



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**STUDIO SULLA PREVISIONE DEI FENOMENI
FRANOSI NELL'AREA DEL MAROSTICANO
(PROVINCIA DI VICENZA) PER
UN'EFFICACE ANALISI COSTI/BENEFICI
DEGLI INTERVENTI DI PREVENZIONE**

Relatore: Dott. Mario Floris

Laureando: Giorgio Salbego

ANNO ACCADEMICO 2013 / 2014

INDICE

INTRODUZIONE	5
ANALISI A PICCOLA SCALA	7
1. Inquadramento Geologico	7
1.1. L'area del Marosticano.....	7
1.2. I movimenti franosi	9
2. L'evento del Novembre 2010	11
3. Analisi statistica	15
3.1. Introduzione.....	15
3.2. L'analisi Frequency Ratio	16
3.2.1. Metodologia dell'analisi.....	16
3.3. Analisi statistica con Buffer dei punti IFFI	19
3.3.1. Riclassificazione fattori predisponenti	19
3.3.2. Risultati dell'analisi statistica.....	20
3.3.3. Predictive Rate Curves e capacità previsionale.....	27
3.4. Analisi statistica con aree d'innescio.....	29
3.4.1. Riclassificazione dei fattori predisponenti	30
3.4.2. Risultati dell'analisi statistica.....	30
3.4.3. Predictive Rate Curves e potere previsionale.....	37
3.5. Considerazioni sull'analisi statistica	40
ANALISI A GRANDE SCALA	41
4. Modellazione Numerica	41
5. Analisi costi-benefici	51
5.1. Quadro economico generale.....	53
5.2. Interventi da attuare.....	53
5.3. Molvena.....	54
5.4. Altri casi analizzati.....	59
5.5. Considerazioni sugli interventi di prevenzione	61
6. Conclusioni	63
Allegato 1	67
BIBLIOGRAFIA	69

INTRODUZIONE

La presente tesi è volta a comprendere i principali fattori che determinano lo sviluppo delle frane, con l'obiettivo di definire se queste siano prevedibili e se un intervento preventivo sia economicamente conveniente rispetto a non agire e dover riparare i danni a dissesto avvenuto.

Lo studio ha previsto l'analisi a piccola scala della porzione Marosticana della Provincia di Vicenza, area nota poiché solitamente soggetta a numerosi fenomeni franosi (Dal Prà, 1990), che coinvolgono principalmente i depositi di alterazione delle rocce vulcaniche presenti. L'attenzione è stata posta sui dissesti avvenuti durante le intense precipitazioni del Novembre 2010: queste ultime hanno messo in risalto la totale assenza di interventi di prevenzione nel territorio, oltre alla scarsa attività di manutenzione delle opere già esistenti, fornendo un'ottima occasione per valutare i costi di una possibile prevenzione degli eventi franosi rispetto alle spese legate ai danni causati dai dissesti. È stata quindi condotta un'analisi di tipo statistico, utile per avere una stima della suscettibilità da frana del territorio in questione e, soprattutto, per avere un'indicazione su quali siano i fattori che predispongono maggiormente un versante a subire una frana in questo particolare contesto. Nonostante la presenza di numerose segnalazioni relative agli eventi franosi avvenuti nel Marosticano, la mancanza di fondi ha reso però impossibile lo studio approfondito di ogni dissesto e, per questo motivo, la tesi in questione è stata realizzata trattando specifici ambiti comunali, portando lo studio ad una scala maggiore: è stata quindi svolta un'analisi di tipo numerico relativa ad un unico versante, che ha permesso di capire se un particolare intervento di abbassamento della tavola d'acqua può essere sufficiente a stabilizzare maggiormente il terreno ed evitare in anticipo il verificarsi del dissesto. Successivamente, le considerazioni ipotizzate nel modello numerico sono state ritenute valide anche negli altri casi in studio, rendendo possibile una più specifica analisi costi/benefici: questa, realizzata sui fenomeni franosi nelle municipalità di Molvena e di Carrè, è stata portata a termine per studiare da un punto di vista economico la convenienza dell'intervento di abbassamento della falda trattato nella modellazione numerica. Non va dimenticato, infatti, che l'aspetto economico

è un punto cruciale per tutte le amministrazioni comunali a cui spetta la decisione di intervenire o meno sul territorio.

ANALISI A PICCOLA SCALA

1. Inquadramento Geologico

1.1. L'area del Marosticano

L'area in studio è situata in Provincia di Vicenza (Veneto), a nord dello stesso capoluogo, nella zona collinare conosciuta come “Marosticano” (Figura 1). La storia geologica di quest'area è riconducibile agli sviluppi paleogeografici della Piattaforma di Trento: quest'ultima, infatti, era una regione a sedimentazione carbonatica di mare poco profondo fino al Giurassico inferiore, quando è annegata al di sotto della zona eufotica ed è diventata un plateau pelagico, permettendo la deposizione di circa 150-300 metri di sedimenti in circa 120 milioni di anni (tra cui si ricordano il Rosso Ammonitico, la Maiolica e la Scaglia Rossa).

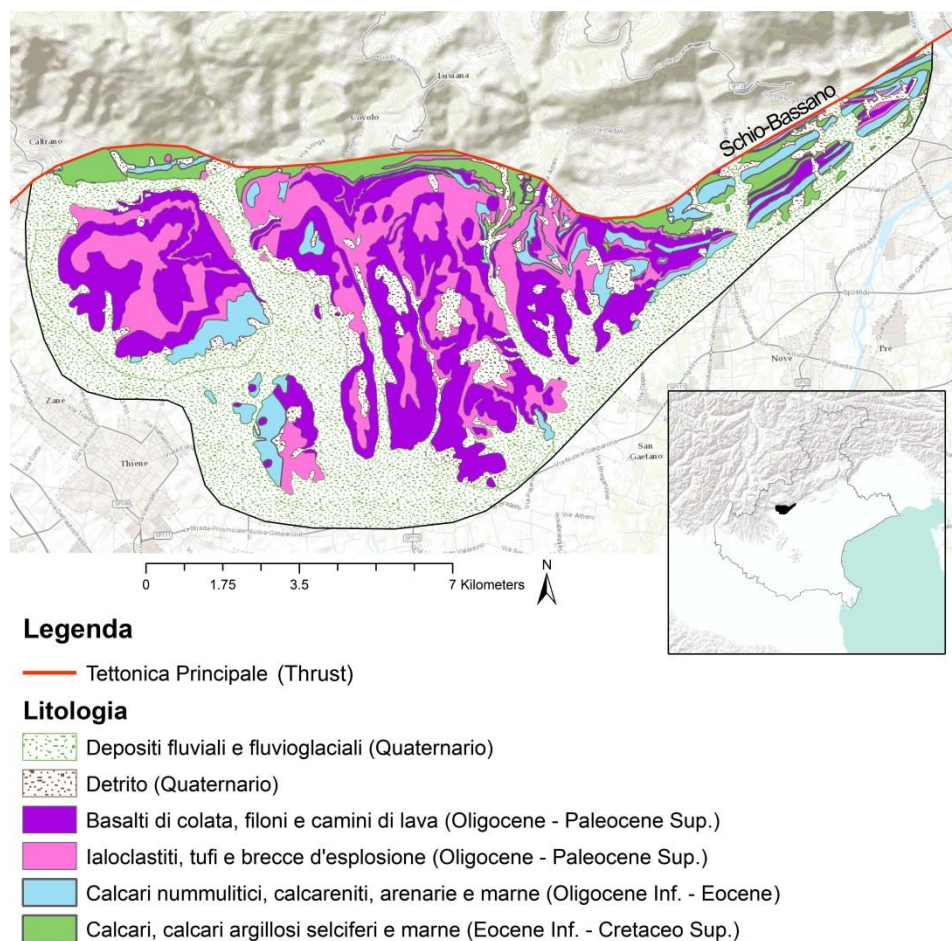


Figura 1 Carta litologica dell'area in analisi (dato vettoriale della Provincia di Vicenza)

Dall'apertura della Tetide nel Mesozoico fino all'inizio della collisione Alpina nel Cenozoico, l'area è stata interessata dalla tettonica estensionale, con la conseguente formazione di una morfologia ad horst e graben: gli alti strutturali hanno permesso la formazione di una nuova piattaforma carbonatica nota come "Lessini Shelf", la quale è stata interessata prima dalla deposizione di calcari argillosi, selciferi e nummulitici dal Cretaceo Superiore all'Oligocene Inferiore (Bosellini, 2004) e, successivamente, dall'attività vulcanica Paleo-Oligocenica. Dal Miocene Medio-Superiore il blocco dei Lessini è stato coinvolto nella tettonica responsabile della formazione delle Alpi, con un trend compressionale di direzione ENE-WSW. A confronto con i settori più orientali ed occidentali delle Alpi Meridionali, i Lessini hanno subito un minor accorciamento, dovuto probabilmente al comportamento più rigido della Piattaforma di Trento rispetto a quello del Bacino Lombardo.

La fase più importante relativamente al presente elaborato è quella vulcanica, in quanto ha generato quelle litologie le cui alterazioni hanno costituito i depositi più interessati dai fenomeni franosi. Tale fase è avvenuta a partire dal Paleocene Superiore (58 Milioni di anni fa) fino al Miocene Inferiore (15-20 Milioni di anni fa). L'ipotesi più accreditata (Barbieri et al., 1982) prevede 12 fasi eruttive principali, separate da periodi più o meno lunghi di stasi: la prima fase coinvolge la valle del Chiampo e dell'Agno, successivamente il vulcanismo si sposta verso Verona, tra il Paleocene e l'Eocene. Nell'Eocene Medio è interessato il Trentino meridionale, mentre nell'Eocene superiore si ha una stasi generale ad esclusione dei Colli Euganei. Dall'Oligocene Medio viene coinvolto il Marosticano, area studio di questa tesi, infine a Priabona si rintracciano le ultime manifestazione dell'attività vulcanica. La genesi del vulcanismo veneto è da rintracciare nella tettonica estensionale in direzione ENE-WSW attiva nel Paleocene e nell'Eocene (Zampieri, 1995), che ha portato alla fusione parziale del mantello superiore alla profondità di circa 70 km (De Vecchi, 1976b). Le vulcaniti presenti in corrispondenza dei Lessini si sono accumulate all'interno del graben dell'Alpone-Agno, sviluppatosi in direzione NNW-SSE e delimitato dalla faglia di Castelvero e quella Schio-Vicenza (Barbieri et al., 1991). Anche i prodotti del Marosticano si sono impostati all'interno di un graben, delimitato ad est da una faglia probabilmente situata vicino a Bassano e ad ovest dalla stessa faglia Schio-Vicenza, con rigetto opposto rispetto alla precedente. Entrambi i graben e le

attività vulcaniche sono compatibili con la direzione principale degli stress già illustrata. Le numerose stasi e spostamenti dell'attività vulcanica hanno generato in una prima fase rocce alcaline, successivamente sostituite da rocce a tendenza tholeiitica nelle manifestazioni più tardive: i prodotti dell'attività eruttiva sono basici, come basalti, tufi e prodotti di disfacimento quali ialoclastiti e breccie. Numerose sono le tracce lasciate dall'attività vulcanica, come camini di alimentazione, intrusioni sub-vulcaniche con formazione di lave a fessurazione colonnare, colate subaeree e subacquee e una vasta gamma di prodotti piroclastici. Le alterazioni tipiche delle suddette rocce basiche di tipo vulcanico sono rappresentate dai minerali delle argille, definite come fillosilicati alluminiferi idrati contenenti proporzioni variabili di Mg, Fe, Na, K e Ca. Il profilo tipico nei versanti interessati dall'attività vulcanica, in linea di massima, prevede il bedrock costituito da basalti o tufi, a cui è sovrapposto uno strato di eluvium: questo, derivato dall'alterazione in situ del bedrock, presenta depositi clasto-sostenuti, con porosità intraclastica e occlusa da matrice limoso-argillosa, con elementi basaltici rotondeggianti, cariati e di dimensioni dal decimetro al millimetro. Più in alto nel profilo del suolo si ritrova infine il colluvium, formato anche in questo caso da sedimenti in matrice limoso-argillosa, ma con clasti di varie dimensioni di origine vulcanica provenienti da ciò che viene eroso più a monte; la porzione più superficiale di quest'ultimo deposito di copertura è spesso dipendente dall'attività antropica legata alla movimentazione del terreno nella varie fasi agricole (dissodatura, spietramento, ecc.).

1.2. *I movimenti franosi*

Le tipologie di frane che tipicamente si possono rinvenire nel territorio sono gli scivolamenti rotazionali e le colate. Le frane sono definite come movimenti di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante per azione della forza di gravità (Cruden, 1991). Gli scivolamenti rotazionali (Figura 2) sono movimenti di terra che possono subire o meno deformazioni, la cui superficie di taglio curva dipende dall'omogeneità litologica o granulometrica, con possibile presenza di scarpate multiple. In pianta questi assumono solitamente una forma ellittica, con una mezzaluna che identifica l'area di innesco/distacco e la restante parte che rappresenta l'area di accumulo.

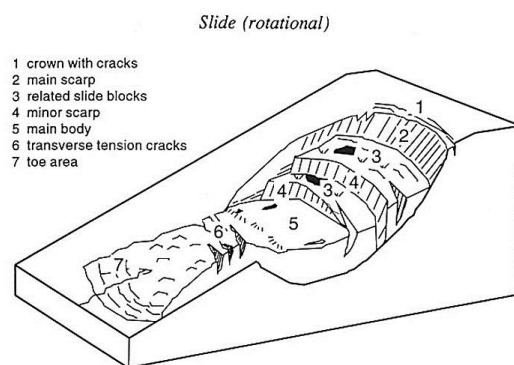


Figura 2 Scivolamenti rotazionali, schema (Dikau et al., 1996)

Le colate (Figura 3), invece, sono movimenti di terra che possono avere velocità molto differenti e interessare volumi diversi. In pianta hanno una forma molto più sviluppata in lunghezza rispetto agli scivolamenti, con una morfologia a lobo nella parte terminale dove si accumula il materiale colato. Bisogna inoltre sottolineare che un fenomeno può nascere presentando un certo tipo di movimento ed evolversi cambiando la stessa cinematica: una frana nata come scivolamento, ad esempio, può evolversi in una colata inglobando acqua al suo interno.

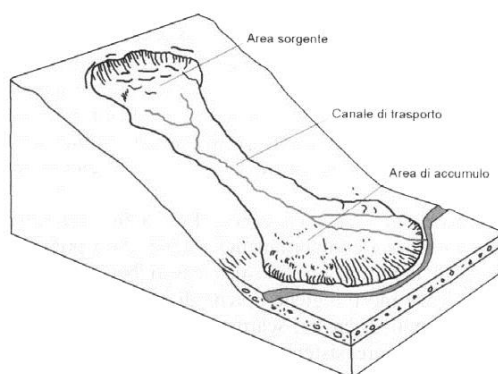


Figura 3 Colate, schema (Cruden e Varnes, 1996, modificato)

In generale, nel caso del Marosticano e dei Lessini, i dissesti avvengono solitamente in depositi limoso-argillosi (colluvium ed eluvium), con una profondità del piano di scivolamento variabile da 1,5 m a 7,0 m (dato desunto dalle numerose relazioni tecniche e da studi effettuati in passato). Si rimanda al Capitolo 3 per un'analisi approfondita delle caratteristiche e dei fattori maggiori che influenzano tali frane.

2. L'evento del Novembre 2010

Lo studio in questione ha lo scopo di analizzare alcune delle frane avvenute a seguito delle intense precipitazioni che hanno colpito la provincia di Vicenza dalla notte del 31 Ottobre alla notte del 2 Novembre. Con una precipitazione media di 336 mm e una massima cumulata di 500 mm in due giorni, tali piogge hanno causato una delle più gravi alluvioni degli ultimi 100 anni, forse paragonabile a quelle del Novembre 1966 e dell'Ottobre 1992. I fiumi Bacchiglione, Astico e Retrone sono straripati, causando notevoli disagi a Vicenza e nei comuni confinanti (Floris et al. 2012). Si sono verificati inoltre molti dissesti nella parte settentrionale e occidentale della provincia, che hanno coinvolto principalmente le porzioni più superficiali di terreno e le coperture detritiche; in quota, la principale conseguenza è stata la destabilizzazione della rete stradale, oltre ad un certo numero di abitazioni danneggiate. Si stima che i soli costi di risistemazione ammontino a circa 80 milioni di euro e si contano circa 1 miliardo di euro di perdite tra infrastrutture, attività industriali ed edifici privati. Come mostra la Figura 4, la massima altezza di precipitazione è stata raggiunta il 1 Novembre.

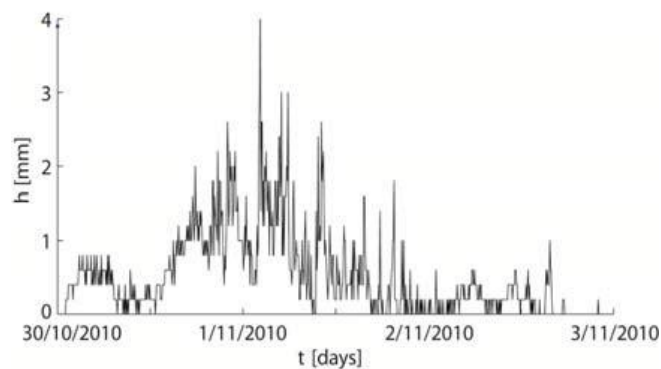


Figura 4 Altezze di precipitazione misurate ogni 5 minuti alla stazione di monitoraggio Ceolati durante l'alluvione del 2010.

Nei mesi successivi all'alluvione sono stati effettuati 554 sopralluoghi sul territorio della Provincia, ognuno dei quali può essere tradotto in un dissesto più o meno esteso. Come si può notare in Figura 5, la maggior parte dell'area montana

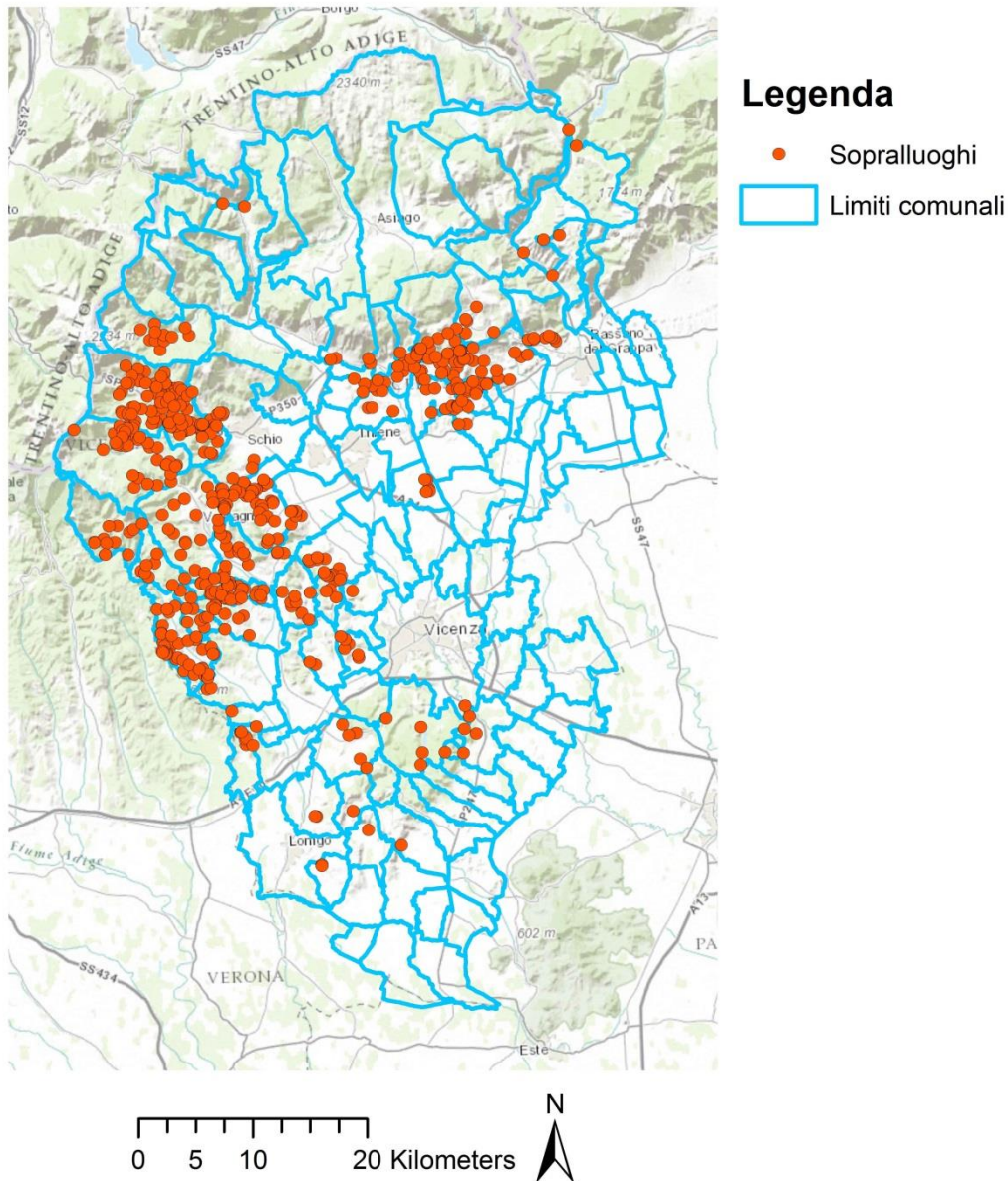


Figura 5 Sopralluoghi effettuati in provincia di Vicenza dopo l'alluvione del 2010

non presenta movimenti franosi (con la sola eccezione della zona di Valli del Pasubio e Recoaro Terme); in questa porzione di territorio, tale assenza di frane va ricercata nella presenza di calcari e dolomie, rocce meccanicamente molto resistenti che sporadicamente possono generare fenomeni di crollo o ribaltamento.

