare nel computer, posto nel prefabbricato, le foto e poi, periodicamente, occorre raggiungere la stazione per poter recuperare le immagini salvate. Questo perché il segnale attualmente presente in zona non è così elevato da poter consentire un sistema di monitoraggio completamente automatico che permetta quindi di trasmettere tramite e-mail le immagini eseguite a tutti gli utenti interessati ai dati rilevati senza la necessità di intervento.

La frana del Tessina

2.3.5 Gestione del monitoraggio

Le operazioni di monitoraggio che vengono eseguite costituiscono lo strumento per acquisire informazioni, in questo caso le foto, necessarie per la successiva fase di analisi e di supporto ai processi decisionali. Per tale motivo, un corretto approccio alle operazioni di monitoraggio, oltre agli aspetti legati alla progettazione e installazione della strumentazione, deve tener conto dei fattori gestionali per garantire la funzionalità d'esercizio dei sistemi.

La strumentazione usata in questo caso (Canon EOS 550D) richiede dunque periodici interventi di ridefinizione delle condizioni al contorno per poter eseguire elaborazioni corrette dei dati acquisiti. Gli interventi di ordinaria e straordinaria manutenzione sono orientati a prevenire i malfunzionamenti legati al decadimento naturale della strumentazione, all'influenza di fattori esterni, alla taratura periodica dei sensori e al ripristino della funzionalità dei dispositivi a seguito di errori verificatisi ed accertati. Per tale motivo si è reso necessario recarsi presso la postazione di monitoraggio, riposizionare la fotocamera con rimessa a fuoco, in quanto leggermente spostata a seguito di eventi meteorologici dalla propria posizione iniziale, così da non consentire un'ampia vista del dissesto. In tale occasione si è contestualmente proceduto al taglio di alberi ed arbusti che ostacolavano la visione della frana ed in particolare la zona di Pian de Cice. Si sono inoltre verificati più volte inconvenienti di natura tecnica sul procedimento automatico che il computer compie giornalmente e che consente di effettuare ed archiviare le foto. In alcuni casi il sistema riusciva ad eseguire le foto da una sola fotocamera mentre in altri l'intero sistema risultava inutilizzabile con conseguente presenza di "periodi ciechi" nell'insieme di immagini acquisite.

Attualmente il sistema non è funzionante a causa della mancanza di elettricità dovuta alla necessità di sostituzione per messa in sicurezza della linea elettrica della zona da parte del comune.

Nella gestione dei sistemi di monitoraggio i componenti software per la raccolta e l'archiviazione dei dati ricoprono un ruolo di primaria importanza. L'organizzazione delle modalità di archiviazione è dunque un'attività preliminare ineludibile per istituire una "base dati" che possa essere successivamente utilizzata quale componente di un processo decisionale più generale. E' quindi necessario

La frana del Tessina

prestare particolare attenzione alla conservazione dell'intero patrimonio informativo che si va costituendo, e quindi di tutte le foto a disposizione, non concentrandosi unicamente sulla serie di immagini relative ad allarmi o a situazioni estreme come importanti movimenti o semplicemente alla presenza di colate di lieve entità, così da garantire una maggior completezza e riutilizzabilità dell'insieme di informazioni raccolte.

2.3.6 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 pregi e difetti principali:

Pregi

- Grazie al costo ed al 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. Consente dunque di monitorare e tenere sotto controllo per lunghi periodi un' area molto estesa che risulta di difficile e insicuro accesso;
- Il sistema consente di accertare la corretta esecuzione del processo di acquisizione di immagini tramite l'invio di una e-mail di conferma appena dopo la conclusione dell'elaborazione stessa, evitando di recarsi personalmente sul luogo per valutare che il processo funzioni correttamente. Consente inoltre di 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.

La frana del Tessina

Difetti

- Il principale difetto rilevato da tutti gli autori è la dipendenza dagli agenti atmosferici: in presenza di nebbia, neve, pioggia e scarsa luminosità le foto sono parzialmente o totalmente inutilizzabili per qualsiasi scopo. Si ha dunque la perdita di una porzione del patrimonio informativo che si va costituendo in quanto è necessario eseguire una selezione delle foto;
- Non essendo un sistema di monitoraggio automatico è necessario recarsi in loco per scaricare i dati, i quali quindi risultano retrodatati. 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. Risulta quindi necessario recarsi in loco per interventi di rimozione o prevedere un riposizionamento degli strumenti;
- La postazione di monitoraggio deve essere fornita di corrente elettrica per l'utilizzo della strumentazione stessa;
- La fotocamera posta sul pilastro presenta uno scarso vincolo alla colonna e quindi, in occasione di forte vento, può spostarsi dalla postazione originale necessitando quindi di un resettaggio (ad esempio rimessa a fuoco della fotocamera come infatti è accaduto). Un'altra causa di instabilità è data dal terreno ed in particolare dalla porzione sottostante la colonna che presenta importanti segni di cedimento.

3. DATASET DA ANALISI DI IMMAGINI E MISURE PLUVIOMETRICHE

3.1 Introduzione

La preparazione del dataset, contenente tutte le informazioni e misure necessarie all'analisi, è stata condotta riprendendo quanto svolto dal dott. Luca Vettore nel suo lavoro di tesi magistrale in cui l'obiettivo principale 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 sopraccitati.

Tali informazioni sono essenziali per il dataset utilizzato nel presente elaborato in cui, noti i dati pluviometrici raccolti dalla stazione meteorologica di Roncadin, vicino a Chies d'Alpago, è stato possibile individuare gli eventi interessanti le varie zone con cui è stata suddivisa l'area sotto esame, così come indicato nel lavoro svolto da Vettore. Per ognuna delle zone ed evento considerato si sono integrate le informazioni relative all'analisi visiva delle fotografie con i dati della stazione meteorologica.

3.2 Analisi visiva delle fotografie

Durante il precedente elaborato (*Vettore, 2012*) sono state visualizzate dal tesista tutte le fotografie raccolte, individuando così gli spostamenti della frana, i meccanismi di movimento e la loro evoluzione nel tempo, risultando quindi un buon punto di partenza per lo studio del fenomeno. Dall'analisi è stato possibile inoltre individuare i periodi in cui il sistema non era funzionante (nei quali una o entrambe le fotocamere non hanno funzionato) e scartare le fotografie inutilizzabili a causa di neve, nebbia o scarsa luminosità (*Figura 3.1*).

La frana del Tessina



Figura 3.1 - Foto scattate dalle fotocamere in presenza di neve e nebbia: il corpo di frana è interamente nascosto

Essendo il fenomeno in esame complesso e di ampie proporzioni, ed essendo inoltre le foto molto risolte, sono state suddivise 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 (*Figura 3.2*).

La frana del Tessina

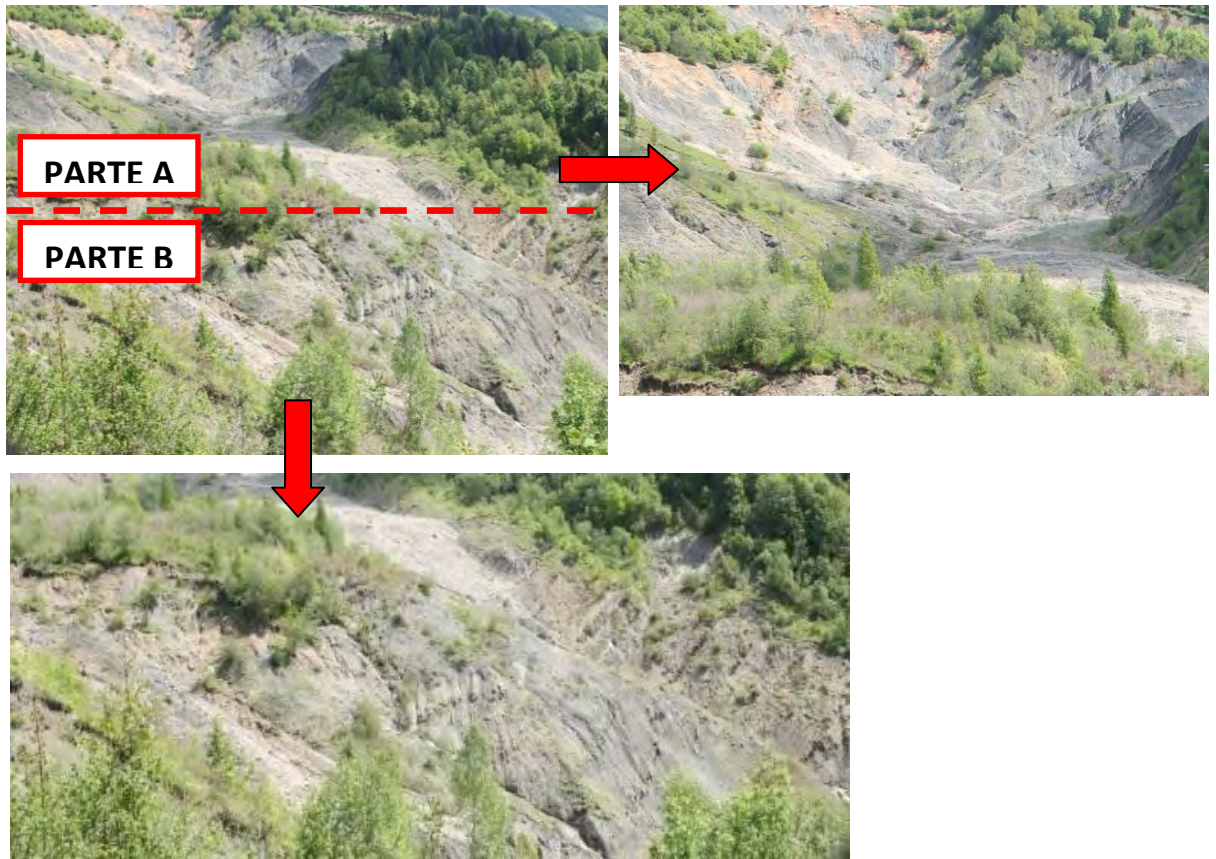


Figura 3.2 - Suddivisione di una fotografia scattata dalla fotocamera di sinistra (posta sopra il pilastrino) e particolare delle due parti ottenute (Vettore, 2012)

Per garantire una maggiore precisione nell'individuazione dei movimenti e della loro evoluzione, sono state suddivise 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 3.3*.

La frana del Tessina

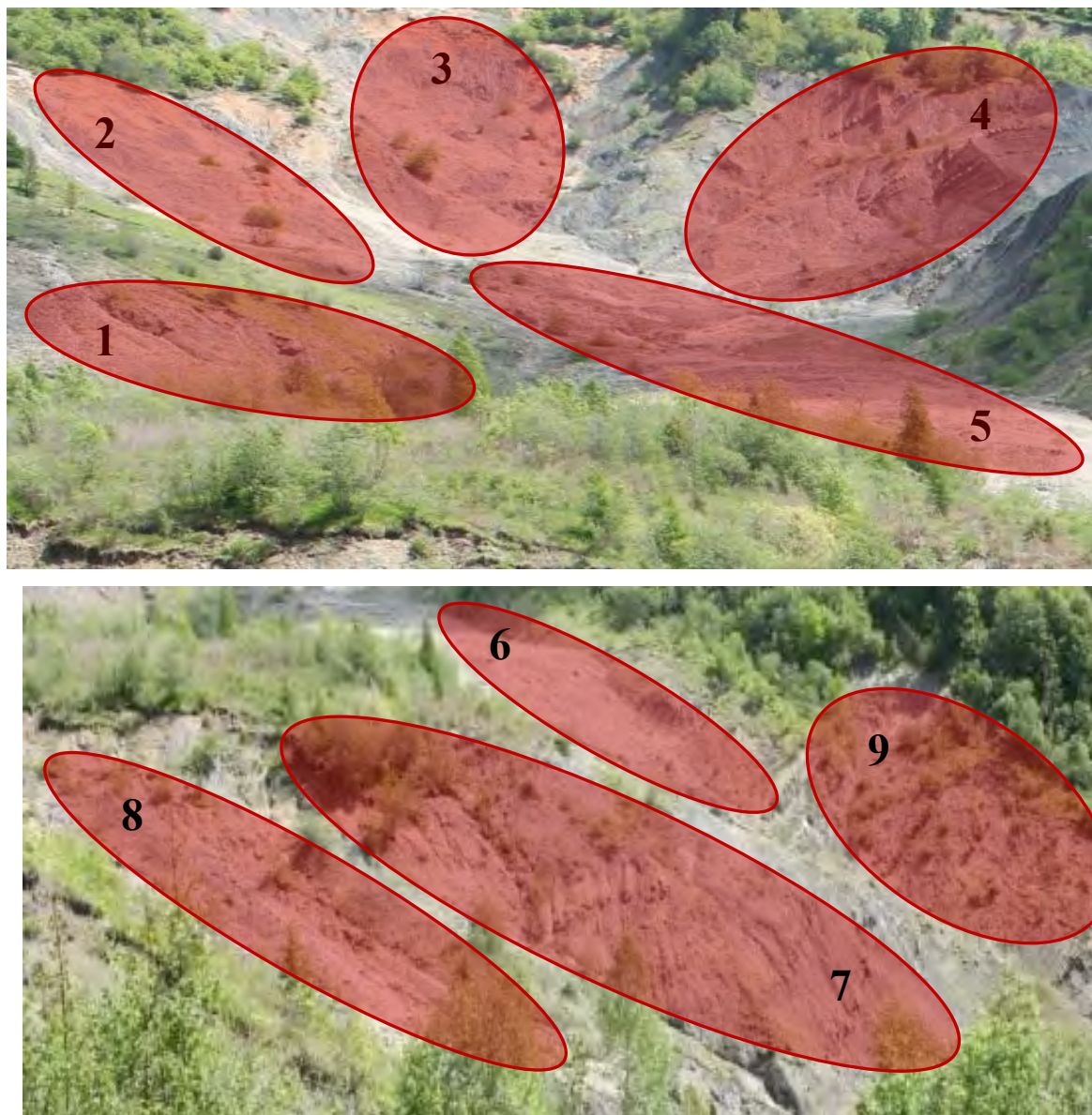


Figura 3.3 - Zonizzazione delle due parti del corpo di frana in una fotografia scattata dalla fotocamera di sinistra (posta sopra il pilastrino)

Analizzando poi separatamente le serie di immagini delle due fotocamere sono stati osservati gli spostamenti delle varie zone facendo scorrere, ad una ad una, le fotografie raccolte nell'arco temporale che va dal 19 Novembre 2011 al 30 Agosto 2013 e sono state annotate tutte le informazioni in un foglio Excel come illustrato in *Tabella 2*.

La frana del Tessina

Tabella 2 - Estratto del foglio di calcolo realizzato durante l'analisi visiva delle fotografie

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

Come anticipato, non si dispone della successione continua di foto a causa dei problemi tecnici sopraggiunti e, molte di esse, sono state scartate per l'impossibilità di essere utilizzate a seguito di eventi meteorologici come neve, nebbia, piogge o scarsa luminosità.

Tali eventi sono indicati come segue:

- Presenza o assenza giornaliera di spostamento della singola zona (presenza spostamento = 1, assenza spostamento = 0);
- Giorni in cui il sistema non ha funzionato (assenza di fotografia indicata con il simbolo "-");
- Giorni in cui è presente la neve (segnati con la lettera NE);
- Giorni in cui è presente la 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), principalmente in relazione ai cambi di luminosità;
- Giorni in cui il corpo di frana non è visibile per la presenza di vegetazione (segnati con la lettera P).

Inoltre, tali eventi comportano la presenza di grandi "periodi ciechi" i quali non consentono di determinare l'esatto evolversi del fenomeno ma che, però, è possibile diminuire attraverso l'integrazione e il confronto delle informazioni raccolte dalle due fotocamere. Oltre a questo, come detto, da luglio 2014 il sistema è stato potenziato attraverso l'aumento di frequenza (ogni due ore a partire dalle 8.00 fino alle 18.00) ed alla variazione di luminosità delle immagini (vengono eseguite per

La frana del Tessina

ogni scatto tre foto a diversa luminosità da ogni fotocamera), così da ridurre i “periodi ciechi” dovuti al problema della scarsa luminosità.

Con il foglio di calcolo così ottenuto, è stato poi realizzato un cronogramma che consente di individuare i periodi di maggior attività della frana in funzione del numero di zone mobilitate e della continuità di movimento, come rappresentato dall’estratto in *Tabella 3* in cui i vari colori rappresentano:

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

Tabella 3 - Estratto del cronogramma (Aprile 2012)

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

3.3 Analisi dei dati pluviometrici e individuazioni degli eventi

Dai dati pluviometrici raccolti dalla stazione meteorologica di Roncadin forniti dall’ARPAV è possibile individuare, ora per ora, la quantità di precipitazioni che interessano l’intera area. Sono infatti disponibili i dati orari dal 01/09/11 al 01/12/14 da cui si determinano le piogge giornaliere, considerando le 24 ore precedenti a partire dalle 12:00 di ogni giorno in modo tale da tener conto di tutti i fenomeni precedenti allo scatto delle foto. Sulla base di questi valori è possibile definire, grazie ad un codice in Matlab realizzato dal Dottor Fabio Gabrieli, la data iniziale e finale del singolo evento meteorico.

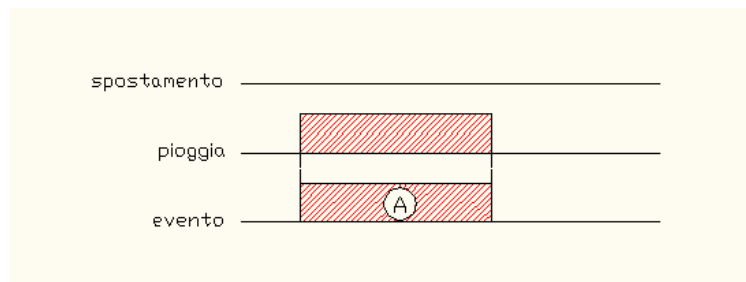
La frana del Tessina

A questo punto, integrando le informazioni così ottenute con quelle derivanti dall'analisi di immagini, vengono definiti i singoli *eventi*, specifici per ognuna delle zone considerate.

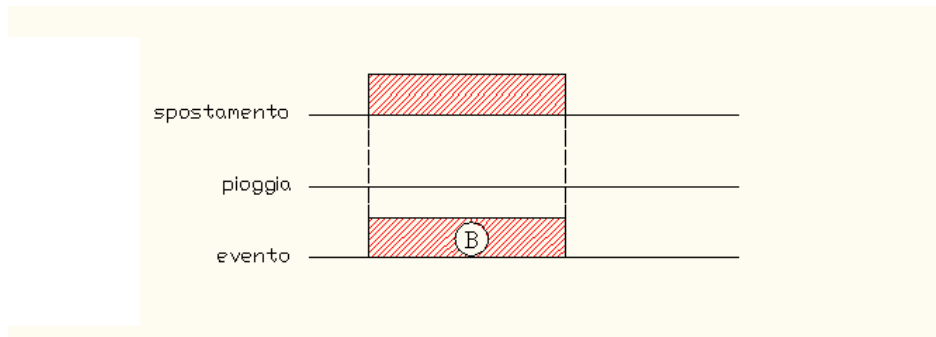
L'evento viene definito come quel fenomeno nella quale, in un dato arco temporale, si verificano o pioggia, o spostamento, od entrambi.

In particolare vengono definiti tre diversi tipi di eventi:

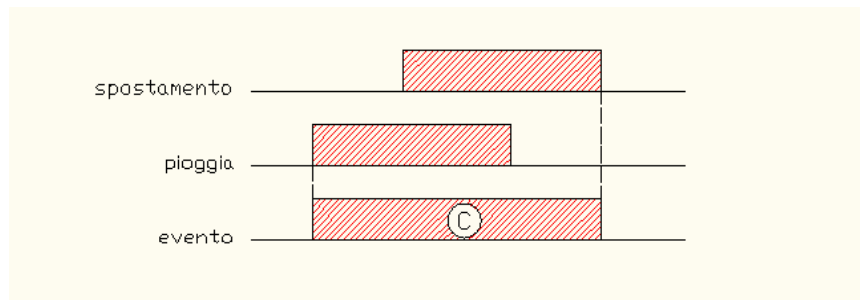
- **Evento tipo A: piove e non si sposta** (Figura 3.4 - A)



- **Evento tipo B: non piove e si sposta** (Figura 3.4 - B)



- **Evento tipo C: piove e si sposta** (Figura 3.4 - C)



La frana del Tessina

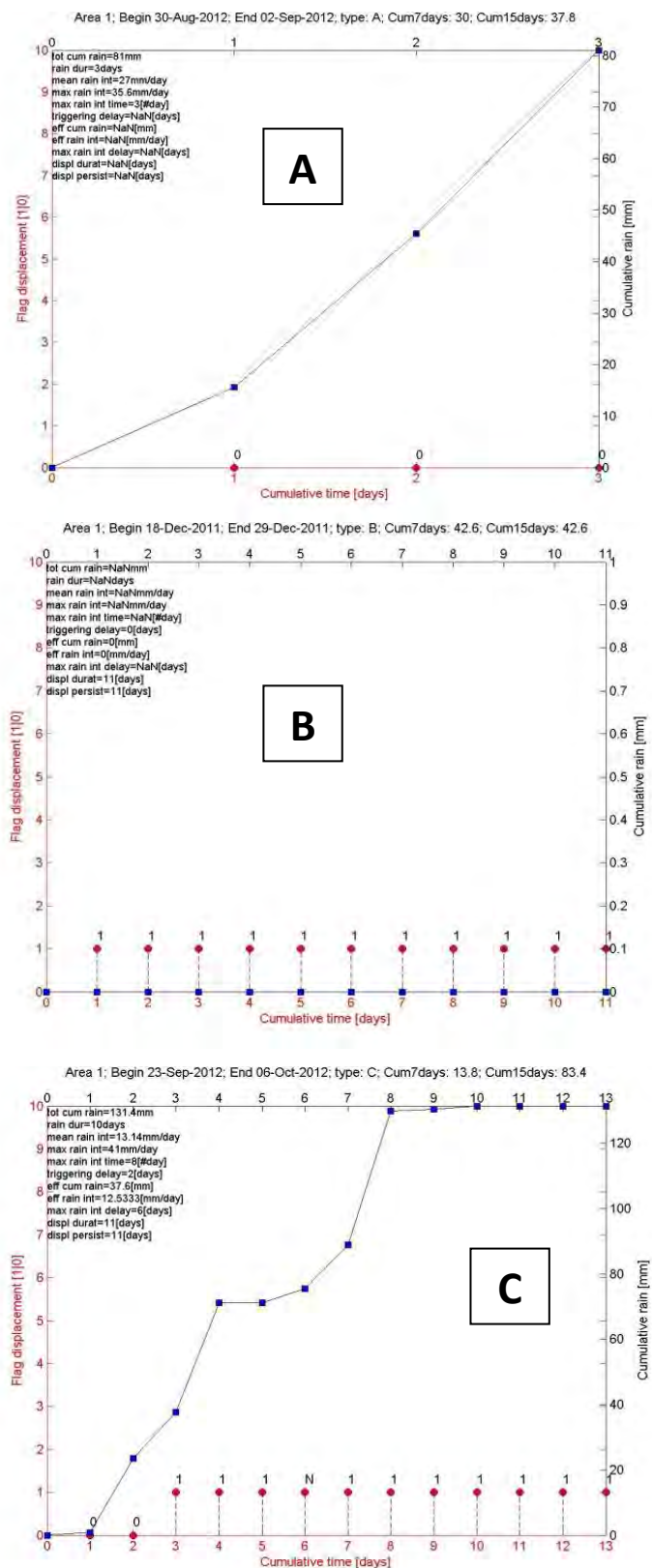


Figura 3.4 - rappresentazione grafica dei tre eventi

Nell'analisi non si considera l'influenza dello scioglimento delle nevi in quanto non facilmente quantificabile.

