



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Scienze della Terra
Direttore Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**ANALISI CINEMATICA, IDROGEOLOGICA E
PROPOSTE DI INTERVENTO PER IL
DISSESTO IN SINISTRA IDROGRAFICA DEL
RIO VERDE, IN LOCALITÀ PASSO DELLA
MORTE (UD)**

Relatore: Prof.ssa Simonetta Cola

Correlatore: Dott. Gianluca Marcato

Laureando: Andrea Scuri

ANNO ACCADEMICO 2012 / 2013

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	5
2. CLASSIFICAZIONE GENERALE DEI FENOMENI FRANOSI.....	7
2.1. Tipi di movimento.....	7
2.2. Stato di attività.....	10
2.3. Cause predisponenti ed innescanti.....	11
3. DESCRIZIONE DELL'AREA DI INDAGINE.....	13
3.1. Localizzazione geografica.....	13
3.2. Ambiente geologico.....	14
3.3. Unità litostratigrafiche.....	14
3.4. Evoluzione tettonica.....	17
3.5. Evoluzione geomorfologica.....	19
3.6. Assetto idrogeologico.....	20
4. INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO.....	21
4.1. Sistemi di monitoraggio.....	22
4.1.2. Sistemi di posizionamento satellitare.....	22
4.1.3. Inclinometri.....	23
4.1.4. Piezometri.....	24
4.1.5. Stazione termo – pluviometrica.....	25
4.1.6. Idrometro.....	25
4.2. Prove di laboratorio.....	26
4.3. Risultati delle prove geotecniche pregresse.....	35
4.4. Caratterizzazione geologico-stratigrafica.....	39

5. GEOMETRIA E CINEMATISMO DELLA FRANA 1.....	42
5.2. Dimensione e geometria.....	42
5.3. Spostamenti superficiali e profondi.....	44
5.4. Geometria del corpo di frana.....	49
5.5. Calcolo del volume di frana.....	54
6. ANALISI IDROGEOLOGICHE.....	57
6.1. Definizione del bacino idrografico.....	57
6.2. Sorgente e scaturigini.....	58
6.3. Curva di esaurimento.....	60
6.4. Descrizione geo-litologica del bacino.....	63
6.5. Analisi delle precipitazioni.....	64
6.6. Relazione pioggia-portata.....	69
6.7. Relazione portata-inclinometro.....	76
6.8. Falda acquifera.....	89
6.9. Analisi di stabilità preliminari.....	90
7. OPERE DI SISTEMAZIONE.....	94
7.1. Drenaggio delle acque.....	95
7.2. Riprofilatura.....	98
7.3. Rinforzo al piede del versante.....	104
8. CONCLUSIONI.....	108
BIBLIOGRAFIA.....	111
ALLEGATI.....	112
Allegato I.....	113
Allegato II.....	114
Allegato III.....	120

1 INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi è finalizzato allo studio di uno dei numerosi fenomeni franosi presenti nella zona del Passo della Morte, tra i comuni di Forni di Sotto e Ampezzo, in provincia di Udine.

L'importanza di uno studio accurato è dovuta alla presenza di un'arteria viaria di primaria importanza qual è la strada statale 52 Carnica che collega le province di Udine e Belluno.

In particolare, l'attenzione si è focalizzata sulla frana 1, che interessa la S.S. 52 per un tratto di circa 150 metri, posto prima dell'imbocco orientale della galleria San Lorenzo, in corrispondenza del torrente Rio Verde, sul versante meridionale del monte Tinisa. La frana è considerata un fenomeno complesso che si innesca come scivolamento rotazionale per poi evolvere in colata. Il suo sviluppo copre un dislivello altimetrico che va da 640 a 790 m s.l.m.

L'assetto geologico e le vicende tettoniche dell'area sono stati studiati con l'ausilio di pubblicazioni e relazioni geologico-tecniche dei diversi Enti che da oltre 15 anni si interessano delle problematiche legate ai fenomeni franosi della zona.

Successivamente si è passati alla perimetrazione del corpo di frana mediante l'utilizzo di foto aeree e di un modello digitale del terreno ad alta risoluzione (Lidar), così da determinarne un'estensione di circa 0,45 km² (4,5 ha).

Sono state poi analizzate le serie stratigrafiche e le indagini geognostiche pregresse, implementate da prove di laboratorio su nuovi campioni, così da avere a disposizione ulteriori dati sulle proprietà geotecniche dei terreni di frana.

Il passo successivo ha previsto un'accurata stima volumetrica del dissesto basata sui dati degli inclinometri presenti nell'area al fine di creare un modello tridimensionale del corpo di frana mediante software ArcGis.

Grazie ai dati inclinometrici e idrologici si è inoltre studiata la relazione esistente tra gli spostamenti indicati dagli strumenti e i regimi pluviometrici e di portata del Rio Verde così da correlare le variazioni dei parametri idrologici con gli incrementi di velocità della frana.

Dalle analisi si è compreso il ruolo di primaria importanza rivestito dalla circolazione idrica nel versante come causa del movimento, perciò si è deciso di

approfondire l'assetto idrogeologico dell'area mediante lo studio delle precipitazioni e degli idrogrammi di portata del Rio Verde, il cui flusso, ad eccezione degli istanti di pioggia e di quelli immediatamente successivi, deriva in massima parte dalla presenza di una fascia di scaturigini idrauliche ubicate nella parte alta della frana.

Infine, alla luce dei dati ottenuti, si sono proposti degli interventi per la messa in sicurezza del versante e una sua efficace stabilizzazione attraverso drenaggi delle acque, sistemazione del letto torrentizio, alleggerimenti alla testa della frana mediante riprofilatura e successivo appesantimento al piede al fine di migliorare le condizioni di stabilità dell'intera zona, caratterizzata dalla presenza di un altro dissesto adiacente alla frana 1.