Inoltre le aree montuose tipicamente sono meno abitate e meno frequentate rispetto a quelle di collina e, perciò, sono meno soggette al controllo umano, fatto che comporta una naturale diminuzione delle segnalazioni effettuate. Anche per questo motivo l'area pedemontana è quella in cui vi è il maggior numero di dissesti, più precisamente in corrispondenza dei Monti Lessini (situati a Nord-Ovest di Vicenza e a Sud di Schio) e dei territori attorno a Marostica (a Nord di Vicenza). L'assetto stratigrafico e litologico di queste aree riveste senza dubbio un ruolo fondamentale in termini di predisposizione al dissesto: in entrambi i contesti vi sono litologie vulcaniche quali basalti, tufi e ialoclastiti. Queste rocce alterano nei minerali delle argille, che danno luogo a terreni meccanicamente meno resistenti rispetto alle rocce da cui derivano e la cui stabilità dipende molto dalla quantità d'acqua presente nel sottosuolo: se da un lato, infatti, le argille sono note come impermeabili, dall'altro possono adsorbire l'acqua e dar luogo a fenomeni di rigonfiamento e contrazione, che agiscono a sfavore della stabilità.

3. Analisi statistica

3.1. Introduzione

Il primo passo verso la comprensione dei fattori che hanno regolato le frane del Novembre 2010 è senza dubbio un'analisi statistica in grado di studiare la ricorrenza storica dei dissesti, dipendentemente dalla posizione geografica in cui questi sono avvenuti. Tale analisi è stata condotta tramite un approccio di tipo statistico-probabilistico, atto a tenere in considerazione la naturale variabilità delle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e geotecniche dei terreni coinvolti da movimenti franosi (Evangeline et al., 2012). Nel dettaglio, è stata utilizzata un'analisi statistica bivariata molto usata, conosciuta come "Frequency Ratio": questa metodologia permette la comprensione dei fattori morfologici, antropici e geologici che predispongono maggiormente un versante al fenomeno gravitativo. Come nella maggior parte dei metodi statistici, inoltre, ogni singolo fattore è suddiviso in categorie di valori e, grazie all'indice chiamato "Frequency Ratio Index" su cui si basa questo tipo di approccio, si possono evidenziare quelle classi di valori che statisticamente sono più interessate dai dissesti (Floris et al., 2011).

Lo scopo ultimo dell'analisi è lo studio della prevedibilità spaziale degli eventi franosi legati all'alluvione del Novembre 2010, conoscendo la distribuzione e le caratteristiche delle frane e i fattori predisponenti in grado di causarle. Durante le elaborazioni statistiche, sono stati considerati in prima istanza solamente quei fenomeni d'instabilità avvenuti prima dell'autunno del 2010. Una volta ottenuta la carta di suscettività da frana "pre-Novembre 2010", gli eventi franosi relativi all'alluvione sono stati utilizzati per verificare se il modello fosse in grado o meno di definire la loro distribuzione spaziale e con che percentuale d'errore.

L'analisi statistica è stata condotta utilizzando il software ESRI ArcGIS™ e i tool relativi ai pacchetti "3D Analyst" e "Spatial Analyst". Per velocizzare l'elaborazione dei dati è stato inoltre creato un modello con lo strumento Model Builder™, che ha permesso una notevole automatizzazione dei procedimenti di calcolo.

3.2. L'analisi Frequency Ratio

Il metodo statistico “Frequency Ratio” è detto “bivariato” poiché prevede l’analisi tra coppie di dataset: in questo caso il dataset delle frane è stato confrontato con il dataset di ogni fattore predisponente preso singolarmente. È stato quindi necessario dotarsi dei data layer relativi ai parametri scelti e del dataset delle frane avvenute all’interno dell’area di studio. I fattori predisponenti considerati sono molteplici e comprendono sia dati numerici (elevazione, pendenza, curvatura, aspect, distanza da strade, distanza da fiumi) sia dati categoriali (litologia e uso del suolo).

3.2.1. Metodologia dell’analisi

Classi	Da(°)	A(°)	N° pixel in classe	N° pixel in frana	Rapporto B	N° pixel non in frana	Rapporto A	F.R.I. (B/A)
1	0	13	2851212	1578	0.374	2849634	0.644	0.581
2	13	23	962963	1789	0.424	961174	0.217	1.952
3	23	33	444093	725	0.172	443368	0.100	1.715
4	33	74	174109	131	0.031	173978	0.039	0.790
Tot			4432377	4223	1.000	4428154	1.000	

Tabella 1 Esempio di svolgimento dell’analisi statistica bivariata “Frequency Ratio”

I dati di input utilizzati sono di tipo raster composti da unità fondamentali (pixel) di dimensioni 5x5 metri. Come si può vedere in Tabella 1, dopo aver suddiviso i fattori in classi (in questo caso, il layer della pendenza diviso in 4 classi), il modello prevede il conteggio del numero di pixel in frana che ricadono all’interno di ogni classe; da tale numero si ricava poi il “Rapporto B” in tabella, che rappresenta la percentuale di pixel in frana in ogni classe rispetto al totale dei pixel in frana. Stessa cosa viene fatta con i pixel non in frana, ottenendo così il valore “Rapporto A”. Il Frequency Ratio Index (F.R.I.) è calcolato mediante il nuovo rapporto tra “Rapporto B” e “Rapporto A”. Se il Frequency Ratio Index è alto (solitamente maggiore di 1,5-2), significa che in quella classe il numero di pixel in frana normalizzato è più alto del numero di pixel non in frana normalizzato; ciò significa che quella classe di valori è in grado di isolare efficacemente le frane di input: è proprio questa classe, quindi, che fornisce indicazioni sul range di valori considerato che predispone maggiormente un versante a franare.

Di seguito i dettagli dei parametri utilizzati:

Elevazione

Il modello digitale del terreno (DEM) è stato ottenuto scaricando i file ASCII dal Geoportale on-line della Regione Veneto, convertendo questi ultimi in file raster “.tif” e mosaicandoli in un'unica immagine. La risoluzione del dato è quella fornita dalla Regione, ossia 5x5 metri.

Pendenza

A partire dal Layer Elevation è stata elaborata la carta della pendenza (“Slope”): definita come derivata topografica prima dell’elevazione, esprime la variazione di quest’ultima in gradi.

Esposizione

La carta dell’esposizione è stata ricavata dal Layer Elevation, e rappresenta la direzione di massima pendenza di ogni versante calcolata per ogni cella rispetto a quelle vicine; è espressa in gradi.

Curvatura

La curvatura delle forme del territorio, definita come derivata topografica seconda dell’elevazione, è stata ottenuta dal Layer Elevation. Presenta valori negativi (concavità verso il basso), positivi (concavità verso l’alto) o nulli (profilo senza curvatura).

Distanza dai fiumi

In questo livello si considera la distanza dai fiumi, in quanto è notoriamente conosciuta la relazione tra i fenomeni franosi e la presenza di acqua superficiale o nel sottosuolo (Lee and Pradhan, 2006); infatti, la presenza di corsi d’acqua in grado di erodere la base dei versanti può generare instabilità, ma anche l’assenza di un reticolo organizzato può essere sinonimo di maggior infiltrazione e, quindi, di minor stabilità. Il dato è stato acquisito in formato vettoriale dal Geoportale della Regione Veneto.

Distanza dalle strade

Uno dei fattori antropici presenti nello studio statistico della zona del marosticano è la distanza delle frane dalle strade; questo è un parametro importante per definire come le frane si distribuiscano attorno alle principali vie di

comunicazione che, insieme ai fabbricati, risultano essere le opere artificiali più esposte ai dissesti. Bisogna inoltre considerare che la costruzione di una strada può essere essa stessa causa primaria di instabilità, poiché il livellamento più o meno orizzontale del versante provoca il detensionamento della parete a monte. Il collasso o la caduta di detrito da tale parete dovuti a precipitazioni eccezionali possono causare notevoli disagi alle comunicazioni, con conseguenti spese dirette di ripristino allo stato originale e costi indiretti di trasporto. Vale perciò la pena approfondire lo stretto rapporto tra le frane e la loro distanza dalle strade. Anche in questo caso il dato è stato acquisito in formato vettoriale dal Geoportale della Regione Veneto.

Uso del suolo

Anche l'uso che viene fatto del suolo è uno dei parametri che si deve considerare dal momento in cui si voglia comprendere quanto l'uomo possa causare squilibri all'interno della dinamica dei versanti. Le attività legate all'uso del suolo, infatti, possono predisporre più o meno pesantemente il terreno a generare fenomeni di instabilità. In questo caso il dato è stato acquisito in formato vettoriale dal Geoportale della Regione Veneto previa richiesta all'amministrazione regionale.

Litologia

All'analisi statistica è stata aggiunta la carta geologica redatta dalla Provincia di Vicenza, derivata dal P.T.C.P.: la litologia è un parametro essenziale in quanto è uno dei principali fattori in grado di predisporre i versanti ai dissesti franosi. Nell'area in studio sono presenti:

- Rocce compatte massicce o a stratificazione indistinta
- Rocce costituite da alternanze di strati o interposizioni tenere e di strati o bancate resistenti
- Rocce compatte stratificate
- Rocce superficialmente alterate e con substrato compatto
- Materiali granulari addensati di deposito fluviale e/o fluvioglaciale a tessitura prevalentemente ghiaiosa e sabbiosa
- Materiali alluvionali, fluvioglaciali, morenici o lacustri a tessitura prevalentemente limo-argillosa
- Copertura detritica colluviale ed eluviale

La definizione del dataset contenente le frane utili alla realizzazione dell'analisi statistica ha rappresentato uno dei passaggi più delicati e problematici dell'intero processo: come discusso in precedenza, il dato di partenza deve considerare solo gli eventi franosi precedenti al Novembre 2010. Poiché sono stati ottenuti dataset puntuali e poligonali, l'analisi è stata ripetuta due volte, secondo l'ordine presente nei Capitoli 3.3 e 3.4. Poiché i dati puntuali rappresentano ogni frana nel suo punto più elevato, è stato aggiunto un Buffer circolare di 10 metri, per cercare di rappresentare al meglio l'area coinvolta dal dissesto. Proprio allo scopo di avere una miglior definizione della superficie di scivolamento ove questa viene a giorno, sono state utilizzate in una seconda analisi le aree d'innescò (Remondo et al., 2003) per le frane di cui è stato possibile ottenere un poligono areale.

3.3. *Analisi statistica con Buffer dei punti IFFI*

La prima analisi statistica è stata realizzata con il dato più numeroso a disposizione e di più facile reperibilità, ossia il dataset puntuale relativo ai fenomeni franosi catalogati all'interno del database IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), per un totale di 68 frane suddivise in:

- 35 Scivolamenti
- 33 Colate (colamenti rapidi, colamenti lenti, aree soggette a frane superficiali diffuse)

3.3.1. Riclassificazione fattori predisponenti

Come molte altre analisi statistiche, i fattori che possono predisporre un versante all'instabilità devono essere suddivisi in opportune classi di valori (Ayalew and Yamagishi, 2004; Guzzetti et al., 1999). Tale riclassificazione è il passaggio più importante dell'intera trattazione statistica, poiché questa è la fase in cui si scelgono i range di valori dei quali si è interessati a studiarne l'influenza nello sviluppo dell'instabilità. Il processo dipende inoltre dalle decisioni dell'utente, per questo la riclassificazione è un lavoro delicato e da compiere con estrema attenzione e cautela. Per quanto riguarda la litologia, ad esempio, non sono state effettuate ulteriori riclassificazioni poiché la suddivisione in litotipi rappresenta essa stessa la normale variabilità delle rocce e delle formazioni presenti.

Analogamente, le numerose suddivisioni dell'uso del suolo sono state riassunte in 12 voci per questione di comodità di calcolo e sintesi del dato. La distanza da strade e da fiumi è stata suddivisa in 6 classi, l'esposizione in 4 classi ognuna da 90° in cui il punto cardinale è presente al centro di ciascuna fascia. Discorso diverso invece vale per l'elevazione, lo slope e la curvatura: in questa prima analisi si è preferito utilizzare il metodo di riclassificazione "Natural Breaks (Jenks)", contenuto nel software ArcGIS: la potenzialità di questo particolare algoritmo matematico è quella di suddividere un insieme di elementi secondo i valori di rottura contenuti in esso. La classificazione, quindi, permette di dividere fattori come la pendenza e l'elevazione in classi all'interno delle quali i valori non subiscono grandi variazioni. Il procedimento svolto è quello spiegato nel Capitolo 3.2.1. Come quanto è stato fatto in precedenti pubblicazioni (Floris et al., 2011), per rappresentare meglio ogni frana in analisi è stato considerato un Buffer di 10 metri attorno ad ogni punto IFFI.

3.3.2. Risultati dell'analisi statistica

L'analisi statistica è stata eseguita considerando separatamente scivolamenti e colate, calcolando gli indici di franosità ("Frequency Ratio Index") per ogni fattore che predispone i versanti ad entrambi i tipi di fenomeno.

I risultati ottenuti sono presenti in Tabella 2.

		SCIVOLAMENTI		COLATE
ELEVAZIONE				
classi	Da (m)	A (m)	F. R. I.	F. R. I.
1	80.00	140.00	0.000	0.329
2	140.00	202.00	0.263	0.887
3	202.00	275.00	1.356	1.545
4	275.00	358.00	2.233	1.733
5	358.00	577.00	5.302	1.474
PENDENZA				
classi	Da (°)	A (°)	F. R. I.	F. R. I.
1	0.00	5.22	0.098	0.535
2	5.22	12.77	1.171	1.225
3	12.77	21.19	1.835	1.369
4	21.19	31.64	1.422	1.504
5	31.64	74.02	2.910	0.795

CURVATURA				
classi	da	a	F. R. I.	F. R. I.
1	-94.15	-11.51	5.546	1.190
2	-11.51	-2.85	1.517	1.795
3	-2.85	1.08	0.746	0.909
4	1.08	8.16	1.640	1.122
5	8.16	106.54	2.033	0.727

ESPOSIZIONE				
classi	Da (°)	A (°)	F. R. I.	F. R. I.
1	315	45	1.520	1.352
2	45	135	0.667	1.144
3	135	225	1.140	0.821
4	225	315	0.917	0.932

DIST. DA STRADE				
classi	Da (m)	A (m)	F. R. I.	F. R. I.
1	0	25	1.693	1.203
2	25	50	2.178	0.371
3	50	75	1.638	1.535
4	75	100	1.056	1.452
5	100	200	0.609	0.698
6	200	end	0.620	1.078

DIST. DA FIUMI				
classi	Da (m)	A (m)	F. R. I.	F. R. I.
1	0	100	0.734	0.374
2	100	200	1.634	2.059
3	200	300	1.393	1.003
4	300	400	0.383	1.138
5	500	1000	0.707	0.759
6	1000	end	0.000	0.650

LITOLOGIA				
classi	denom.	litologia	F. R. I.	F. R. I.
1	L-SUB-01	Rocce compatte massicce	1.069	1.722
2	L-SUB-03	Rocce compatte stratificate	0.974	0.469
3	L-SUB-04	Rocce superficialmente alterate	2.180	1.385
4	L-SUB-05	Rocce costituite da altern. di strati	2.197	1.092
5	L-ALL-01	Depositi fluviali ghiaioso-sabbiosi	0.179	0.323
6	L-ALL-05	Materiali alluvionali limo-argillosi	0.000	0.166
7	L-DET-01	Cop. Detritica colluviale ed eluviale	0.799	1.550
8	L-FRA-01	Accumuli di frana	13.970	0.000

USO DEL SUOLO				
classi	denom.	uso del suolo	F. R. I.	F. R. I.
1	1	Urbane	1.245	1.322
2	3	Ind./comm.	0.000	0.000
3	5	Estr./disc.	0.000	0.000
4	7	Verdi	0.000	0.000
5	9	Arabili	0.000	0.000
6	11	Colt. stag.	0.646	0.000
7	26	Colt. Perm.	0.276	0.251
8	31	Boschive	0.000	1.862
9	56	Erbose	1.356	1.145
10	58	Incolte	1.226	0.804
11	62	Veg. rada	3.132	1.681
12	63	Corpi d'acqua	0.000	0.000

Tabella 2 Frequency Ratio Index ottenuti per tutte le classi dei fattori predisponenti scelti. I valori evidenziati in giallo sono i più elevati all'interno del fattore in analisi

Come si può notare, le due tipologie di frana risultano essere predisposte da differenti classi di valori per ogni fattore analizzato, ad esclusione dell'esposizione e della distanza dai fiumi. Gli scivolamenti, ad esempio, si verificano più facilmente ad elevate altitudini (358-577 m), pendenze ($31,6^{\circ}$ - 74°) e curvature (-94.15- -11.15, 8.16-106.54), si collocano a poca distanza dalle strade (25-5m m), in zone a vegetazione rada e prevalentemente coinvolgono rocce superficialmente alterate, ossia ialoclastiti e tufi. Le colate si ritrovano ad altitudini (275-358 m), pendenze ($21,2^{\circ}$ - $31,6^{\circ}$) e curvature più basse (-11.51 - -2.85), ad una distanza maggiore dalle strade (50-75 m), prevalentemente in aree boschive e coinvolgono un substrato alterato generato da rocce compatte massicce, i basalti. L'analisi spaziale si è rivelata essere dunque molto importante per definire quali siano le differenze tra i diversi ambienti in cui possono avvenire questi due tipi di fenomeni.

È stata successivamente utilizzata la cosiddetta "Success Rate Curve": questa curva diagramma in ascissa la suscettibilità suddivisa in classi decrescenti e in ordinate la percentuale cumulata delle frane osservate nelle stesse classi. Essa viene costruita con le stesse frane che sono state utilizzate per addestrare il modello e fornisce quindi delle indicazioni su quanto il modello riesca a rappresentare le frane osservate. Una curva coincidente con la diagonale dallo 0% al 100% corrisponde ad una rappresentazione totalmente casuale del dataset scelto, mentre più tale curva si allontana dalla diagonale verso l'alto, migliore è il risultato dell'analisi effettuata. Allo stesso modo, maggiore è la pendenza della curva nel primo tratto (ossia quando essa tende molto rapidamente a valori del 100% dell'area franosa), più grande è la capacità del modello statistico di identificare le aree effettivamente dissestate, e la carta di suscettibilità individua come più suscettibili le zone instabili usate come input (Remondo et al., 2003). Per questo motivo, dal grafico in Figura 6 si può desumere che l'analisi statistica effettuata per gli scivolamenti rappresenta meglio le aree franose rispetto alle colate: per queste ultime, infatti, il 70% delle frane nel dataset di input ricade in pixel corrispondenti al 30% dell'area di studio con la massima suscettibilità, percentuale che sale fino al 90% del dataset di input se si considerano gli scivolamenti. Appurato che le curve dovrebbero essere più lontane possibili dalla diagonale 0%-100%, tali valori si possono considerare indicativi di un'analisi statistica molto soddisfacente.