La frana del Tessina

3.4 Dataset completo

Una volta definite le durate ed inizi dei vari eventi, specifici per le varie zone, è possibile ultimare il dataset così da poterlo utilizzare per le successive analisi statistiche volte a fornire informazioni più precise riguardo al fenomeno.

Il dataset, il cui estratto è riportato in *Tabella 4*, contiene un certo numero di variabili raccolte in 35 colonne che sono specificate in seguito (*Figura 3.5*).

Tabella 4 - Estratto del dataset utilizzato

zone	ev_type	begin_ev	end_ev	month_ev	temperatura [C°]	tot_cum_rain[mm]
1	A	02-Dec-2011	04-Dec-2011	12	4.216666667	17.6
1	A	12-Dec-2011	15-Dec-2011	12	4.3125	22.2
1	A	16-Dec-2011	17-Dec-2011	12	1.408333333	20.4
1	B	18-Dec-2011	29-Dec-2011	12	-0.654166667	NaN
1	B	30-Dec-2011	01-Jan-2012	12	-0.433333333	NaN
1	C	02-Jan-2012	09-Jan-2012	1	1.15	11.8

rain_dur[dd]	mean_rain_int[mm/dd]	max_rain_int[mm/dd]	max_rain_int_time[dd]
2	8.8	13.6	1
3	7.4	15.4	1
1	20.4	20.4	1
NaN	NaN	NaN	NaN
NaN	NaN	NaN	NaN
4	2.95	11.4	1

triggering_delay[dd]	eff_cum_rain[mm]	eff_rain_int[mm/dd]	max_rain_int_delay[dd]
NaN	NaN	NaN	NaN
NaN	NaN	NaN	NaN
NaN	NaN	NaN	NaN
0	0	0	NaN
0	0	0	NaN
1	11.4	5.7	0

displ_durat[dd]	displ_persist[dd]	days_from_last_displ[dd]	cum_up_to_last_displ[mm]
NaN	NaN	NaN	NaN
NaN	NaN	NaN	NaN
NaN	NaN	NaN	NaN
11	11	NaN	NaN
2	2	1	0
6	6	2	11.4

La frana del Tessina

cum_up_to_last_displ / days_from_last_displ	g01[mm]	g02[mm]	g14[mm]	g15[mm]
#VALORE!	13.6	13.6	13.6	13.6
#VALORE!	15.4	15.4	33	33
#VALORE!	20.4	20.4	46.6	60.2
#VALORE!	0	0	42.6	42.6
0	0	0	0	20.4
5.7	11.4	11.4	11.4	11.4

- 1) *zone*: numero della zona;
- 2) *ev_type*: tipo di evento;
- 3) *begin_ev*: data di inizio dell'evento;
- 4) *end_ev*: data di fine dell'evento;
- 5) *month_ev*: numero del mese dell'evento;
- 6) *temperatura [C°]*: temperatura aria a 2 metri di altezza (media giornaliera tra le 12:00 e 12:00);
- 7) *tot_cum_rain[mm]*: pioggia cumulate nell'evento;
- 8) *rain_dur[dd]*: durata della pioggia durante l'evento;
- 9) *mean_rain_int[mm/dd]*: intensità di pioggia media durante l'evento;
- 10) *max_rain_int[mm/dd]*: intensità di pioggia max durante l'evento;
- 11) *max_rain_int_time[dd]*: giorno al quale si è verificata l'intensità di pioggia massima a partire dall'inizio dell'evento;
- 12) *triggering_delay[dd]*: ritardo tra l'inizio della pioggia e l'inizio dello spostamento;
- 13) *eff_cum_rain[mm]*: pioggia cumulate prima del triggering di spostamento;
- 14) *eff_rain_int[mm/dd]*: intensità di pioggia media prima del triggering;
- 15) *max_rain_int_delay[dd]*: ritardo tra la pioggia max e l'inizio dello spostamento;
- 16) *displ_durat[dd]*: durata del primo spostamento;
- 17) *displ_persist[dd]*: durata dello spostamento comprese le pause intermedie;
- 18) *days_from_last_displ[dd]*: giorni trascorsi dal termine dello spostamento precedente allo spostamento attuale (e non all'evento attuale);
- 19) *cum_up_to_last_displ[mm]*: pioggia cumulata dal termine dello spostamento precedente all'inizio dello spostamento attuale;

La frana del Tessina

20-35) $g01[mm]$ $g02[mm]$ $g03[mm]$ $g04[mm]$ $g05[mm]$ $g06[mm]$ $g07[mm]$
 $g08[mm]$ $g09[mm]$ $g10[mm]$ $g11[mm]$ $g12[mm]$ $g13[mm]$ $g14[mm]$
 $g15[mm]$: piogge cumulate da 1 a 15 giorni prima dell'inizio dell'evento.

Quest'ultime variabili sono prese in esame considerando che la frana non si mobilita immediatamente dopo l'evento piovoso, ma richiede più tempo a causa della circolazione idrica sotterranea.

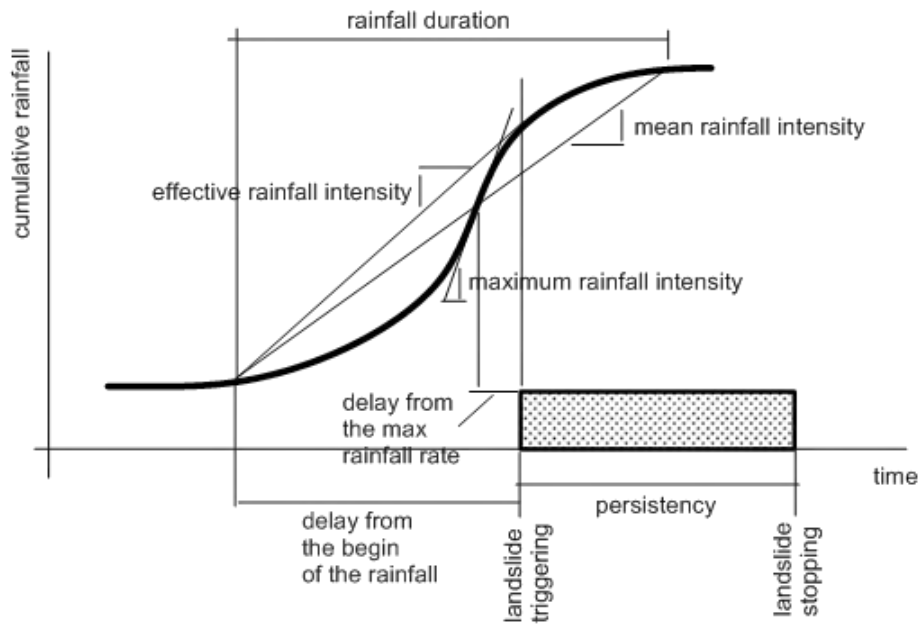


Figura 3.5 - Spiegazione delle variabili riportate nel dataset

La frana del Tessina

4. ANALISI DEI DATI

4.1 Introduzione

L'analisi dei dati è stata svolta col software di analisi statistica *Minitab* che consente di ottenere delle informazioni quantitative riguardo al comportamento della frana soggetta a precipitazioni. In particolare si vuole ricercare l'eventuale relazione tra le precipitazioni registrate dalla stazione meteorologica di Roncadin e gli spostamenti individuati durante l'osservazione delle foto raccolte. L'apporto meteorico infatti risulta essere un fattore importante nella frana in esame perché oltre a garantire un'alimentazione per la circolazione idrica sotterranea, porta alla fluidificazione del Flysch, con conseguente aumento dell'instabilità del versante.

Tale analisi è stata svolta partendo dai risultati, osservazioni e deduzioni riportate da Vettore (2012) nel suo lavoro di tesi e riassunte nel seguente paragrafo.

4.2 Risultati delle analisi precedenti

Nel precedente lavoro si è inizialmente eseguito un *test chi-quadrato* ed una *regressione logistica binaria*, che hanno permesso di ricercare la presenza di eventuali correlazioni tra gli spostamenti delle zone di valle e di monte. Dal test chi-quadrato è stato possibile constatare come lo spostamento della zona 6 risultasse dipendente da quello della zona 5, il quale a sua volta risultava dipendente dallo spostamento della zona 2 e zona 3 situata frontalmente. I risultati ottenuti sono stati poi confermati dalla regressione logistica binaria, la quale ha permesso 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.

Lo spostamento della frana è stato dunque schematizzato nel seguente modo (*Figura 4.1*):

La frana del Tessina

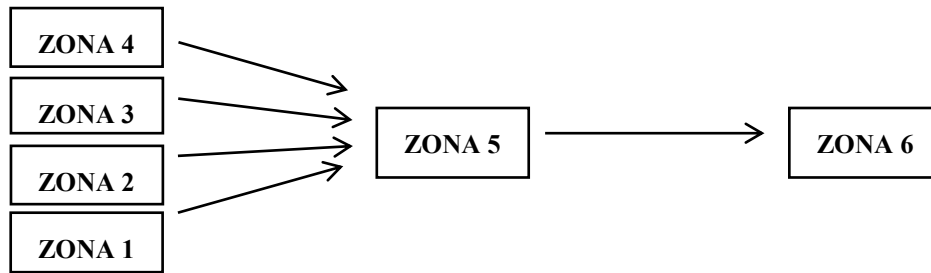


Figura 4.1 - Schema riassuntivo del meccanismo di movimento principale (Vettore, 2012)

Nello schema si evidenzia come a seguito di uno distacco di materiale dalle zone apicali, questo venga convogliato e depositato nell'accumulo superiore (zona 5) dove, una volta superato un certo "grado di riempimento", viene spinto lungo il canalone di valle (zona 6) dalle colate successive. Tale meccanismo non coinvolge le zone 7, 8 e 9, le quali sono ubicate esternamente all'area interessata dalla colata e per questo caratterizzate da movimenti indipendenti.

Tali risultati sembrerebbero rispecchiare quanto emerso dall'analisi visiva delle fotografie (Figura 4.2): la zona 6 entra in movimento all'arrivo del materiale dalla zona 5 mentre quest'ultima si mobilita grazie alla spinta ricevuta frontalmente dalle zone apicali ed in particolare dalla zona 3 dalla quale, essendo molto vasta e caratterizzata apparentemente da una maggior pendenza, il materiale arriva con maggiore energia rispetto alle altre zone adiacenti.



Figura 4.2 - Rappresentazione del meccanismo di movimento osservato su una fotografia scattata dalla fotocamera di sinistra (Vettore, 2012)

La frana del Tessina

Successivamente, avendo a disposizione i dati pluviometrici si sono eseguite delle analisi di regressione lineare (*General Linear Model GLM*) e regressione logistica binaria, per ricercare eventuali correlazioni tra gli spostamenti delle singole zone e le precipitazioni.

Dal GLM è stato possibile affermare che le precipitazioni hanno mediamente effetto sullo spostamento delle singole zone e che, 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 lunghe. Questi risultati vengono in buona parte confermati dalla regressione logistica.

4.3 Modello di regressione del fenomeno franoso

Sulla base di quanto riportato precedentemente, constatata la presenza di una certa relazione tra gli eventi meteorologici e gli spostamenti osservati, risulta di notevole interesse individuare quali delle variabili presenti nel dataset influenzino maggiormente l'innescò del movimento del versante (evento tipo C), assumendo come variabile dipendente l'intensità di pioggia media prima dello spostamento (*effective_rain_intensity [mm/dd]*), così da determinarne un modello di regressione che consenta di descrivere e prevedere il fenomeno sulla base dei dati acquisiti.

L'analisi viene svolta separatamente per i due gruppi di zone definiti e composti il primo dalle zone 1, 2, 3, 4 e il secondo dalle zone 7, 8, 9. Tale suddivisione è stata fatta considerando i risultati derivanti dal precedente lavoro e riassunti nel *paragrafo 4.2* nelle quali si constata come le prime quattro zone, appartenenti al coronamento apicale, sono contraddistinte da comportamenti e cinematismi simili, mentre le zone 7, 8, 9, poste inferiormente, presentano, come dimostrato, comportamenti indipendenti, movimenti non direttamente correlati alle zone soprastanti, una morfologia completamente differente oltre ad una diversa correlazione con gli eventi meteorologici. Le zone 5 e 6 non sono invece state considerate in quanto il loro innescò presenta, come detto, forte dipendenza con il movimento delle zone apicali appartenenti al primo gruppo analizzato piuttosto che dai soli eventi di pioggia.

La frana del Tessina

La presente analisi verrà esposta in dettaglio solamente per il primo gruppo di zone, commentando le varie fasi che consentono di conseguire al risultato finale; per il secondo gruppo verranno invece riportati e commentati solamente i risultati conclusivi.

4.3.1 Zone 1, 2, 3, 4

Inizialmente si sono misurati i gradi di associazione lineare tra le varie variabili, in termini di entità e direzione, così da determinarne il corrispondente *coefficiente di correlazione*. Tale coefficiente può assumere valori che vanno da -1.0 (correlazione perfetta negativa) a +1.0 (correlazione perfetta positiva). Una relazione pari a 0 indica che tra le variabili non vi è alcuna interazione. Noti quest'ultimi è possibile eseguire una prima selezione andando ad eliminare dal modello le variabili che presentano un'eccessiva correlazione così da evitare un possibile *errore di multicollinearità*. In questo caso i descrittori fornirebbero la stessa informazione al modello che non riuscirebbe più ad attribuire un significato ad ognuna di esse comportando un'alta variabilità e inaffidabilità e, di conseguenza, l'invalidamento dei risultati. L'analisi è stata svolta attraverso il comando *Stat – Basic Statistic – Correlation* che restituisce l'output una volta specificate le variabili indipendenti e il metodo da utilizzare, in questo caso il metodo di Pearson che consente di ottenere una correlazione lineare per ogni coppia di variabili. Nel seguente output viene riportato anche il *p-value* che indica se il coefficiente di correlazione determinato sia significativamente diverso da 0 data la soglia di significatività $\alpha = 5\%$. In particolare, se il *p-value* è $\leq \alpha$ si può concludere che la correlazione è diversa da 0; se il *p-value* è $> \alpha$ non si può concludere che la correlazione sia diversa da 0.

In questo ritaglio vengono riportate solo le variabili indipendenti significative inserite poi nel modello.

La frana del Tessina

Correlation: triggering_delay, eff_cum_rain[mm], cum_up_to_last_d, g02[mm], g10[mm]

	trig_delay	eff_cum_rai	cum_up_to_last_d	g02[mm]	g10[mm]
eff_cum_rain[mm]	0.554 0.000				
cum_up_to_last_d	0.006 0.961	0.588 0.000			
g02[mm]	0.016 0.899	0.200 0.097	0.221 0.073		
g10[mm]	-0.018 0.880	0.163 0.177	0.407 0.001	0.230 0.055	

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

I coefficienti di Pearson sembrano indicare una nulla o debole correlazione tra le variabili usate. Il modello determinato non sembra quindi essere soggetto al problema di multicollinearità.

Da notare come la correlazione tra le variabili *g10[mm]* e *triggering_delay* è leggermente negativa. Ciò significa che un incremento del *g10[mm]* comporta un decremento del *triggering_delay*.

La relazione tra le variabili può anche essere rappresentata graficamente tramite il comando *Graph – MatrixPlot* sia in termini di entità che di direzione (Figura 4.3). Anche in questo caso vengono riportate solo le variabili inserite nel modello.

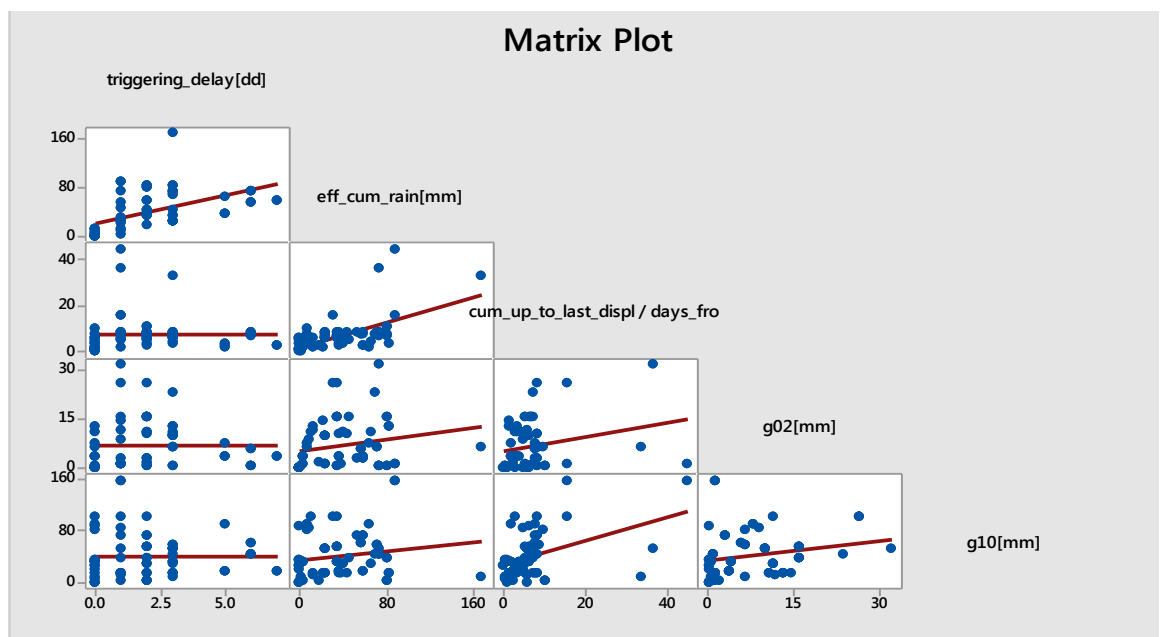


Figura 4.3 – MatrixPlot per le variabili del modello

La frana del Tessina

Successivamente attraverso il comando *Stat – Regression – Regression – Best Subset Regression* si sono comparati tutti i possibili modelli usando uno specifico set di predittori (tutte le variabili del dataset) così da ottenere il miglior gruppo di variabili possibile per il modello.

Nella finestra relativa al comando vengono specificate:

- *Response* (variabile dipendente): *effective rain intensity*
- *Free predictor* (variabili indipendenti): tutte le variabili del dataset
- *Predictor in all models* (variabile presente in ogni modello): *triggering delay*

L'output fornisce alcuni coefficienti statistici che consentono di esaminare la bontà del modello:

- *R-Sq*: descrive la percentuale di variazione dei dati di risposta spiegati dai predittori nel modello.
- *R-Sq (adj)*: è una versione modificata del *R-Sq* che è regolata in base al numero di predittori nel modello.
- *R-Sq (predicted)*: indica la capacità del modello di prevedere delle risposte per nuove osservazioni.
- *Mallows Cp*: valuta quanto bene il modello si adatta ai dati. Dovrebbe essere vicino al numero di predittori contenuti nel modello.
- *S*: deviazione standard dell'errore (stima della variabilità media rispetto alla curva di regressione).

La frana del Tessina

Best Subsets Regression: eff_rain_int versus eff_cum_rain, cum_up_to_la, ...

Response is eff_rain_int[mm/dd]

The following variables are included in all models: triggering_delay[dd]

Vars	R-Sq	R-Sq (adj)	R-Sq (pred)	Mallows Cp	S	c u m - u P - e d f i f s - P c l u m / - r d																	
						a	a	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
						i	y	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
						n	s	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4			
2	89.7	89.2	85.8	6.6	3.4796	X																X	
2	89.2	88.6	85.0	10.1	3.5697	X																X	
2	89.1	88.6	84.1	10.3	3.5751	X	X																
2	89.1	88.6	84.9	10.5	3.5818	X								X									
2	89.0	88.5	84.8	10.9	3.5913	X																X	
3	90.6	90.0	85.0	3.0	3.3532	X	X															X	
3	90.4	89.8	85.2	3.9	3.3798	X	X							X									
3	90.3	89.7	85.2	4.7	3.4004	X	X												X				
3	90.3	89.7	85.1	4.7	3.4011	X	X										X						
3	90.3	89.6	84.5	4.9	3.4070	X	X															X	
4	91.0	90.2	86.3	2.4	3.3085	X	X	X					X	X									
4	90.9	90.1	84.4	3.0	3.3237	X	X	X														X	
4	90.7	90.0	84.7	3.9	3.3505	X	X						X	X									
4	90.7	90.0	84.2	4.1	3.3565	X	X	X														X	
4	90.7	89.9	84.5	4.2	3.3585	X	X	X														X	
5	91.6	90.8	85.8	0.5	3.2182	X	X	X				X	X										
5	91.3	90.5	85.5	2.2	3.2711	X	X	X				X									X		
5	91.3	90.4	85.0	2.7	3.2834	X	X	X				X	X										
5	91.2	90.3	84.9	3.2	3.3003	X	X		X			X	X										
5	91.1	90.3	86.4	3.4	3.3040	X	X		X	X		X	X									X	

In verde vengono evidenziati i gruppi di variabili che presentano delle caratteristiche migliori in riferimento ai coefficienti sopra specificati. Tra i due modelli viene scelto il secondo, dato il maggior numero di variabili prese in considerazione e data la scarsa correlazione presente tra le variabili *cum02* e *cum10*. In giallo sono evidenziati i modelli che presentano caratteristiche migliori in assoluto ma, come precedentemente detto, data la necessità di creare un modello privo di errori di multicollinearità vengono scartati data l'elevata correlazione osservata tra le cumulative.