2 CLASSIFICAZIONE GENERALE DEI FENOMENI FRANOSI

Una frana è un movimento di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante per azione della forza di gravità. (CRUDEN & VARNES,1991).

2.1 Tipo di movimento

Una delle tante classificazioni dei fenomeni franosi è quella proposta dall'International Geotechnical Society costituita dall'UNESCO al fine di fornire un censimento globale delle frane basato sul tipo di movimento che le caratterizza.

Una rapida analisi di tale di classificazione porta alla seguente suddivisione in otto categorie principali:

Crolli: per crollo si intende il movimento di caduta di materiali di qualsiasi dimensione e tipologia (più frequentemente rocce e detriti) in aria libera (**Figura 2.1.1**). Successivamente il materiale frantumato tende ad avanzare lungo il pendio sottostante per rotolamento o scorrimento

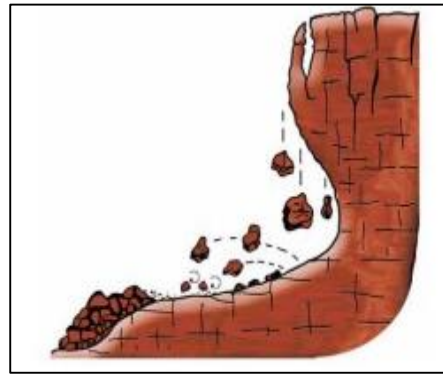


Figura 2.1.1 Schema di un crollo

fino a che la pendenza non cala creando gravi danni a tutto ciò che trova lungo il suo percorso. È un fenomeno molto rapido che caratterizza pendii acclivi (pareti) o aggettanti. Il distacco avviene, generalmente, in corrispondenza di superfici di discontinuità preesistenti quali fratture, giunti, faglie, piani di scistosità o di laminazione. Tali fenomeni, come già visto, oltre ad essere molto rapidi e violenti, a causa dell'elevata energia cinetica in gioco, risultano anche di difficile prevedibilità e quindi presentano una pericolosità molto elevata.

Ribaltamenti: il ribaltamento è dovuto ad una rotazione frontale o inflessione di un blocco di roccia delimitato dal resto dell'ammasso da sistemi di discontinuità quali giunti, fratture, faglie o di altro tipo, sia orizzontali che verticali (**Figura**

2.1.2). Perché un blocco sia soggetto a ribaltamento la verticale condotta dal suo baricentro al terreno deve cadere al di fuori della base del blocco stesso. Il fenomeno può svilupparsi in tutti i tipi di materiali: rocce, detriti e terre. Questa tipologia di movimento può avvenire con velocità estremamente variabili, da molto lente a molto rapide, nel caso in cui culminino in un crollo improvviso.

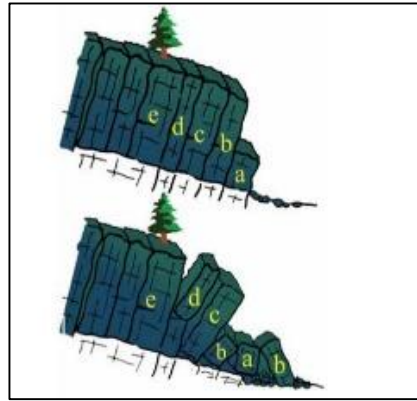


Figura 2.1.2 Schema ribaltamento

Scivolamenti Rotazionali e Traslazionali: Gli scorrimenti rotazionali si verificano con un movimento di rotazione attorno ad un punto esterno al versante e al di sopra del baricentro della massa franosa (**Figura 2.1.3**). La superficie di rottura è generalmente concava verso l'alto e di forma semicircolare o complessa. I materiali interessati possono essere terreni, detrito e rocce tenere.

Verificandosi progressivamente, la rottura definitiva è di norma preceduta dalla comparsa di fratture di trazione lungo la superficie che dopo il collasso costituirà il coronamento della frana. Tipiche di questi fenomeni sono le comparse di contropendenze e ristagni d'acqua sul corpo franoso. Gli scivolamenti traslazionali possono realizzarsi in roccia, terreno e detrito (**Figura 2.1.4**). Il movimento è localizzato in corrispondenza di superfici di discontinuità quali fratture, giunti, superfici di stratificazione disposte con giacitura a franapoggio che favorisce questo tipo di instabilità.

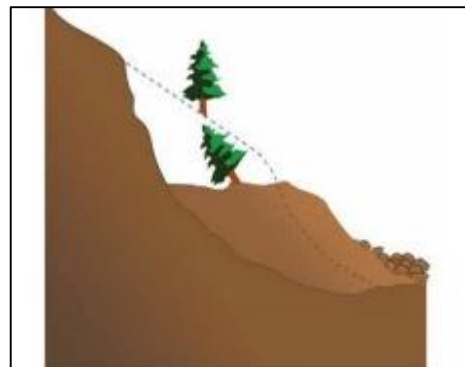


Figura 2.1.3 schema scivolamento rotazionale

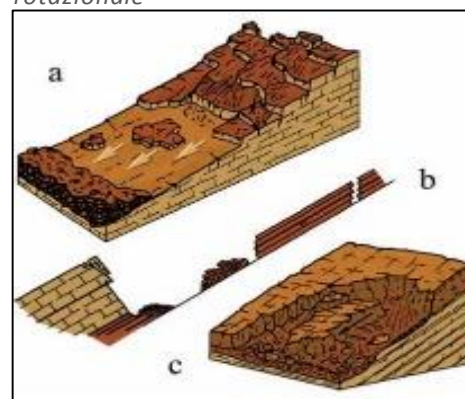


Figura 2.1.4 schema scivolamento traslazionale

Espandimenti laterali: gli espandimenti laterali hanno luogo quando corpi rocciosi rigidi e fratturati quali ad esempio dei calcari sono sovrapposti a terreni a comportamento tipicamente plastico come le argille (**Figura 2.1.5**). Questi fenomeni si sviluppano su scale temporali molto ampie e non costituiscono, pertanto, una minaccia a breve termine. Il movimento si innesca quando il peso dell'ammasso roccioso rigido gravando sulle argille le mobilizza e queste iniziano a scorrere lentamente portando con sé i blocchi più esterni separati dal corpo principale da fratture verticali che vengono progressivamente riempite dall'argilla sottostante plasticizzata.