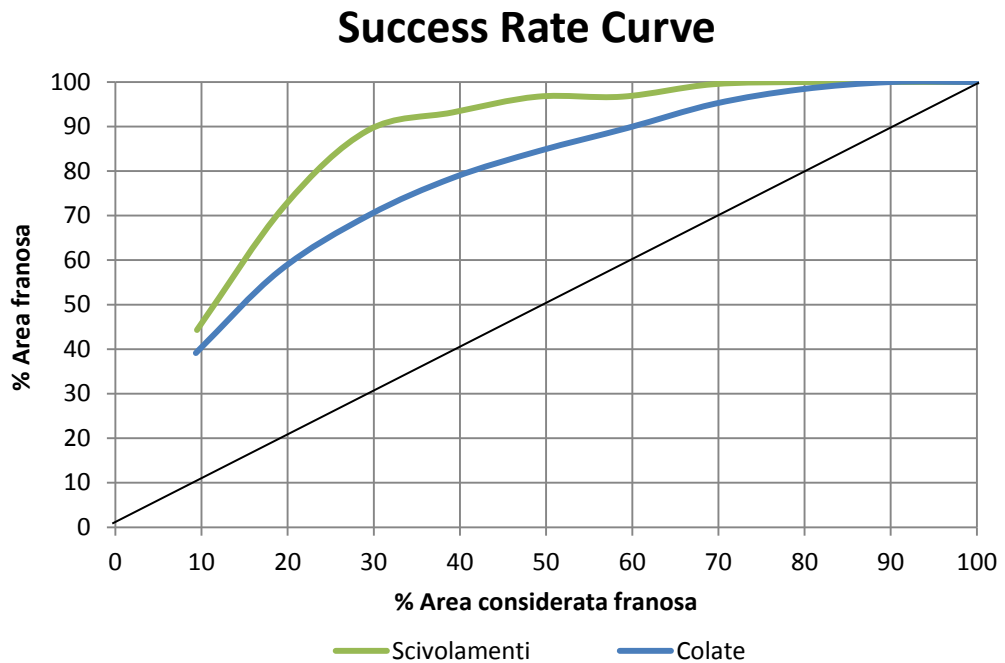


Figura 6 Success Rate Curve per scivolamenti e colate per l’analisi statistica effettuata con un buffer di 10 metri attorno ai punti dell’IFFI. La linea nera rappresenta il trend 0%-100% indice di un’analisi non affidabile

L’analisi statistica in questione permette inoltre la costruzione della cosiddetta “carta di suscettibilità”: questa rappresenta la zona in studio suddivisa in aree a diversa suscettibilità da frana, i cui valori sono stati ottenuti sommando per ogni pixel i Frequency Ratio Index di ogni fattore. Come si può notare dalle Figure 10 e 11, la predisposizione a franare è stata suddivisa in 5 classi di predisposizione, ognuna corrispondente ad un certo range di valori del Frequency Ratio Index totale. Tali range sono stati definiti studiando le varie pendenze della Success Rate Curve di Figura 6: ad esempio, la porzione di curva tra il 10% e il 20% dell’area considerata franosa ha una pendenza diversa dal tratto successivo ed è caratterizzata da un intervallo di valori di indice di franosità pari a 12,35-30, che rappresenta l’area a più alta suscettibilità da frana. Dalle Figure 10 e 11 si può notare come sia confermata la tendenza delle colate ad avvenire ad altitudini minori rispetto agli scivolamenti. Questi ultimi sembrano inoltre concentrarsi soprattutto vicino alla sede stradale: tale fatto è confermato dalla raccolta dati e dai sopralluoghi effettuati durante lo stage al Dipartimento di Difesa del Suolo della Provincia di Vicenza; come avvenuto nel Novembre 2010, infatti, i dissesti

tendono a verificarsi soprattutto vicino alle vie di comunicazione (a seguire le Figure 7, 8 e 9, immagini scattate in quel periodo nell'area del Marosticano).



Figura 7 02/11/2011 - Dissesto a Pianezze



Figura 8 Nov. 2011 - Dissesto a Marostica, strada presente più a monte



Figura 9 Nov. 2011 - Dissesto a Molvena

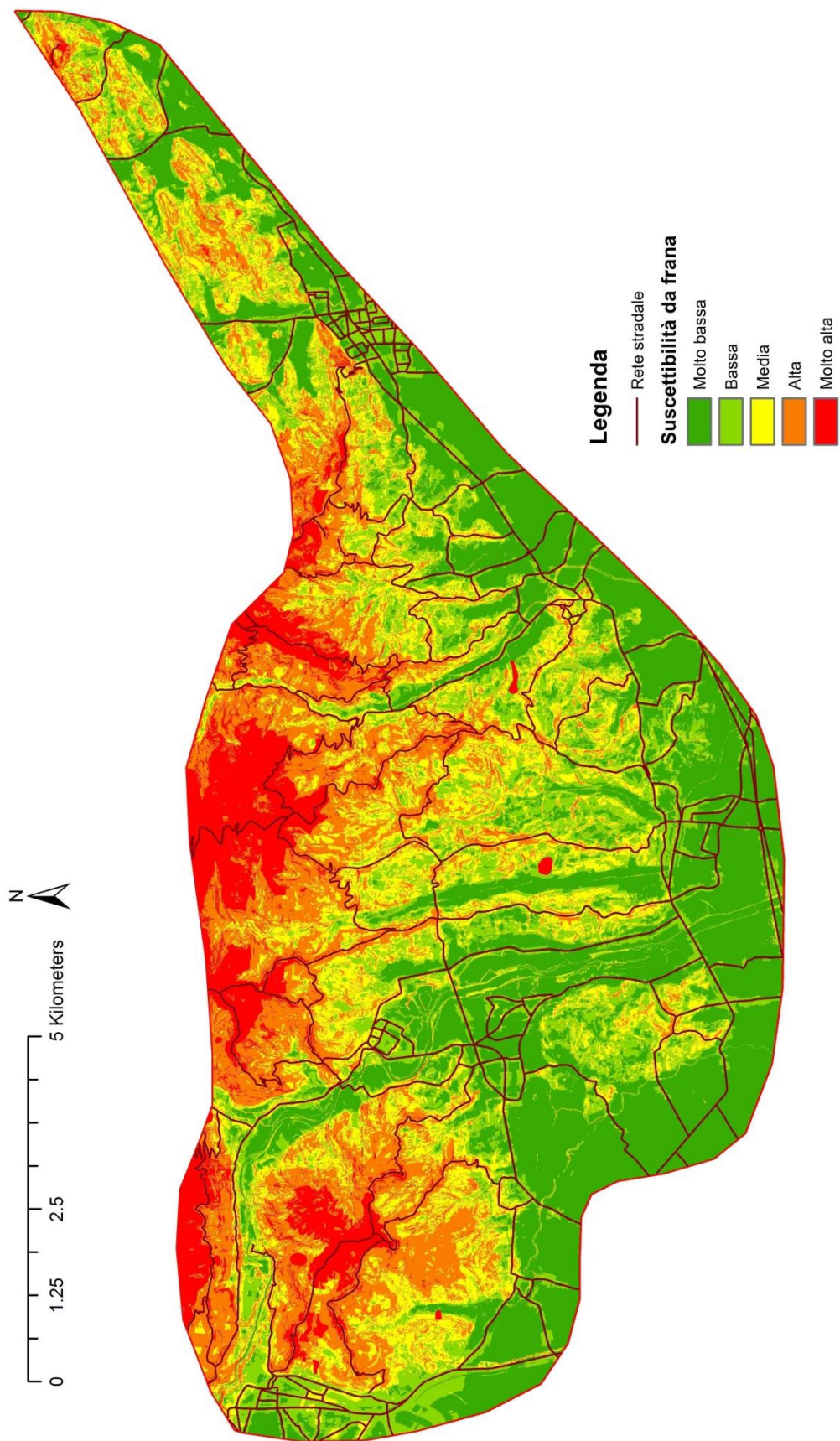


Figura 10 Carta di suscettività da frana dell'area del Marosticano per gli scivolamenti

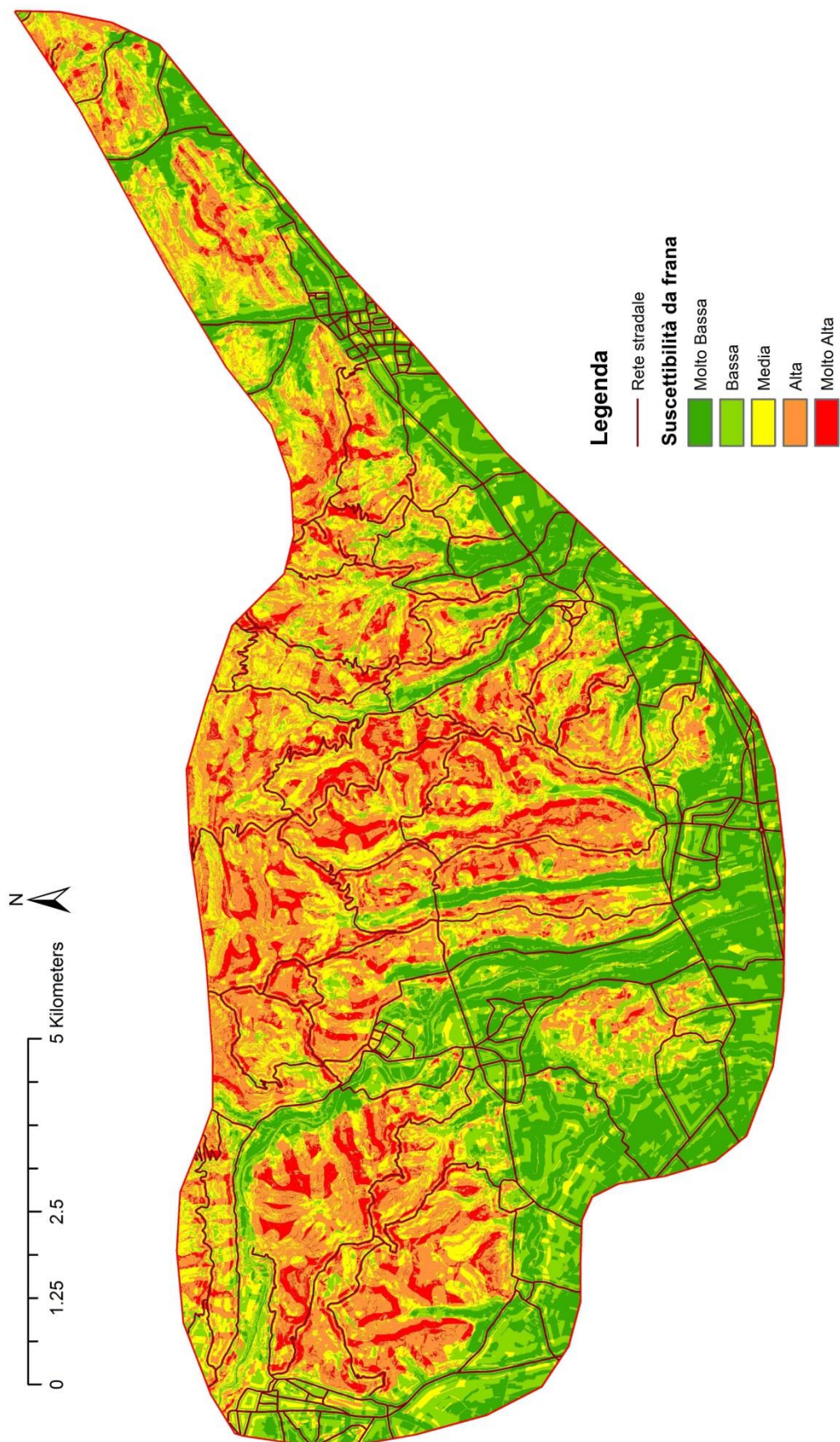


Figura 11 Carta di suscettività da frana dell'area del Marosticano per le colate

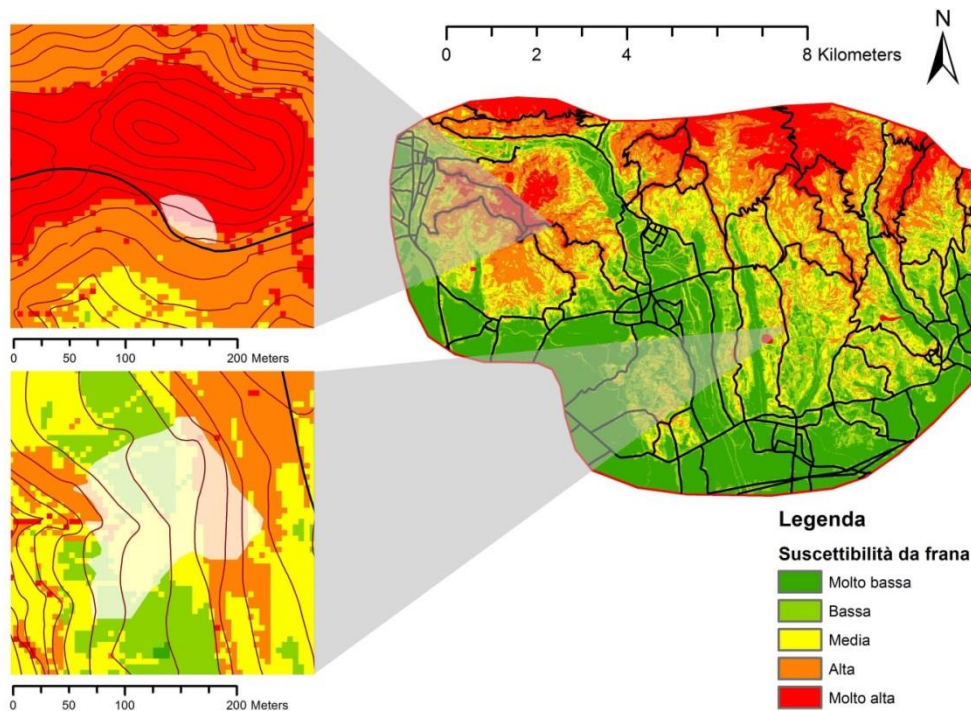


Figura 12 Due esempi di scivolamenti nell’area del Marosticano: in alto a sinistra, via Valdaro a Carrè; in basso a sinistra, via Costa a Fara Vicentino

In Figura 12, alla carta di suscettibilità da scivolamenti è stata sovrapposta la perimetrazione delle frane di scivolamento d’esempio, ossia quella a Carrè in Via Valdaro e quella a Fara Vicentino in Via Costa. Nonostante la carta prodotta non sia in grado di identificare precisamente l’area in frana e quindi di isolare distintamente il fenomeno franoso, in entrambi i casi è in grado di assegnare la maggior suscettibilità da frana all’area di alimentazione, segnata con colori rosso o arancione, e la minor suscettibilità alla zona di accumulo, segnata con colori arancione o giallo-verde.

3.3.3. Predictive Rate Curves e capacità previsionale

Nella bibliografia scientifica esistono due metodologie in grado di stabilire la capacità previsionale di un’analisi statistica di questo tipo: il procedimento tipico (Floris et al., 2011) prevede che il modello sia costruito utilizzando un’area di training e un’area di test, la prima utilizzata per realizzare l’analisi stessa e la seconda per dare indicazioni sulla prevedibilità dei fenomeni. Poiché però gli

eventi di interesse sono avvenuti durante l'alluvione del Novembre 2010, è stata realizzata un'analisi temporale, creando un dataset di training comprendente le frane precedenti al 2010 e un dataset di test/validazione comprendente le segnalazioni giunte al Dipartimento di Difesa del Suolo di Vicenza relative all'evento alluvionale, avvenute subito dopo o in concomitanza alle precipitazioni di quell'anno (Tareq et al., 2011). Nell'ottica della prevedibilità si utilizzano le cosiddette "Predictive Rate Curves": queste sono concettualmente uguali alle "Success Rate Curve", ma presentano la peculiarità di essere costruite a partire da un dataset di validazione, cioè il file vettoriale contenente tutti i sopralluoghi effettuati dopo le precipitazioni del Novembre 2010. Il problema maggiore relativo al nuovo dataset utilizzato è che non esiste una suddivisione tra scivolamenti e colate, e le indagini di campagna svolte durante il periodo di tesi non hanno permesso di assegnare la precisa tipologia di movimento ad ogni dissesto avvenuto a quasi quattro anni di distanza. Alla luce di questo, è stato scelto di usare lo stesso dataset per entrambi i tipi di frana e capire se esistono delle differenze tra le due curve ottenute. Come per le frane IFFI, anche in questo caso ai punti è stato applicato un Buffer di 10 m.

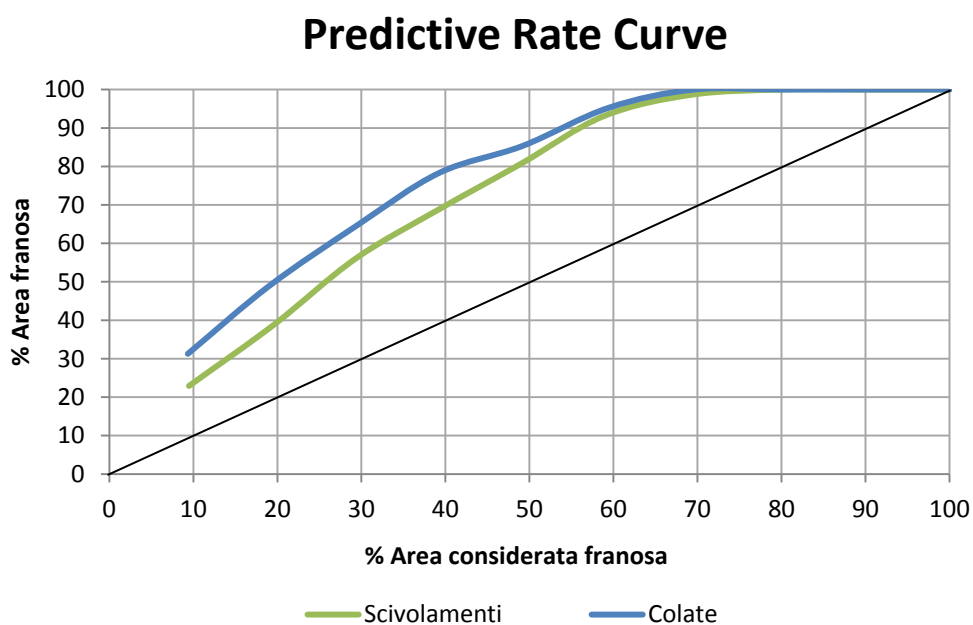


Figura 13 Grafico che rappresenta le Predictive Rate Curve di scivolamenti e colate. La linea nera rappresenta il trend 0%-100% indice di un'analisi non affidabile

Come si può vedere in Figura 13, l'analisi costruita sulle colate ha un maggior potere previsionale rispetto a quella costruita sugli scivolamenti, con una differenza tra le curve di circa il 10%. La Predictive Rate Curve relativa agli scivolamenti mostra che al 30% dell'area considerata franosa corrisponde un valore di circa il 57% dell'area effettivamente franosa: questo, secondo quanto già detto in precedenza, si può comunque ritenere un buon risultato, nonostante le percentuali siano molto diverse rispetto a quelle ottenute per le Success Rate Curve.

3.4. *Analisi statistica con aree d'innescò*

Il limite del dataset vettoriale IFFI appena utilizzato è quello di essere costituito da dati di tipo puntuale, spesso non in grado né di rappresentare la nicchia di frana né tantomeno l'intera superficie di scivolamento. Lo step successivo, quindi, ha previsto la ricerca e l'informatizzazione digitale della perimetrazione delle stesse frane allo scopo di definire l'area d'innescò di ogni fenomeno, che rappresenta meglio la porzione della superficie di rottura che viene a giorno: la quantità e la qualità del dato è stata migliorata per merito soprattutto dell'attività di stage svolta presso il Dipartimento di Difesa del Suolo della Provincia di Vicenza: grazie alla consultazione ivi svolta e alla visita ad alcuni uffici tecnici comunali del Marosticano, sono state recuperate le carte di fragilità in formato raster contenute nei P.A.T.I. ("Piano di Assetto del Territorio Intercomunale") dei comuni presenti nell'area in analisi e i dati vettoriali relativi al P.A.I. ("Piano di Assetto Idrogeologico") e al P.T.C.P. della provincia di Vicenza ("Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale"). Dopo la vettorializzazione dei dati raster, è stato ottenuto un totale di 123 frane, suddivise in:

- 95 frane estratte dai P.A.T.I.
- 14 frane estratte dal database IFFI
- 4 frane estratte dal P.A.I.
- 10 frane estratte dal P.T.C.P.

Sono , quindi, stati aggiunti 27 poligoni corrispondenti a frane perimetrare tramite fotointerpretazione, utilizzando ortofoto scattate tra gli anni '80 e '90 e avvalendosi degli strumenti offerti da ArcGIS (isoipse ricavate dalla CTR

numerica in scala 1:5000 e hillshading). I dissesti perimetrati nell'area studio sono perciò saliti a 150. Grazie alla mole di dati raccolta è stato possibile assegnare a 32 scivolamenti e 24 colate del database IFFI il loro poligono di frana con la propria area d'innescio. L'analisi statistica è stata perciò ripetuta utilizzando questo secondo dato di input: tale approccio ha consentito la definizione del modello migliore tra i due realizzati, permettendo di capire se uno sia più preciso dell'altro (tramite grafici che rappresentano le Success Rate Curve) e se un buffer di 10 metri attorno ad un dato puntuale basti per rappresentare al meglio l'evento franoso.