Una volta specificate quali variabili considerare, si prosegue definendo il modello di regressione attraverso il comando *Stat – Regression – Regression – Fit*

La frana del Tessina

Regression Model. Anche in questo caso vengono specificate nell'apposita finestra il *Response* (*effective rain intensity*) e i *Continuous predictors* (variabili indicate nel *Best Subset*). Questo comando consente anche di introdurre nel modello le iterazioni tra le variabili. In particolare si considerano le iterazione tra il *triggering delay* e i restanti predittori così da esaminare anche l'effetto della pioggia caduta precedentemente l'innesco sul ritardo del movimento stesso. Lo stesso comando consente inoltre di eseguire automaticamente una procedura *Stepwise* che consente di eliminare una variabile predittiva inclusa in un primo momento nel modello se l'introduzione successiva di altre variabili ne determinasse la perdita di efficacia misurata con il coefficiente p-value con soglia di significatività $\alpha = 5\%$. L'output fornisce informazioni riguardo la varianza, i coefficienti, la bontà del modello oltre che l'equazione di regressione.

Regression Analysis: eff_rain_int versus triggering_d, eff_cum_rain, cum_up_to_la, ...

Stepwise Selection of Terms α to enter = 0.05, α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	7157.08	1192.85	295.07	0.000
triggering_delay[dd]	1	20.18	20.18	4.99	0.029
eff_cum_rain[mm]	1	3980.86	3980.86	984.72	0.000
g02[mm]	1	80.46	80.46	19.90	0.000
g10[1	85.79	85.79	21.22	0.000
trigg_delay[dd]*eff_cum_rain[mm]	1	408.98	408.98	101.17	0.000
triggering_delay[dd]*g02[mm]	1	139.94	139.94	34.62	0.000
Error	60	242.56	4.04		
Lack-of-Fit	52	242.56	4.66	*	*
Pure Error	8	0.00	0.00		
Total	66	7399.64			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.01063	96.72%	96.39%	95.02%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0.835	0.566	-1.47	0.146	
triggering_delay[dd]	0.775	0.347	2.23	0.029	7.42
eff_cum_rain[mm]	0.4523	0.0144	31.38	0.000	3.58
g02[mm]	0.2839	0.0636	4.46	0.000	3.55
g10[mm]	0.03488	0.0075	4.61	0.000	1.12
trig_delay[dd]*eff_cum_rain[mm]	-0.06098	0.0060	-10.06	0.000	10.91
triggering_delay[dd]*g02[mm]	-0.1915	0.0326	-5.88	0.000	4.32

La frana del Tessina

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{eff_rain_int}[\text{mm/dd}] = & -0.835 + 0.775 \text{ triggering_delay}[\text{dd}] + \\ & 0.4523 \text{ eff_cum_rain}[\text{mm}] + 0.2839 \text{ g02}[\text{mm}] + 0.03488 \text{ g10}[\text{mm}] - \\ & 0.06098 \text{ trig_delay}[\text{dd}] * \text{eff_cum_rain}[\text{mm}] \\ & 0.1915 \text{ triggering_delay}[\text{dd}] * \text{g02}[\text{mm}] \end{aligned}$$

Nell'*analysis of variance* viene riportato il p-value della regressione che, essendo pari a 0, ci indica che almeno uno dei coefficienti regressori è significativamente diverso da zero. Il p-value di ogni singolo regressore ci indica che per tutti i fattori considerati il coefficiente è significativamente diverso da zero.

Dal *Model Summary* si può notare come il modello così ottenuto, contenente anche le variabili di iterazioni, presenti dei coefficienti migliori sia in termini di variabilità che di affidabilità rispetto a quanto precedentemente trovato nell'analisi *Best Subset* e, di conseguenza, una maggiore potenzialità e precisione.

Nel riquadro dedicato ai *coefficients* notevole importanza assume anche in questo caso il p-value che consente di determinare quali effetti del modello siano statisticamente rilevanti. Nel nostro caso, tutti i p-value sono inferiori alla soglia di significatività $\alpha = 5\%$ e quindi tutti i fattori considerati, comprese le iterazioni, risultano significanti.

Il valore *VIF* indica se i predittori siano più o meno correlati tra loro. Un valore vicino a 1 indica assenza di correlazione mentre un valore maggiore di 10 può produrre dei coefficienti instabili di difficile interpretazione. Nel nostro caso, come ci si aspettava, tale valore denota una debole correlazione soprattutto legata ai parametri di iterazione che però vengono comunque considerati nel modello data la loro importanza nel fenomeno studiato.

Il *SE coeff* è una misura statistica di precisione della stima. Più piccolo è il valore, migliore è la stima.

Dall'equazione di regressione, infine, si nota come il *triggering_delay* sia il parametro con maggiore effetto sulla risposta (*eff_rain_int*) dato il coefficiente più elevato (0,775), seguito dall'*eff_cum_rain* (0,4523) e dal *g02* (0,2839) mentre i fattori di iterazione presentano coefficienti negativi.

Un'ultima importante verifica deve essere svolta sui *residui* (distanza verticale tra punto empirico e curva determinata) per avere la certezza di non proporre un modello inconsistente dal punto di vista del metodo statistico e di avere quindi un

La frana del Tessina

modello corretto e utilizzabile. Questi si ottengono dalla finestra *Graphs* all'interno del comando *Regression*. L'output è rappresentato in *Figura 4.4*.

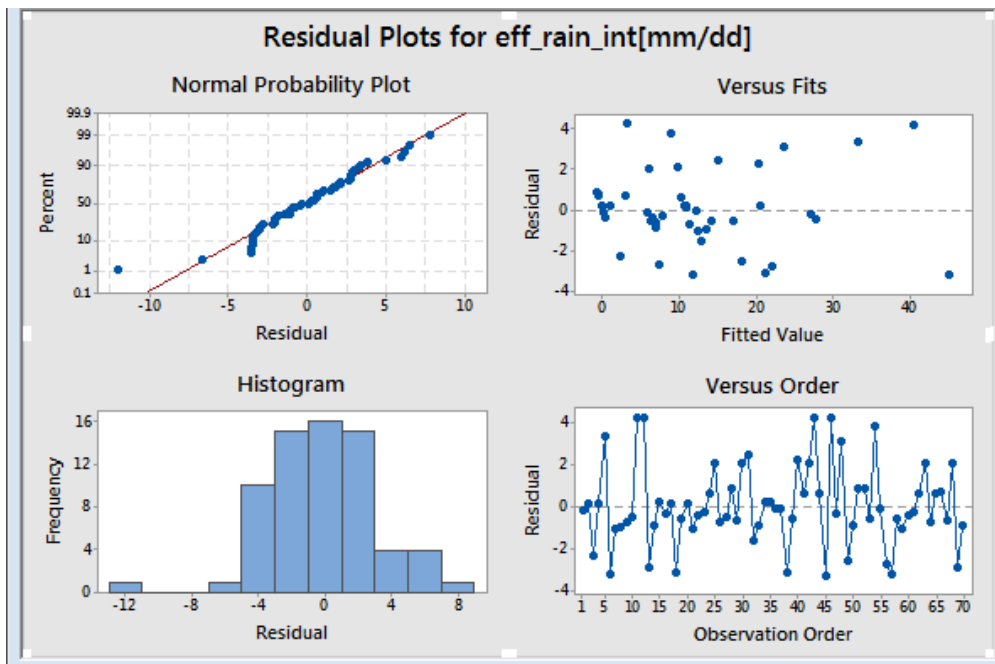


Figura 4.4 – Residual Plots del modello

- 1) Dal *Normal probability plot* e dall'*istogramma* l'assunzione di normalità risulta essere ragionevole, in quanto l'istogramma presenta forma campanulare e i punti del normal probability plot risultano abbastanza allineati lungo la retta, indici questi che i residui sono ben modellati da una distribuzione normale.
- 2) Dal grafico *Versus fits* l'assunzione di omoschedasticità (varianza costante) sembra essere supportata. I punti infatti sembrano essere distribuiti abbastanza omogeneamente e non presentano una particolare tendenza attorno allo 0.
- 3) Il grafico *Versus order* mostra un pattern totalmente casuale, segno che anche l'ipotesi di indipendenza tra le osservazioni è plausibile.

La frana del Tessina

4.3.2 Zone 7, 8, 9

Per il secondo gruppo di zone si eseguono, come detto, gli stessi passaggi descritti precedentemente. In questo caso, dal comando *Best Subset Regression*, il miglior gruppo di variabili indicato risulta composto dal *triggering_delay*, *eff_cum_rain*, *cum_up_to_last_displ / days_from_last_displ*, *g02*, *g04* e *g13*. Queste variabili, sempre utilizzando il comando *Fit Regression Model*, vengono vagliate attraverso la procedura *Stepwise* così da ottenere il seguente output.

Regression Analysis: eff_rain_int versus triggering_d, eff_cum_rain, cum_up_to_la, ...

Stepwise Selection of Terms α to enter = 0.05, α to remove = 0.05

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	11391.0	2278.20	222.32	0.000
eff_cum_rain[mm]	1	1830.4	1830.43	178.62	0.000
cum_up_to_last_displ / days_fro	1	51.7	51.66	5.04	0.032
g02[mm]	1	251.6	251.61	24.55	0.000
trig_delay[dd]*eff_cum_rain[mm]	1	711.6	711.61	69.44	0.000
triggering_delay[dd]*g02[mm]	1	192.9	192.92	18.83	0.000
Error	30	307.4	10.25		
Lack-of-Fit	29	307.4	10.60	*	*
Pure Error	1	0.0	0.00		
Total	35	11698.4			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3.20115	97.37%	96.93%	93.22%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
eff_cum_rain[mm]	0.4050	0.0303	13.37	0.000	11.45
cum_up_to_last_displ / days_fro	0.2053	0.0914	2.25	0.032	3.69
g02[mm]	0.3613	0.0729	4.96	0.000	3.14
trig_delay[dd]*eff_cum_rain[mm]	-0.04750	0.0057	-8.33	0.000	7.12
triggering_delay[dd]*g02[mm]	-0.1028	0.0237	-4.34	0.000	3.17

Regression Equation

$$\text{eff_rain_int[mm/dd]} = 0.4050 \text{ eff_cum_rain[mm]} +$$

$$0.2053 \text{ cum_up_to_last_disp/days_fro} + 0.3613 \text{ g02[mm]} -$$

$$0.04750 \text{ trigger_delay[dd]*eff_cum_rain[mm]} -$$

$$0.1028 \text{ triggering_delay[dd]*g02[mm]}$$

La frana del Tessina

Essendo pari a 0 il p-value della regressione nell'*analysis of variance*, almeno uno dei coefficienti regressori è significativamente diverso da zero. Il p-value di ogni singolo regressore indica che tutti i fattori considerati hanno un coefficiente significativamente diverso da zero.

Dal *Model Summary* si può notare come il modello, contenente anche le variabili di iterazioni, presenti dei soddisfacenti coefficienti sia in termini di variabilità che di affidabilità sia per i dati di risposta acquisiti sia per la capacità del modello di prevedere delle risposte per le nuove osservazioni.

Dal riquadro dei *coefficients* tutti i p-value risultano inferiori alla soglia di significatività $\alpha = 5\%$ e quindi tutti i fattori considerati, comprese le iterazioni, risultano significanti.

Dallo stesso riquadro, dal valore *VIF* si denota una debole correlazione per i parametri di iterazione e per l'*effective_cumulate_rain* che però, come nel caso precedente, non vengono comunque esclusi dal modello data la loro importanza per tale fenomeno.

Dall'equazione di regressione, infine, si può notare che il parametro con maggiore effetto sulla risposta sia l'*eff_cum_rain* (0,4050), seguito dal *g02* (0,3613) e il *cum_up_to_last_displ / days_from_last_displ* (0,2053) mentre i fattori di iterazione presentano dei coefficienti negativi.

Viene in seguito svolta la verifica sui *residui* così da avere la certezza di utilizzare un modello corretto in ambito statistico. L'output è rappresentato in *Figura 4.5*.

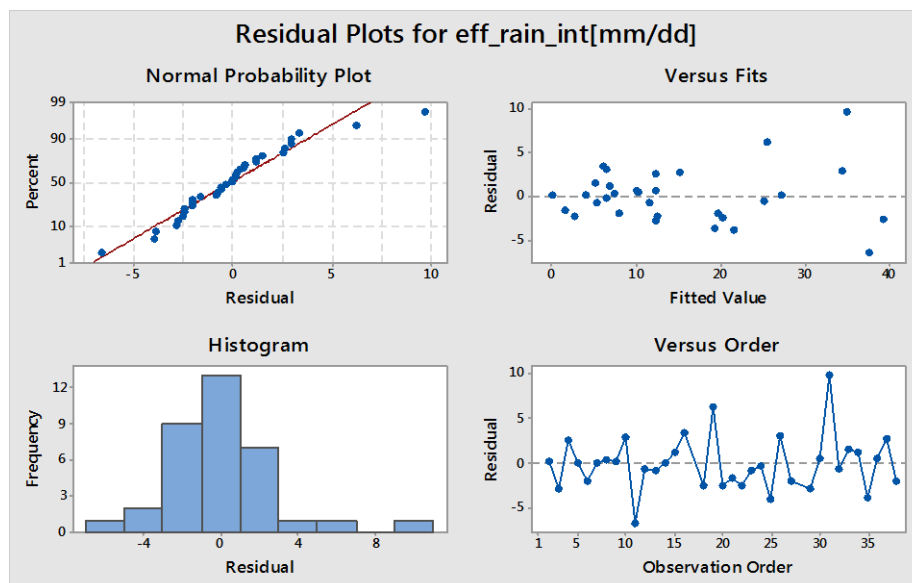


Figura 4.5 – Residual Plots del modello

La frana del Tessina

- 1) I residui sembrano ben modellati da una distribuzione normale infatti l'istogramma presenta una forma campanulare, anche se leggermente asimmetrica a sinistra, e i punti del *normal probability plot* risultano abbastanza allineati lungo la retta
- 2) Dal grafico *Versus fits* anche l'assunzione di omoschedasticità (varianza costante) sembra essere supportata infatti i punti non presentano una particolare distribuzione o tendenza attorno allo 0.
- 3) Il grafico *Versus order* mostra un pattern totalmente casuale, segno che anche l'ipotesi di indipendenza tra le osservazioni è plausibile.

4.4 Soglia pluviometrica (modello intensità – durata)

Di grande importanza nello studio del movimento franoso, ed in particolare del legame tra gli eventi meteorologici e gli spostamenti osservati, è riuscire a stabilire una soglia pluviometrica d'innescamento del fenomeno, la quale può essere molto utile per la sicurezza degli abitati di Funes e Lamosano.

Si è quindi di seguito cercato di definire un sistema di prima previsione ed allarme per i possibili movimenti del versante basato sui valori di intensità e durata della precipitazioni.

Una soglia viene definita come:

“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'innescamento 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 e stabilità dei versanti (Montgomery & Dietrich,

La frana del Tessina

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 all'estensione dell'area geografica (soglie globali, regionali, locali) o ai dati pluviometrici considerati (specifici eventi pluviometrici, precipitazioni precedenti agli eventi innescanti, altri eventi). (Guzzetti et al., 2007).

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).

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):

$$I = c + \alpha D^{\beta}$$

dove:

I = intensità di pioggia [mm/giorno]

D = durata di pioggia [giorni]

α , β , c = parametri

La frana del Tessina

Dalle equazioni delle numerose soglie presenti in letteratura è possibile osservare che il parametro c risulta nullo e β assume un valore negativo. Il tipico andamento è proposto in *Figura 4.6*:

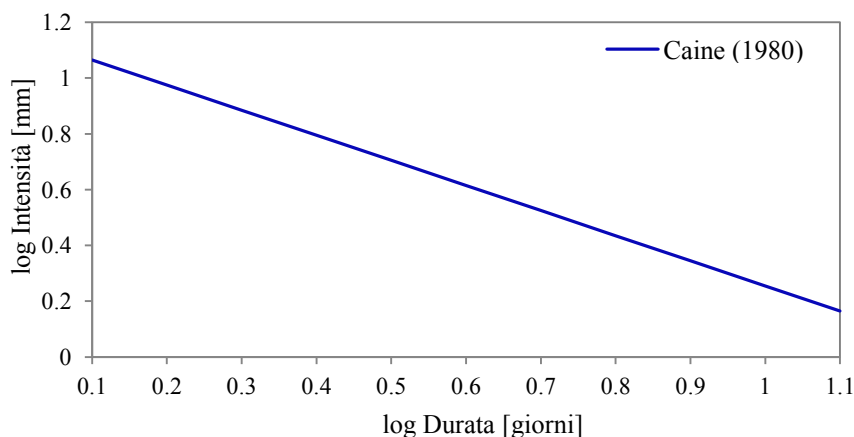
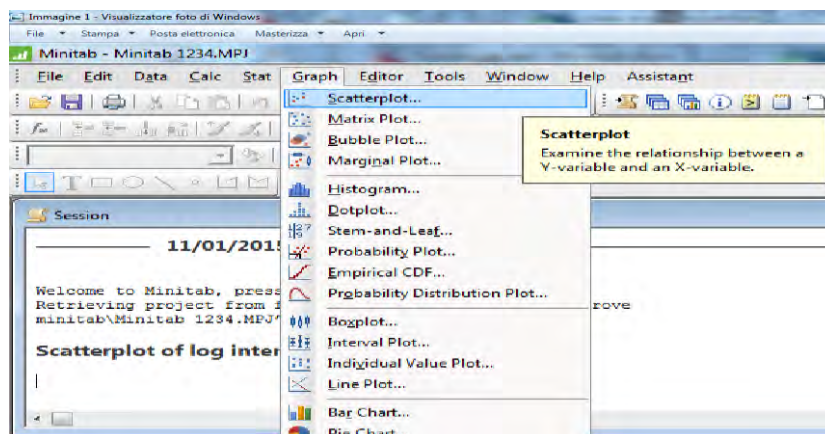


Figura 4.6 - Soglia pluviometrica di Caine (1980)

Nel caso in esame, la retta di interpolazione lineare nel grafico a scala logaritmica tra le variabili intensità - durata è stata determinata sia per gli eventi tipo A e C. In particolare, per l'evento tipo A in ordinata viene riportato il valore di *mean_rain_intensity [mm/dd]* ed in ascissa la *rain_duration [dd]*, mentre per l'evento C in ordinata viene posta la *effective_rain_intensity [mm/dd]* ed in ascissa il corrispondente valore di *triggering_delay[dd]*.

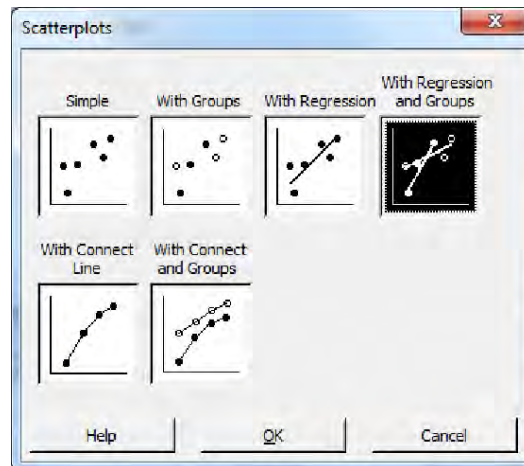
Per eseguire l'analisi è necessario inizialmente importare su *Minitab* il foglio di calcolo contenente le variabili sopracitate differenziate in base al tipo di evento caratteristico. Una volta fatto ciò, si è proceduto nel seguente modo:

- 1) Dal menù *Graph* si seleziona il comando *Scatterplots* che consente di esaminare la relazione tra le variabili X ed Y selezionate.

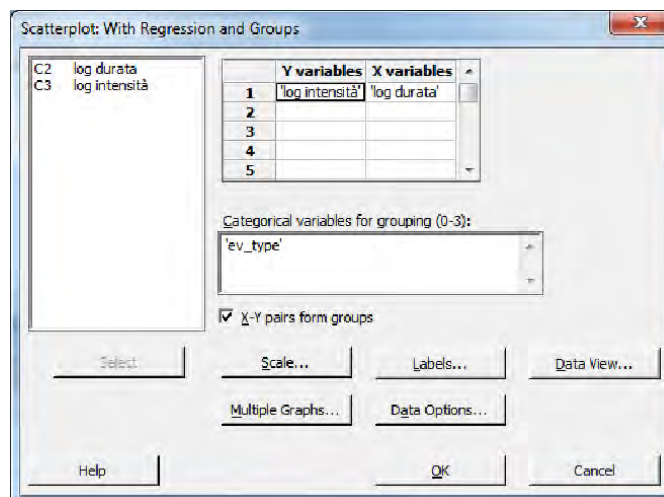


La frana del Tessina

- 2) Nella finestra seguente si seleziona il comando *With Regression and Groups* così da determinare tramite una operazione di regressione, eseguita automaticamente dal programma, la retta interpolatrice per ogni sottogruppo indicato.



- 3) Nella finestra finale si inseriscono le variabili di interesse nelle apposite celle *X variables* e *Y variables* come specificato precedentemente e si definisce la variabile categorica, nel nostro caso la *event_type*.



- 4) Imponendo al programma l'utilizzo di una regressione di tipo lineare, le soglie trovate presentano un andamento come in *Figura 4.7*. Anche in questo caso, l'analisi viene svolta diversamente per i due gruppi di zone per le stesse motivazioni sopra riportate.