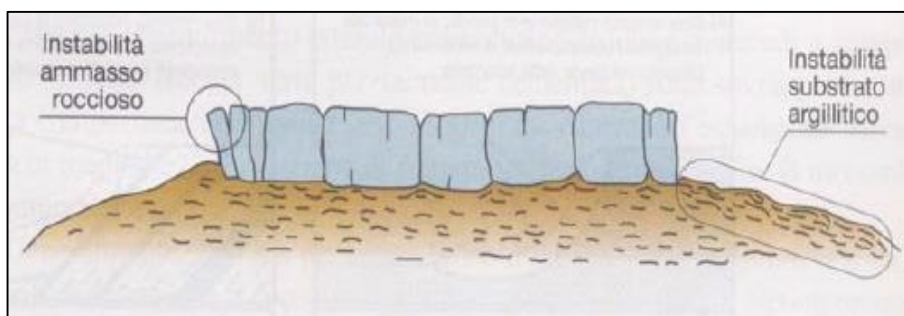


Figura 2.1.5. Schema espandimento laterale

Colamenti: possono avvenire sia in roccia che in detrito sciolto. Nel primo caso il movimento è abbastanza lento ma può coinvolgere interi versanti. Le rocce interessate devono essere molto fratturate (**Figura 2.1.6**). Nelle colate in terreni e detriti invece i granuli si comportano indipendentemente gli uni dagli altri e la

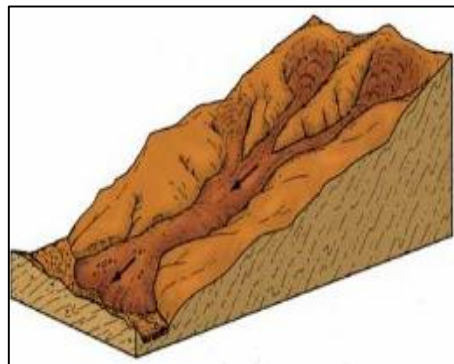


Figura 2.1.6 Schema colamento

velocità varia molto a seconda della granulometria del materiale e del suo contenuto in acqua, più ce n'è, maggiore sarà la velocità della colata. In entrambi i casi risulta talvolta di difficile interpretazione il riconoscimento di una superficie di scivolamento definita. Una delle cause principali di questo fenomeno sono le precipitazioni meteoriche che destabilizzano la massa e sono il fattore scatenante della sua messa in movimento.

Frane complesse: questi fenomeni non sono riconducibili all'interno di nessuna delle classi precedentemente descritte, ma derivano dalla combinazione di più tipi di movimento, essendo così caratterizzate da un'evoluzione complessa.

Non inserite all'interno della classificazione di Cruden & Varnes ma comunque di grande importanza risultano i DGPV o deformazioni gravitative profonde di versante. Questi fenomeni implicano deformazioni plastiche con spostamenti molto piccoli (mm/anno) lungo superfici di rottura non continue e disomogenee che interessano solo i materiali lapidei (**Figura 2.1.7**).

La caratteristica che pone questi fenomeni a cavallo tra movimenti franosi e tettonica gravitativa, oltre alla loro lentezza, è legata ai volumi in gioco, che possono essere rappresentati da interi versanti; fino a centinaia di milioni di m³.

Inoltre i DGPV possono avere effetto sull'assetto morfologico di un rilievo andando a creare, ad esempio, degli sdoppiamenti di cresta e trincee nella parte alta e dei rigonfiamenti a valle.

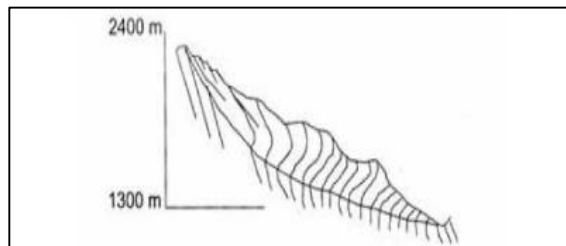


Figura 2.1.7 Schema DGPV

2.2 Stato di attività

Una classificazione che esula dal tipo di movimento e dalla geometria della massa franosa è rappresentata dallo stato di attività del fenomeno di instabilità (**Figura 2.2.1**).

In base alla classificazione di CRUDEN & VARNES (1991), le frane possono suddividersi in attive e inattive. Nella prima categoria ricadono quelle attive s.s. (in movimento al momento dell'osservazione), sospese (attive durante l'ultimo ciclo stagionale ma non al momento dell'osservazione) e riattivate.

Nella seconda categoria ricadono le frane quiescenti (riattivabili nel contesto morfoclimatico attuale), stabilizzate naturalmente o artificialmente (se le cause che le hanno generate non sono più in grado di riattivarle naturalmente o se sono state messe in sicurezza ad opera dell'uomo) e infine quelle relitte (verificatesi in un contesto morfoclimatico diverso da quello attuale).