3.4.1. Riclassificazione dei fattori predisponenti

Anche in questo caso, le due tipologie di fenomeno sono predisposte da diverse classi di valori per ogni fattore analizzato, come per il modello creato mediante i buffer di 10 metri dei punti dell'IFFI, nonostante il file di input sia stato rivoluzionato e le classi siano leggermente differenti. In questo caso, infatti, è stata operata una scelta diversa: la suddivisione dei valori di elevazione, pendenza e curvatura è stata desunta suddividendo ogni fattore in 3, 6 e 9 classi di valori utilizzando sia il "Natural Breaks" sia il "Geometrical Interval" come metodi di classificazione inclusi nel tool specifico di ArcGIS. Così, potendo attingere da sei diverse fonti per ogni fattore, sono stati identificati i Frequency Ratio Index più elevati e le relative classi.

3.4.2. Risultati dell'analisi statistica

Le colate coinvolgono ancora una volta i basalti, e sono predisposte da pendenze tra i 13° e i 23°; gli scivolamenti avvengono principalmente in tufi e ialoclastiti, in pendenze tra i 23° e i 33°. Anche in questo caso gli scivolamenti avvengono più facilmente vicino alle strade e ai fiumi, mentre le colate risentono meno della vicinanza di tali elementi. La vegetazione, invece, predispone ugualmente i versanti ad entrambi i tipi di fenomeno (Tabella 3). L'analisi statistica così svolta sembra essere notevolmente migliore rispetto alla precedente: oltre a presentare Frequency Ratio Index più alti, infatti, è caratterizzata da Success Rate Curve che ricoprono percentuali più elevate, indice di un modello in grado di

ELEVAZIONE				
classi	Da (m)	A (m)	F. R. I.	F. R. I.
1	80	145	0.000	0.000
2	145	245	0.497	1.477
3	245	314	1.671	1.661
4	314	420	3.276	1.668
5	420	577	12.244	1.046
PENDENZA				
classi	Da (°)	A (°)	F. R. I.	F. R. I.
1	0	13	0.411	0.581
2	13	23	2.052	1.952
3	23	33	2.314	1.715
4	33	74	1.504	0.790
CURVATURA				
classi	da	a	F. R. I.	F. R. I.
1	-94.15	-6.00	1.480	1.045
2	-6.00	-2.07	1.641	1.447
3	-2.07	0.29	0.752	0.752
4	0.29	12.73	1.318	1.435
5	12.73	107.00	1.745	0.622
ESPOSIZIONE				
classi	Da (°)	A (°)	F. R. I.	F. R. I.
1	315	45	1.214	0.684
2	45	135	0.707	0.950
3	135	225	1.437	1.162
4	225	315	0.483	0.948
DIST. DA STRADE				
classi	Da (m)	A (m)	F. R. I.	F. R. I.
1	0	25	1.286	0.491
2	25	50	1.650	0.574
3	50	75	1.428	0.981
4	75	100	1.275	1.578
5	100	200	0.658	0.836
6	200	end	0.830	1.231
DIST. DA FIUMI				
classi	Da (m)	A (m)	F. R. I.	F. R. I.
1	0	100	0.462	0.407
2	100	200	1.509	1.699
3	200	300	2.030	1.521
4	300	400	1.107	1.833
5	500	1000	0.255	0.173
6	1000	end	0.205	0.000
LITOLOGIA				
classi	denominazione	litologia	F. R. I.	F. R. I.
1	L-SUB-01	Rocce compatte massicce	1.226	2.496
2	L-SUB-03	Rocce compatte stratificate	1.077	0.000
3	L-SUB-04	Rocce superficialmente alterate	2.663	1.690
4	L-SUB-05	Rocce costituite da altern. di strati	1.060	0.000
5	L-ALL-01	Depositi fluviali ghiaioso-sabbiosi	0.019	0.000
6	L-ALL-05	Materiali alluvionali limo-argillosi	0.000	0.000
7	L-DET-01	Cop. Detritica colluviale ed eluviale	0.000	0.000

USO DEL SUOLO

classi	denominazione	uso del suolo	F. R. I.	F. R. I.
1	1	Urbane	0.761	0.588
2	3	Ind./comm.	0.000	0.000
3	5	Estr./disc.	0.000	0.000
4	7	Verdi	0.000	0.000
5	9	Arabili	0.000	0.000
6	11	Colt. stag.	0.156	0.985
7	26	Colt. Perm.	0.250	0.343
8	31	Boschive	0.316	0.756
9	56	Erbose	1.581	1.079
10	58	Incolte	1.152	1.585
11	62	Veg. rada	6.234	2.249
12	63	Corpi d'acqua	0.000	0.000

Tabella 3 Frequency Ratio Index ottenuti per tutte le classi dei fattori predisponenti scelti

Success Rate Curve

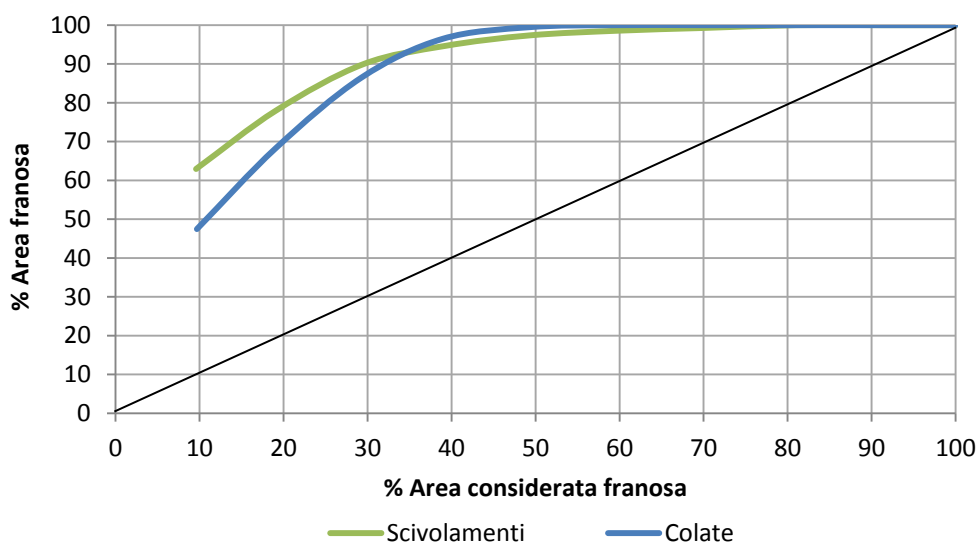


Figura 14 Grafico che rappresenta le Success Rate Curve di scivolamenti e colate. La linea nera rappresenta il trend 0%-100% indice di un'analisi non affidabile

rappresentare molto bene le aree franose utilizzate come input (Figura 14). Nello specifico, la differenza tra le due analisi svolte è meno evidente per gli scivolamenti, il cui grafico in Figura 15 presenta delle curve con andamento differente solamente nella porzione 10%-30% dell'area considerata franosa, e più marcata per quanto riguarda le colate, le cui curve sono molto lontane una dall'altra (Figura 16).

Success Rate Curve - Scivolamenti

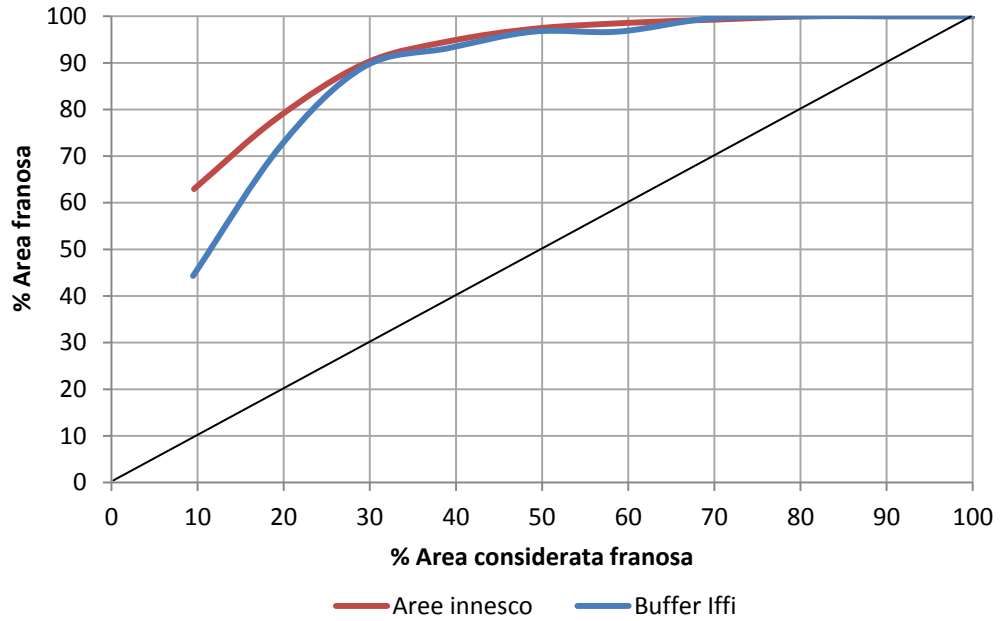


Figura 15 Grafico che rappresenta le Success Rate Curve relative agli scivolamenti ottenute con le due diverse analisi, una realizzata a partire dai buffer dei punti Iffi, l'altra dalle aree innesco delle frane. La linea nera rappresenta il trend 0%-100% indice di un'analisi non affidabile

Success Rate Curve - Colate

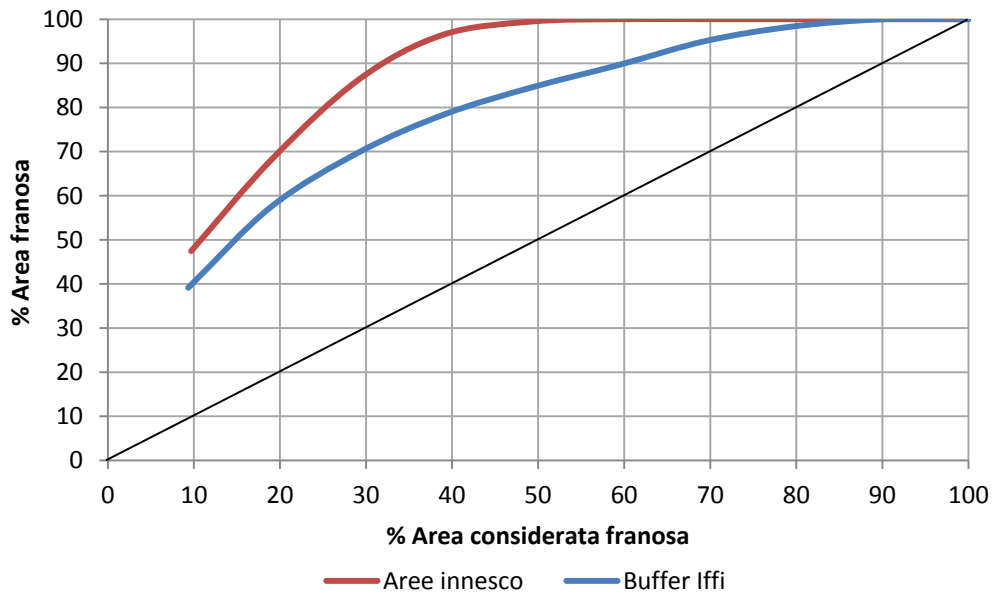


Figura 16 Grafico che rappresenta le Success Rate Curve relative alle colate ottenute con le due diverse analisi, una realizzata a partire dai buffer dei punti Iffi, l'altra dalle aree innesco delle frane. La linea nera rappresenta il trend 0%-100% indice di un'analisi non affidabile

Nelle Figure 17 e 18 è rappresentata la suscettibilità da frana nell'area del Marosticano, con una suddivisione in 5 classi di suscettibilità desunte dalle pendenze assunte delle Success Rate Curve. Ad esclusione delle zone più predisposte a franare nella porzione settentrionale dell'area in esame, si può notare anche in questo caso che le zone ad alta suscettibilità per gli scivolamenti si trovano dove sono presenti le strade. In questa seconda analisi, inoltre, i territori più predisposti agli scivolamenti sono molto più estesi rispetto a quelli visti nella prima analisi, mentre la predisposizione alle colate si differenzia molto dall'analisi precedente solo in pianura, dove la suscettibilità è quasi ovunque "Molto Bassa".

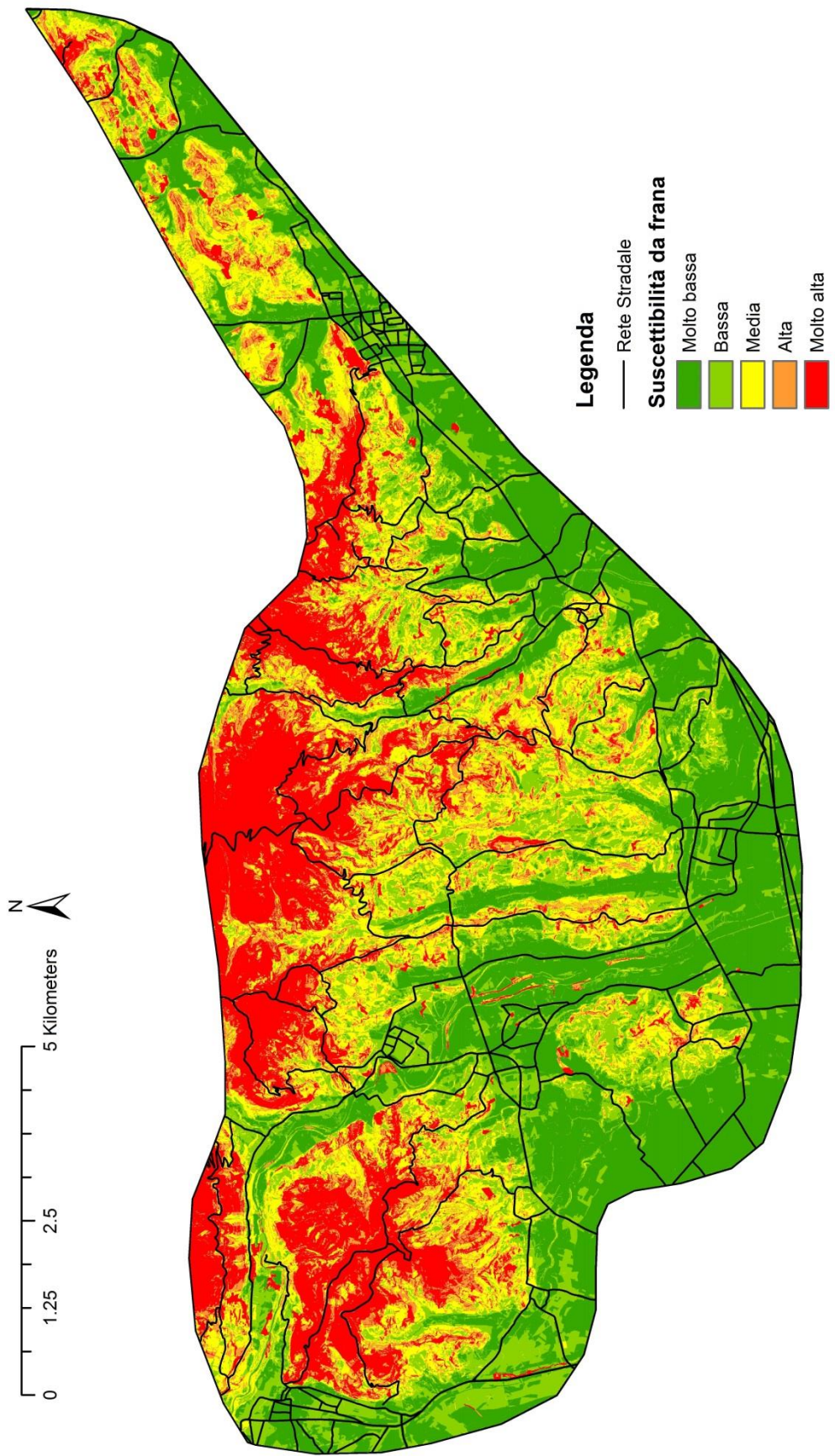


Figura 17 Carta di suscettività da frana dell'area del Marosticano per gli scivolamenti

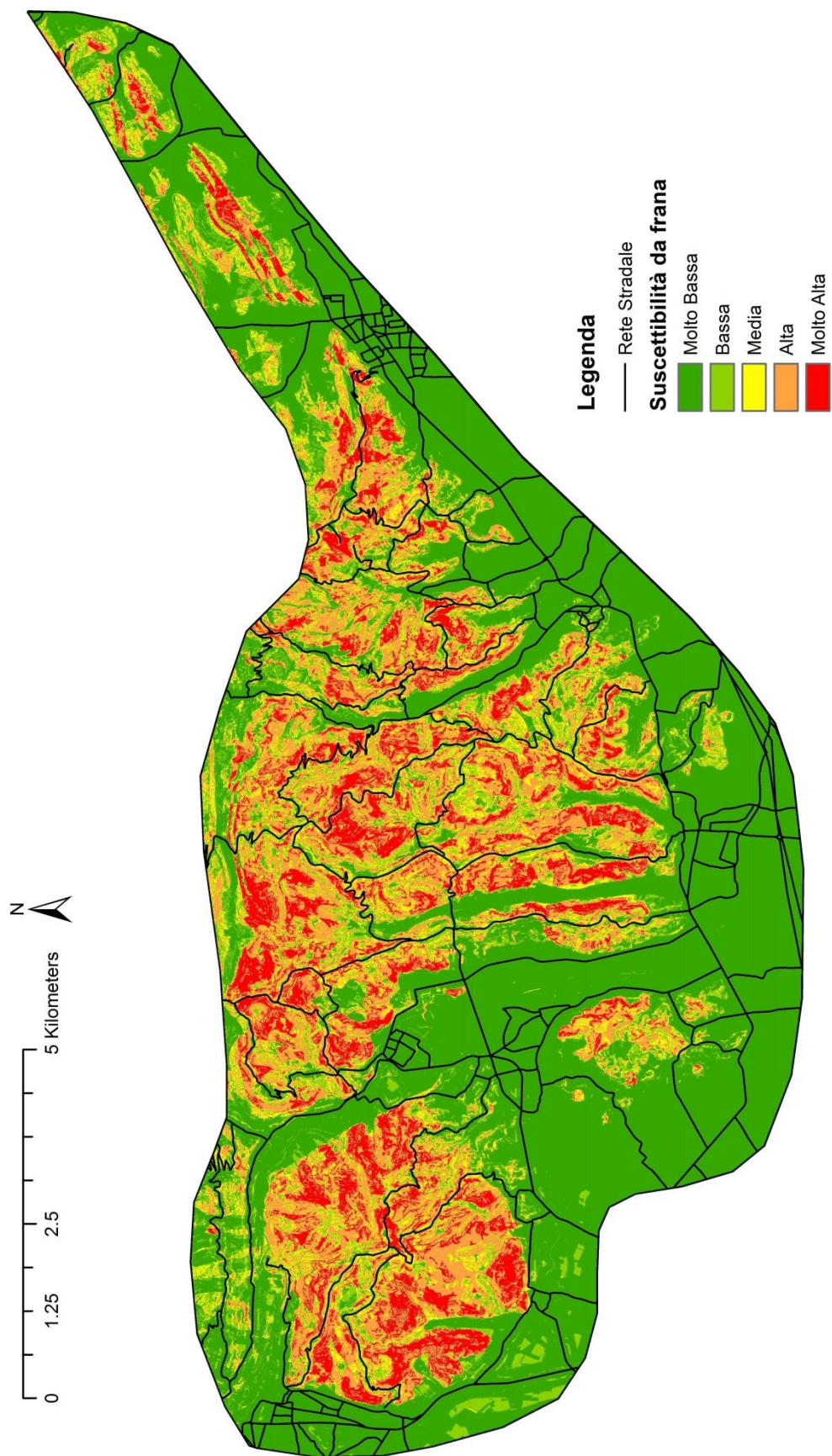


Figura 18 Carta di suscettività da frana dell'area del Marosticano per le colate

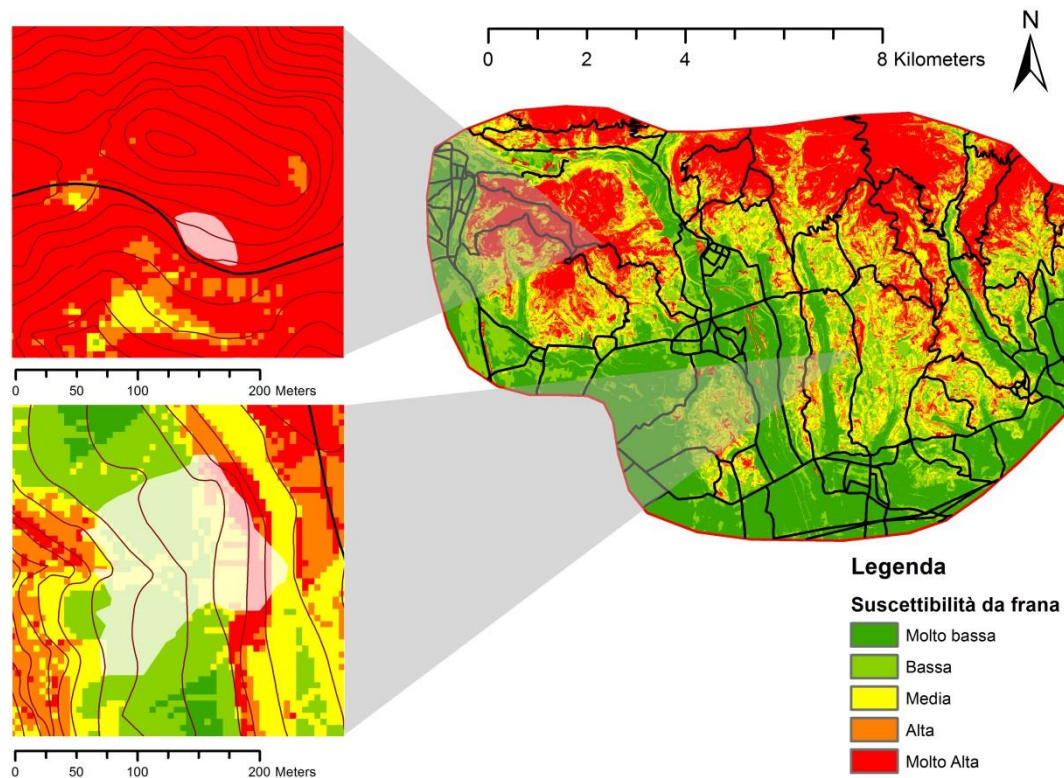


Figura 19 Due esempi di scivolamento nell'area del Marosticano: in alto a sinistra, via Valdaro a Carrè; in basso a sinistra, via Costa a Fara Vicentino

In Figura 19, le frane d'esempio già viste nel Capitolo 3.3.2 sono plottate nella nuova carta di suscettibilità: lo scivolamento di Carrè è situato in una zona generalmente a suscettibilità molto elevata, perciò l'analisi non è valida come quella precedentemente svolta. Il caso di Fara Vicentino, invece, presenta una suscettibilità più alta in corrispondenza dell'area di innesco, aspetto che fa preferire quest'analisi rispetto a quella realizzata col buffer dei punti iffi.