La frana del Tessina

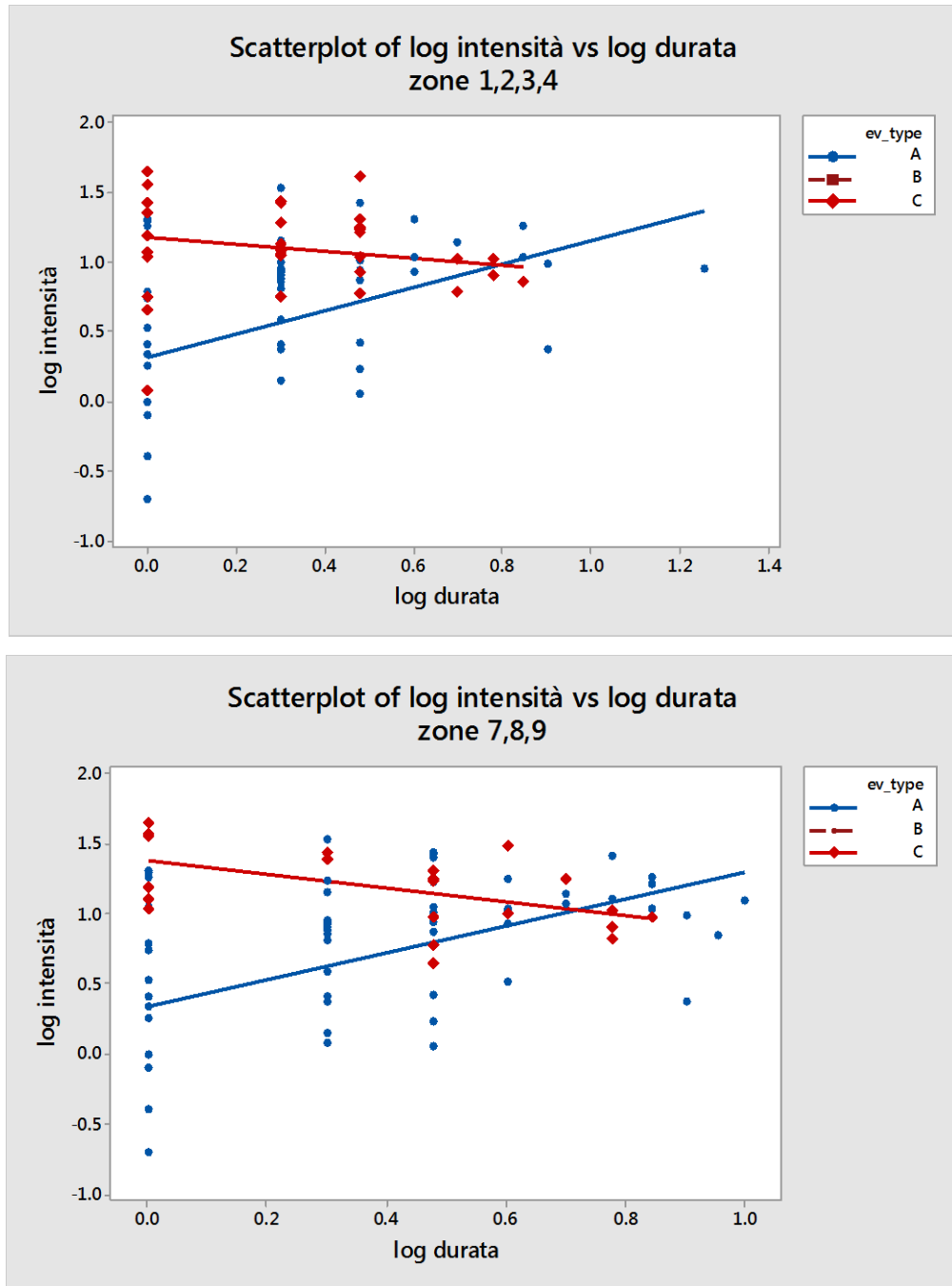


Figura 4.7 - Soglie pluviometriche dei due gruppi di zone

Per gli eventi A, la retta indica la soglia sotto la quale, mediamente, una data combinazione di intensità e durata non dovrebbe comportare un'attivazione del movimento dell'area. Per gli eventi C la retta indica la soglia oltre la quale, mediamente, una data combinazione di durata ed intensità porta al movimento del versante. Le equazioni corrispondenti sono:

La frana del Tessina

- ZONE 1, 2, 3, 4:

- *Retta C*: $\text{Log intensità} = 1,184 - 0,2515 \log \text{durata}$ R-Sq = 5,3 %
- *Retta A*: $\text{Log intensità} = 0,3151 + 0,8384 \log \text{durata}$ R-Sq = 15,4 %

- ZONE 7, 8, 9:

- *Retta C*: $\text{Log intensità} = 1,384 - 0,4956 \log \text{durata}$ R-Sq = 28,3 %
- *Retta A*: $\text{Log intensità} = 0,3425 + 0,9547 \log \text{durata}$ R-Sq = 20,2 %

Dal grafico si può osservare che, relativamente alla soglia di innesco dell'evento tipo C, come ci si aspettava, la retta risulta inclinata verso l'asse delle ordinate indicando che, ad un incremento della durata antecedente il movimento, il valore minimo di intensità di precipitazione che può scatenare la frana decresce.

Dalla stessa retta si nota, inoltre, come ci siano sia punti tipo A sopra di essa, sia punti tipo C al di sotto di essa. Tali punti sono abbastanza da non potere essere trascurati o considerati come dei punti "anomali". Si è quindi cercato di trovare giustificazione a ciò, andando a valutare quali possibili altri parametri potessero influenzare il risultato.

Inizialmente, considerato che la circolazione idrica sotterranea è un fattore importante per la frana in esame, un probabile motivo di non innesco del moto franoso si è ricercato nel valore medio di pioggia cumulata. Si sono quindi analizzati tutti i punti tipo A sopra la curva di innesco, che presentavano dunque una coppia durata-intensità superiore rispetto al valore limite definito dalla retta di interpolazione degli eventi C, così da valutare se effettivamente questi punti presentassero dei valori modesti come ci si aspettava.

L'analisi è stata condotta tramite il comando *BoxPlot* in quanto i dati idrologici, in generale, sono lontani dall'essere distribuiti come una normale ed è quindi corretto descriverli mediante mediana e quantili. Questo tipo di grafico (*Figura 4.8*) costituisce una rappresentazione grafica dei dati e ne descrive la distribuzione mediante alcuni indici di posizione. È costituito da un rettangolo diviso in due parti. I lati opposti del rettangolo sono posti in corrispondenza dei percentili 25% e 75% (1° e 3° quartile) mentre la divisione è posta in corrispondenza della mediana o del percentile 50% (2° quartile). Dal rettangolo escono due segmenti, cosiddetti baffi, che terminano al valore minimo e al valore massimo. Le distanze tra ciascun quartile e la mediana forniscono informazioni riguardo alla forma della

La frana del Tessina

distribuzione. Se una distanza è diversa dall'altra, allora la distribuzione è asimmetrica. Tale rappresentazione fornisce anche un criterio per stabilire quando un dato può considerarsi anomalo.

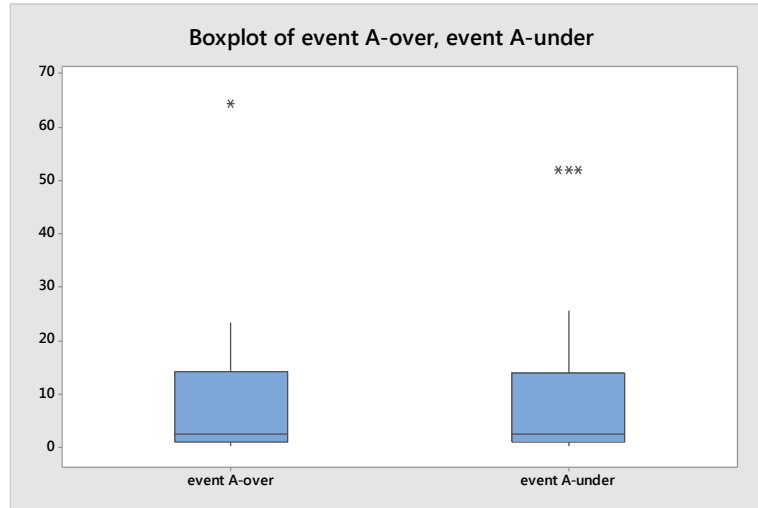


Figura 4.8 – Esempio di box-plot per la cumulata a 3 giorni

Dai valori mediani delle *cumulate a 3gg, 9gg* (intervallo temporale medio intercorso tra il livello di falda di picco e il raggiungimento, a seguito di deflusso dell'acqua filtrata, dell'altezza di falda “normale” posta a -20 m), *cumulata dall'ultimo movimento/giorni dall'ultimo movimento e 15gg* l'ipotesi assunta non si è verificata, a significare quindi che il risultato non sembra essere influenzato dalla quantità d'acqua presente nel terreno. Infatti, come si vede dalla seguente *Tabella 4.1*, i valori mediani per i punti sottostanti la curva risultano comunque inferiori/uguali rispetto ai valori dei punti soprastanti.

Tabella 4.1 – Cumulate medie di precipitazioni per gli eventi A

ZONE 1,2,3,4		
cum. up to last displ. / days from last displ.		
	n° punti	mediana
event A-over	17	6,43
event A-under	103	2,18

ZONE 1,2,3,4		
cumulata 3 giorni		
	n° punti	mediana
event A-over	17	2,6
event A-under	122	2,6

La frana del Tessina

ZONE 1,2,3,4		
cumulata 9 giorni		
	n° punti	mediana
event A-over	17	43,8
event A-under	122	15,4

ZONE 1,2,3,4		
cumulata 15 giorni		
	n° punti	mediana
event A-over	17	61,6
event A-under	122	33

ZONE 7,8,9		
cum. up to last displ. / days from last displ.		
	n° punti	mediana
event A-over	23	6,36
event A-under	110	3,97

ZONE 7,8,9		
cumulata 3 giorni		
	n° punti	mediana
event A-over	23	6,2
event A-under	137	2,8

ZONE 7,8,9		
cumulata 9 giorni		
	n° punti	mediana
event A-over	23	37,6
event A-under	137	18,2

ZONE 7,8,9		
cumulata 15 giorni		
	n° punti	mediana
event A-over	23	72
event A-under	137	42,6

Per i punti C sottostanti la curva di innesco si è svolta la stessa analisi in quanto, sebbene contraddistinti da una coppia di intensità-durata che non dovrebbe portare ad alcuno spostamento, il versante ha comunque subito fenomeni di instabilità di diversa entità. Ci si aspettava dunque che il motivo fosse da ricercare in un elevato valore di pioggia cumulata nel terreno che potesse quindi aumentarne la vulnerabilità ma, anche in questo caso, i risultati ottenuti non corrispondono a quelli attesi. Come si vede dalla *Tabella 4.2* il valore cumulato mediano nei vari casi risulta maggiore per i punti C soprastanti la curva di innesco, con un'unica eccezione nel caso di cumulata a 15 giorni per le zone 7,8,9. Approfondendo quest'ultimo valore ed eseguendo ulteriori prove per i valori di cumulata compresi tra 9 e 15 giorni, si evince come a partire dalla cumulata a 10 giorni, per le zone 7,8,9 il valore mediano risulti superiore per i punti sottostanti la curva. Limitatamente a queste zone sembra dunque che l'innesco del versante non dipenda dalla precipitazione cumulata nei nove giorni precedenti il movimento ma sia condizionato da quelli ancora antecedenti.

La frana del Tessina

Tabella 4.2 – Cumulate medie di precipitazioni per gli eventi C

ZONE 1,2,3,4		
cum. up to last displ. / days from last displ.		
	n° punti	mediana
event C-over	38	6,14
event C-under	29	5,77

ZONE 1,2,3,4		
cumulata 3 giorni		
	n° punti	mediana
event C-over	40	60,6
event C-under	30	39,6

ZONE 1,2,3,4		
cumulata 9 giorni		
	n° punti	mediana
event C-over	40	82,8
event C-under	30	71,2

ZONE 1,2,3,4		
cumulata 15 giorni		
	n° punti	mediana
event C-over	40	122,2
event C-under	30	107

ZONE 7,8,9		
cum. up to last displ. / days from last displ.		
	n° punti	mediana
event C-over	20	7,8
event C-under	15	7,1

ZONE 7,8,9		
cumulata 3 giorni		
	n° punti	mediana
event C-over	23	75
event C-under	15	57,4

ZONE 7,8,9		
cumulata 9 giorni		
	n° punti	mediana
event C-over	23	85
event C-under	15	76,4

ZONE 7,8,9		
cumulata 15 giorni		
	n° punti	mediana
event C-over	23	136,6
event C-under	15	152,2

A questo punto si sono ricercate le possibili cause analizzando tutte le restanti variabili a disposizione confrontandone, come precedentemente fatto, i valori medi ma, anche in questi casi, con esiti negativi.

Un ultimo tentativo è stato fatto per i punti A andando a considerare, limitatamente per i punti soprastanti la curva di riferimento, come eventi separati quei fenomeni meteorologici contraddistinti da un cambio importante di intensità all'interno dello stesso evento, come per l'esempio riportato in *Figura 4.9*.

La frana del Tessina

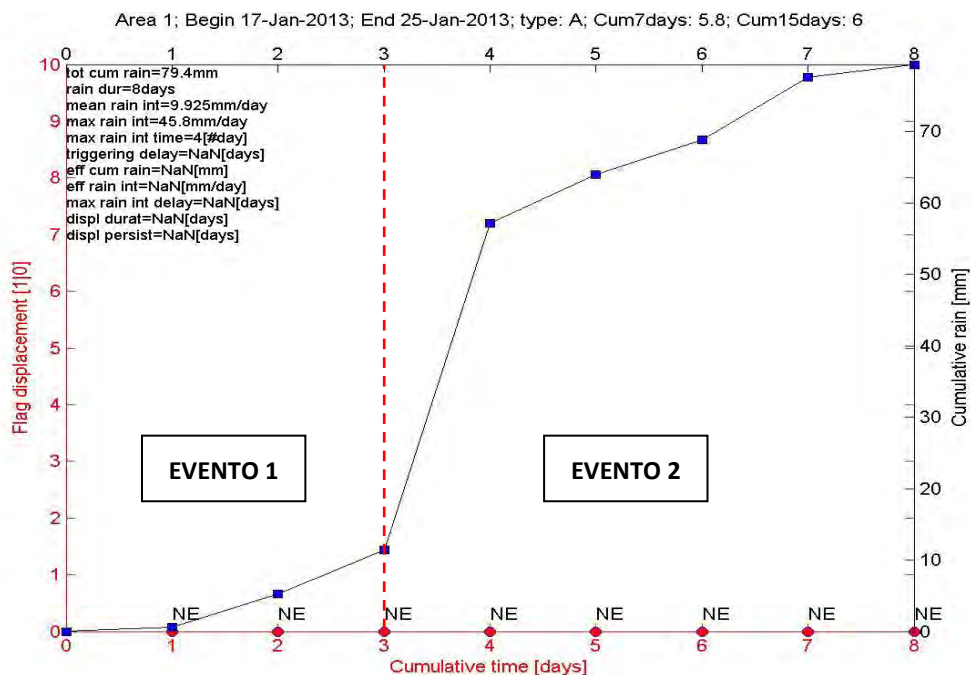
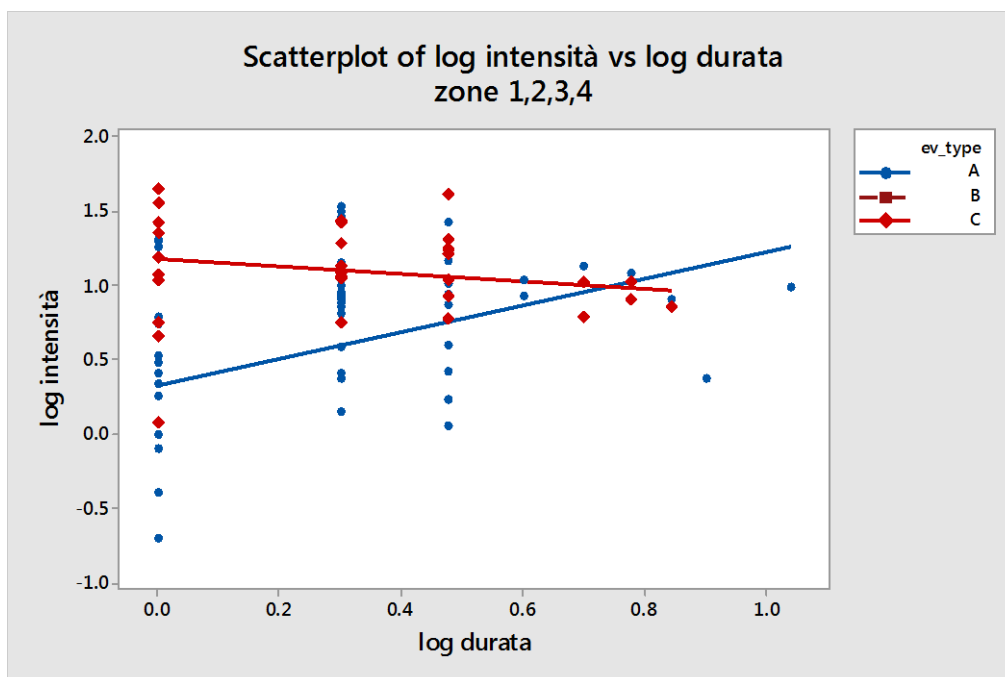


Figura 4.9 – Evento meteorico caratterizzato da un cambio importante di intensità è perciò considerato composto da due diversi fenomeni meteorologici

Ciò consente di generare eventi con durata inferiore e di ridurre perciò il numero di fenomeni “anomali”. Anche in questo caso però i risultati non hanno rispettato le attese in quanto il numero di punti tipo A appartenenti al semispazio soprastante la curva rimane comunque importante e non trascurabile (Figura 4.10).



La frana del Tessina

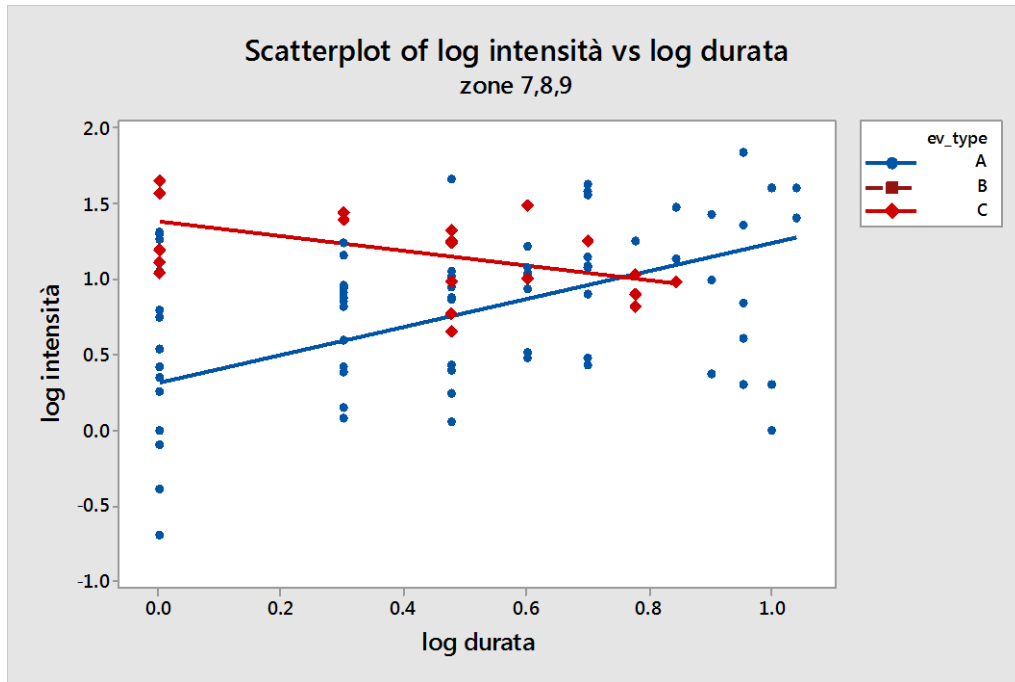


Figura 4.10 - Soglie pluviometriche dei due gruppi di zone con eventi A soprastanti la retta di innesco separati in base all'intensità di precipitazione

Si è quindi proceduto nel riproporre il grafico di interpolazione lineare relativamente ai soli valori medi di intensità per data durata prima (Figura 4.11) e ai valori percentili poi (Figura 4.12). Agli eventi A è associato il percentile 95% e quindi a significare che solamente il 5% degli eventi A ha una coppia durata-intensità sopra a tale retta. Viceversa, agli eventi tipo C è associato il percentile 5% e quindi a significare che nel 95% dei casi in cui si ha movimento del versante l'evento presenta una coppia durata-intensità maggiore della retta di innesco. Può quindi essere considerato un buon punto di partenza come metodo di previsione e di allarme per possibili movimenti.

Nel calcolo delle rette di interpolazione non si sono considerati gli eventi A con durata inferiore a 1 giorno e di intensità inferiore a 1 mm/giorno in quanto non ritenuti particolarmente significanti.