Ovviamente questa classificazione implica la difficoltà di assegnare ad una frana

un certo stato di attività costante nel tempo, poiché questo potrà variare più volte dal momento dell'osservazione sul campo a quello in cui si sta descrivendo il fenomeno.

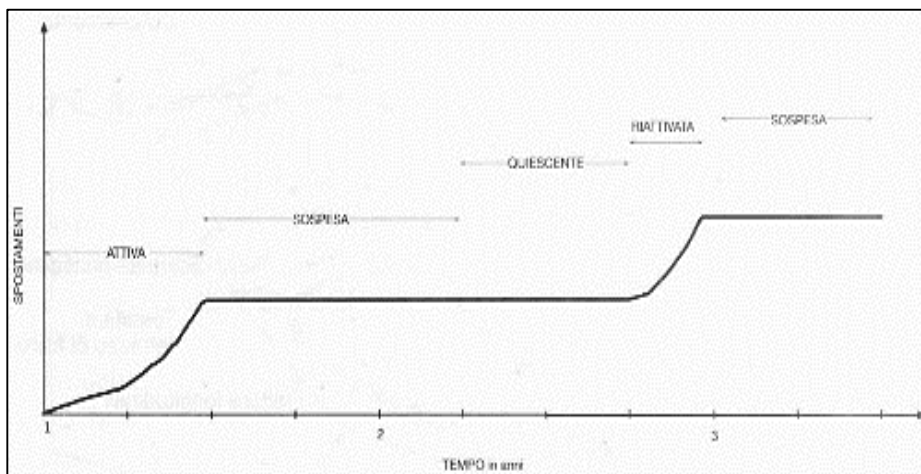


Figura 2.2.1 Stato di attività di un movimento franoso

2.3 Cause predisponenti ed innescanti

Analizzando un fenomeno franoso una delle attività più importanti da svolgere è quella di ricercare le cause che hanno determinato lo sviluppo dell'instabilità lungo il versante. Queste cause, spesso, sono molteplici e la loro interazione dà origine ad un complesso meccanismo di fattori, talvolta difficili da individuare e discernere.

In generale le cause possono essere distinte in esterne o interne al versante, oppure in predisponenti ed innescanti.

Cause esterne: rientrano in questa categoria quei fattori che tendono ad aumentare gli sforzi di taglio sul versante, tra queste si annoverano le variazioni geometriche (pendenza, lunghezza e altezza del pendio), i sovraccarichi (antropici o naturali), le riduzioni di carico (naturali o antropiche), gli shock e le vibrazioni.

Cause interne: rientrano in questa categoria i fattori che tendono a ridurre la resistenza al taglio, tra queste le più importanti sono rappresentate dalla rottura progressiva (fessurazione, rigonfiamento), dall'alterazione del materiale (chimica o fisica), dall'erosione per filtrazione (rimozione del fine o del cemento) e dalle variazioni del regime idrico (innalzamento della falda, svasso rapido, saturazione, pressioni di poro eccessive).

Cause Predisponenti: Fanno parte di questa categoria quei fattori geologici, geomorfologici, climatici, idrogeologici e antropici che rendono il pendio suscettibile di fenomeni di instabilità.

Cause innescanti: si definiscono tali i fattori sia interni che esterni al versante che provocano un'immediata instabilità nello stesso, diminuendo le resistenze al taglio o aumentando gli sforzi. Ovviamente per poter parlare di causa innescante, la sua attuazione deve portare ad una rapida instabilità sul versante, in un lasso di tempo ragionevolmente breve da far risultare logico un legame di causa-effetto.

3 DESCRIZIONE DELL'AREA DI STUDIO

3.1 Localizzazione geografica

L'area oggetto di studio si trova nelle Prealpi Carniche, in sinistra idrografica del fiume Tagliamento, tra i comuni di Forni di Sotto e Ampezzo, in provincia di Udine. L'unità di frana numero 1, indicata nella carta Tabacco numero 2, 1:25.000 (**Fig. 3.1.1**), oggetto del presente studio, costituisce solo una delle cinque frane facenti parte di un'importante movimento gravitativo in atto nella zona. In particolare quest'unità è ubicata poco prima dell'imbocco orientale della nuova galleria S. Lorenzo in località Passo della Morte, costruita recentemente lungo questo tratto della S.S. 52 Carnica proprio per risolvere i problemi legati alla sicurezza del vecchio tratto di strada. La frana 1 è posta in sinistra idrografica del Rio Verde che dalle pendici del monte Tinisa discende il versante fino a sfociare nel fiume Tagliamento.