3.4.3. Predictive Rate Curves e potere previsionale

Utilizzando lo stesso dataset di validazione-previsione rispetto alla prima analisi statistica effettuata, si ottiene un risultato opposto rispetto a quanto ottenuto precedentemente: le curve relative agli scivolamenti, in questo caso, presentano percentuali più alte rispetto alle colate (Figura 20).

Predictive Rate Curve

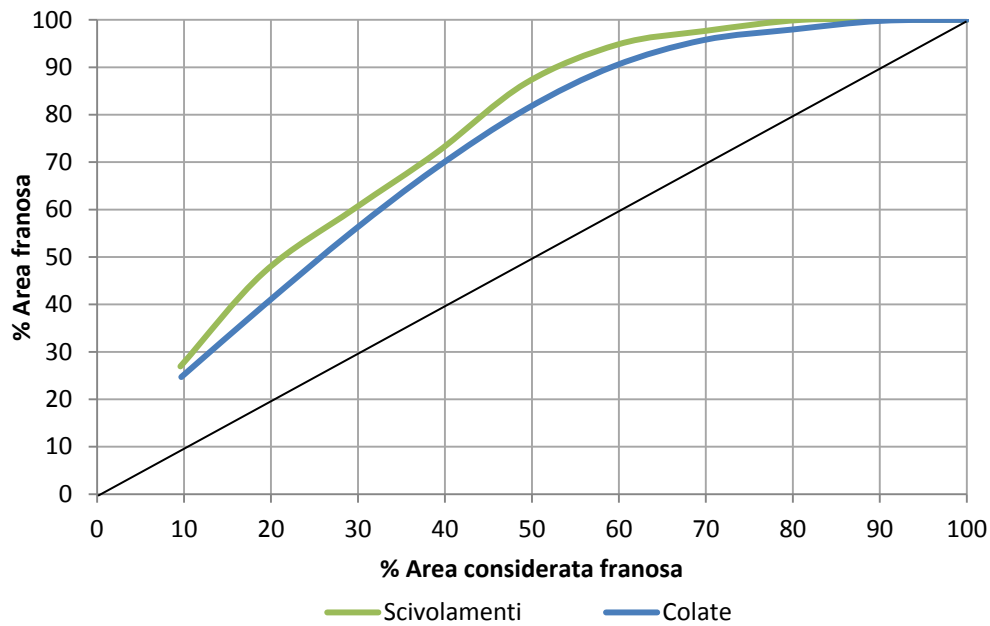


Figura 20 Grafico che rappresenta le Predictive Rate Curve di scivolamenti e colate. La linea nera rappresenta il trend 0%-100% indice di un'analisi non affidabile

I risultati ottenuti, quindi, stanno sì a significare che possono essere utilizzati entrambi i metodi per cercare di prevedere due tipi diversi di fenomeno, però sottolineano la mancanza della suddivisione in tipologie di movimento nel dataset di validazione. Di seguito, in Figura 21 e 22, sono presenti i confronti tra le Predictive Rate Curve per scivolamenti e colate tra le due analisi statistiche condotte.

Predictive Rate Curve - Scivolamenti

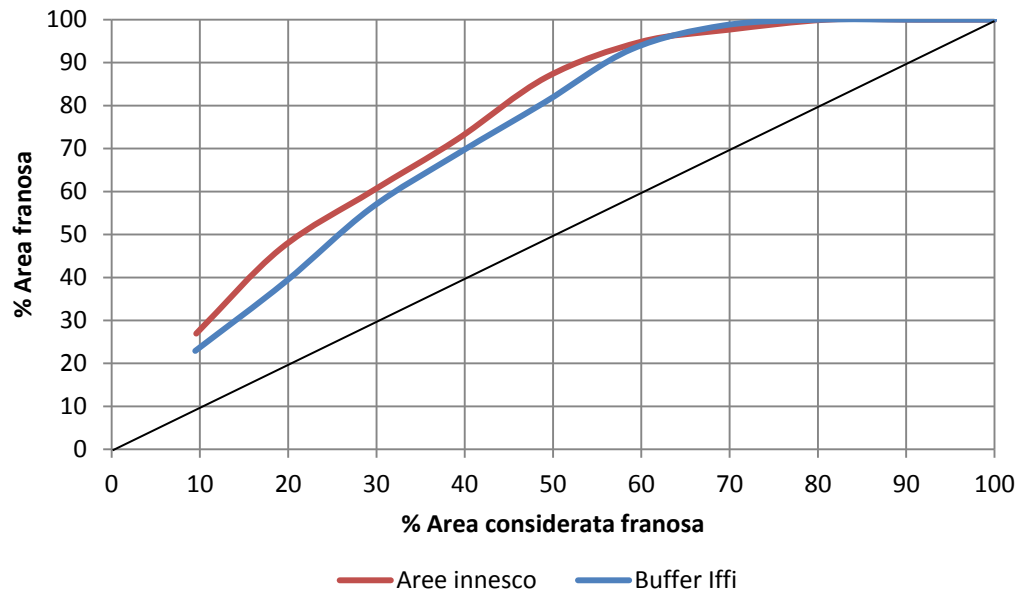


Figura 21 Grafico che rappresenta le Predictive Rate Curve relative agli scivolamenti ottenute con le due diverse analisi, una realizzata a partire dai buffer dei punti Iffi, l'altra dalle aree innesco delle frane. La linea nera rappresenta il trend 0%-100% indice di un'analisi non affidabile

Predictive Rate Curve - Colate

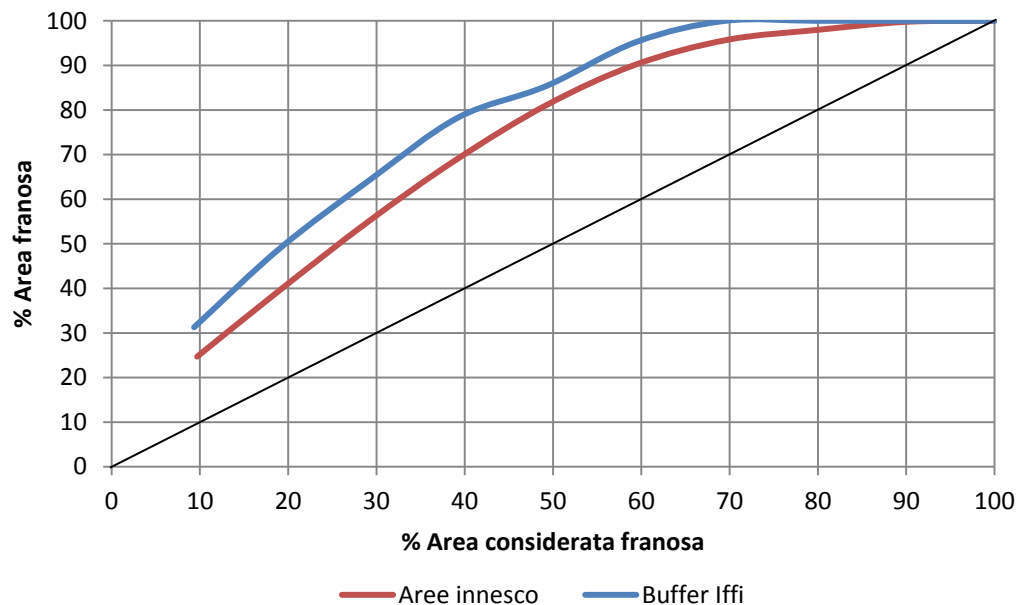


Figura 22 Grafico che rappresenta le Predictive Rate Curve relative alle colate ottenute con le due diverse analisi, una realizzata a partire dai buffer dei punti Iffi, l'altra dalle aree innesco delle frane. La linea nera rappresenta il trend 0%-100% indice di un'analisi non affidabile

3.5. Considerazioni sull'analisi statistica

Le analisi appena svolte si sono rivelate essere degli ottimi strumenti per ottenere una prima stima delle aree più suscettibili a generare fenomeni franosi, in alcuni casi permettendo la distinzione tra area d'innescò e area d'accumulo. Anche la conoscenza dei fattori più importanti nello sviluppo del dissesto è molto utile, in quanto può dare indicazioni valide su quali siano i parametri a cui riservare maggiore attenzione come la pendenza, la curvatura della morfologia superficie topografica, la distanza dalle strade e la litologia, relazionate con la tipologia di movimento franoso. In un ottica di intervento, però, i comuni interessati non potrebbero di certo accollarsi le spese per sistemare interi versanti che l'analisi statistica indica come molto suscettibili.

D'altra parte si stima che circa il 90% dei fenomeni franosi avvenga in aree in cui nel passato si sono già verificati dissesti (Varnes, 1984), le zone in cui si possono concentrare le risorse umane ed economiche si riducono sostanzialmente. Ci si può concentrare quindi su quei territori in cui si hanno informazioni storiche di precedenti movimenti, ponendo maggiore attenzione dove questi si sono verificati vicino a opere antropiche come strade e costruzioni. In ultima analisi, non va dimenticato che quelli visti fino ad ora rappresentano i fattori predisponenti un versante a franare, mentre il fattore scatenante più importante è senza dubbio l'acqua meteorica derivante da intense precipitazioni. È quindi utile analizzare in che modo un'eventuale risalita molto rapida della tavola d'acqua possa incidere sulla stabilità di un versante.

ANALISI A GRANDE SCALA

4. Modellazione Numerica

La modellazione numerica consente di studiare la stabilità di un versante partendo da condizioni iniziali e al contorno stabilite in un modello concettuale, definito sulla base delle conoscenze geologiche e geotecniche in possesso. Tale metodo permette la schematizzazione della condizione del pendio in analisi sia prima e dopo che avvenga la frana, sia dopo la realizzazione delle opere di sistemazione e stabilizzazione del versante in analisi: in questo modo è possibile valutare i meccanismi di innesco del fenomeno franoso e definire le condizioni di stabilità del pendio, studiando inoltre se determinati tipi di interventi di prevenzione avrebbero potuto evitare il dissesto o meno.

Come preannunciato nel capitolo 3.5, le opere più economiche e di facile realizzazione che possono garantire la prevenzione nei confronti delle frane sono quelle mirate ad eliminare il fattore scatenante più importante, ossia l'acqua. Agire sui fattori predisponenti già discussi nell'analisi statistica, infatti, risulterebbe complicato sotto molti punti di vista: la litologia non rappresenta un fattore facilmente eliminabile, ed agire sulla pendenza significherebbe dover livellare intere aree più o meno accessibili. Ecco che, dunque, l'approccio più conveniente è quello di ridurre la quantità d'acqua presente nel terreno. Lo scopo è evitare l'aumento delle pressioni interstiziali, che sono la causa principale di instabilità. L'intervento più utile da attuare nelle zone più a rischio, quindi, è la costruzione di una rete di raccolta dell'acqua ove assente e l'inserimento nel terreno di tubi o trincee drenanti, con adeguati sistemi di raccolta e smaltimento delle acque. Si agirà quindi sul modello numerico creato, verificando le condizioni di stabilità qualora si passi da una falda al piano campagna ad una falda depressa, frutto dell'azione di prevenzione attuata.

La modellazione numerica è stata realizzata mediante un metodo continuo 2D alle differenze finite, FLAC® di Itasca (Fast Lagrangian Analysis of Continua), molto utilizzato nell'ambito delle geoscienze poiché adatto a rappresentare il comportamento di mezzi geologici quali terreni e rocce che tendono a fluire plasticamente quando è raggiunta la soglia di plasticizzazione. Tale codice trova

numerose applicazioni in quanto permette di studiare le deformazioni e la rottura del materiale rappresentato, implementa numerosi modelli costitutivi e consente la modellazione idro-meccanica. Negli ultimi anni, inoltre, l'aumento della capacità di calcolo dei processori ha permesso la realizzazione delle analisi in tempi sempre più brevi. All'interno del codice di calcolo i materiali sono rappresentati da una griglia di elementi, modellata dall'utente in modo che questa si adatti all'oggetto che si sta studiando. Ogni elemento segue una legge tensioni-deformazioni lineare o non lineare in risposta alle forze o alle condizioni a contorno applicate. Ottenuta la griglia e le relative caratteristiche (stratificazioni, giunti, ecc), vengono assegnate le proprietà ai materiali e impostate le condizioni iniziali e a contorno: il software risolve la struttura calcolando inizialmente lo stato tensionale σ_v e σ_h presente in ogni nodo della griglia, per poi ottenere successivamente le deformazioni associate: in questo modo la griglia si deforma insieme al materiale che rappresenta. Sulla base di queste deformazioni il software procede a elaborare gli spostamenti utilizzando l'equazione del moto. La procedura così sviluppata termina con il ricalcolo dello stato tensionale sulla base degli spostamenti suddetti. Tutto l'iter di azioni appena descritto è definito ciclo, ripetuto continuamente da FLAC fino a quando risulta nulla la differenza tra lo stato tensionale iniziale e quello ottenuto al termine di ogni ciclo (le cosiddette forze non bilanciate, "Unbalanced forces").

Se le forze non bilanciate appena discusse sono nulle, allora il sistema ha raggiunto la stabilità e non vi è alcun movimento, risultato confermato da un valore del fattore di sicurezza maggiore di 1 (fattore che rappresenta il rapporto tra le resistenze disponibili e le resistenze mobilizzate). Se invece le forze non bilanciate hanno un valore non nullo, il sistema è in disequilibrio e vi sarà una certa instabilità, supportata anche in questo caso da un fattore di sicurezza minore di 1.

Poiché vanno valutate le generali condizioni di stabilità di un versante trattato come esempio, non è stato necessario riferirsi ad un fenomeno avvenuto durante le intense precipitazioni del 2010. Per la modellazione è stato scelto il caso dello scivolamento rotazionale avvenuto nel 2014 in via Valdaro nel comune di Carrè, in quanto questo ha causato molti più danni e le superfici di rottura e l'area di accumulo sono state molto più evidenti rispetto a quella relativa all'alluvione del

2010, motivi per i quali l'analisi effettuata è risultata più significativa; inoltre il sito è stato scelto anche per le considerazioni del Capitolo 3.5, in quanto la popolazione locale era già a conoscenza del dissesto ben prima dell'anno dell'alluvione: durante gli ultimi decenni, infatti, si sono misurati numerosi movimenti del versante - tra cui quello risalente al Febbraio scorso - che hanno reso necessario l'abbattimento di una vecchia casa dismessa. Inoltre, anche l'analisi statistica mostra che il versante in questione ha una suscettibilità a franare molto elevata. Previa richiesta all'ufficio comunale, sono stati ottenuti gli elaborati grafici tecnici relativi al profilo pre-frana, opportunamente inserito all'interno del codice di calcolo alle differenze finite, come in Figura 23.

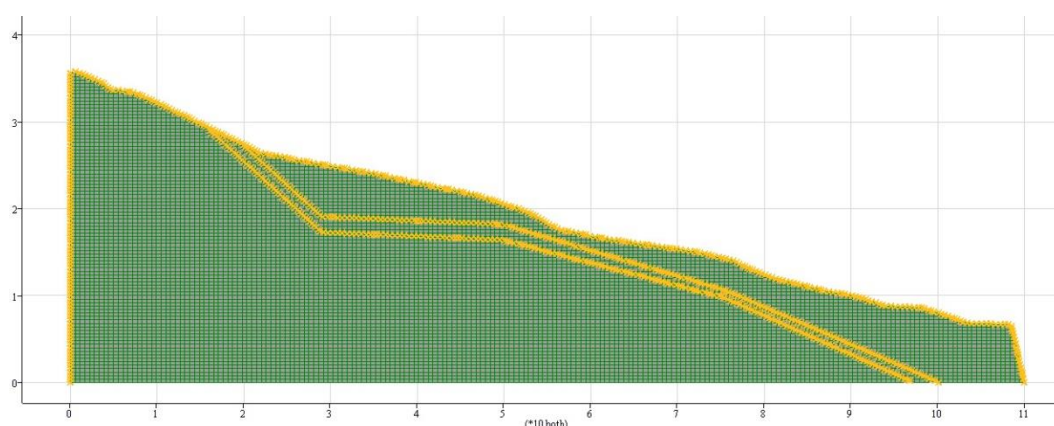


Figura 23 Profilo pre-frana e geometria degli strati; la griglia è discretizzata (assi X e Y espressi in decine di metri)

Successivamente i nodi della griglia al contorno sono stati bloccati, obbligando tutti i nodi ai due lati a mantenere la stessa coordinata X e i nodi alla base a mantenere le coordinate X e Y. Inizialmente sono stati assegnati ai materiali valori molto elevati di coesione e resistenza a trazione, in modo da portare il modello all'equilibrio elastico senza permettere deformazioni. Successivamente sono state assegnate le proprietà caratteristiche ai materiali (Figura 24). Come si può vedere in Tabella 4, il modello geotecnico dell'esempio trattato è caratterizzato da 3 litotipi diversi: un substrato basaltico ad elevata resistenza meccanica; un orizzonte "B", costituito dai prodotti di alterazione del basalto sottostante, caratterizzato da limi ricchi in minerali argillosi come la smectite, in quantità sufficiente a peggiorare le proprietà meccaniche dell'orizzonte (la coesione e l'angolo d'attrito sono infatti piuttosto bassi); l'orizzonte "A" più superficiale è costituito da materiale proveniente da rocce alterate non in situ. Per

questo motivo i moduli di taglio e di compressibilità, coesione e angolo di attrito sono più alti rispetto all'orizzonte "B" appena discusso.

I valori dei parametri sono stati ricavati dal database interno di FLAC e, dove non possibile, stimati sulla base delle conoscenze apprese sulla frana in studio, anche tramite relazioni geologiche e progetti di altri casi analoghi.