La frana del Tessina

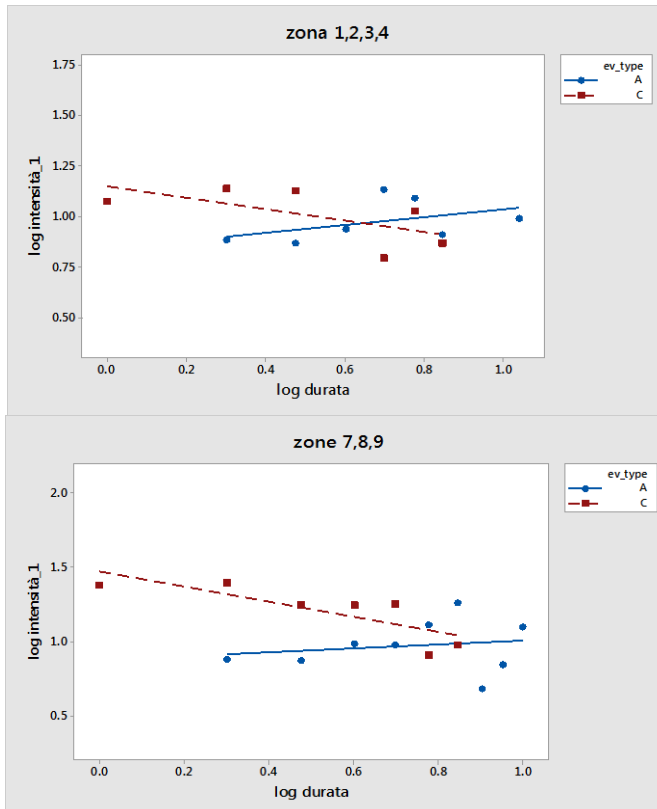


Figura 4.11 - Soglie pluviometriche dei due gruppi di zone in riferimento ai valori medi di intensità

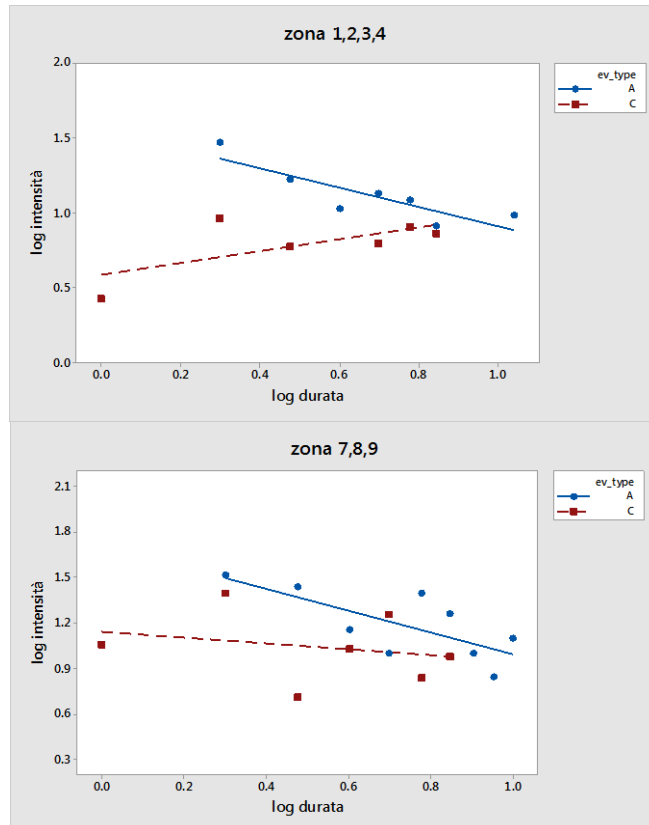


Figura 4.12 - Soglie pluviometriche dei due gruppi di zone in riferimento ai valori percentili di intensità (95% per A, 5% per C)

La frana del Tessina

Le equazioni corrispondenti sono:

- ZONE 1, 2, 3, 4:

➤ Valori medi:

- *Retta C*: $\text{Log intensità} = 1,148 - 0,2790 \log \text{durata}$ R-Sq = 40,5 %
- *Retta A*: $\text{Log intensità} = 0,8427 + 0,1908 \log \text{durata}$ R-Sq = 20,9 %

➤ Valori percentili:

- *Retta C*: $\text{Log intensità} = 0,5875 + 0,3898 \log \text{durata}$ R-Sq = 44,3 %
- *Retta A*: $\text{Log intensità} = 1,561 - 0,6486 \log \text{durata}$ R-Sq = 73,5 %

- ZONE 7, 8, 9:

➤ Valori medi:

- *Retta C*: $\text{Log intensità} = 1,471 - 0,5104 \log \text{durata}$ R-Sq = 65,2 %
- *Retta A*: $\text{Log intensità} = 0,8726 + 0,1315 \log \text{durata}$ R-Sq = 3,2 %

➤ Valori percentili:

- *Retta C*: $\text{Log intensità} = 1,184 - 0,2515 \log \text{durata}$ R-Sq = 6,4 %
- *Retta A*: $\text{Log intensità} = 1,704 - 0,7094 \log \text{durata}$ R-Sq = 53,1 %

Si nota subito come i coefficienti R-Sq siano maggiori del caso precedente in entrambi i casi per le prime quattro zone mentre, per le restanti, il metodo dà risultati migliori per gli eventi C dei valori medi ed A dei valori percentili. Si ha quindi un generale aumento di affidabilità del modello di regressione lineare. Inoltre, si nota anche come in quest'ultimo caso si abbia un cambio di pendenza per le curve.

Il modello così ottenuto può essere ulteriormente migliorato attraverso un approccio non-lineare. Ad esempio, considerando un'interpolazione di tipo cubica come in *Figura 4.13*, il modello ottenuto presenta un'elevata affidabilità ed è quindi più adatto alla rappresentazione del fenomeno, anche se di più difficile interpretazione.

La frana del Tessina

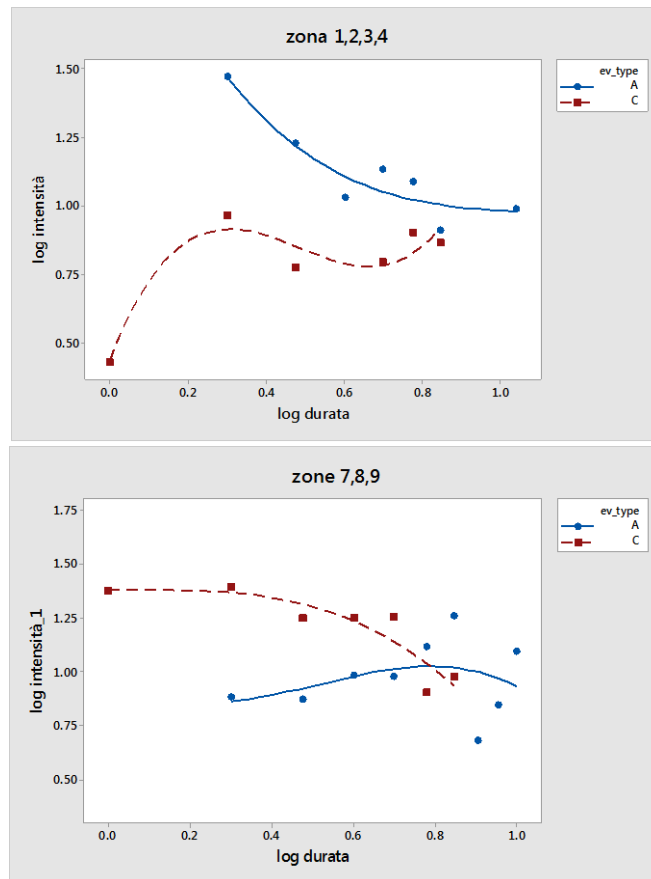


Figura 4.13 - Soglie pluviometriche dei due gruppi di zone in riferimento ai valori percentili di intensità per le zone 1, 2, 3, 4 e ai valori medi per le zone 7, 8, 9 con interpolazione cubica

Le equazioni sono:

- ZONE 1, 2, 3, 4:

➤ Valori percentili:

- *Retta C:* $\text{Log intensità} = 0,4366 + 3,683 \log \text{ durata} - 8,767 \log \text{ durata}^2 - 6,017 \log \text{ durata}^3$ R-Sq = 90,3 %
- *Retta A:* $\text{Log intensità} = 2,245 - 3,455 \log \text{ durata} + 3,221 \log \text{ durata}^2 - 1,030 \log \text{ durata}^3$ R-Sq = 87,4 %

- ZONE 7, 8, 9:

➤ Valori medi:

- *Retta C:* $\text{Log intensità} = 1,380 - 0,011 \log \text{ durata} + 0,163 \log \text{ durata}^2 - 0,915 \log \text{ durata}^3$ R-Sq = 82,0 %
- *Retta A:* $\text{Log intensità} = 0,989 - 1,19 \log \text{ durata} + 3,20 \log \text{ durata}^2 - 2,068 \log \text{ durata}^3$ R-Sq = 9,9 %

La frana del Tessina

4.5 Carta del rischio

Un'importante evoluzione dell'approccio precedente basato sulla determinazione delle soglie pluviometriche si è ottenuto con la definizione delle *carte del rischio*.

Prendendo in considerazione tutte le variabili del dataset si sono di seguito eseguite alcune elaborazioni, sempre col programma Minitab, atte a determinare quali fattori governino maggiormente il *rischio di frana*.

Per rischio si intende la potenzialità che ha un dato fattore di portare ad un evento indesiderabile, in questo caso il franamento. Sebbene ogni variabile considerata sia rischiosa, alcune hanno una percentuale di rischio maggiore e quindi una maggiore influenza sul movimento.

Come in precedenza, anche la presente analisi verrà esposta in dettaglio solamente per il primo gruppo di zone, commentando le varie fasi che consentono di conseguire al risultato finale; per il secondo gruppo verranno invece riportati e commentati solamente i risultati conclusivi.

Si specifica, inoltre, che l'analisi riportata è stata svolta utilizzando la totalità dei dati a disposizione per la stima del modello e quindi per la valutazione numerica dei parametri, in modo da rendere minima la differenza tra i valori modellati e quelli sperimentali delle variabili di interesse.

4.5.1 Zone 1, 2, 3, 4

Inizialmente si sono confrontati attraverso il comando *Boxplot* i valori mediani di tutte le variabili, specificando come variabile categorica il *displacement* che indica la presenza (*displacement* = 1, evento C e B) o meno (*displacement* = 0, evento A) dello spostamento, così da individuare i termini che influenzano maggiormente il fenomeno (*Figura 4.14*).

Per gli eventi tipo A, con la variabile *duration* si intende la *rain duration*, con la variabile *rain intensity* si intende la *mean rain intensity* mentre con la *cumulative rain* la *total cumulative rain*. Per gli eventi C si riportano invece per tali variabili il *triggering delay*, la *effective rain intensity* e la *effective cumulative rain* rispettivamente.

La frana del Tessina

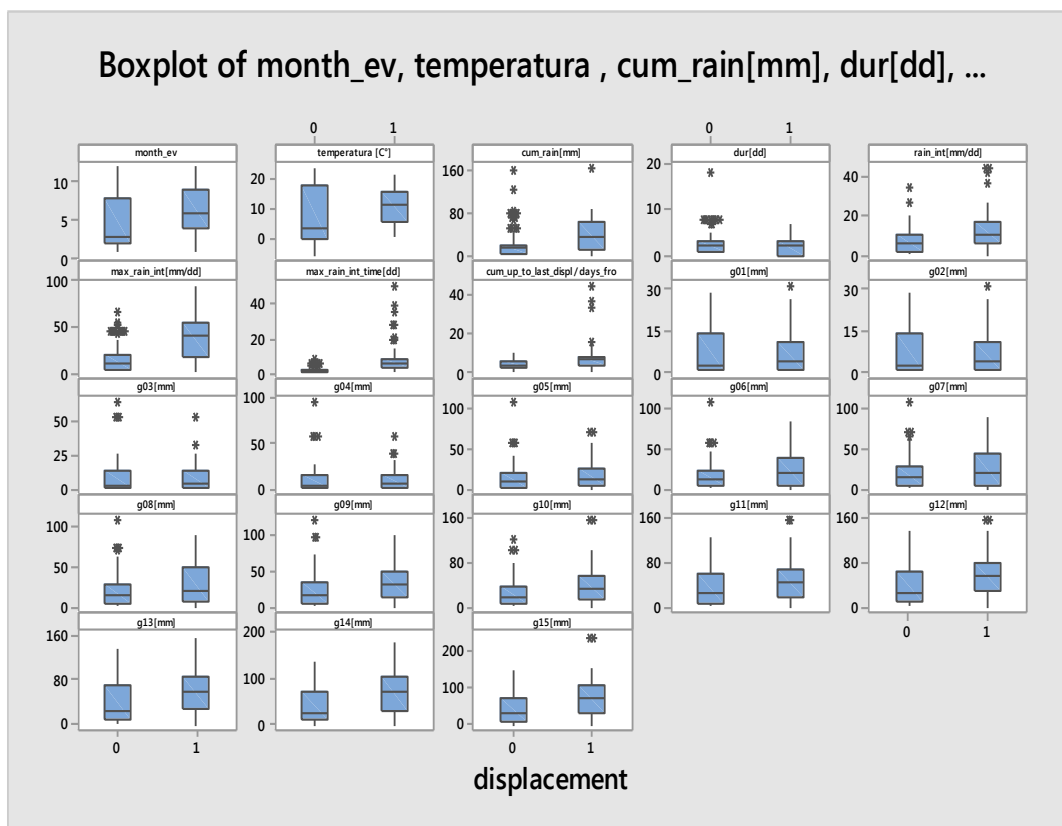


Figura 4.14 – Box-plot per l'analisi di rischio

L'output del programma mette in evidenza i fattori che presentano una maggiore differenza in termini di valore mediano che sono riassunti di seguito (Tabella 4.4).

Tabella 4.4 – Valori mediani significativi

VARIABILE	DISPLACEMENT		differenza
	0	1	
cum_rain (mm)	13	34.5	21.5
max_rain_int (mm/dd)	8.6	41	32.4
g11 (mm)	23.6	44	20.4
g12 (mm)	23.6	57.2	33.6
g13 (mm)	25.6	61.7	36.1
g14 (mm)	25.8	71.6	45.8
g15 (mm)	33	74.4	41.4

Di questi vengono presi in considerazione solamente i termini evidenziati in verde per evitare di avere variabili troppo correlate tra loro. Quindi, per i valori di cumulate dall'undicesimo al quindicesimo giorno, si è scelto di considerare il valore

La frana del Tessina

al dodicesimo giorno in quanto maggiormente significativo rispetto al precedente e antecedente ai seppur più rilevanti giorni successivi.

Queste vengono poi analizzate con la *Regressione Logistica Binaria* che è un modello statistico inferenziale che consente di eseguire un'analisi multivariata, cioè permette di valutare l'effetto simultaneo delle variabili sulla risposta. Permette quindi di verificare quali delle variabili sopra indicate hanno il maggiore effetto sullo spostamento delle zone espresso in forma dicotomica.

Data la forma dicotomica della risposta, si ottiene una relazione non lineare tra le variabili, impedendo perciò 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:

$$p_i(Y = 1) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik})}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik})}}$$

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

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 ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0$), la quale viene rifiutata se, fissato un livello di significatività $\alpha = 5\%$, il termine p-value della statistica test risulta minore di tale valore, consentendo di affermare che esiste almeno una variabile che ha effetto significativo sulla risposta ($H_1: \exists \beta_j \neq 0$).

Essendo la variabile risposta espressa in forma dicotomica, essa definisce l'appartenenza ad uno dei due gruppi, pertanto i valori che vengono assegnati ai livelli sono arbitrari. Ciò che interessa è 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 tra i due livelli (rappresenta quindi il rapporto di probabilità di due eventi complementari).

La frana del Tessina

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 il 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” nel gruppo di zone a seguito dell'aumento della j-esima variabile, e della “presenza di spostamento” e “assenza di spostamento” nel gruppo di zone a seguito della diminuzione della j-esima variabile.

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

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 il rischio diminuisce; maggiore è l'*Odds Ratio*, maggiore è la probabilità che gli spostamenti del gruppo di zone si verifichino a causa della variazione della j-esima variabile.

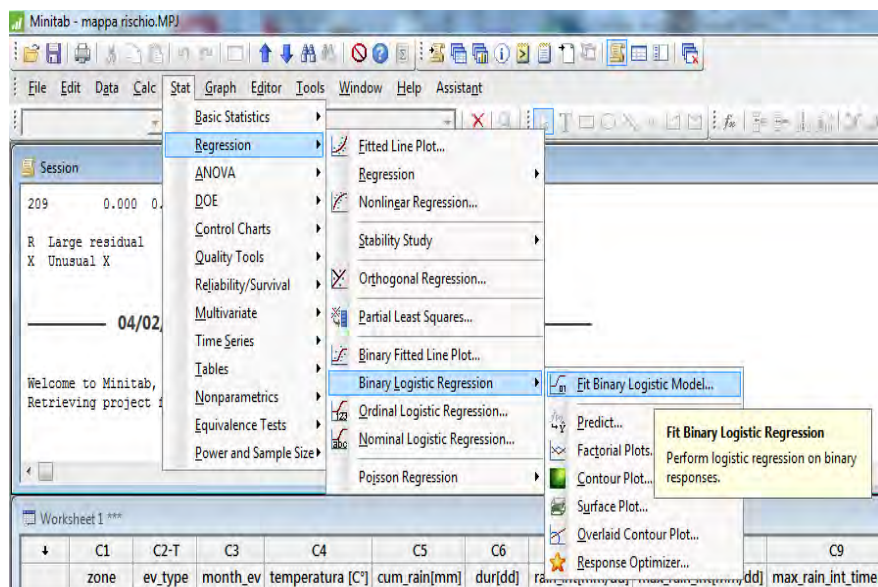
I parametri β stimati sono pari al logaritmo dell'*Odds Ratio* della variabile corrispondente e pertanto rappresentano la variazione della variabile risposta all'aumento unitario della variabile indipendente corrispondente; se l'*Odds Ratio* assume valore maggiore di uno, indicando quindi che una variazione 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.

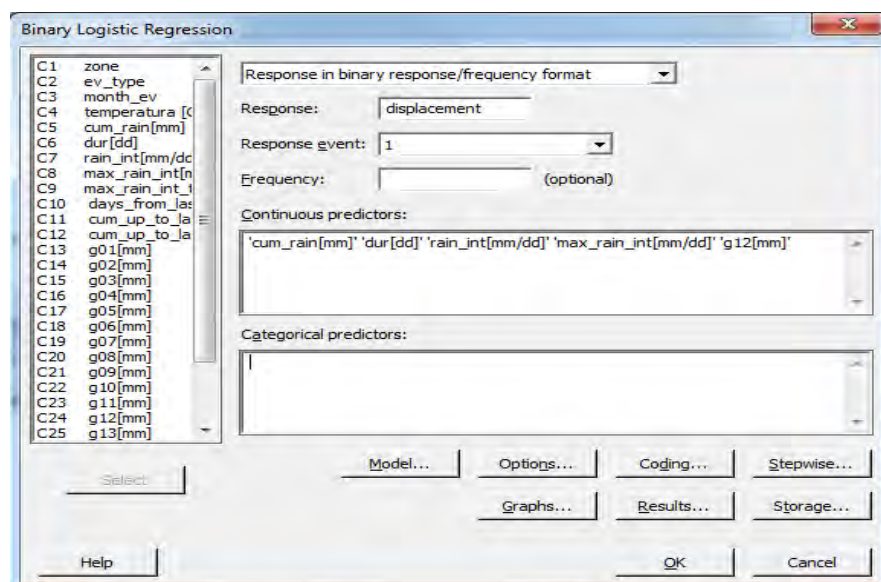
Per iniziare l'analisi è necessario importare su Minitab il foglio di calcolo contenente le variabili suddette ed eseguire il seguente procedimento:

La frana del Tessina

- 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) e come *Continuous Predictors* le variabili indipendenti (in questo caso *rain_dur_ok (dd)*, *rain_int_ok (mm/dd)*, *max_rain_int (mm/dd)*, *g12 (mm)*). Da questa finestra, è possibile eseguire automaticamente una procedura *Stepwise*.



La frana del Tessina

3) Si ottiene il seguente output:

Binary Logistic Regression: displacement versus rain_dur_ok[, rain_int_ok[, max_rain_int

Method

Link function Logit
Rows used 220

Stepwise Selection of Terms, α to enter = 0.05, α to remove = 0.05

Response Information

Variable	Value	Count
displacement	1	81 (Event)
	0	139
Total		220

Deviance Table

Source	DF	Seq Dev	Contrib.	Adj Dev	Adj Mean	P-Value
Regression	3	97.256	33.59%	97.26	32.4186	0.000
rain_dur_ok[dd]	1	5.726	1.98%	38.53	38.5290	0.000
rain_int_ok[mm/dd]	1	11.669	4.03%	20.97	20.9745	0.000
max_rain_int[mm/dd]	1	79.861	27.58%	79.86	79.8613	0.000
Error	216	192.256	66.41%	192.26	0.8901	
Total	219	289.512	100.00%			

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	P-Value	VIF
Constant	-0.297	0.305	(-0.895, 0.301)	0.330	
rain_dur_ok[dd]	-0.791	0.167	(-1.118, -0.464)	0.000	2.44
rain_int_ok[mm/dd]	-0.1766	0.0440	(-0.2629, -0.0903)	0.000	3.23
max_rain_int[mm/dd]	0.1510	0.0257	(0.1007, 0.2013)	0.000	5.55

Odds Ratios for Continuous Predictors

	Odds Ratio	95% CI
rain_dur_ok[dd]	0.4532	(0.3269, 0.6285)
rain_int_ok[mm/dd]	0.8381	(0.7688, 0.9137)
max_rain_int[mm/dd]	1.1630	(1.1060, 1.2229)

Regression Equation

$$P(1) = \exp(Y') / (1 + \exp(Y'))$$
$$Y' = -0.297 - 0.791 \text{ rain_dur_ok[dd]} - 0.1766 \text{ rain_int_ok[mm/dd]} + 0.1510 \text{ max_rain_int[mm/dd]}$$

In questo output si è presa in considerazione solamente la variabile *max_rain_int* (mm/dd) (oltre che alla *rain_dur_ok* (dd), la *rain_int_ok* (mm/dd) e le rispettive iterazioni) mentre è stata esclusa la variabile *g12* (mm) in quanto dall'analisi

La frana del Tessina

logistica eseguita, quest'ultima non presentava una significativa rilevanza nella precisione del modello ottenuto. Infatti, in entrambi i modelli considerati (con o senza la $g12$ (mm)), la capacità di prevedere gli eventi franosi è pari all'88%. Il preciso significato di questo indice di performance del modello verrà chiarito in seguito.

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 i seguenti fattori:

Tabella 4.5 – Variabili significative

Regressori significativi			
Variabili	B	p-value	Odds ratio
rain_dur_ok [dd]	-0.791	0.00	0.4532
rain_int_ok [mm/dd]	-0.1766	0.00	0.8381
max_rain_int [mm/dd]	0.151	0.00	1.163

Dai risultati appena esposti è possibile osservare come il valore dell' *Odds Ratio* relativo alla max_rain_int (mm/dd) risulta essere maggior dell'unità, indicando quindi un aumento di probabilità di osservare spostamento delle zone in esame per effetto della variazione di quest'ultima.

Di seguito si riportano le carte del rischio che completano l'analisi appena svolta.

La prima di queste (Figura 4.15) definisce la probabilità di accadimento dell'evento di spostamento per ogni coppia di variabili considerate, con valore della restante variabile fissato pari al suo valore medio. Al rischio di accadimento viene associata una data graduazione; tanto più scura è la graduazione corrispondente al punto tanto maggiore è la probabilità di franamento.

Si specifica che, in questo tipo di grafico, i termini di iterazioni tra le variabili non possono essere rappresentati in quanto non è possibile vedere quale sia l'effetto simultaneo di due variabili sulla restante.