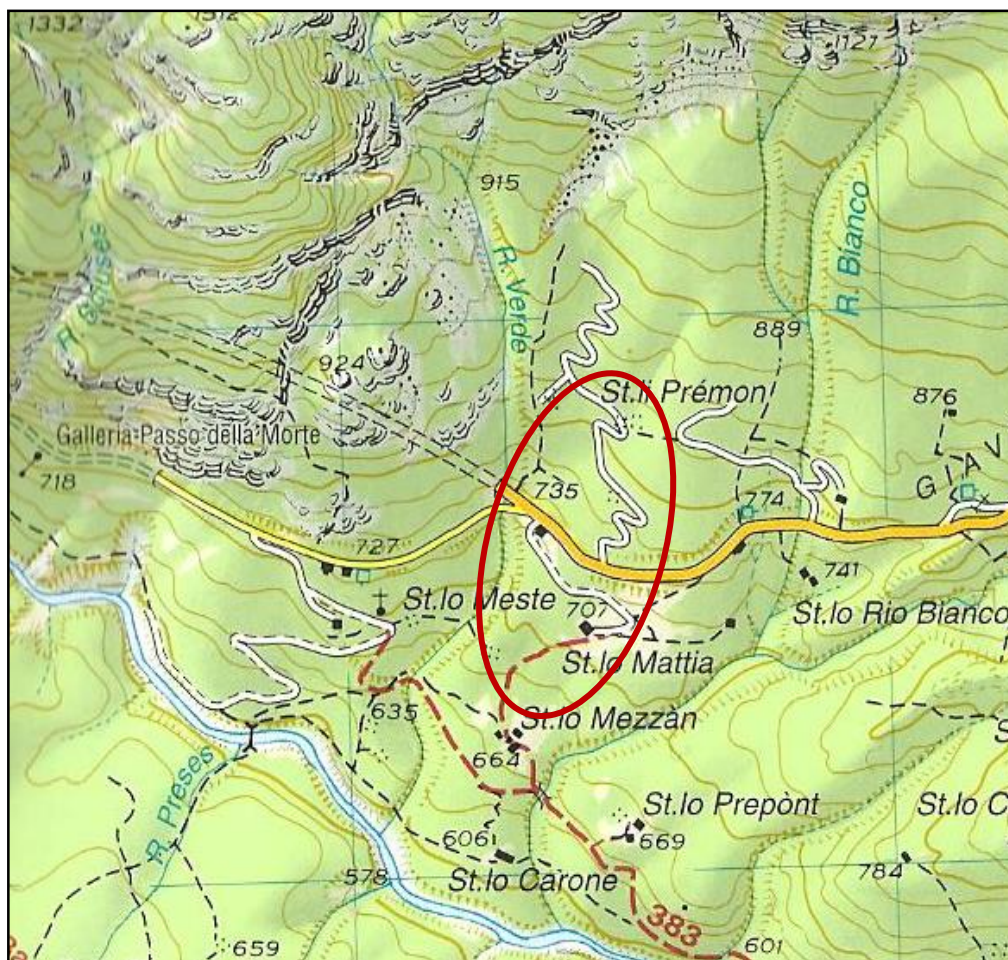


Figura 3.1.1. Localizzazione dell'unità di frana numero 1 e di parte del tracciato della nuova galleria (tratteggio nero)

3.2 Ambiente geologico

L'area del Passo della Morte ricade all'interno del complesso delle alpi Carniche meridionali, che appartengono alla più estesa catena Carnica.

Questa porzione sud-alpina si estende in affioramento dal limite meridionale della Catena Paleocarnica fino ai rilievi collinari prealpini, sotto cui si sviluppano le sue propaggini, coperte dai sedimenti alluvionali della pianura veneto-friulana.

Una delle caratteristiche della catena Carnica è quello di essere sud vergente così come lo sono anche i principali thrust del resto della catena sud-alpina.

I terreni che si rinvencono nella zona risalgono al Mesozoico, in particolare più rappresentati sono quelli medio-triassici, che sovrastano i più antichi affioramenti permo-triassici che vengono a giorno nelle zone di fondo valle a causa della costante azione erosiva di fiumi e ghiacciai che li ha riportati alla luce. Anche questa porzione della catena sud alpina ha avuto origine dalla chiusura dell'oceano della Tetide dovuto all'avvicinamento del margine Africano alla placca Europea. La parte più orientale della catena, però, ha conosciuto la sua completa costituzione solo dopo l'Oligocene (34-23 Ma). Infatti essa si è sviluppata dal Miocene superiore nella cosiddetta fase neoalpina. Prova di ciò, oltre alle diverse testimonianze neo-tettoniche, ne è l'ancor presente attività sismica che caratterizza questo lembo delle Alpi orientali.

3.3 Unità litostratigrafiche

La successione delle unità litostratigrafiche principali affioranti nella zona può essere così descritta dalle più antiche alle più recenti:

- Calcari dolomitici del M. Tiarfin (Ladinico): corrisponde ai "Calcari e calcari dolomitici massicci" (PISA, 1972). Si tratta di calcari e calcari dolomitici di colore grigio chiaro, massicci o in banchi metrici. L'unità ha uno spessore variabile fra i 200 ed i 300 m. La formazione si rinviene con continuità dalle pareti orientali del M. Tinisa fino al Torrente Auza a nord di Forni di sotto.
- Dolomia dello Schlern (Ladinico sup.): calcari e calcari dolomitici massicci o in spessi banchi di colore grigiastro. Lo spessore è variabile da 200 a 300 m. Risultano evidenti le fratturazioni con direzione circa E-O frutto dell'interessamento dell'area da parte della linea di Sauris di cui la dolomia

dello Schlern costituisce la formazione di tetto. Essa affiora lungo i versanti meridionali del Clap di Lavres e del Col Pimin che sovrastano la S.S. 52 “Carnica”, tra l’imbocco della galleria paramassi ad Est ed il corso del T. Auza ad Ovest.

- Calcari scuri stratificati (Carnico): si presenta sotto forma di calcari micritici, e subordinate calcareniti, con strati di spessore variabile dal decimetro al metro, alternati a livelli marnosi di colore scuro che raggiungono spessori di 25 cm.
- Calcari e dolomie stratificati (Carnico): un’alternanza di dolomie, calcari e calcareniti con sottili intercalazioni marnose grigie, spessore attorno ai 25 metri.
- Dolomie cristalline massicce (Carnico): rappresentate doloareniti compatte di colore grigio chiaro con spessore intorno ai 10 metri.
- Argille siltose varicolori (Carnico): soprattutto siltiti e argille siltose di colore rossastro con intercalazioni di strati arenacei di spessore variabile fino al metro, presenza di sottili strati di 5-10 cm di dolomie marnose grigio biancastre.
- Gessi (Carnico sup.): caratterizzati dalla presenza di impurità argillose sparse uniformemente nella roccia o in veli centimetrici scuri. Difficile la stima dello spessore a causa della forte tettonizzazione.
- Dolomie cariate (Carnico sup.): dolomie marnose grigie, dolomie chiare spesso vacuolari in strati più spessi, e marne dolomitiche. Sono frequenti breccie di collasso formate da clasti spigolosi centimetrici di dolomie grigio-giallastre analoghe a quelle che formano gli strati sopra e sottostanti, immersi in una matrice marnosa chiara.
- Dolomia di Forni (Norico): dolomie, dolomie marnose scure, decimetriche, selcifere, talvolta laminate, alternate a livelli marnosi ricchi di sostanza organica.
- Depositi quaternari: accumuli caotici di frane tardoglaciali talvolta cementate (marocche), conglomerati poligenici, alluvioni distribuite lungo l’asse vallivo dei corsi d’acqua, coperture detritiche al piede dei versanti talvolta associati a depositi morenici di età glaciale.