	A	B	Substrato
Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Density [kg/m]	1900	1900	2700
Bulk modulus [Pa]	$5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{10}$
Shear Modulus [Pa]	$2 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{10}$
Cohesion [Pa]	$1 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^7$
Tension [Pa]	$1 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^7$
Friction angle [°]	23	15	31

Tabella 4 Caratteristiche assegnate ai tre materiali presenti nell'area in analisi

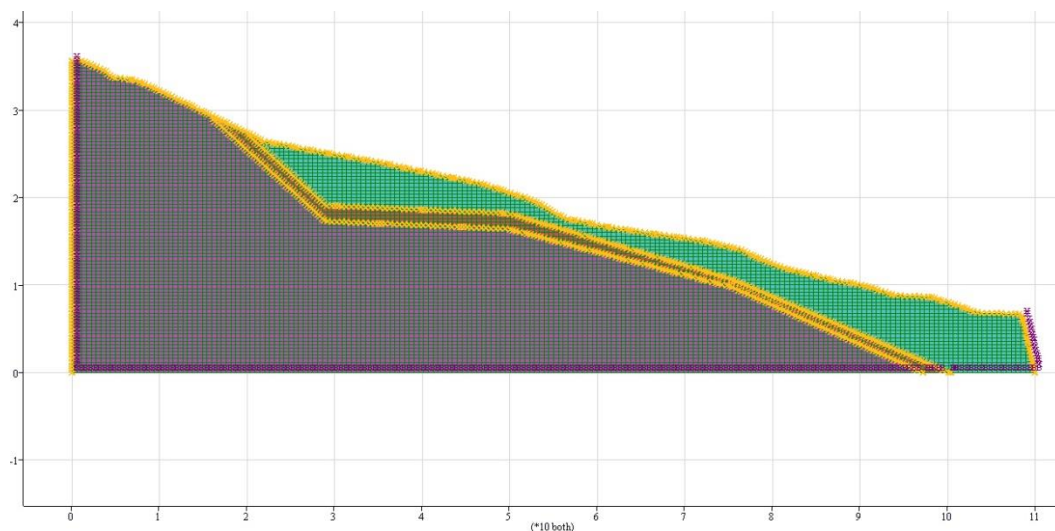


Figura 24 Profilo pre-frana con condizioni a contorno e litologie assegnate (assi X e Y espressi in decine di metri). Il materiale più superficiale rappresenta l'orizzonte "A", seguito in profondità dall'orizzonte "B" e dal substrato

Allo scopo di testare il comportamento del versante in caso di precipitazioni insistenti come quelle avvenute nel Novembre 2010 e soprattutto nel Febbraio 2014, è stata ipotizzata la peggior condizione possibile, ossia la falda ovunque coincidente con il piano campagna (senza considerare eventuali sovrappressioni o apporti di acqua provenienti da monte). L'approccio utilizzato è stato quello idrostatico, in quanto non si hanno informazioni precise riguardo i valori delle permeabilità dei terreni e delle rocce coinvolte utili a realizzare un'analisi

accoppiata idro-meccanica. Per il caso in analisi, inoltre, è stata reputata sufficiente l'analisi idrostatica per dimostrare che la maggior parte delle volte un semplice abbassamento della falda può evitare l'innescò del fenomeno franoso.

Una volta impostata la tavola d'acqua al piano campagna, FLAC inizia la sequenza di cicli ma non raggiunge la stabilità del modello, in quanto le forze non bilanciate non si annullano (Figura 25). È stato quindi imposto un numero di cicli tale da ottenere uno spostamento massimo lungo l'asse X paragonabile a quello visto in campagna, pari a circa 1 metro (Figura 26): le rotture per tensione rappresentate dai cerchi viola coincidono molto bene con le rotture avvenute realmente in via Valdaro (Figura 27 relativa al modello e Figura 28 a quanto avvenuto nel caso reale).

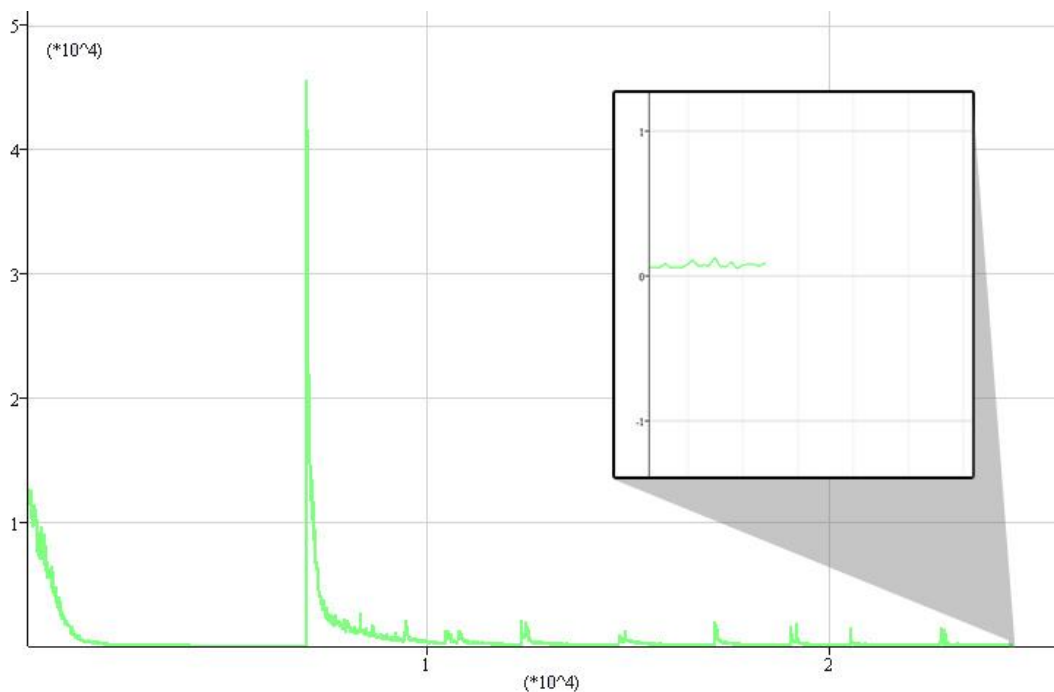


Figura 25 Le forze non bilanciate non si annullano, quindi il modello non raggiunge la stabilità (l'asse X esprime il numero dei cicli, l'asse Y le forze non bilanciate in Newton)

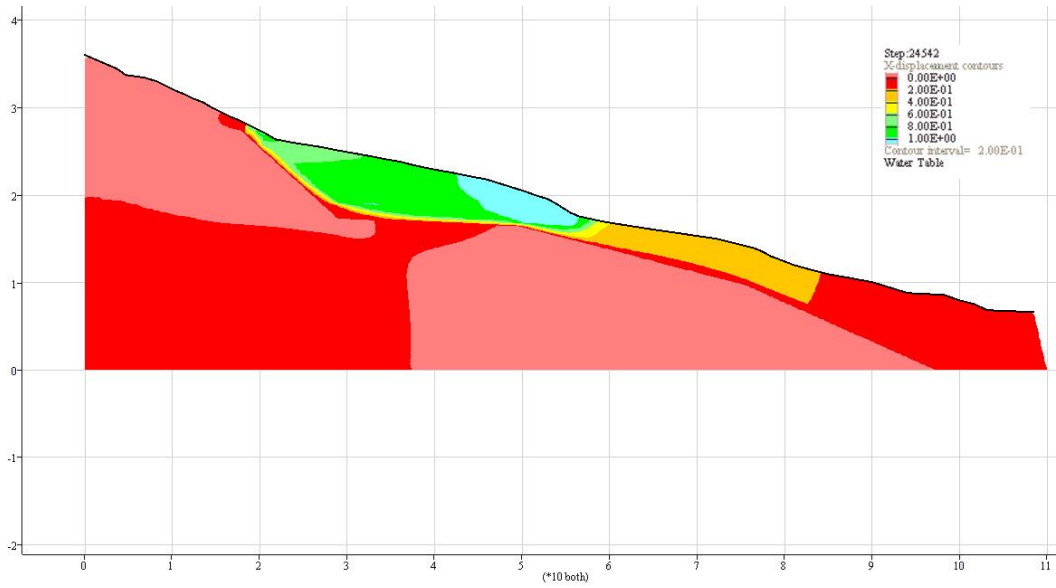


Figura 26 Spostamenti lungo l'asse X con la tavola d'acqua coincidente col piano campagna (assi X e Y espressi in decine di metri). La linea nera rappresenta la tavola d'acqua

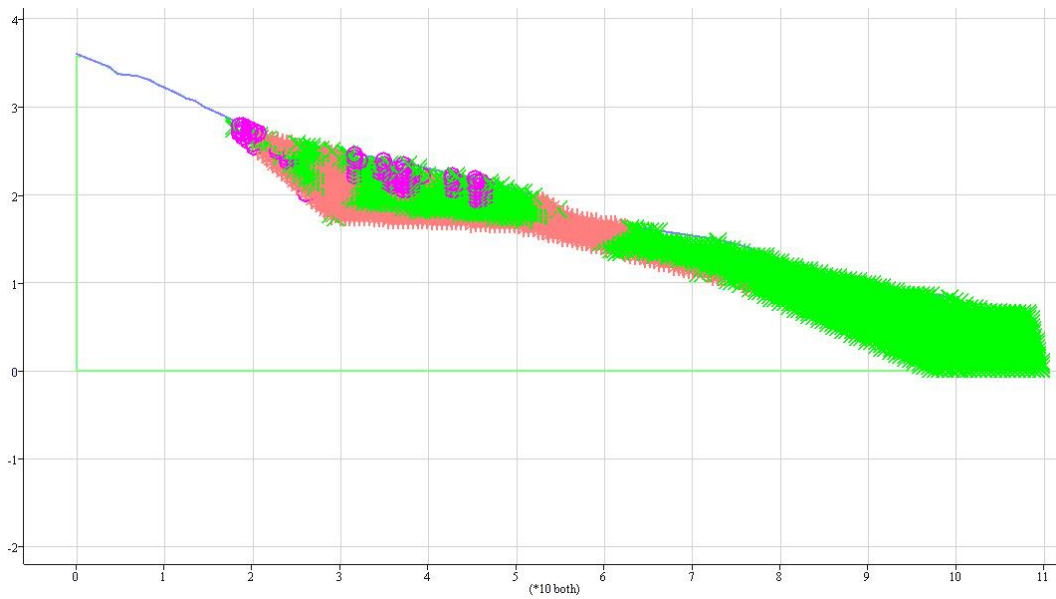


Figura 27 Le rotture per tensione, rappresentate dai cerchi viola, coincidono con quanto visto in campagna (assi X e Y espressi in decine di metri)



Figura 28 Rotture per tensione a Carrè in Via Valdaro

Il fattore di sicurezza legato alla superficie di scivolamento di Figura 29 generata con l'acqua al piano campagna è pari a 0,99, e perciò il pendio è da considerarsi instabile.

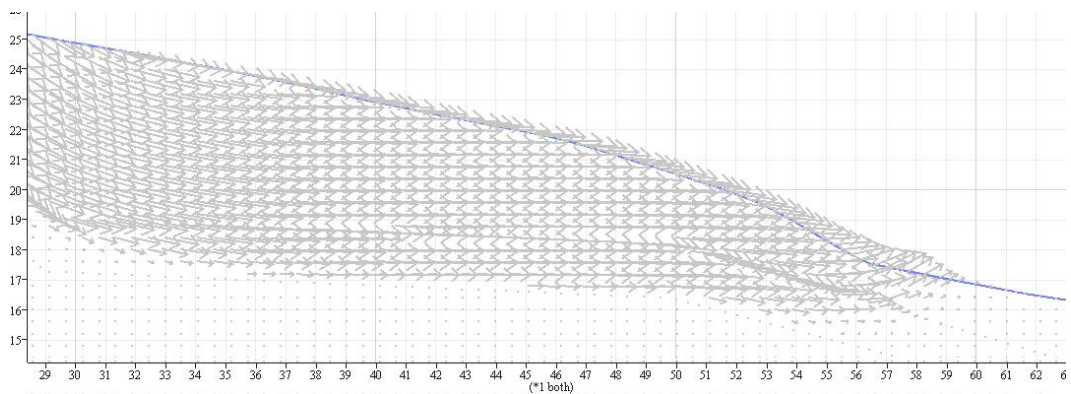


Figura 29 I vettori indicano la velocità di deformazione di taglio. La superficie di rottura è ben evidente (assi X e Y espressi in metri)

La tavola d'acqua è stata quindi corretta, simulando la presenza di un drenaggio inclinato in posizione centrale nel profilo (rappresentato dalla linea nera), in grado

di abbattere la falda di circa due metri nella zona a monte e al di sotto della strada. In Figura 30 sono plottati gli spostamenti lungo l'asse X e la posizione della falda. In questo secondo caso gli spostamenti non sono nulli, ma il fattore di sicurezza è pari a 1,13, condizione di stabilità confermata anche dal grafico delle forze non bilanciate (Figura 31). Questo conferma l'ipotesi avanzata inizialmente, ossia che la posa di drenaggi in grado di abbassare la falda freatica rappresenta una tipologia di intervento valido ad evitare il verificarsi di un fenomeno franoso in versanti caratterizzati da questa litologia.

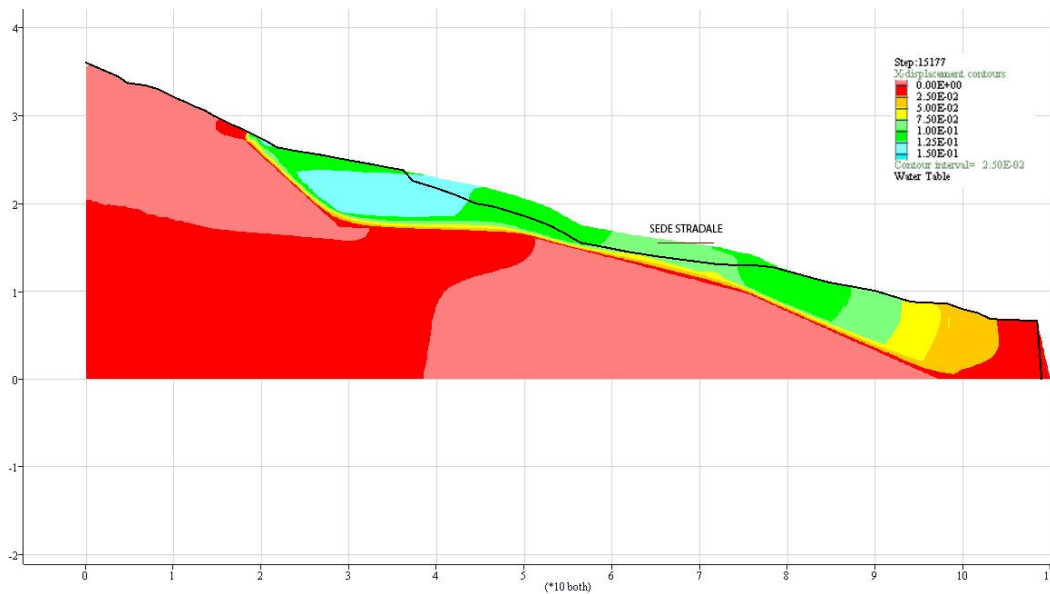


Figura 30 Spostamenti lungo l'asse X con la tavola d'acqua depressa per opera del drenaggio inclinato (assi X e Y espressi in decine di metri). La linea nera rappresenta la tavola d'acqua

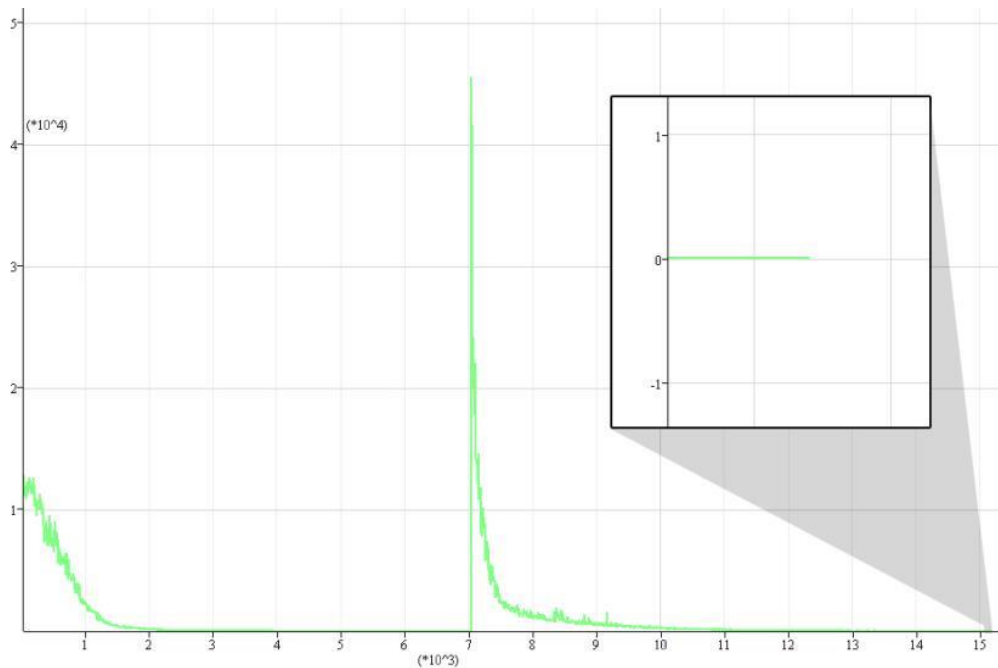


Figura 31 Le forze non bilanciate si annullano, quindi il modello raggiunge la stabilità (l'asse X esprime il numero dei cicli, l'asse Y le forze non bilanciate in Newton)

Nel caso in cui non si ritenga sufficiente un fattore di sicurezza pari a 1,13, potrebbero essere inseriti dei drenaggi lungo tutto il versante, ottenendo quindi una falda ancor più abbattuta e un conseguente aumento della stabilità (Figura 32), espresso dall'aumento del fattore di sicurezza fino a 1,27. Naturalmente questa seconda ipotesi di intervento avrebbe l'inconveniente di una spesa maggiore rispetto a quella che è stata sostenuta fino ad oggi. Un esempio del codice di calcolo implementato in FLAC è presente nell'Allegato 1.

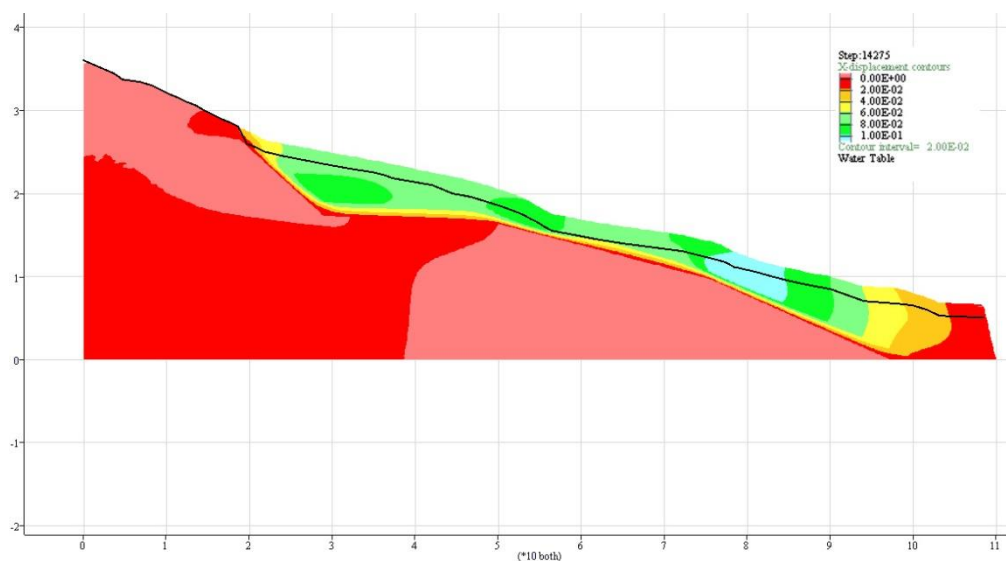


Figura 32 Spostamenti lungo l'asse X con la tavola d'acqua depressa per opera di più drenaggi inclinati (assi X e Y espressi in metri). La linea nera rappresenta la tavola d'acqua

Si può quindi concludere che un intervento di questo tipo atto a diminuire l'altezza della falda freatica può rappresentare l'opera giusta per cercare di prevenire il fenomeno franoso: in questo semplice caso analizzato non si è tenuto conto dello sviluppo in larghezza della frana, che avrebbe reso necessaria la realizzazione di altri profili 2-D del modello appena creato, in modo da ottenere un abbassamento omogeneo dell'altezza piezometrica lungo tutto il versante. Nonostante questo, si può constatare come il fattore di sicurezza passi da valori inferiori all'unità a valori maggiori dell'unità nel caso in cui si inserisca un drenaggio sub-orizzontale o una trincea drenante nel terreno. Alla luce di quanto già visto nel Capitolo 3 dedicato all'analisi statistica, potrebbe essere conveniente realizzare questo tipo di opere dove la suscettibilità da frana è maggiore e soprattutto dove si hanno già evidenze di movimenti passati del terreno. Nel Capitolo 5 si studierà la convenienza di quest'azione di prevenzione secondo un approccio di tipo economico.