Inoltre, questi grafici non hanno una validità interpretativa complessiva perché non mettono in evidenza la relazione tra la variabilità di tutte e tre le variabili considerate.

La frana del Tessina

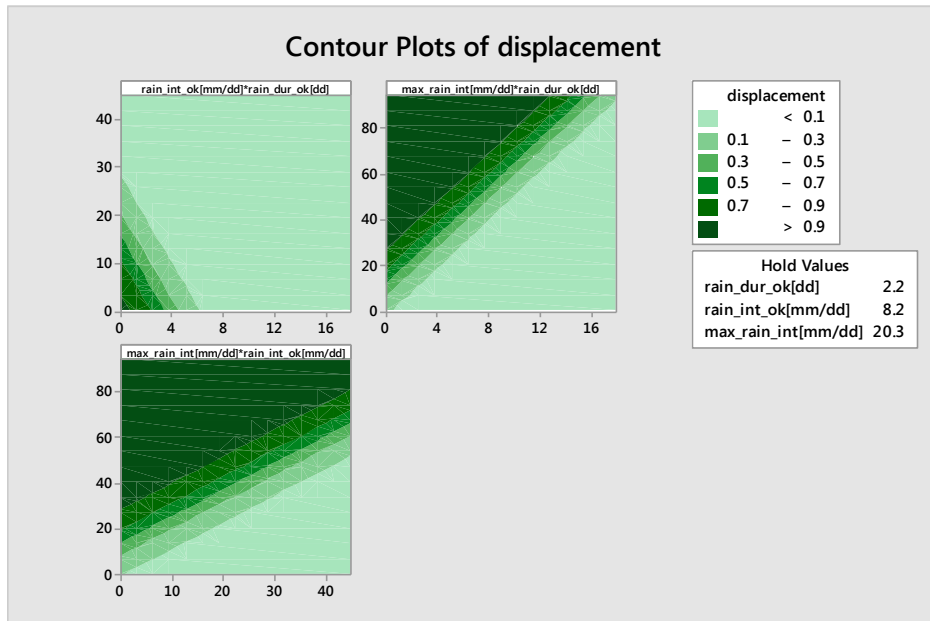


Figura 4.15 – Carta del rischio 2D

Come si vede, la max_rain_int (mm/dd) governa in modo preponderante la probabilità (rischio) di frana, a conferma di quanto detto.

L'andamento di questi grafici, inoltre, mette in evidenza come all'aumentare della $rain_dur_ok$ (dd) e della $rain_int_ok$ (mm/dd) la probabilità tenda a diminuire, come si vede anche dal seguente *Main effect plot* riportato nella seguente Figura 4.16.

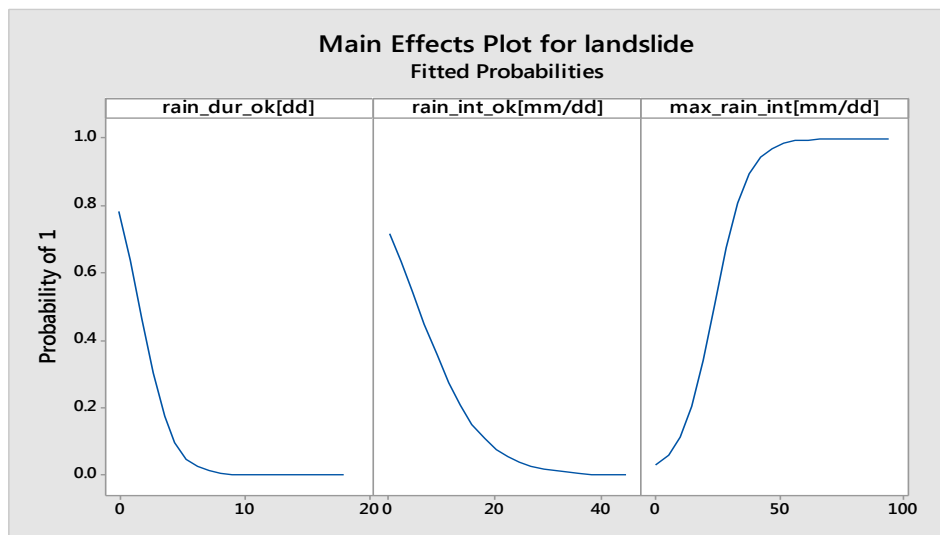


Figura 4.16 – Main effect plot

La frana del Tessina

Tale fatto è confermato anche dai rispettivi valori dell' *Odds Ratio* riportati in *Tabella 4.5* che hanno un valore inferiore all'unità. A giustificazione di ciò si consideri il grafico riportato in *Figura 4.17*.

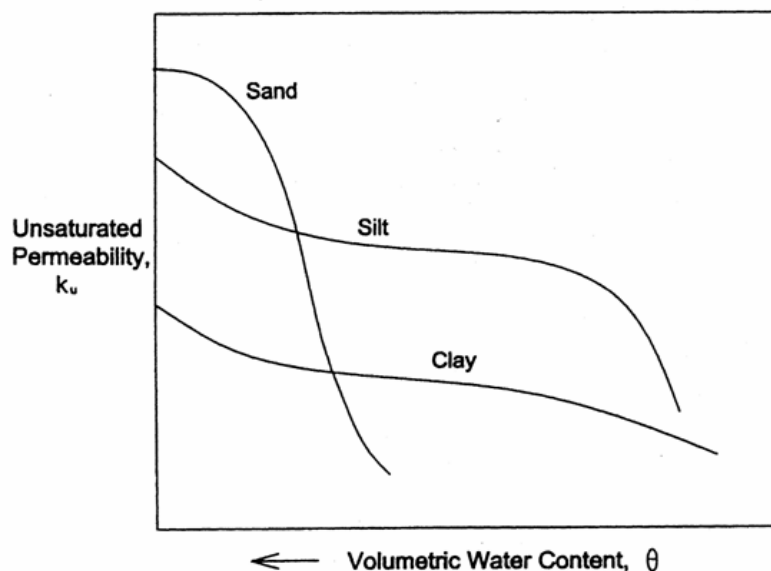


Figura 4.17 – Andamento della conducibilità idraulica del terreno

Questo grafico dimostra come il valore di conducibilità idraulica del terreno, che dipende dalle proprietà del liquido e del mezzo poroso, presenti un andamento crescente all'aumentare del contenuto d'acqua nel terreno. Questo perché, al crescere del contenuto di umidità, cresce il numero dei condotti imbibiti di acqua attraverso i quali questa può defluire. D'altro canto al diminuire del contenuto idrico del suolo, larga parte dei pori viene occupata dall'aria, per cui diminuisce la sezione effettivamente disponibile per il moto dell'acqua ed aumenta la tortuosità dei percorsi per essa. Il valore massimo della conducibilità idraulica si raggiunge quando il suolo è saturo. Ritornando alla *Figura 4.15* si ha quindi che, all'aumentare dell'intensità media e della durata dell'evento meteorico, aumenta il volume d'acqua presente nel terreno e, di conseguenza, aumenta la capacità del suolo di far defluire l'acqua infiltrata durante l'evento, riducendo così la probabilità di franamento del versante.

La stessa valutazione può essere fatta osservando la *Surface Plot* riportata in *Figura 4.18*.

La frana del Tessina

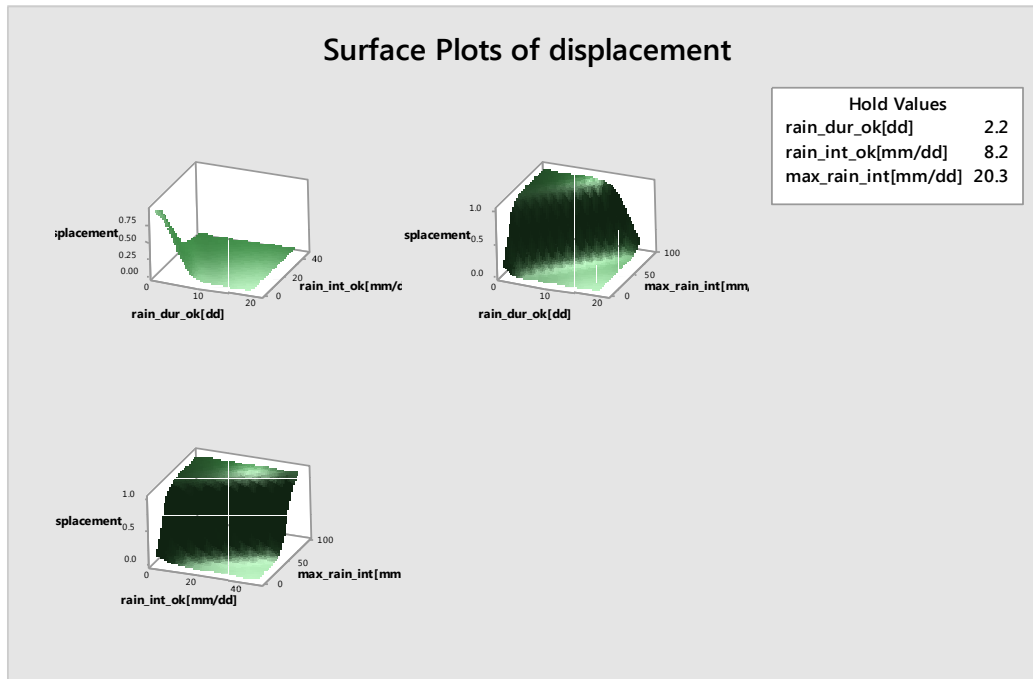


Figura 4.18 – Carta del rischio 3D

Oltre al modello appena proposto, ne viene in seguito presentato un altro basato sulle sole variabili intensità e durata. Tali variabili, come già detto, hanno significati diversi in base all'evento considerato (A, B o C).

Dall'analisi eseguita con il comando *Binary Logistic Regression*, tutte e tre le variabili considerate risultano essere significative a seguito della procedura automatica *Stepwise*. Il modello ottenuto è il seguente:

Regression Equation

$$P(1) = \exp(Y') / (1 + \exp(Y'))$$

$$Y' = 0.028 - 0.747 \text{ rain_dur_ok[dd]} - 0.0253 \text{ rain_int_ok[mm/dd]} + 0.0577 \text{ rain_dur_ok[dd]} * \text{rain_int_ok[mm/dd]}$$

Il modello (*Figura 4.19*, *Figura 4.20*), sebbene sia molto più semplice e di facile interpretazione rispetto al precedente e abbia una capacità di previsione dell'evento inferiore (prevede il 75,5 % delle frane), rispetta comunque le attese ed è coerente con l'andamento delle soglie pluviometriche definite nel *paragrafo 4.4*.

La frana del Tessina

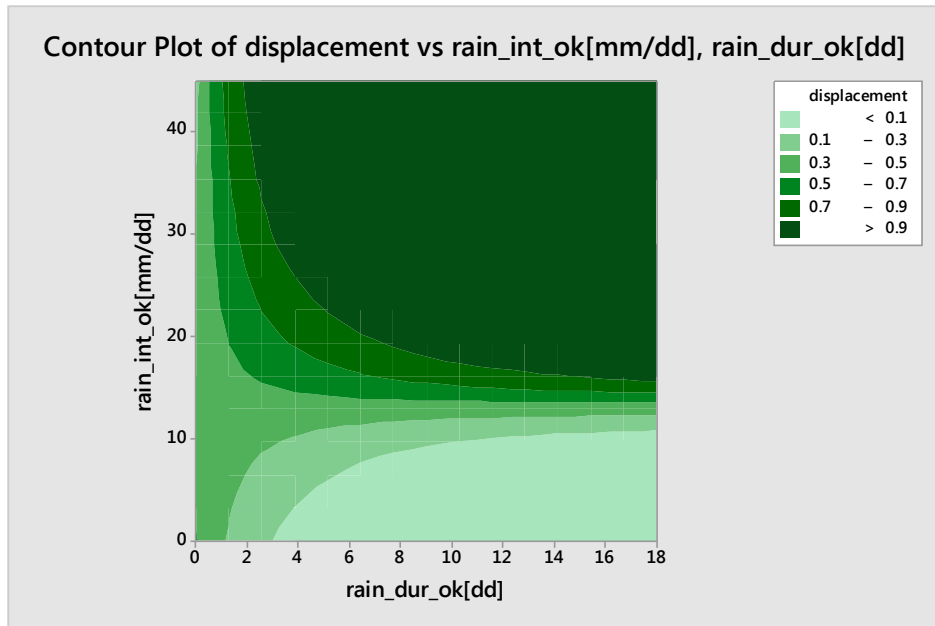


Figura 4.19 – Carta del rischio 2D per le sole variabili intensità e durata

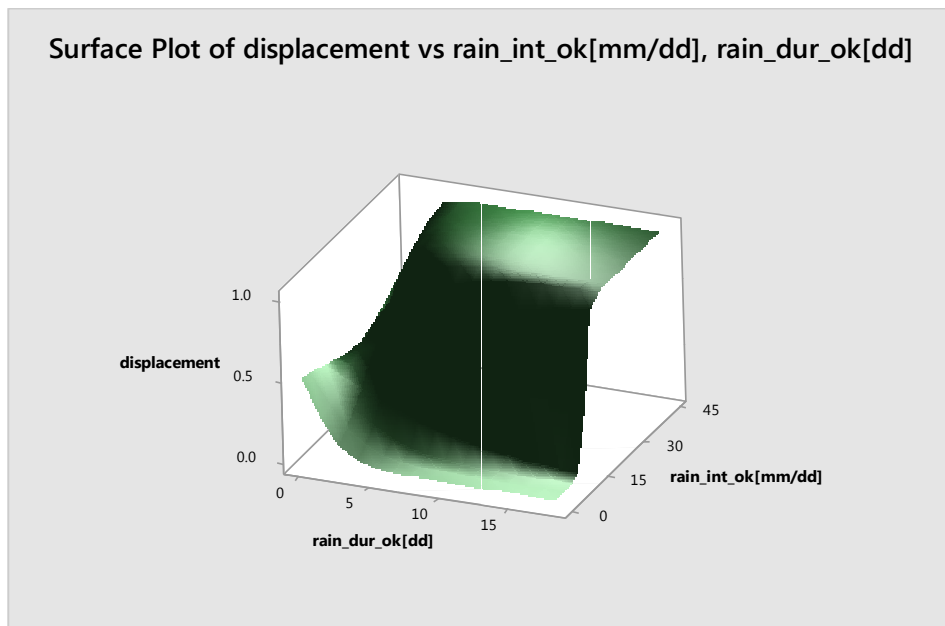


Figura 4.20 – Carta del rischio 3D per le sole variabili intensità e durata

Anche in questi grafici valgono i concetti espressi precedentemente riguardo alla conducibilità idraulica del terreno. Si nota, infatti, come al di sotto di una intensità di precipitazione di circa 13 mm/dd la probabilità di accadimento presenti, come evidenziato anche precedentemente in riferimento alla *Figura 4.15*, un andamento decrescente all'aumentare della durata del fenomeno.

La frana del Tessina

Un'ulteriore giustificazione al particolare andamento del grafico di *Figura 4.19* può essere ricercata facendo riferimento ai modelli di *Horton* e *SCS (soil conservation service)* che schematizzano il processo di infiltrazione nel terreno:

- **Horton:**

Con questo approccio si tiene conto della variazione del tasso di infiltrazione nel tempo attraverso la seguente equazione:

$$J_a(t) = J_c + (J_0 - J_c)e^{-kt}$$

nella quale J_0 è il valore iniziale del tasso di infiltrazione potenziale (in genere espresso in mm/ora), J_c è il valore finale del tasso di infiltrazione al quale il processo tende asintoticamente, k è una costante. I parametri J_0 , J_c e k dovranno essere stimati in relazione alle caratteristiche del suolo e delle condizioni iniziali dell'evento considerato.

Nella *Figura 4.21* è fornito un esempio dell'andamento della curva del tasso di infiltrazione secondo tale modello.

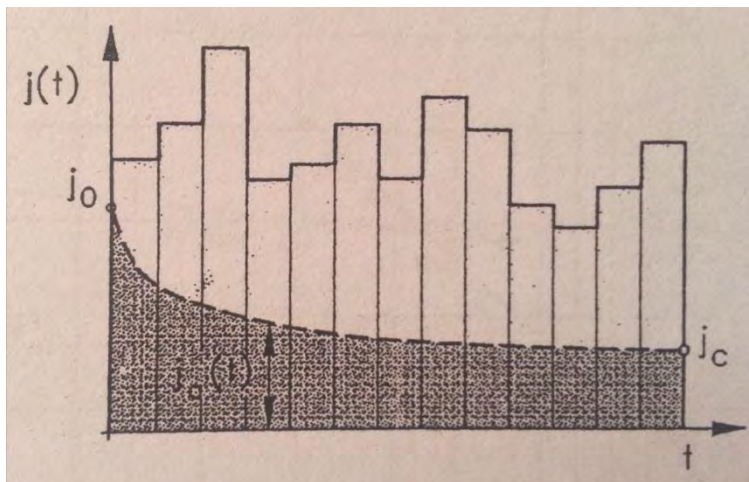


Figura 4.21 – Processo di infiltrazione secondo il modello di Horton

- **SCS:**

Con questo approccio si assume che all'avvio del fenomeno meteorico un volume V_0 saturi il terreno e che, successivamente, l'infiltrazione proceda alla maniera di Horton. Il deflusso superficiale prende origine dopo che sia stata raggiunta la saturazione del terreno, per l'eccedenza dell'afflusso meteorico sulla frazione Hortoniana che continua ad infiltrarsi. Indicando con $P(t)$ il volume dell'afflusso

La frana del Tessina

meteorico, con $P_e(t)$ la frazione efficace che forma il deflusso superficiale e V_H la frazione Hortoniana, il bilancio è:

$$P(t) = P_e(t) + V_0 + V_H$$

Indicando con V_{max} il volume massimo che teoricamente il terreno può per infiltrazione ospitare, il metodo assume che:

$$\frac{V_H}{V_{max}} = \frac{P_e}{P - V_0}$$

Il volume V_0 dipende dallo stato di saturazione del bacino all'inizio dell'evento piovoso e nelle comuni applicazioni è fissato pari a $V_0 = 0,2 V_{max}$. La relazione empirica che assegna il valore di V_{max} è:

$$V_{max} = \frac{25400}{CN} - 254$$

nella quale il parametro CN, detto *Curve Number*, è fissato in base alle caratteristiche del terreno, destinazione d'uso e alle condizioni iniziali di umidità.

Nella *Figura 4.22* è fornito un esempio dell'andamento della curva del tasso di infiltrazione secondo tale modello.

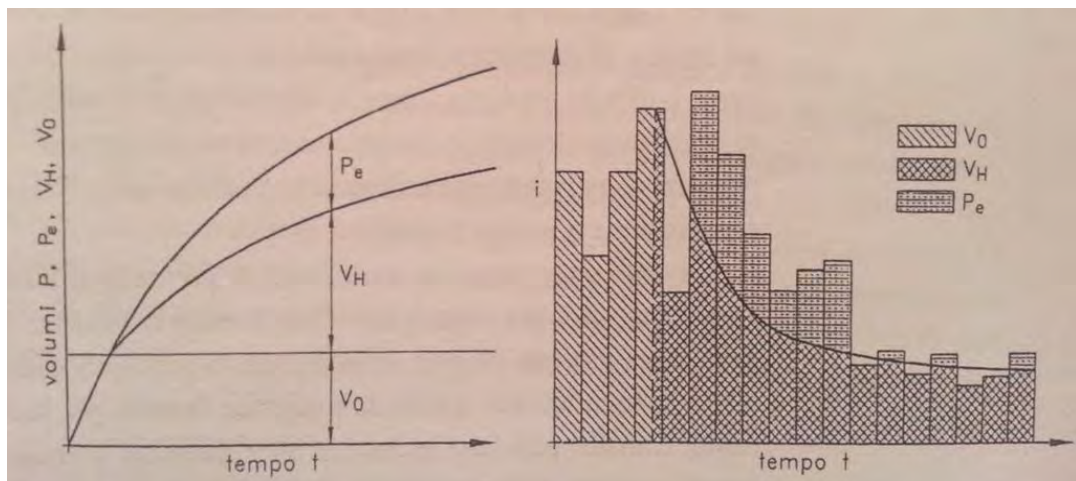


Figura 4.22 – Processo di infiltrazione secondo il modello SCS

In base a questi modelli e osservando la *Figura 4.19* sembra che, fino ad un valore di intensità di 13 mm/dd, la precipitazione assorbita non sia in grado di saturare

La frana del Tessina

completamente il terreno dato che, per valori di intensità modeste, il terreno riesce a far defluire l'acqua assorbita, grazie alla capacità drenante dello stesso, così da non raggiungere la condizione di saturazione potenzialmente innescante il fenomeno franoso. Per la porzione di grafico sottostante a tale soglia sembra quindi valere il modello di Horton.

Per la porzione di grafico soprastante sembra invece valere il modello SCS in quanto, per elevate intensità di precipitazione, il terreno sembra raggiungere un volume di saturazione V_0 . Raggiunto tale volume il terreno non riesce più ad assorbire e far defluire l'afflusso meteorico eccedente la frazione Hortoniana con conseguente incremento del deflusso superficiale. Si ha quindi un aumento di probabilità di franamento con il perdurare del fenomeno meteorico.

Si specifica che tale soglia, non essendo dipendente dalla durata del fenomeno, può essere confusa con la soglia asintotica J_c raggiunta dal meccanismo di infiltrazione Hortoniano. Ma, assumendo che il franamento possa innescarsi prima che si verifichi il deflusso superficiale, per effetto dell'aumento delle forze instabilizzanti dovute alla crescita del livello idrico, è ragionevole pensare che sia inferiore e che possa essere in qualche modo legata, con una certa relazione, a quest'ultima.

4.5.2 Zone 7, 8, 9

Per il secondo gruppo di zone si eseguono, come detto, gli stessi passaggi descritti precedentemente. In questo caso, dal comando *Boxplot*, i fattori che presentano una maggiore differenza in termini di valore mediano sono (*Tabella 4.6*):

Tabella 4.6 – Valori mediani significativi

VARIABILE	DISPLACEMENT		differenza
	0	1	
cum_rain (mm)	15.2	48.5	33.3
max_rain_int (mm/dd)	11	41.8	30.8
g10 (mm)	23.8	52	28.2

Queste variabili (con l'aggiunta della *rain_duration_ok* e *rain_intensity_ok*) vengono analizzate con la *Regressione Logistica Binaria* per valutarne l'effetto

La frana del Tessina

simultaneo sulla risposta (*displacement*), espressa in forma dicotomica, così da giustificarne la probabilità di passaggio da uno stato all'altro.