In **Figura 3.3.1** è presentato un estratto significativo della “Carta geologica con elementi di geomorfologia” redatta dal Dr. Marcato nell’ambito della tesi di dottorato “Valutazione della pericolosità da frana in località Passo della Morte”, in cui sono indicate anche le principali strutture tettoniche di seguito analizzate.

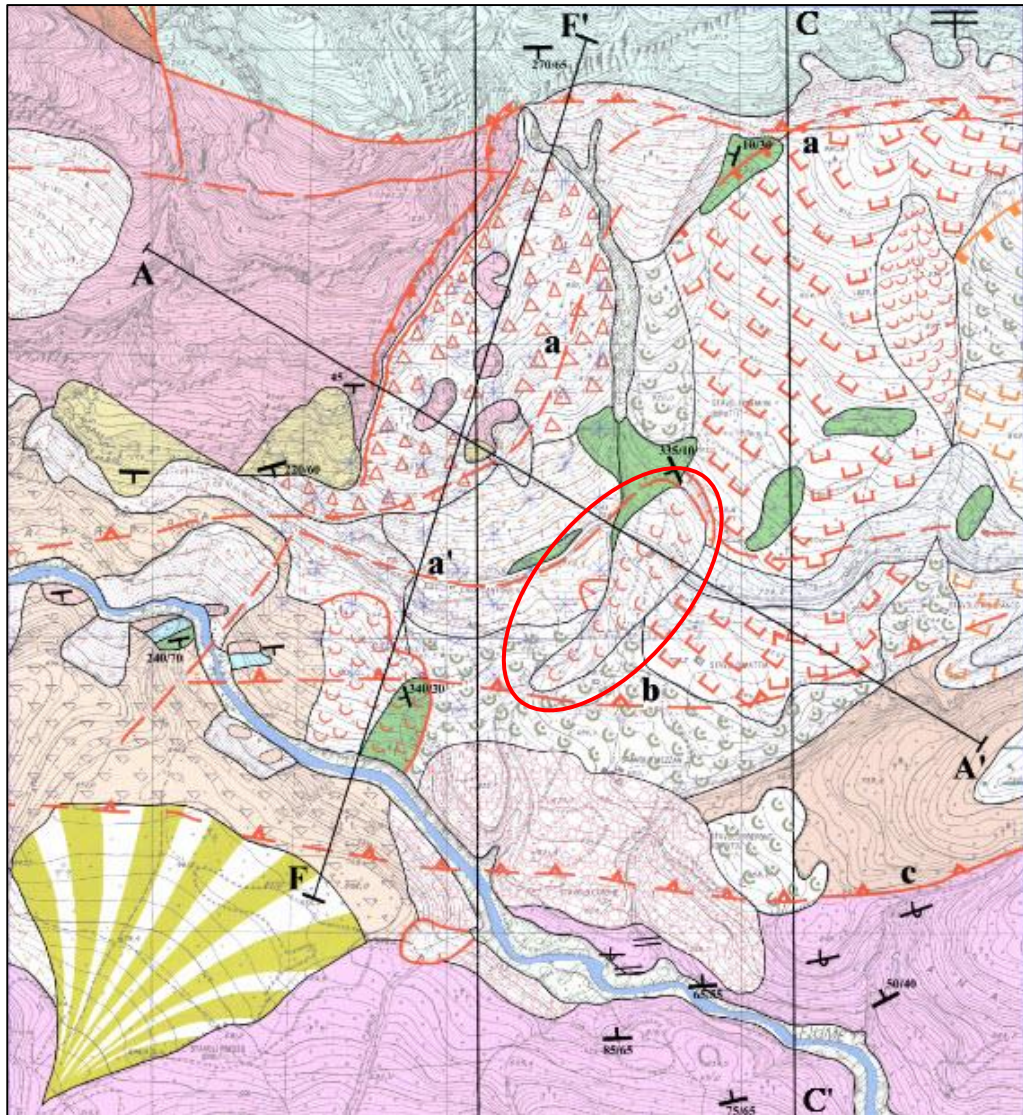


Figura 3.3.1. Stralcio della carta geologica con elementi di geomorfologia del Passo della Morte e indicazione della frana 1

DEPOSITI PREQUATERNARI	ELEMENTI STRUTTURALI	FORME E DEPOSITI DI VERSANTE DOVUTI ALLA GRAVITA'
Dolomia di Forni	Faglia certa	Detrito di versante
Dolomie e breccie cariate	Faglia presunta	Deposito di frana per colata
Gessi	Sovrascorrimento certo	Deposito di frana complessa
Argille siltose varicolori	Sovrascorrimento presunto	Deposito di frana per crollo
Dolomie cristalline massicce		
Calcari scuri stratificati		
Dolomia dello Schlem		
Calcari dolomitici del M. Tiarfin		
	FORME FLUVIALI E FLUVIOGLACIALI	
	Conoide di origine mista	Deposito colluviale
	Deposito alluvionale	Conglomerati alluvionali