5. Analisi costi-benefici

La prevenzione nei confronti dei fenomeni franosi passa necessariamente per l'analisi dei costi e dei benefici: questa è una tecnica finalizzata a confrontare l'efficienza di differenti alternative utilizzabili in un dato contesto per raggiungere un obiettivo ben definito. L'analisi verifica se i benefici che un'alternativa è in grado di apportare alla collettività sono maggiori dei relativi costi. Nel caso in cui si trattino dissesti alla scala del versante, quindi, essa può essere utilizzata per stabilire se sia più conveniente la scelta di effettuare la prevenzione nei confronti di un fenomeno franoso o la scelta di non effettuarla, tenendo in considerazione tutte le spese di intervento, manutenzione e risarcimento. Poiché l'analisi richiede il confronto di costi e benefici che si verificano in momenti di tempo diversi, è necessario applicare uno sconto intertemporale (TSIS, tasso di sconto intertemporale sociale) utile a rendere pienamente confrontabili tra loro grandezze monetarie disponibili in momenti diversi. Il momento temporale di riferimento al quale vengono ricondotti tutti i costi e benefici è il momento di inizio dell'implementazione della politica, perciò il valore di ogni costo viene attualizzato ed espresso rispetto al tempo iniziale (chiamato valore attuale o present value). Per determinare tale valore attuale (VA) di una grandezza monetaria X disponibile al tempo futuro t, ipotizzando un tasso di sconto uguale ad r, si utilizza la formula seguente:

$$VA(X) = \frac{1}{(1+r)^t} X$$

Considerando il flusso nel tempo dei costi C_t e dei benefici B_t , si calcola il valore attuale netto, definito come la differenza tra la somma dei costi e la somma dei benefici calcolati per ogni anno (Frattoni and Crosta, 2006):

$$VAN = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

In un'analisi costi/benefici applicata ai dissesti franosi, il punto cruciale della trattazione è rappresentato dalla stima dei costi appena visti: questi si dividono in costi diretti (i danni veri e propri causati dalla frana ad opere antropiche, oggetti e

proprietà privati ed esseri umani) e in costi indiretti (disagi per l'alterazione della rete stradale, mancanza del senso di sicurezza e di tranquillità nella popolazione ecc.). Nella zona del Marosticano le opere antropiche più colpite sono state le strade e, raramente, alcune case private, senza la perdita di vite umane. Per avere una buona stima dei costi diretti legati al coinvolgimento di persone durante il fenomeno franoso, sarebbe opportuno considerare il rischio di un individuo di perdere la vita (Romeo et al., 2006), studiando ad esempio la densità del traffico nella zona del dissesto e la probabilità di avere più persone all'interno di ogni veicolo. Anche la valutazione dei costi indiretti è molto complicata: ad esempio occorrerebbe monetizzare le spese che i cittadini devono affrontare dal momento in cui questi non siano più in grado di utilizzare una strada, oppure il disagio apportato alla popolazione locale, costretta a vivere in un territorio considerato instabile. In questa trattazione, come costi totali sono state considerate solamente le spese legate agli interventi di ripristino e di messa in sicurezza dei versanti. L'analisi è quindi cautelativa, cioè sottostima i costi legati all'intervento post-frana, poiché non sono stati considerati i danni legati alla vita e all'attività umana che ricadono tra le spese da sostenere dopo l'avvenimento del fenomeno franoso.

Un esempio fittizio della procedura di analisi è riportata in Tabella 5:

Anni	Costi	Benefici	Sconto		Valore attuale
			Costi	Benefici	
1	€ 10,000.00	€ 0.00	€ 9,836.71	€ 0.00	-€ 9,836.71
2	€ 100.00	€ 0.00	€ 96.76	€ 0.00	-€ 96.76
3	€ 100.00	€ 0.00	€ 95.18	€ 0.00	-€ 95.18
...
19	€ 100.00	€ 0.00	€ 73.14	€ 0.00	-€ 73.14
20	€ 100.00	€ 50,000.00	€ 71.94	€ 35,972.27	€ 35,900.33
Tasso di sconto	0.0166		Valore attuale netto		€ 24,543.84

Tabella 5 Esempio di svolgimento di un'analisi costi/benefici

Supponendo una cifra di € 50000 relativa agli interventi di ripristino eseguiti in un ipotetico versante già franato, questa è considerata come "beneficio", poiché rappresenta la somma che sarebbe stata evitata se fossero state attuate opere preventive prima che avvenisse la frana. L'esempio di spesa di € 10000 al primo anno rappresenta i costi relativi alle opere di prevenzione, mentre le successive somme ipotizzate di € 100 sono da intendersi come costi di manutenzione. Applicando un certo tasso di sconto, si giunge ad un ipotetico risparmio di € 24583.84. Quindi l'alternativa rappresentata dai "costi", ossia la prevenzione, conviene rispetto a quella rappresentata dai "benefici", cioè la non prevenzione.

5.1. Quadro economico generale

Dopo le intense precipitazioni del Novembre 2010, alla provincia di Vicenza sono stati assegnati 300 milioni di euro, stanziati da un ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri per gli interventi straordinari e urgenti di protezione civile. Tale somma è stata suddivisa tra tutti i comuni che hanno subito danni più o meno ingenti a seguito dell'alluvione. I finanziamenti sono giunti ai comuni attraverso diverse modalità e in vari tempi: i primi aiuti, chiamati "somme urgenze", sono stati utili a garantire la messa in sicurezza dei siti soggetti a eventi franosi subito dopo l'alluvione. Successivamente è stato garantito un acconto per le municipalità più colpite, di entità variabile a seconda di quanto stabilito dai responsabili del lavoro di revisione e controllo del Dipartimento di Difesa del suolo di Vicenza. Tale cifra è stata suddivisa tra pubblico e privato, in modo da aiutare sia la ricostruzione di strade e infrastrutture sia le aziende e i privati che hanno risentito della grave alluvione. A prima vista, una sommaria analisi costi/benefici può essere condotta anche a questa scala: in via teorica, infatti, le spese considerate come "somme urgenze" sarebbero state pienamente evitabili se fossero stati attuati interventi di prevenzione dei dissesti, poiché non sarebbe avvenuto nessun evento calamitoso. Sotto sono riportate le somme urgenze relative ai tre comuni più colpiti in provincia di Vicenza nell'area del Marosticano:

Marostica: € 25554.86; Molvena: € 23650.00; Fara Vicentino: € 10000;

Totale: € 59204.86

5.2. Interventi da attuare

In questo caso, a contrario di quanto avviene nel mondo dell'economia, l'analisi costi/benefici non è stata scelta per poter operare previsioni per il futuro, ma per capire se le decisioni prese in passato siano state corrette o meno. In linea con una mentalità preventiva, il fine ultimo è quello di sapere se l'intervenire sul territorio prima delle precipitazioni del Novembre 2010 sarebbe stato economicamente conveniente rispetto al non intervenire e al dover riparare i danni a frana avvenuta. Il naturale proseguimento dell'analisi risiede nella scelta del costo di ogni intervento di sistemazione effettuato dopo l'autunno del 2010 come prima alternativa per il calcolo dei costi e dei benefici. Alla prima dev'essere confrontata

la seconda alternativa, rappresentata in questo caso da ogni opera che sarebbe stato opportuno realizzare prima dell'avvenimento della frana. Per capire al meglio le tipologie di opere previste, grazie allo stage effettuato al Dipartimento di Difesa del Suolo di Vicenza e ad alcune visite ai comuni delle municipalità più colpite, sono stati visionati molti progetti di sistemazione realizzati nella zona del Marosticano, tra i quali spiccano le documentazioni relative agli interventi realizzati nel comune di Molvena.

5.3. Molvena

Di notevole interesse è il territorio appartenente al comune di Molvena: qui, infatti, oltre al grande numero di frane catalogate utili all'analisi statistica condotta nel Capitolo 3 (la maggior parte delle frane utilizzate come dato di input sono situate proprio all'interno di questo Comune), sono presenti alcuni progetti di sistemazione di dissesti avvenuti nel Novembre 2010.

I vari progetti prevedono la realizzazione di drenaggi, l'infissione di pali di ancoraggio al substrato e la rimodellazione del versante come opere principali di sistemazione. Come già discusso nel Capitolo 4 relativo alla modellazione numerica, poiché si ipotizza che gli interventi di regimazione delle acque rappresentino una buona opera di prevenzione al fine di evitare il movimento delle frane, si è deciso di considerare proprio la fornitura e la posa di drenaggi come unica opera da effettuare prima del Novembre 2010 (i relativi costi sono stati desunti dagli stessi progetti). In questo modo, quindi, il costo totale dell'opera di sistemazione viene confrontato direttamente con le spese relative ai possibili interventi che sarebbe stato possibile effettuare nel passato. Tutti i progetti analizzati, inoltre, sono relativi a movimenti franosi già presentatisi in passato, prima dell'evento del Novembre 2010. Il lasso temporale di 20 anni scelto per l'analisi costi/benefici è stato utilizzato poiché questo corrisponde al tempo di ritorno delle massime altezze di precipitazione di durata pari a 12 ore: il dato è consistente con la ricorrenza delle ultime rilevanti alluvioni avvenute nel territorio vicentino, 1966, 1992 e 2010.

Di seguito sono presenti le analisi costi/benefici per i vari casi in questione.

Via Fogliati (Molvena)

Costi totali di prevenzione (pre-frana):

Fornitura e posa di tubazione in PVC	€ 1,433.18
Pozzetto condotta acque meteoriche	€ 203.00
Fornitura e posa di tubazione drenante in PE e tubi di polietilene per condotte	€ 2,215.20
Fornitura e posa di pozzetti stradali	€ 975.00
Altre spese	€ 3,662.00
Totale	€ 8,488.38

Costi annuali per la manutenzione:

Manutenzione (€/anno)	€ 400.00
-----------------------	----------

Costi totali di sistemazione (post-frana):

Totale	€ 80,000.00
---------------	--------------------

Tasso di sconto applicato:

Tasso di sconto	0.0166
-----------------	--------

Anni	Costi	Benefici	Sconto		Valore attuale
			Costi	Benefici	
1	€ 8,488.38	€ 0.00	€ 8,349.77	€ 0.00	-€ 8,349.77
2	€ 400.00	€ 0.00	€ 387.04	€ 0.00	-€ 387.04
3	€ 400.00	€ 0.00	€ 380.72	€ 0.00	-€ 380.72
4	€ 400.00	€ 0.00	€ 374.51	€ 0.00	-€ 374.51
5	€ 400.00	€ 0.00	€ 368.39	€ 0.00	-€ 368.39
6	€ 400.00	€ 0.00	€ 362.38	€ 0.00	-€ 362.38
7	€ 400.00	€ 0.00	€ 356.46	€ 0.00	-€ 356.46
8	€ 400.00	€ 0.00	€ 350.64	€ 0.00	-€ 350.64
9	€ 400.00	€ 0.00	€ 344.91	€ 0.00	-€ 344.91
10	€ 400.00	€ 0.00	€ 339.28	€ 0.00	-€ 339.28
11	€ 400.00	€ 0.00	€ 333.74	€ 0.00	-€ 333.74
12	€ 400.00	€ 0.00	€ 328.29	€ 0.00	-€ 328.29
13	€ 400.00	€ 0.00	€ 322.93	€ 0.00	-€ 322.93
14	€ 400.00	€ 0.00	€ 317.66	€ 0.00	-€ 317.66
15	€ 400.00	€ 0.00	€ 312.47	€ 0.00	-€ 312.47
16	€ 400.00	€ 0.00	€ 307.37	€ 0.00	-€ 307.37
17	€ 400.00	€ 0.00	€ 302.35	€ 0.00	-€ 302.35
18	€ 400.00	€ 0.00	€ 297.41	€ 0.00	-€ 297.41
19	€ 400.00	€ 0.00	€ 292.56	€ 0.00	-€ 292.56
20	€ 400.00	€ 80,000.00	€ 287.78	€ 57,555.64	€ 57,267.86
Valore attuale netto					€ 42,838.98

Tabella 6 Analisi costi/benefici per la frana in via Fogliati

Come espresso in precedenza, l'analisi costi benefici necessita dell'applicazione di un certo tasso di sconto per attualizzare qualsiasi cifra all'anno zero, ossia in questo caso all'anno in cui vengono effettuate le opere di prevenzione. Il tasso usato del valore del 1.66% annuo è stato ricavato dal sito del Dipartimento del Tesoro, vale per i BTPi a 15 anni (in cui è incluso il tasso di inflazione; il dato si può considerare valido anche per i 20 anni). Nel caso del dissesto di via Fogliati, il prezzo relativo alle tubazioni previste per l'intervento si riferisce a tubi drenanti della lunghezza di circa 70 m, mentre le spese di manutenzione ammontano a € 400.00 l'anno, per un totale di € 8000 in 20 anni (cifra scelta poiché molti controlli non necessitano di particolari strumentazioni e possono anzi essere operati "a vista", con frequenza mensile, annuale o pluriennale).

Questo porta a ricavare un valore attuale netto "VAN" di € 42838.98, cioè la differenza economica tra le due differenti alternative scelte per l'analisi relativa alla frana in via Fogliati (Tabella 6): a posteriori, quindi, se fosse stato scelto di attuare le misure preventive di posa dei drenaggi allo scopo di evitare l'avvenimento della frana, sarebbero stati risparmiati più di € 42000, una cifra non indifferente per le casse delle amministrazioni comunali e provinciali. In Figura 33, una foto del dissesto in studio.



Figura 33 Foto del fenomeno franoso in via Fogliati

Via Michelina (Molvena)

Costi totali di prevenzione (pre-frana):

Fornitura e posa di tubazione in PVC	€ 1,600.00
Protezione tubi in PVC	€ 800.00
Fornitura e posa di tubazione drenante in PE e tubi di polietilene	€ 260.00
Fornitura e posa di pozzetti stradali	€ 200.00
Allaccio alla condotta fognaria	€ 2,860.00
Totale	€ 2,860.00

Costi annuali per la manutenzione:

Manutenzione (€/anno)	€ 400.00
-----------------------	----------

Costi totali di sistemazione (post-frana):

Totale	€ 20,000.00
---------------	--------------------

Tasso di sconto applicato:

Tasso di sconto	0.0166
-----------------	--------

Anni	Costi	Benefici	Sconto		Valore attuale
			Costi	Benefici	
1	€ 2,860.00	€ 0.00	€ 2,813.30	€ 0.00	-€ 2,813.30
2	€ 400.00	€ 0.00	€ 387.04	€ 0.00	-€ 387.04
3	€ 400.00	€ 0.00	€ 380.72	€ 0.00	-€ 380.72
4	€ 400.00	€ 0.00	€ 374.51	€ 0.00	-€ 374.51
5	€ 400.00	€ 0.00	€ 368.39	€ 0.00	-€ 368.39
6	€ 400.00	€ 0.00	€ 362.38	€ 0.00	-€ 362.38
7	€ 400.00	€ 0.00	€ 356.46	€ 0.00	-€ 356.46
8	€ 400.00	€ 0.00	€ 350.64	€ 0.00	-€ 350.64
9	€ 400.00	€ 0.00	€ 344.91	€ 0.00	-€ 344.91
10	€ 400.00	€ 0.00	€ 339.28	€ 0.00	-€ 339.28
11	€ 400.00	€ 0.00	€ 333.74	€ 0.00	-€ 333.74
12	€ 400.00	€ 0.00	€ 328.29	€ 0.00	-€ 328.29
13	€ 400.00	€ 0.00	€ 322.93	€ 0.00	-€ 322.93
14	€ 400.00	€ 0.00	€ 317.66	€ 0.00	-€ 317.66
15	€ 400.00	€ 0.00	€ 312.47	€ 0.00	-€ 312.47
16	€ 400.00	€ 0.00	€ 307.37	€ 0.00	-€ 307.37
17	€ 400.00	€ 0.00	€ 302.35	€ 0.00	-€ 302.35
18	€ 400.00	€ 0.00	€ 297.41	€ 0.00	-€ 297.41
19	€ 400.00	€ 0.00	€ 292.56	€ 0.00	-€ 292.56
20	€ 400.00	€ 20,000.00	€ 287.78	€ 14,388.91	€ 14,101.13
Valore attuale netto					€ 5,208.73

Tabella 7 Analisi costi/benefici per la frana in via Michelina

Via Don G. Carli (Molvena)

Costi iniziali di prevenzione (pre-frana):

Drenaggio e trincee	€ 3,000.00
Fornitura e posa di tubazione in PVC	€ 4,160.00
Fornitura e posa di pozzetto	€ 2,940.00
Fornitura e posa di elementi ad anello	€ 1,410.00
Intercettazione tubazione acque	€ 200.30
Totale	€ 11,710.30

Costi annuali per la manutenzione:

Manutenzione (€/anno)	€ 400.00
-----------------------	----------

Costi totali di sistemazione (post-frana):

Totale	€ 30,000.00
--------	-------------

Tasso di sconto applicato:

Tasso di sconto	0.0166
-----------------	--------

Anni	Costi	Benefici	Sconto		Valore attuale
			Costi	Benefici	
1	€ 11,710.30	€ 0.00	€ 11,519.08	€ 0.00	-€ 11,519.08
2	€ 400.00	€ 0.00	€ 387.04	€ 0.00	-€ 387.04
3	€ 400.00	€ 0.00	€ 380.72	€ 0.00	-€ 380.72
4	€ 400.00	€ 0.00	€ 374.51	€ 0.00	-€ 374.51
5	€ 400.00	€ 0.00	€ 368.39	€ 0.00	-€ 368.39
6	€ 400.00	€ 0.00	€ 362.38	€ 0.00	-€ 362.38
7	€ 400.00	€ 0.00	€ 356.46	€ 0.00	-€ 356.46
8	€ 400.00	€ 0.00	€ 350.64	€ 0.00	-€ 350.64
9	€ 400.00	€ 0.00	€ 344.91	€ 0.00	-€ 344.91
10	€ 400.00	€ 0.00	€ 339.28	€ 0.00	-€ 339.28
11	€ 400.00	€ 0.00	€ 333.74	€ 0.00	-€ 333.74
12	€ 400.00	€ 0.00	€ 328.29	€ 0.00	-€ 328.29
13	€ 400.00	€ 0.00	€ 322.93	€ 0.00	-€ 322.93
14	€ 400.00	€ 0.00	€ 317.66	€ 0.00	-€ 317.66
15	€ 400.00	€ 0.00	€ 312.47	€ 0.00	-€ 312.47
16	€ 400.00	€ 0.00	€ 307.37	€ 0.00	-€ 307.37
17	€ 400.00	€ 0.00	€ 302.35	€ 0.00	-€ 302.35
18	€ 400.00	€ 0.00	€ 297.41	€ 0.00	-€ 297.41
19	€ 400.00	€ 0.00	€ 292.56	€ 0.00	-€ 292.56
20	€ 400.00	€ 30,000.00	€ 287.78	€ 21,583.36	€ 21,295.59
Valore attuale netto					€ 3,697.40

Tabella 8 Analisi costi/benefici per la frana in via Don G. Carli

Il secondo caso in analisi coinvolge il dissesto avvenuto in via Michelina (Tabella 7). Qui le opere di sistemazione sono meno ingenti, infatti le spese totali ammontano a € 20000. La lunghezza media dei drenaggi è di circa 80 metri, ma rispetto al caso precedente si hanno meno spese accessorie, perciò i costi di prevenzione sono proporzionalmente più bassi (la stima per le spese dei drenaggi è di € 2860). Anche in questa seconda situazione vi è la possibilità di risparmiare € 5208.73.

Nel terzo caso, la prevenzione nei confronti del dissesto in Via Don G. Carli permette un minor margine di risparmio, che ammonta a poco meno di € 3700 (Tabella 8). La frana si sviluppa per circa 30 m seguendo la strada, ma la lunghezza dei drenaggi previsti è di 160 m, che spiega la cifra di € 4000 necessaria per la loro realizzazione.

Riassumendo, utilizzando quel particolare tasso di sconto, per tre interventi post-frana realizzati e un totale di € 130.000 , sarebbero stati risparmiati € 51.745,11, ossia circa il 40% di quanto è stato effettivamente speso.

5.4. Altri casi analizzati

Numerose sono state le altre frane vagliate durante l'analisi costi/benefici, ma in molti casi l'evoluzione nel tempo degli interventi di sistemazione e la non precisa definizione dei costi diretti non hanno permesso di ottenere un risultato preciso: nel caso della frana a Carrè in via Valdaro, due drenaggi sono già stati realizzati insieme ad un ancoraggio con micropali, ma il progetto prevede anche la realizzazione di una berlinese ancora in fase di progettazione, quindi non si possono conoscere di preciso i costi totali di sistemazione del versante. Tra i danni diretti andrebbe poi considerato il valore economico di una casa distrutta a causa della frana, ma la valutazione non è di facile entità in quanto l'abitazione era molto vecchia, dismessa e disabitata.