Si ottiene il seguente output:

Binary Logistic Regression: displacement versus rain_int_ok[, rain_dur_ok[, max_rain_int

Method

Link function Logit
Rows used 201

Stepwise Selection of Terms, α to enter = 0.05, α to remove = 0.05

Response Information

Variable	Value	Count
displacement	1	42 (Event)
	0	159
Total		201

Deviance Table

Source	DF	Adj Dev	Adj Mean	Chi-Square	P-Value
Regression	3	88.16	29.3872	88.16	0.000
rain_int_ok[mm/dd]	1	27.21	27.2070	27.21	0.000
rain_dur_ok[dd]	1	34.75	34.7494	34.75	0.000
max_rain_int[mm/dd]	1	77.43	77.4332	77.43	0.000
Error	197	117.89	0.5984		
Total	200	206.05			

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	VIF
Constant	-0.827	0.487	
rain_int_ok[mm/dd]	-0.2835	0.0722	8.22
rain_dur_ok[dd]	-1.038	0.238	4.18
max_rain_int[mm/dd]	0.2037	0.0385	13.80

Odds Ratios for Continuous Predictors

	Odds Ratio	95% CI
rain_int_ok[mm/dd]	0.7531	(0.6537, 0.8677)
rain_dur_ok[dd]	0.3542	(0.2223, 0.5642)
max_rain_int[mm/dd]	1.2259	(1.1367, 1.3220)

Regression Equation

$$P(1) = \exp(Y') / (1 + \exp(Y'))$$
$$Y' = -0.827 - 0.2835 \text{ rain_int_ok[mm/dd]} - 1.038 \text{ rain_dur_ok[dd]} + 0.2037 \text{ max_rain_int[mm/dd]}$$

La frana del Tessina

Nel modello così ottenuto la precisione nel prevedere gli eventi franosi è pari all'89,6%. Come in precedenza, il modello presenta quindi un'elevata validità e precisione.

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 i seguenti fattori (Tabella 4.7):

Tabella 4.7 – Variabili significative

Regressori significativi			
Variabili	β	p-value	Odds ratio
rain_dur_ok [dd]	-1.038	0.00	0.3542
rain_int_ok [mm/dd]	-0.2835	0.00	0.7531
max_rain_int [mm/dd]	0.2037	0.00	1.2259

Dai risultati appena esposti è possibile osservare che, anche per queste zone, il valore dell' *Odds Ratio* relativo alla *max_rain_int* (mm/dd) risulta essere maggior dell'unità, indicando quindi un aumento di probabilità di osservare lo spostamento per effetto della variazione di quest'ultima.

Di seguito si riportano le carte del rischio che completano l'analisi svolta.

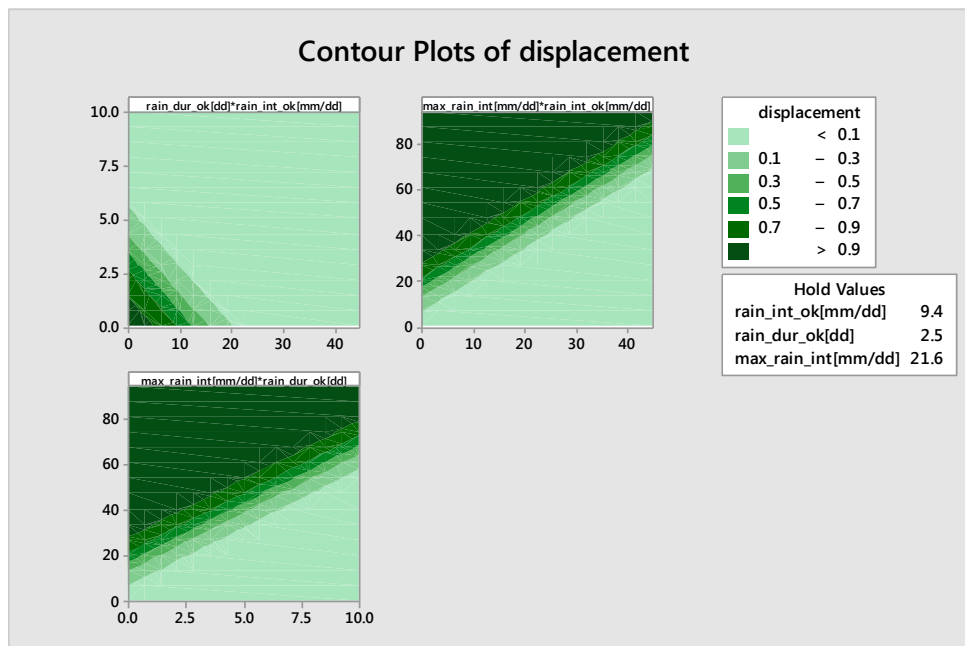


Figura 4.23 – Carta del rischio 2D

La frana del Tessina

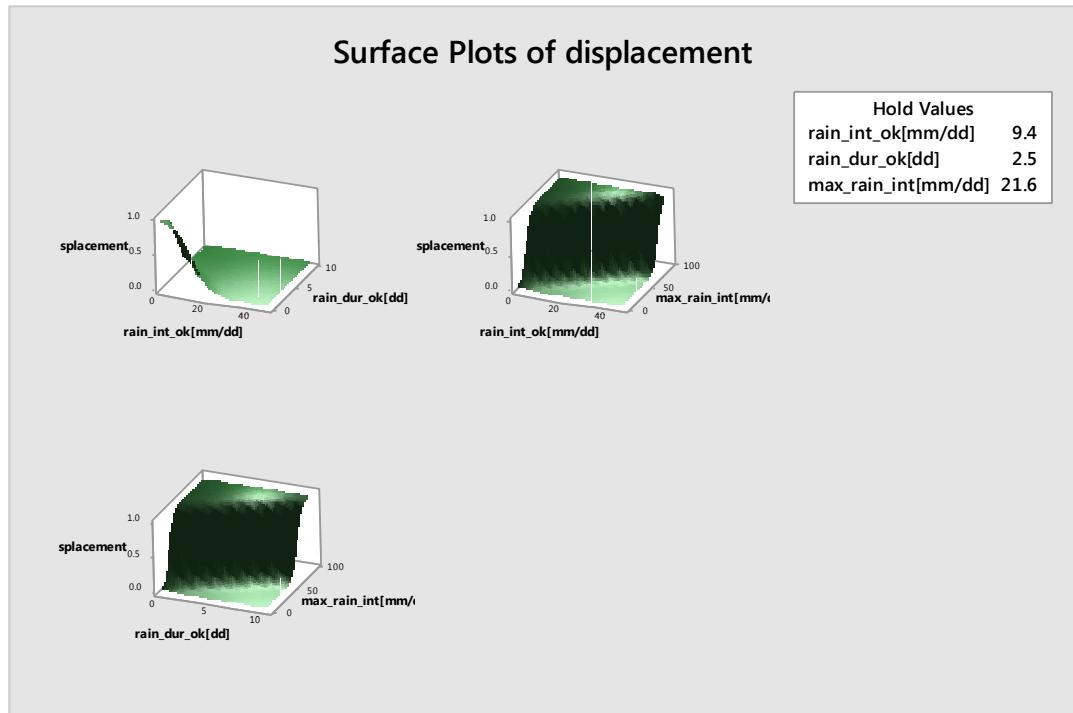


Figura 4.24 – Carta del rischio 3D

Come si vede, l'andamento di tali grafici segue quanto già osservato per le zone 1, 2, 3 e 4, con la *max_rain_int* (mm/dd) che, anche qui, governa in modo preponderante la probabilità di frana (Figura 4.23 e Figura 4.24). Valgono perciò gli stessi concetti espressi precedentemente per quanto riguarda la conducibilità idraulica del terreno.

Il seguente modello, basato sulle sole variabili intensità e durata, sebbene sia più semplice e di facile interpretazione, ha una buona capacità di previsione dell'evento franoso, pari al 70%.

La frana del Tessina

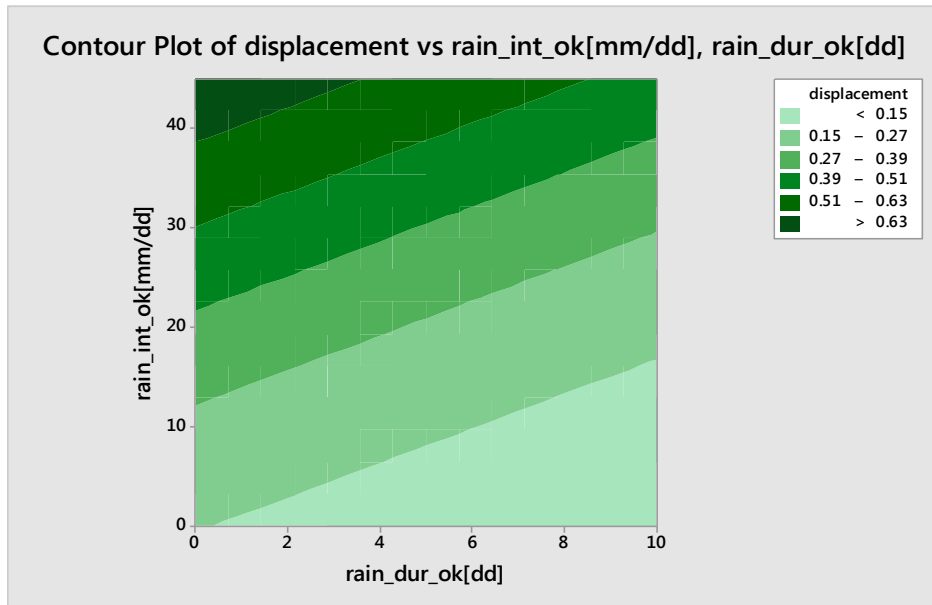


Figura 4.25 – Carta del rischio 2D per le sole variabili intensità e durata

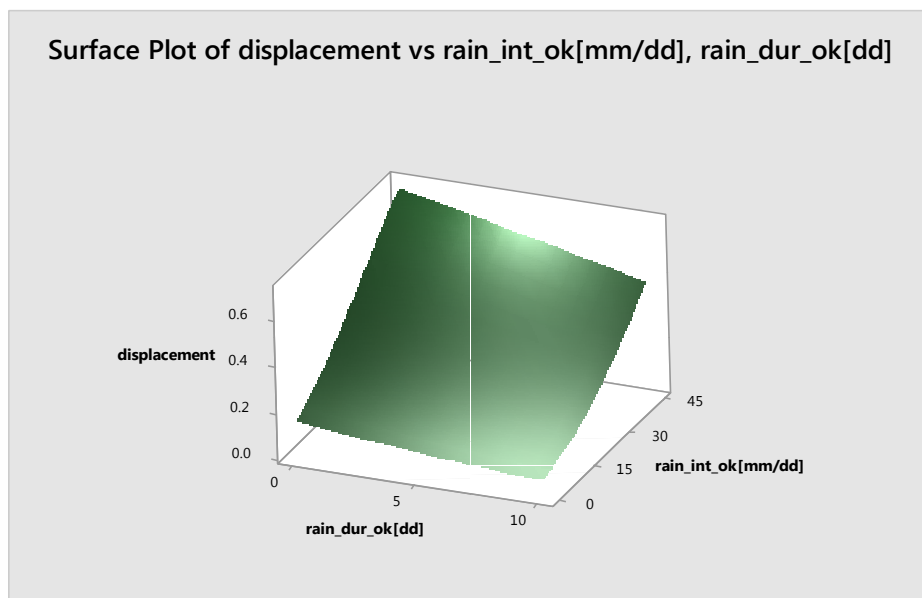


Figura 4.26 – Carta del rischio 3D per le sole variabili intensità e durata

In questa analisi si ha, invece, un andamento dei grafici in *Figura 4.25* e *Figura 4.26* differente rispetto ai corrispondenti grafici alle zone apicali. Questo è dovuto presumibilmente alla diversa morfologia che contraddistingue i due gruppi di zone. Dal modello ottenuto, le variabili *rain_dur_ok* (*dd*) e l'iterazione tra intensità e durata dell'evento non risultano essere significative e vengono perciò escluse a seguito della procedura automatica *Stepwise*. Il modello ottenuto è il seguente:

La frana del Tessina

Regression Equation

$$P(1) = \exp(Y') / (1 + \exp(Y'))$$

$$Y' = -1.929 + 0.0561 \text{ rain_int_ok[mm/dd]}$$

Per creare il grafico di probabilità sono però necessarie almeno due variabili nel modello e, perciò, è stato imposto al programma di mantenere anche la *rain_dur_ok (dd)* sebbene quest'ultima non risultasse significativa per l'analisi.

Di conseguenza, il grafico in *Figura 4.25* non presenta alcuna curvatura ma una relazione di tipo lineare tra le due variabili che lo porta quindi ad avere un andamento completamente differente rispetto al grafico in *Figura 4.19*.

In questo caso si ha che, per un dato valore di intensità, un aumento della durata dell'evento meteorico comporta una diminuzione della probabilità di franamento. Viceversa, per un dato valore di durata, un aumento d'intensità media di precipitazione porta ad un incremento della probabilità.

La diminuzione di probabilità può essere giustificata considerando la *Figura 4.17* e le osservazioni già riportate precedentemente inerenti l'andamento crescente assunto dalla conducibilità idraulica a seguito dell'accrescimento del volume d'acqua presente nel terreno.

Per l'aumento di probabilità dovuta alla crescita di intensità media, si può, di nuovo, far riferimento al processo di infiltrazione nel terreno secondo lo schema di *Horton* e *SCS*. Valori di intensità media superiori alla capacità di deflusso Hortoniana porta ad un incremento del deflusso superficiale e del volume presente nel terreno. Quindi, concludendo, l'incremento d'acqua nel terreno ne aumenta la capacità drenante ma, se l'intensità supera la capacità drenante massima, il terreno non riesce più ad assorbire e far defluire l'afflusso meteorico eccedente portando perciò ad un incremento della probabilità di franamento del versante.

4.5.3 Carta del rischio intensità-durata per l'intera area di frana

A completare questa analisi, si riporta in seguito la carta del rischio corrispondente alla totalità delle zone considerate (*Figura 4.27* e *Figura 4.28*). In questo caso, sebbene il numero dei dati a disposizione sia maggiore rispetto i casi precedenti, il modello presenta una precisione e una capacità di prevedere l'evento franoso inferiore e pari al 69%, date le importanti differenze che contraddistinguono tali

La frana del Tessina

zone e che sono state precedentemente esposte. Tale modello risulta comunque di elevata importanza in quanto può fornire un primo segnale di allarme generale per l'intera area dalla quale poter partire poi con le successive analisi, specifiche per i due gruppi di zone.

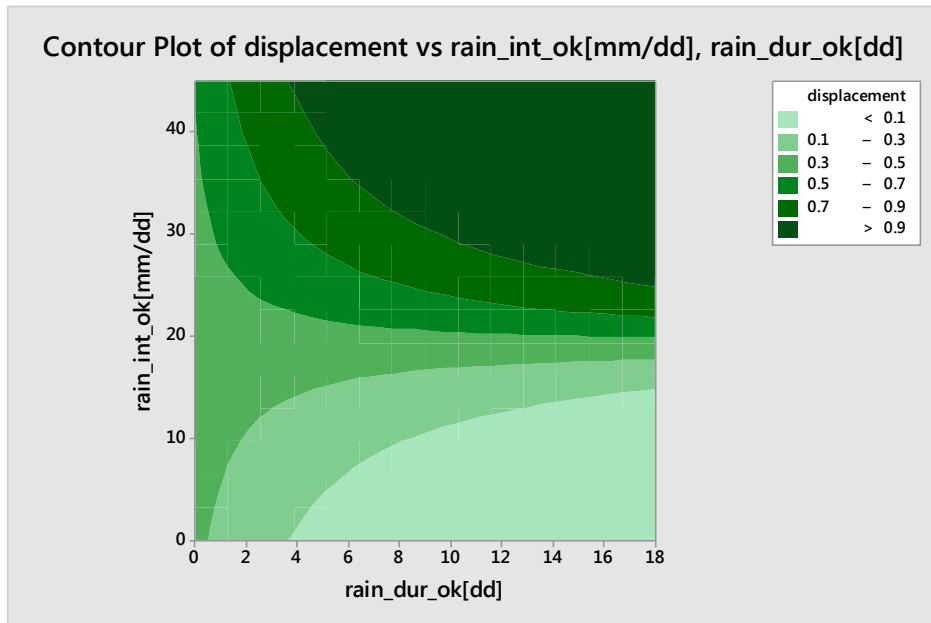


Figura 4.27 – Carta del rischio 2D per le sole variabili intensità e durata

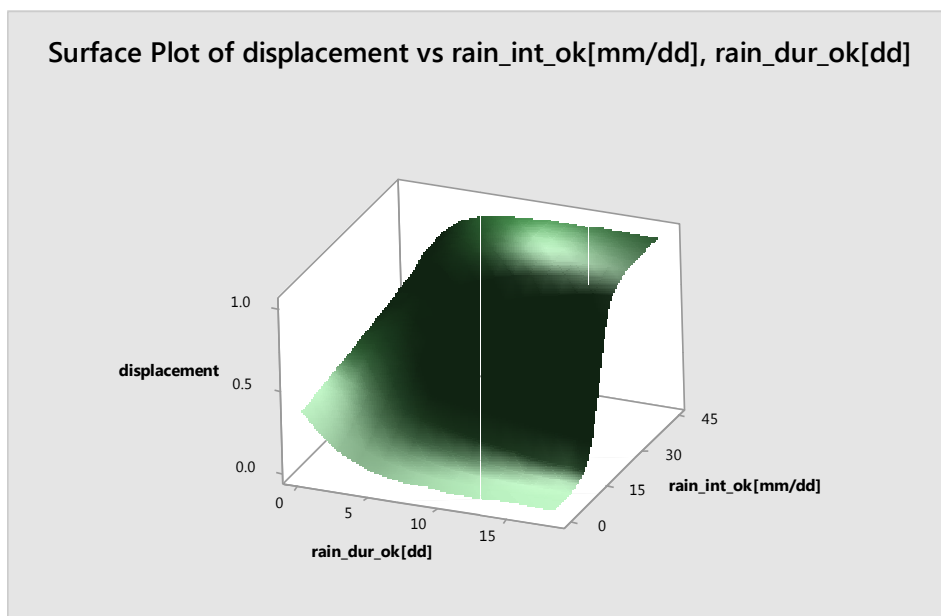


Figura 4.28 – Carta del rischio 3D per le sole variabili intensità e durata

Nel modello ottenuto anche il termine di iterazione risulta significativo. Quindi, in questo caso, l'andamento è simile al corrispondente grafico delle zone apicali che

La frana del Tessina

sembrano perciò governare in maniera preponderante il rischio di frana nell'area in esame.

Anche in questi grafici valgono quindi i concetti espressi precedentemente riguardo alla conducibilità idraulica e al processo di infiltrazione nel terreno.

Inoltre, dalla *Figura 4.27* sembra che, il valore di intensità di precipitazione limite dalla quale si osserva una variazione della modalità di risposta del terreno sia di 19 mm/dd, leggermente superiore al valore delle sole zone apicali.

Tale aumento è causato dalla presenza nel modello generale delle zone 7, 8 e 9, che presentano, per elevati valori di probabilità di accadimento, valori di intensità molto elevati che causano quindi un incremento della soglia di intensità limite.

4.5.4 Indici di performance dei modelli ottenuti

Per la valutazione della performance dei modelli ottenuti si può far riferimento a degli indicatori statistici. I principali indicatori, che, si specifica, sono di seguito calcolati solamente per il modello completo appartenente al primo gruppo analizzato (zone 1, 2, 3 e 4), possono essere riassunti facendo riferimento alle seguenti quattro combinazioni della *matrice di confondimento* (*Tabella 4.8*):

Tabella 4.8 – Matrice di confondimento

		OSSERVAZIONI		
		Hit (True positive - TP)	False alarm (False positive - FP)	
PREVISIONI	Miss (False negative - FN)	Correct negative (True negative - TN)	Non previsti	
	Osservati (Positive - P)	Non osservati (Negative - N)		

- *Hit (TP)* = numero di volte in cui un evento previsto è osservato;
- *False alarm (FP)* = numero di volte in cui un evento previsto non viene successivamente osservato;
- *Miss (FN)* = numero di volte in cui un evento non previsto viene successivamente osservato ;

La frana del Tessina

- *Correct negative (TN)* = numero di volte in cui un evento non viene previsto e non viene successivamente osservato.

Gli indicatori sono:

- *Sensitività (True Positive Rate - TPR)*: capacità del test di identificare correttamente una condizione di interesse. Viene calcolato attraverso la relazione:

$$TP/P = TP/(TP+FN)$$

- *Specificità (True Negative Rate - TNR)*: capacità del test di escludere correttamente una data condizione. Viene calcolato attraverso la relazione:

$$TN/N = TN/(FP+TN)$$

Un modello di previsione ideale (ma non reale) dovrebbe avere pari ad 1 sia la sensitività sia la specificità.

- *Accuratezza*: indice di performance. Viene calcolato con la relazione:

$$ACC = (TP+TN)/(P+N).$$

In *Tabella 4.9* si riporta la matrice di confondimento. Si specifica che i risultati sono stati ottenuti facendo riferimento ai dati giornalieri per avere una misura continua e considerare perciò anche i casi di contemporanea assenza di precipitazione e movimento, precedentemente esclusi nelle analisi basate sull'individuazione degli eventi A, B e C. Inoltre, i valori sono stati ottenuti assumendo una soglia di probabilità pari al 50 % che stabilisce quindi la regola decisionale.

Tabella 4.9 – Matrice di confondimento

	OSSERVAZIONI		
PREVISIONI	52	7	previsti
	92	429	non previsti
	osservati	non osservati	

La frana del Tessina

Si riporta di seguito un grafico (*Figura 4.29*) che mette in evidenza la precisione del modello di previsione ottenuto.