3.4 Evoluzione tettonica

La situazione risulta piuttosto complicata, e caratterizzata da una serie di strutture con andamento E-O che nel loro insieme prendono il nome di Linee di Sauris. Tale disturbo tettonico di importanza regionale è frutto di una deformazione di età neogenica ed è stato influenzato, nel suo sviluppo, dalla fase di estensione Triassica. Esso si concretizza nei pressi del Passo della Morte, con un sovrascorrimento a basso angolo che mette a contatto le formazioni dal Ladinico sup. al Carnico (fino ai calcari scuri stratificati) con le argille siltose varicolori. Nella carta geologica il sovrascorrimento è indicato con la lettera “a”. Si può notare come l’andamento del thrust subisca un cambio di direzione da E-O a NE-SO proprio nei pressi del Passo, per poi tornare a seguire la direzione originale. Queste variazioni sono, molto probabilmente, da imputare alla fase estensionale Triassica. Infatti Pisa (1973) indica la presenza di faglie distensive che fratturano la formazione dei calcari del monte Tiarfin sul versante meridionale del monte Tinisa.

È interessante notare una struttura coniugata della linea “a” indicata con la lettera “a” che si diparte dal thrust principale e si rinviene nella zona della frana 1 e spiega il motivo per cui le argille siltose si ritrovano al di sopra dei gessi.

Con la lettera “b” si indica la lineazione tettonica, passante al di sotto della frana 1, che porta i gessi a sovrascorrere sulle dolomie cariate mentre verso occidente porta le argille siltose varicolori sulle dolomie cariate; in superficie il piano di scivolamento ha un’inclinazione di circa 40° ed immerge verso nord.

Altra struttura tettonica di importanza regionale è la linea dell’Alto Tagliamento indicata con la lettera “c”, anche in questo caso si tratta di un thrust sud-vergente con inclinazione del piano di scivolamento in superficie di circa 50°, che porta le dolomie cariate a sovrascorrere sulla dolomia di Forni.

Infine le lineazioni indicate con lettere “d” ed “e” si ritrovano nella parte più meridionale della valle del Tagliamento, al di fuori dell’area di studio, e hanno comportamento simile alle strutture precedenti.

Un profilo geologico trasversale C-C’ (**Figura 3.4.1**) a corredo della carta geologica è presentato per fornire una miglior definizione dell’andamento delle principali strutture tettoniche descritte.

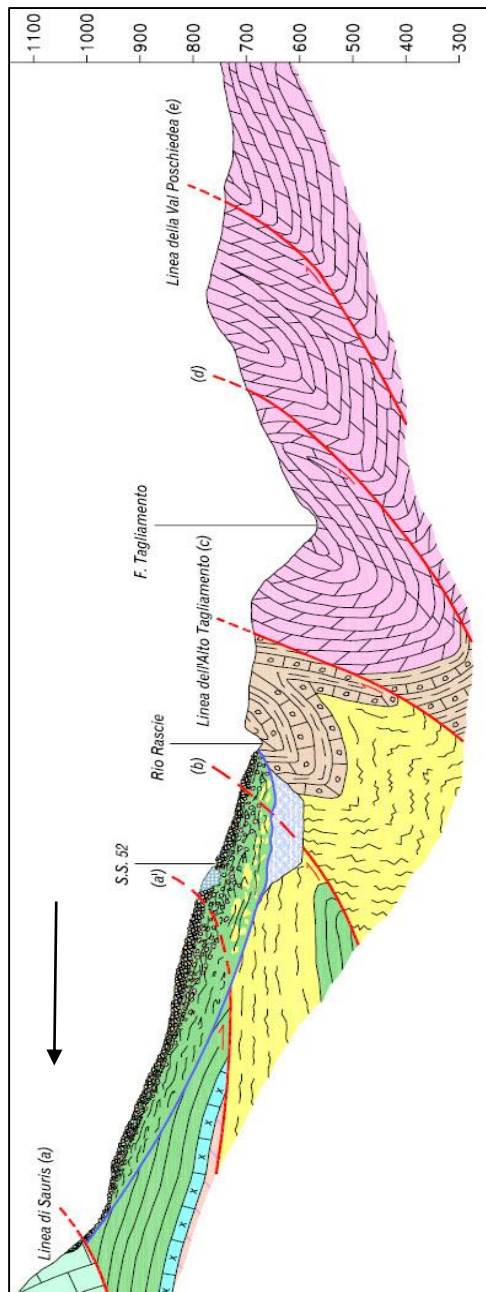
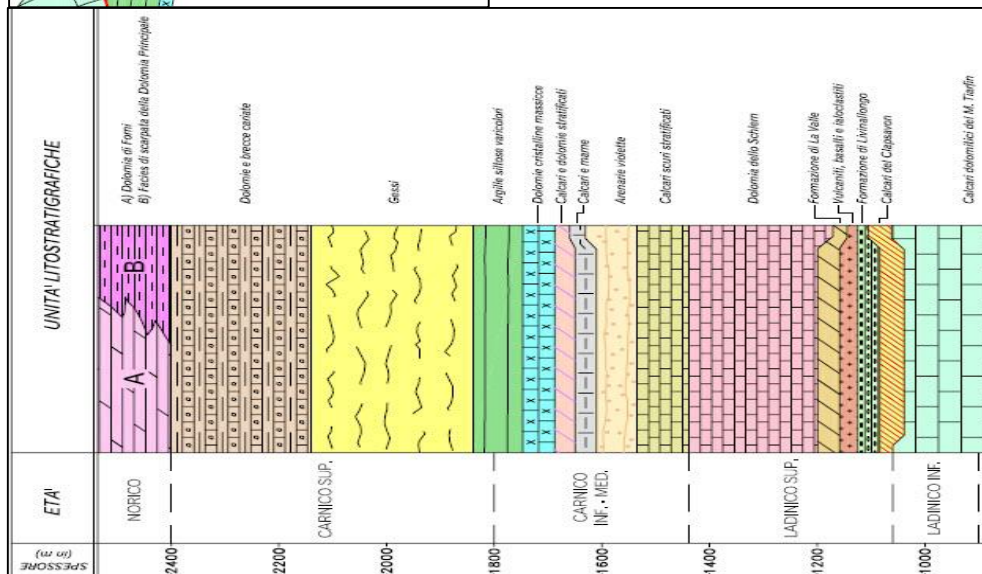