In linea di massima, quindi, si può procedere considerando quello che finora è stato fatto, ottenendo un risparmio di € 17.277,75, utilizzando € 17.652,00 per la prevenzione con drenaggi a fronte dei € 57.000 spesi per risistemare il versante anche con i micropali (Tabella 9).

Via Valdaro (Carrè)

Costi totali di prevenzione (pre-frana):

Fornitura e posa di tubazione in PVC	€ 14,582.00
Videospezione	€ 800.00
Cantiere	€ 670.00
Altre spese	€ 1600.00
Totale	€ 17,652.00

Costi annuali per la manutenzione:

Manutenzione (€/anno)	€ 400.00
-----------------------	----------

Costi totali di sistemazione (post-frana):

Totale	€ 57,000.00
--------	-------------

Tasso di sconto applicato:

Tasso di sconto	0.0166
-----------------	--------

Anni	Costi	Benefici	Sconto		Valore attuale
			Costi	Benefici	
1	€ 17,652.00	€ 0.00	€ 17,363.76	€ 0.00	-€ 17,363.76
2	€ 400.00	€ 0.00	€ 387.04	€ 0.00	-€ 387.04
3	€ 400.00	€ 0.00	€ 380.72	€ 0.00	-€ 380.72
4	€ 400.00	€ 0.00	€ 374.51	€ 0.00	-€ 374.51
5	€ 400.00	€ 0.00	€ 368.39	€ 0.00	-€ 368.39
6	€ 400.00	€ 0.00	€ 362.38	€ 0.00	-€ 362.38
7	€ 400.00	€ 0.00	€ 356.46	€ 0.00	-€ 356.46
8	€ 400.00	€ 0.00	€ 350.64	€ 0.00	-€ 350.64
9	€ 400.00	€ 0.00	€ 344.91	€ 0.00	-€ 344.91
10	€ 400.00	€ 0.00	€ 339.28	€ 0.00	-€ 339.28
11	€ 400.00	€ 0.00	€ 333.74	€ 0.00	-€ 333.74
12	€ 400.00	€ 0.00	€ 328.29	€ 0.00	-€ 328.29
13	€ 400.00	€ 0.00	€ 322.93	€ 0.00	-€ 322.93
14	€ 400.00	€ 0.00	€ 317.66	€ 0.00	-€ 317.66
15	€ 400.00	€ 0.00	€ 312.47	€ 0.00	-€ 312.47
16	€ 400.00	€ 0.00	€ 307.37	€ 0.00	-€ 307.37
17	€ 400.00	€ 0.00	€ 302.35	€ 0.00	-€ 302.35
18	€ 400.00	€ 0.00	€ 297.41	€ 0.00	-€ 297.41
19	€ 400.00	€ 0.00	€ 292.56	€ 0.00	-€ 292.56
20	€ 400.00	€ 57,000.00	€ 287.78	€ 41,008.39	€ 40,720.61
Valore attuale netto					€ 17,277.75

Tabella 9 Analisi costi/benefici per la frana in via Valdaro

Il caso della frana di Fara Vicentino in via Costa è ancora più complicato dal punto di vista dell'analisi costi/benefici a posteriori: non solo non esiste alcun progetto di risistemazione, ma per calcolare il valore economico dell'abitazione parzialmente distrutta (Figura 34) sarebbe necessario conoscere il prezzo di acquisto e la rivalutazione immobiliare. In aggiunta, c'è la possibilità che l'intervento di prevenzione costituito dai drenaggi sia insufficiente a garantire la sicurezza in una zona in cui sono presenti case abitate nelle immediate vicinanze della frana (al di sopra del coronamento e di fianco, oltre a quella distrutta all'interno della stessa), implicando una necessaria infissione di pali di ancoraggio al substrato come opera preventiva.



Figura 34 Abitazione distrutta dalla frana in Via Costa, Fara Vicentino

5.5. Considerazioni sugli interventi di prevenzione

La percentuale di risparmio ottenuta rappresenta una cifra molto importante, soprattutto dal momento in cui la si consideri in un'ottica amministrativa, dove ogni spesa dev'essere pesata e inserita all'interno del contesto comunale; inoltre,

nel caso in cui l'intera somma prevista dai progetti di risistemazione fosse effettivamente disponibile, il 40% di risparmio potrebbe essere reinvestito in altre opere di prevenzione, risultando in un aumento della sicurezza di grandi porzioni del territorio comunale. Oltre all'azione preventiva, però, non va dimenticato il ruolo della manutenzione nella stabilità del versante: il controllo e l'analisi anno per anno delle opere preventive già realizzate rappresentano un'azione da svolgere necessariamente, ed è la base di tutte le considerazioni finora effettuate. Un'ottima opera di prevenzione seguita da una scarsa manutenzione equivale ad un impatto pressoché nullo dell'opera di prevenzione stessa. Non è un caso, infatti, che molti dei dissesti avvenuti durante le precipitazioni del Novembre 2010 si siano sviluppati anche a causa di una cattiva gestione delle opere già realizzate in precedenza. È importante sottolineare questo aspetto nella gestione delle strutture esistenti, soprattutto in previsione del nuovo Progetto di Legge presentato in Senato dal comune di Vicenza, volto ad ottenere un sistema di controllo e di prevenzione più snello e attento riguardo alla difesa del suolo e alla sfida rappresentata dalle calamità naturali.

6. Conclusioni

Lo studio realizzato ha permesso una comprensione accurata dei fenomeni franosi avvenuti a seguito delle intense precipitazioni avvenute nel Novembre 2010, che hanno causato numerosi disagi a gran parte della popolazione della Provincia di Vicenza. Lo scopo ultimo è stato quello di capire se e quanto i dissesti potessero essere previsti prima dell'alluvione suddetta, concentrando l'attenzione sulle modalità con cui sarebbe stato possibile attuare gli interventi di prevenzione adatti. La presente tesi è stata realizzata tramite tre analisi: statistica, numerica e costi/benefici.

L'analisi statistica ha mostrato come i fenomeni di scivolamento e di colata, a piccola scala, siano predisposti da diversi fattori ben distinti, che permettono di individuare determinate aree a suscettibilità più elevata e, quindi, più potenzialmente pericolose per la popolazione. Le informazioni desunte dal modello non sono state però sufficientemente esaustive, in quanto l'analisi spaziale ha assegnato un'alta suscettibilità da frana ad intere colline, versanti e Comuni: tale risultato sarebbe impensabile in un'ottica di intervento, poiché non sarebbe economicamente possibile operare con soluzioni preventive su tutto il territorio interessato. Il lavoro statistico svolto generalmente su tutto il territorio, quindi, deve necessariamente essere accompagnato da un'analisi effettuata versante per versante, interrogando la popolazione e le autorità locali per venire a conoscenza degli aspetti più intimi di ogni frana o movimento già avvenuto nel passato. Una volta fatto questo, si devono considerare tutti gli aspetti legati alla vulnerabilità non trattati in questo documento, relativi al rischio legato alla vita e all'attività antropica del territorio. Solo in questo modo si possono identificare quelle porzioni di territorio più problematiche sulle quali agire con maggior tempestività, al fine di difenderle da eventuali dissesti scatenati da precipitazioni molto intense. Proprio a causa delle scarse informazioni relative alle caratteristiche proprie di ogni dissesto avvenuto nel Marosticano, quindi, è stato cambiato approccio, concentrando l'attenzione su alcuni Comuni di interesse, Molvena e Carrè, e continuando l'analisi dei fenomeni franosi a grande scala. Come intervento di prevenzione atto ad evitare lo sviluppo delle frane tipiche di questo territorio sono stati previsti dei drenaggi o trincee drenanti, opere poste a

bassa profondità in grado di abbattere di qualche metro il livello della falda freatica e aumentare così le caratteristiche di resistenza del terreno negli strati più superficiali. Per verificare le condizioni di stabilità con i drenaggi è stato implementato un modello numerico alle differenze finite analizzando un versante di prova, testando la presenza o meno di movimento imponendo prima una falda coincidente al piano campagna e successivamente una depressa dall'azione del drenaggio. L'analisi così svolta ha confermato una maggior stabilità nel caso in cui la falda sia depressa. Come ultimo passaggio è stata studiata la convenienza dell'intervento di prevenzione proposto da un punto di vista prettamente economico, utilizzando un'analisi costi/benefici: questa è stata utilizzata a posteriori, valutando quale spesa sarebbe risultata essere maggiore tra le due alternative proposte, ossia la possibilità di effettuare la prevenzione e la certezza di dover attuare opere di sistemazione. In tutti i vari casi analizzati nel Comune di Molvena, ipotizzando un tempo di ritorno della precipitazione tale da causare il dissesto pari a 20 anni, la spesa per la prevenzione è risultata essere del 40% inferiore rispetto ai costi da sostenere una volta accaduta una frana. Cercare di prevenire il fenomeno franoso è quindi la scelta più conveniente in termini economici, a condizione che si abbia una buona conoscenza del fenomeno alla scala del versante e, soprattutto, che venga eseguito negli anni un adeguato e costante lavoro di manutenzione delle opere previste.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare in primis il Dott. Mario Floris, per il continuo supporto e i preziosi consigli forniti durante i mesi di lavoro alla tesi.

Ringrazio anche il Dott. Enrico Busnardo, per l'aiuto dato durante le chiacchierate più scientifiche e nella realizzazione dell'analisi statistica.

Un sentito ringraziamento va a all'Ing. Giovanni Stevan dell'Ufficio di Difesa del Suolo della Provincia di Vicenza, per gli insegnamenti e le discussioni sui vari aspetti tecnici trattati durante l'attività di stage.

Ringrazio tutta la mia famiglia, sempre pronta a sostenermi in questi anni e negli ultimi mesi di lavoro, facendomi capire l'importanza di guardare sempre avanti.

Ringrazio inoltre tutti i miei amici, che hanno contribuito ad allietare le mie giornate con risate, scherzi e bei momenti passati assieme.

Soprattutto desidero ringraziare di cuore la mia Mimi, partner ideale per le nostre scampagnate in campagna, per le nostre insostituibili chiacchierate e per tutte le stupende esperienze vissute insieme. Ti ringrazio per avermi ascoltato durante tutte le mie elucubrazioni mentali, per avermi sostenuto moralmente e per avermi fatto sorridere ogni giorno. Ti voglio bene!

Allegato 1

Esempio di codice di calcolo utilizzato in FLAC®:
Caso analizzato: frana in Via Valdaro, Carrè
Intervento di prevenzione: trincea drenante

```
config
grid 200,100
m m
set gravity=9.81

;-----
;GEOMETRIA PENDIO
;-----

gen 0,0 0,40 110,40 110,0
table 1 0,0 0,36 3.71,34.47 4.67,33.67 6.87,33.44 8.24,33 9.27,32.5 10.31,32
11.34,31.5 12.37,31 13.46,30.59 14.51,30 15.54,29.5 16.58,29 17.63,28.5 18.68,28
19.73,27.5 20.78,27 21.79,26.38 23.99,26 26.64,25.5 29.36,25 32.23,24.5 34.87,24
36.2,23.75 37.34,23.5 39.65,23 42.05,22.5 44.57,22 45.78,21.77 46.82,21.5 48.49,21
50.08,20.5 51.6,20 52.89,19.5 53.85,19 54.7,18.5 55.55,18 56.43,17.53 59.2,17
61.86,16.5 65.17,16 72.24,15 76.45,14 77.44,13.5 78.42,13 81.03,12 82.93,11.5
84.93,11 87.29,10.5 90.09,10 94.06,8.79 98.2,8.6 100.03,8 101.62,7.5 103.19,6.84
108.48,6.61 110,0
gen table 1
model null region 167 98
group 'null' region 167 98
group delete 'null'

;-----
;GEOMETRIA STRATI
;-----

table 2 19.7,27.5 29,19.06 49.82,18.18 75.34,10.66 92.44,3.33 100.19,0
gen table 2
table 3 15.5,29.52 29,17.27 49.82,16.38 75.34,9.76 92.44,2.13 97.20,0
gen table 3

;-----
;CORREZIONI GEOMETRIA STRATI
;-----

ini x 97.58164 y 0.0030044913 i 178 j 1
ini x 97.19834 y 0.009186804 i 177 j 1
ini x 97.19834 y 0.0 i 177 j 1
ini x 97.58164 y 0.0 i 178 j 1
ini x 100.38841 y 0.015369117 i 183 j 1
ini x 100.178215 y 0.0030044913 i 182 j 1
ini x 100.178215 y 0.0 i 182 j 1
ini x 100.38841 y 0.0 i 183 j 1

;-----
;CONDIZIONI AL CONTORNO
;-----

fix x i 1 j 1 90
fix x i 201 j 1 4
fix x i 200 j 4
fix x i 200 j 5 10
fix x i 199 j 10
fix x i 199 j 11 15
fix x i 198 j 16
fix x i 198 j 17
fix x y j 1

;-----
; PROPRIETA' MATERIALI PER INIZIALIZZAZIONE
;-----
```

```

model mohr notnull group 'Ini2:Inizializzazione2'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12 friction=40.0 dilation=0.0
tension=1000000.0 notnull group 'Ini2:Inizializzazione2'
group 'Ini2:Inizializzazione2' region 131 35
model mohr group 'Ini2:Inizializzazione2'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12 friction=40.0 dilation=0.0
tension=1000000.0 group 'Ini2:Inizializzazione2'
group 'Ini2:Inizializzazione2' region 78 45
model mohr group 'Ini2:Inizializzazione2'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12 friction=40.0 dilation=0.0
tension=1000000.0 group 'Ini2:Inizializzazione2'
group 'Ini2:Inizializzazione2' region 139 25
model mohr group 'Ini2:Inizializzazione2'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12 friction=40.0 dilation=0.0
tension=1000000.0 group 'Ini2:Inizializzazione2'
group 'Ini2:Inizializzazione2' region 147 20
model mohr group 'Ini2:Inizializzazione2'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12 friction=40.0 dilation=0.0
tension=1000000.0 group 'Ini2:Inizializzazione2'
group 'Ini2:Inizializzazione2' region 148 20
model mohr group 'Ini2:Inizializzazione2'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12 friction=40.0 dilation=0.0
tension=1000000.0 group 'Ini2:Inizializzazione2'
group 'Ini1:Inizializzazione1' region 133 16
model elastic group 'Ini1:Inizializzazione1'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 group 'Ini1:Inizializzazione1'
history 999 unbalanced
solve elastic

;-----
; PROPRIETA' MATERIALI PER MODELLO
;-----

ini xdisp=0
ini ydisp=0
group 'Colluvio:Colluvio' region 171 19
model mohr group 'Colluvio:Colluvio'
prop density=1900.0 bulk=5E6 shear=2E6 cohesion=10000.0 friction=23.0 dilation=0.0
tension=10000.0 group 'Colluvio:Colluvio'
group 'Eluvio:Eluvio' region 171 6
model mohr group 'Eluvio:Eluvio'
prop density=1900.0 bulk=1E6 shear=5E5 cohesion=6000.0 friction=15.0 dilation=0.0
tension=6000.0 group 'Eluvio:Eluvio'
group 'Eluvio:Eluvio' region 144 22
model mohr group 'Eluvio:Eluvio'
prop density=1900.0 bulk=1E6 shear=5E5 cohesion=6000.0 friction=15.0 dilation=0.0
tension=6000.0 group 'Eluvio:Eluvio'
group 'Eluvio:Eluvio' region 139 25
model mohr group 'Eluvio:Eluvio'
prop density=1900.0 bulk=1E6 shear=5E5 cohesion=6000.0 friction=15.0 dilation=0.0
tension=6000.0 group 'Eluvio:Eluvio'
group 'Eluvio:Eluvio' region 135 27
model mohr group 'Eluvio:Eluvio'
prop density=1900.0 bulk=1E6 shear=5E5 cohesion=6000.0 friction=15.0 dilation=0.0
tension=6000.0 group 'Eluvio:Eluvio'
group 'Rock:basalt' region 132 18
model mohr group 'Rock:basalt'
prop density=2700.0 bulk=3.32E10 shear=1.32E10 cohesion=6.62E7 friction=31.0
dilation=0.0 tension=1.31E7 group 'Rock:basalt'

;-----
; DEFINIZIONE TAVOLA D'ACQUA
;-----

table 4 0,36 3.71,34.47 4.67,33.67 6.87,33.44 8.24,33 9.27,32.5 10.31,32
11.34,31.5 12.37,31 13.46,30.59 14.51,30 15.54,29.5 16.58,29 17.63,28.5 18.68,28
19.73,27.5 20.78,27 21.79,26.38 23.99,26 26.64,25.5 29.36,25 32.23,24.5 34.87,24
36.2,23.75 37.34,22.5 39.65,21.8 42.05,21 44.57,20 45.78,19.77 46.82,19.5 48.49,19
50.08,18.5 51.6,18 52.89,17.5 53.85,17 54.7,16.5 55.55,16 56.43,15.53 59.2,15
61.86,14.5 65.17,14 72.24,13 76.45,12.9 77.44,12.8 78.42,12.7 81.03,12 82.93,11.5
84.93,11 87.29,10.5 90.09,10 94.06,8.79 98.2,8.6 100.03,8 101.62,7.5 103.19,6.84
108.48,6.61 109,0
water density=1000
water table 4
solve

```

BIBLIOGRAFIA

Ayalew, L., Yamagishi, H. (2004) The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65, 15-31.

Barbieri, G., De Zanche, V., Medizza, F., Sedeà, R. (1982) Considerazioni sul vulcanismo terziario del Veneto occidentale e del Trentino meridionale. *Rend. Soc. Geol. It.*, 4, 267-270.

Barbieri G., De Zanche, V., Sedeà, R. (1991) Vulcanismo paleogenico ed evoluzione del semigraben Alpone-Agno (Monti Lessini). *Rend. Soc. Geol. It.*, 14, 5-12.

Bosellini, A. (2004) The Western Passive Margin of Adria and its carbonate platform. *Special Volume of the Italian Geological Society for the IGC 32 Florence*, 79-92.

Cruden, D. M. (1991) A simple definition of a landslide. *Bulletin of Engineering Geology*, 43.

Cruden, D. M., Varnes, D. J. (1996) Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and mitigation - Chapter 3*, 247, 36-75.

Dal Prà, A., Silvano, S. (1990) Considerazioni sulla franosità del territorio nella provincia di Vicenza. In: *Rapporto sullo stato dell'ambiente nella provincia di Vicenza*. Collegio degli Ingegneri della provincia di Vicenza, A1-A32.

De Vecchi, G. P., Gregnanin, A., Piccirillo, E. M. (1976b) Tertiary Volcanism in the Veneto: Magmatology, Petrogenesis and Geodynamic Implications. *Geol. Rundsch*, 65, 701-710.

Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M. L. (1996) *Landslide Recognition*. Wiley, Chichester, 251.

Evangelina, S. R., Rajamanickam, G. V., Kumaravel, P. (2012) Landslide susceptibility analysis using Probabilistic Certainty Factor Approach: a case study on Tevankarai stream watershed, India. *Journal of Earth System Science*, 121/5, 1337-1350.

Floris, M., D'Alpaos, A., De Agostino, A., Stevan, G., Tessari, G., Genevois, R. (2012) A process-based model for the definition of hydrological alert systems in landslide risk mitigation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 3343-3357.

Floris, M., Iafelice, M., Squarzoni, C., Zorzi, L., De Agostini, A., Genevois, R. (2011) Using online databases for landslide susceptibility assessment: an example from the Veneto Region (northeastern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 1915-1925.

Frattoni, P., Crosta, G. B. (2006) Valutazione dell'accettabilità del rischio da frana e analisi costi-benefici. *Giornale di Geologia Applicata*, 4, 49-56.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, 181-216.

Itasca FLAC 7® Manual Table of Contents.

Lee, S, Pradhan, B. (2006) Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Island, Malaysia, *Journal of Earth System Science*, 115/6, 661-672.

Momigliano, S., Nuti, F. G., De Marco, A., Oglialoro, C., Florio, M., Martelli, M., Piacentino, D., Sarpi, D. (2001) La valutazione dei costi e dei benefici nell'analisi dell'impatto della regolazione - Dipartimento della funzione pubblica. Rubettino Editore, 36-46.

Remondo, J., Gonzales, A., Diaz, J. R., Cendrero, A., Fabbri, A., Chung, F. (2003) Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30, 437-449.

Romeo, R. W., Floris, M., Veneri, F. (2006) Area-scale landslide hazard and risk assessment. *Environmental Geology*, 51, DOI 10.1007/s00254-006-0294-1.

Tareq, H. M., Juhari, M. A. (2011) Landslide susceptibility assessment using Frequency Ratio Model applied to an area along the E-W Highway (Gerik-Jeli). *American Journal of Environmental Sciences*, 7, 43-50.

Varnes, D. J., (1984) Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards* 3, UNESCO, Paris.

Zampieri, D. (1995) Tertiary extension in the southern Trento Platform, Southern Alps, Italy. *Tectonics*, 14/3, 654-657.