SOPRA LA SOGLIA		SOTTO LA SOGLIA	
previsione esatta	previsione sbagliata	previsione esatta	previsione sbagliata
52	7	429	92

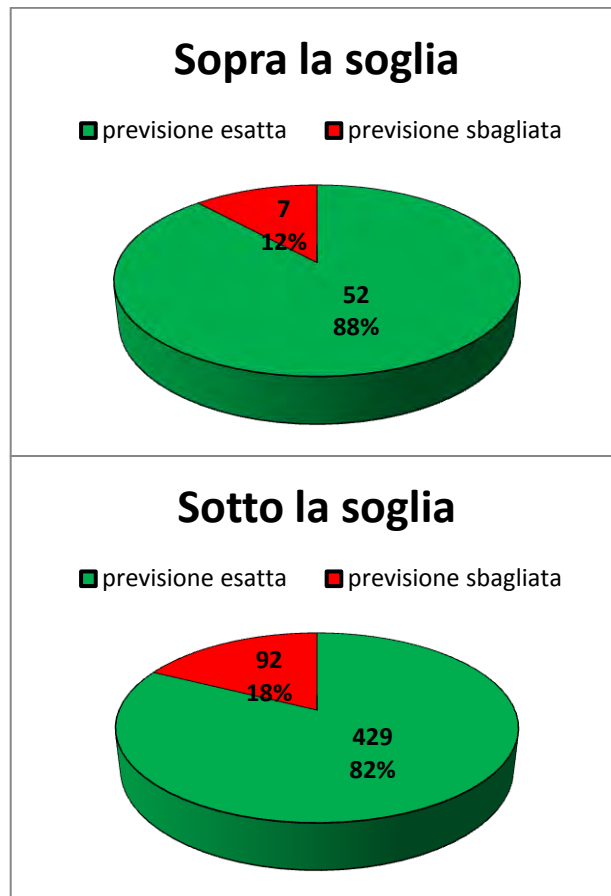


Figura 4.29 – Precisione del modello

Il totale dei dati considerati (580) è composto da un insieme di valori con pioggia (254), cioè caratterizzati da precipitazione e quindi papabili per il modello, e da un insieme di valori senza pioggia (326). Per quest'ultimi il modello indovina la precisione in quanto, non essendoci precipitazione, il modello assegna correttamente un non superamento della soglia. Per questo, questi dati vengono sommati ai 103, per i quali il modello ha indovinato la previsione di non innesco del versante in presenza di precipitazione, per un totale di 429 casi.

La frana del Tessina

In *Tabella 4.10* si riassumono gli indici sopra indicati.

Tabella 4.10 – Indicatori statistici

sensitività	specificità	accuratezza
0.361	0.984	0.829

Come si vede, mentre l'indice di sensitività assume un valore basso, e quindi una scarsa capacità del test di identificare correttamente una data condizione, i restanti indici, specificità e accuratezza, presentano valori molto elevati e confermano quindi che il modello ha una elevata capacità di escludere correttamente una data condizione e possiede una elevata performance.

I diversi effetti (sensitività e specificità) della capacità di previsione del modello possono anche essere dedotti attraverso la rappresentazione grafica del *Boxplot* (*Figura 4.29*) che mette in evidenza anche i punti non correttamente classificati. In questo caso ci si aspetta che la condizione nulla (assenza di spostamento) sia posta inferiormente rispetto alla condizione rappresentante la presenza del fenomeno franoso.

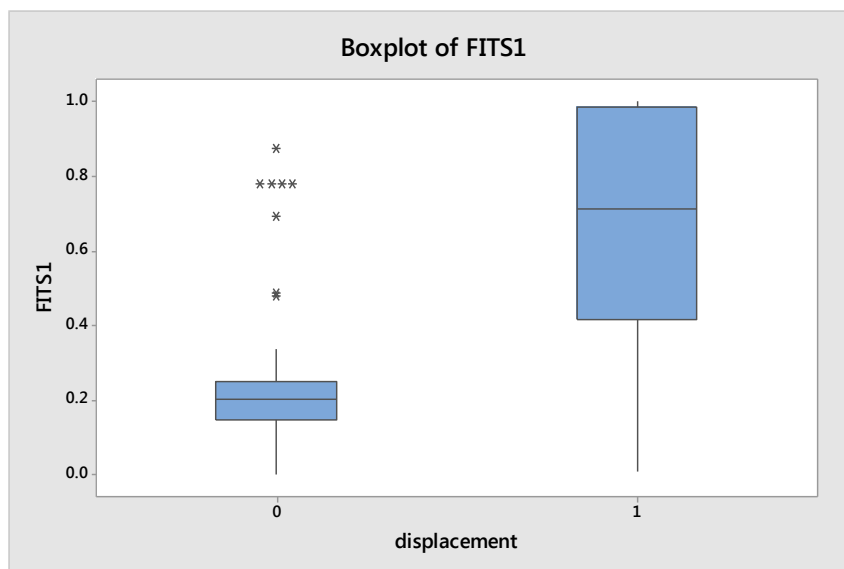


Figura 4.29 – Boxplot dei valori di probabilità

A conferma di quanto detto, sembra che la capacità del modello di escludere correttamente una condizione (specificità) sia maggiore della capacità di identificarne una correttamente (sensitività).

La frana del Tessina

Per chiarire il significato degli indici di performance che definiscono la capacità di previsione dei modelli, ottenuti dall'output finale e riportati nelle pagine precedenti (88 % per il modello completo e 75,5 % per il modello semplificato intensità-durata), si deve fare riferimento alle curve *ROC*. La curva operativa caratteristica *ROC* è il più importante criterio di valutazione dell'affidabilità delle performance di un modello per l'analisi del rischio in quanto consente di valutarne simultaneamente la specificità e la sensibilità. La *ROC* è quindi una rappresentazione grafica delle performance di un test numerico che si ottiene plottando i tassi di sensibilità (*TPR*) e i tassi di fall-out ($FPR = 1 - \text{specificità}$) al variare della soglia di probabilità prefissata (*cut-off*) che stabilisce la regola decisionale (*Figura 4.30*).

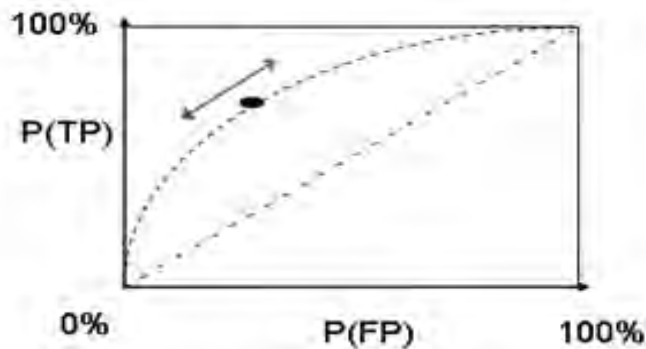


Figura 4.30 – Tipica curva ROC

Essendo una rappresentazione bidimensionale delle prestazioni di un classificatore, per confrontare tra loro classificatori diversi è utile ridurre le prestazioni *ROC* ad un singolo indicatore che rappresenti le prestazioni attese. Un metodo comune consiste nel calcolare l'area sotto la curva *ROC* detto *AUC - Area Under the Curve*.

L'*AUC* di un classificatore è equivalente alla probabilità che il classificatore ordini in modo corretto il valore di due unità, una positiva e una negativa, scelte casualmente. Quindi, nel nostro caso, se scegliamo casualmente due condizioni, una in presenza ed una in assenza di spostamento, e consideriamo il valore di probabilità di rischio ottenuto tramite il modello, la probabilità che il valore corrispondente allo spostamento sia maggiore del valore relativo al non-spostamento è pari all'area sottesa dalla curva e cioè all' *AUC*.

$$AUC = \Pr (X(\text{positivo}) > X(\text{negativo}))$$

La frana del Tessina

Poiché l'AUC è una frazione della superficie del quadrato unitario, il suo valore sarà sempre tra 0 e 1. Tuttavia, poiché la strategia del “tirare a caso” produce la linea diagonale (0,0) - (1,1) e corrisponde ad una superficie di 0.5, nessun classificatore realistico dovrebbe avere $AUC < 0.5$.

Tornando ai valori ottenuti in fase di analisi, corrispondono quindi al valore AUC relativo ad una soglia prefissata pari al 50 % di probabilità. Si ha perciò rispettivamente l'88 % e il 75,5 % di probabilità che il modello ordini correttamente due eventi opposti in base al rischio che li contraddistingue.

Un'ulteriore sviluppo per determinare un indice di performance del modello più preciso, non svolto in questo lavoro, potrebbe essere quello di considerare un processo di *Cross-Validation*. L'analisi viene condotta utilizzando la gran parte dei dati a disposizione per la stima e i restanti, circa il 10 % dei dati, per la validazione del modello stesso e quindi per accertare la capacità del modello stimato di riprodurre il funzionamento reale del sistema attraverso il confronto tra i valori sperimentali e modellati. Calcolando, a questo punto, la matrice di confondimento per la porzione dei dati utilizzati in fase di stima, è possibile costruire la relativa curva ROC. Ripetendo questo procedimento cambiando la porzione dei dati di validazione e la soglia che stabilisce la regola previsionale, è possibile ottenere un valore minimo, medio e massimo per l'indice AUC. Il valore medio complessivo così determinato rappresenta un valore più realistico della capacità di prevedere il futuro.

4.5.5 Software per le carte del rischio

Constatata la precisione dei modelli ottenuti, si è pensato infine di estenderne l'utilità sviluppando un apposito codice di calcolo con lo scopo di elaborare la previsione di probabilità di franamento in base ai dati di previsione meteorologica e sfruttando i modelli analitici determinati in fase di analisi.

Questo è stato possibile utilizzando il portale disponibile all'indirizzo web <https://jsfiddle.net> ed il codice di calcolo sviluppato principalmente dal Dottor Ing. Gabrieli. Il software consente di acquisire in tempo reale la carta di probabilità corrispondente al modello inserito, e quindi alle zone considerate, e ai dati

La frana del Tessina

pluviometrici forniti. Un esempio del layout del programma è riportato in *Figura 4.31*.

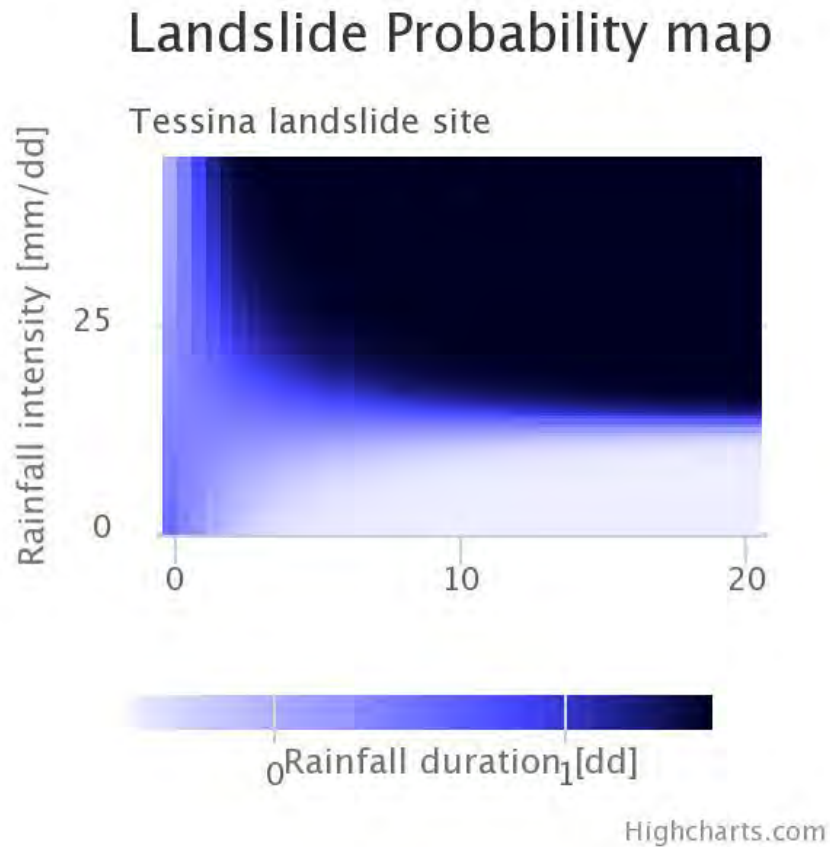


Figura 4.31 – Layout del software

Grazie all'automazione del processo è possibile acquisire in tempo reale i dati di previsione pluviometrica direttamente dal sito <http://lstat.gest.unipd.it/landslide/>.

Infine, un importante sviluppo futuro di questo software potrebbe essere quello di aumentare la potenzialità del codice di calcolo automatizzando anche la fase di generazione del modello analitico sulla base dei dati storici, acquisiti automaticamente, caratteristici dei vari eventi.

La frana del Tessina

CONCLUSIONI

In conclusione quindi, nonostante il basso costo, le difficoltà ed i difetti del sistema di monitoraggio fotogrammetrico, tale sistema sembrerebbe essere adeguato per un primo studio del comportamento di un fenomeno franoso di questo tipo, in quanto, integrando le informazioni ricavate dalla stazione meteorologica dell' ARPAV, 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.

In questo lavoro, sfruttando anche i risultati ottenuti da studi precedenti e la conseguente suddivisione in zone, si sono svolte tre principali analisi statistiche:

- Modello di regressione: consente di definire una soglia di innesco per l'intensità di precipitazione efficace, cioè antecedente l'innesco del versante, sulla base dei dati acquisiti dai precedenti eventi di frana. Il modello ottenuto, composto da tutte le variabili dipendenti significative per questa soglia, presenta una precisione molto elevata pari al 96% . Risulta quindi adatto come metodo di previsione del fenomeno. Sebbene risulti un modello molto valido per lo studio della relazione tra piogge e spostamenti, fa riferimento, però, ai soli eventi tipo C e cioè a quei eventi caratterizzati sia da spostamento che da precipitazione. La "base dati", composta anche da eventi tipo A e B, non è perciò completamente sfruttata, non essendo questo un modello previsionale generale ma basato solamente su situazioni estreme come importanti movimenti o semplici colate di lieve entità.
- Soglia pluviometrica: definisce un valore di intensità di pioggia minima necessaria per determinare l'innesco della frana. Costituisce quindi un sistema di prima previsione ed allarme per i possibili movimenti del versante basato sui valori di intensità e durata della precipitazioni. Nel caso in esame, la retta di interpolazione lineare nel grafico a scala logaritmica è stata determinata sia per gli eventi tipo A e C, differenziando opportunamente le variabili di intensità e durata in funzione del tipo di evento considerato. In particolare, per gli eventi A, la retta indica la soglia sotto la quale una data combinazione di intensità e durata non dovrebbe comportare un'attivazione del movimento dell'area. Per gli eventi C la retta indica la soglia oltre la quale una data

La frana del Tessina

combinazione di durata ed intensità porta al movimento del versante. La precisione dei modelli ottenuti non è però soddisfacente come nel caso della regressione e si è, perciò, cercato di giustificare le anomalie emerse. In particolare, si è provveduto a spiegare la presenza di punti tipo A sopra e punti C sotto la retta di innesco. Le varie analisi e prove eseguite non hanno però confermato le attese ed hanno avuto esito negativo. Unica eccezione riguarda l'analisi dei punti C sottostanti la curva di innesco per le zone 7, 8 e 9 e cioè a quei punti in cui, sebbene contraddistinti da una coppia di intensità-durata che non dovrebbe portare ad alcuno spostamento, il versante ha comunque subito fenomeni di instabilità di diversa entità. In questo caso, l'analisi sulla precipitazione cumulata nel sottosuolo ha confermato che l'innesco del versante dipende dalla precipitazione cumulata nei giorni antecedenti ai nove giorni precedenti l'innesco. La bontà di questa analisi è stata poi migliorata facendo riferimento ai valori medi e percentili di intensità per data durata, ottenendo un generale aumento di affidabilità del modello. Agli eventi A è associato il percentile 95% e quindi a significare che solamente il 5% degli eventi A ha una coppia durata-intensità sopra a tale retta. Viceversa, agli eventi tipo C è associato il percentile 5% e quindi a significare che nel 95% dei casi in cui si ha movimento del versante l'evento presenta una coppia durata-intensità superiore alla retta di innesco. Anche questi modelli, come il precedente, dato l'obiettivo di studiare il legame tra precipitazione e spostamento, non utilizzano completamente la "base dati" acquisita nel tempo durante la fase di monitoraggio in quanto vengono esclusi dall'analisi gli eventi tipo B caratterizzati dal solo spostamento in assenza di precipitazione. È quindi un metodo previsionale basato sulle situazioni di spostamento avvenute in concomitanza ad eventi meteorologici.

- Carta del rischio: è l'evoluzione dei precedenti approcci e consente di individuare i fattori che governano maggiormente il rischio di frana per poi definire delle rappresentazioni grafiche atte ad individuare la probabilità di accadimento dell'evento di franamento in base ai valori assunti da tali fattori. A differenza delle precedenti analisi, viene utilizzato l'intero dataset ed è quindi un metodo generale basato non unicamente sugli eventi meteorologici con spostamento ma interessa anche eventi caratterizzati dal solo spostamento

La frana del Tessina

(evento B) precedentemente esclusi. Per entrambi i due gruppi di zone sono state svolte due diverse analisi; la prima per tenere in considerazione la totalità delle variabili a disposizione e la seconda, più semplice e di facile interpretazione, basata sulle sole variabili intensità media e durata. Dalla prima è emerso che, per entrambi i gruppi, oltre alle variabili intensità media e durata, una significativa rilevanza è assunta dall'intensità massima di precipitazione che governa in modo preponderante il rischio di frana. Inoltre, in entrambi i gruppi si è visto che un aumento dell'intensità media e durata della precipitazione causa una riduzione della probabilità di franamento, mentre un incremento dell'intensità massima ne aumenta la probabilità. I modelli ottenuti, composti da queste variabili dipendenti, presentano una capacità di prevedere gli eventi franosi pari all'88% per il primo gruppo di zone e del 89,6% per il secondo gruppo. Nella seconda analisi i modelli ottenuti presentano, invece, andamenti differenti tra i due gruppi. Per le zone apicali si nota la presenza di una soglia di intensità di precipitazione dalla quale si osserva una variazione della modalità di risposta del terreno. Sotto a questa soglia la probabilità di accadimento presenta un andamento decrescente all'aumentare della durata del fenomeno, viceversa, sopra la soglia l'aumento della durata comporta un aumento di probabilità. Per le restanti zone, invece, il modello è caratterizzato da una relazione di tipo lineare tra le due variabili che porta quindi il grafico ad avere una diminuzione della probabilità di franamento con l'aumento della durata dell'evento meteorico per un dato valore di intensità. Viceversa, per un dato valore di durata, un aumento d'intensità media di precipitazione porta ad un incremento della probabilità. L'andamento di ognuno di questi grafici è stato giustificato ricorrendo ai concetti di conducibilità idraulica e di modalità di infiltrazione della precipitazione nel terreno (Horton e SCS). I modelli così ottenuti presentano una capacità di prevedere gli eventi franosi pari all'75,5% per il primo gruppo e del 70% per il secondo gruppo di zone. A completare l'analisi, è stata poi costruita la carta del rischio corrispondente alla totalità delle zone considerate per le sole variabili intensità media e durata. In questo caso, l'andamento è simile al grafico delle zone apicali che sembrano perciò governare in maniera preponderante il rischio di frana nell'area in esame. Il modello presenta una

La frana del Tessina

precisione e una capacità di prevedere l'evento franoso pari al 69%. Tale modello risulta di elevata importanza in quanto può fornire un primo segnale di allarme generale per l'intera area dalla quale poter partire poi con le successive analisi, specifiche per i due gruppi di zone.

Si specifica, infine, che i risultati ottenibili da questi approcci, 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.

È inoltre importante osservare che un esito positivo della fase di stima e validazione dei modelli ottenuti costituisce condizione necessaria, ma non sufficiente, per garantire la qualità del modello come strumento previsionale. Ciò è dovuto al fatto che il suddetto confronto tra valori sperimentali e modellati è necessariamente condotto con riferimento allo stato attuale (presente) del sistema, e non vi è a priori nessuna garanzia che le relazioni funzionali che esprimono i legami di causa-effetto tra le variabili non subiscano mutamenti "strutturali" nel tempo, soprattutto se le previsioni si riferiscono ad orizzonti temporali di lungo periodo. È comunque evidente che questa potenziale "debolezza" risulta ineliminabile proprio in quanto è insita nell'utilizzo previsionale del modello.

Concludendo, il giudizio complessivo sul sistema di monitoraggio e di analisi visivo-statistico è senz'altro buono, soprattutto in riferimento alle carte del rischio. 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 al fine di ottenere un sistema efficace che consenta di ricostruire in modo stereografico la morfologia dell'area di frana e la distribuzione tridimensionale degli spostamenti.

La frana del Tessina

BIBLIOGRAFIA

P. Gasparetto (2001), “Rimozione programmata del materiale di deposito della frana del Tessina in comune di Chies d’Alpago”, Progetto Preliminare, IQT Consulting, Rovigo, pp. 2-3.

F. Villa, L. Colombo e A. Veroli (1993), “Idrogeologia, foto interpretazione e tipologia delle opere progettate: i pozzi verticali”, Studi sulla Frana del Tessina - contributo B, pp. 2-5.

G. Dal Farra (2009), “Lavori di potenziamento della capacità drenante della galleria del Tessina”, Progetto n° 800 - Relazione Tecnico Illustrativa, Genio Civile di Belluno, pp. 1-7.

M. Zoppè (Anno Accademico 2011/2012), “Misura degli spostamenti superficiali della frana del Tessina da analisi di immagini”, tesi di laurea triennale, Padova.

L. Vettore (Anno Accademico 2012/2013), “Relazione tra spostamenti e precipitazioni nella frana del Tessina”, tesi di laurea magistrale, Padova.

S. Cola, N. Calabrò, P. Simonini, G. Marcato, A. Pasuto, S. Silvano (2009), “Analisi dell’evoluzione della frana del Tessina per la messa a punto di criteri di previsione”, The first Italian Workshop on Landslide - Volume 2, Fondazione Giovanni Angelini - Convegno del 2/10/2009 sulla Frana del Tessina - Belluno, pp. 1-6.

Genio Civile di Belluno (2009), “Monitoraggio Frana del Tessina, Comune di Chies d’Alpago (BL)”, periodo: aprile 2007 - agosto 2009, formato digitale: relazione Tessina IV-V anno cap 7.

Fondazione Giovanni Angelini (2011), “La Frana del Tessina: Laboratorio naturale per la ricerca applicata alla protezione del territorio”, di Ester Cason Angelini, Scripta edizioni, ISBN 978-88-86106-35-1.