Figura 3.4.1. Profilo geologico C-C' dell'area di Passo della Morte e legenda stratigrafica



Dal punto di vista temporale diversi autori, Carulli & Ponton (1992) e Ponton & Venturi (2000), sostengono l'antecedenza di sviluppo della Linea di Sauris rispetto a quella dell'Alto Tagliamento.

Come detto nel paragrafo 3.2 l'attività tettonica neogenica non si è però esaurita e continua tuttora come testimoniato dall'attività sismica che si registra, come il terremoto del 1976 con epicentro nel comune di Gemona del Friuli (UD).

3.5 Evoluzione geomorfologica

Come in tutte le aree alpine l'aspetto geomorfologico principale è legato all'azione dei fenomeni gravitativi e di quelli erosivi tra cui spiccano gli effetti delle glaciazioni e dell'erosione fluviale.

Uno dei caratteri più interessanti è rappresentato dal riequilibrio dell'assetto dei versanti che si è venuto a creare al termine dell'ultima fase glaciale pleistocenica, che ha visto il suo culmine nella marocca di Sacrovint, un'imponente frana post-glaciale sviluppatasi sul versante meridionale della valle dell'Alto Tagliamento in corrispondenza dei Clap Di Lavres. La frana olocenica è stata responsabile della formazione del lago di sbarramento di Forni di Sotto. La causa di questo tipo di frane è da ricercare nella mancanza di supporto laterale precedentemente fornito dalla presenza di un corpo glaciale, il cui ritiro, genera una diminuzione della pressione di confinamento dei versanti. Altri fenomeni gravitativi sono avvenuti sul versante settentrionale nella zona compresa tra il Passo della Morte a est e Cima Corso a ovest. I successivi collassi delle pareti rocciose hanno dato origine a delle frane complesse, in parte ancora attive, che, in seguito a reiterati movimenti hanno rimaneggiato e ricoperto, in parte mascherandoli, i depositi glaciali dell'area. Uno di questi fenomeni complessi è rappresentato dalla grande frana che coinvolge il versante meridionale del monte Tinisa che ha determinato una progressiva chiusura della valle, con conseguente deviazione del corso del fiume Tagliamento, ed una generale inversione del rilievo, con la formazione di un piccolo laghetto effimero. Questa evidenza è testimoniata dalla presenza di contropendenze e gradini lungo il versante. Tale fenomeno complesso va a sovrapporsi, poco sopra la S.S. 52, ai fenomeni di dissesto che interessano in senso stretto l'imbocco orientale della galleria San Lorenzo al Passo della Morte tra cui vi è la frana 1.

3.6 Assetto idrogeologico

Questo aspetto risulta fondamentale per la comprensione del fenomeno franoso di Passo della Morte, vista la stretta correlazione esistente tra il movimento della frana e gli aumenti di portata delle scaturigini poste nell'estremità superiore. Queste venute d'acqua si rinvergono nei terreni alla base del massiccio del Monte Tinisa al contatto tra formazioni con diverse caratteristiche di permeabilità o in corrispondenza del passaggio di strutture tettoniche. In base alle prove di permeabilità di tipo "Le Franc" eseguite in tutta l'area di Passo della Morte si sono determinati tre complessi a diversa permeabilità relativi a distinti complessi geologici presenti nella zona.

Un complesso costituito dal detrito di frana avente permeabilità elevata nell'ordine dei 10^{-3} m/s costituito da materiale grossolano eterometrico rinvenuto alla base delle pareti rocciose.

Un complesso a permeabilità bassa nell'ordine dei 10^{-8} m/s costituito da siltiti e argilliti.

Un complesso carbonatico a permeabilità intermedia (10^{-5} m/s) ma caratterizzato da forte fessurazione la quale induce un fenomeno di permeabilità per carsismo.

Permeabilità (m/s)	Litologia	Classe di permeabilità
1.00E-03	Detrito di falda grossolano	alta
1.00E-05	Rocce carbonatiche	media
1.00E-08	Siltiti e argilliti	bassa

Tabella 3.6.1. Complessi idrogeologici principali dell'area

Il flusso sotterraneo principale è diretto dal massiccio del Tinisa e dalle sue pendici verso il fiume Tagliamento e occasionalmente, in corrispondenza di variazioni litologiche o presenza di lineazioni tettoniche, dà origine a sorgenti costituite da fasce di scaturigini idrauliche con allineamento circa est-ovest.

Nei capitoli seguenti si tratterà più nel dettaglio lo studio delle scaturigini che interessano la parte alta della frana 1, al fine di individuare le principali caratteristiche idrogeologiche e le connessioni col fenomeno franoso.

4 INDAGINI GEOGNOSTICHE E MONITORAGGIO

L'area del Passo della Morte, e in particolare la zona dell'imbocco orientale della galleria S. Lorenzo, a causa dell'elevata concentrazione di fenomeni di instabilità (**Fig. 4.0.1**) e presenza di strutture viarie, è oggetto di studio da oltre 15 anni.

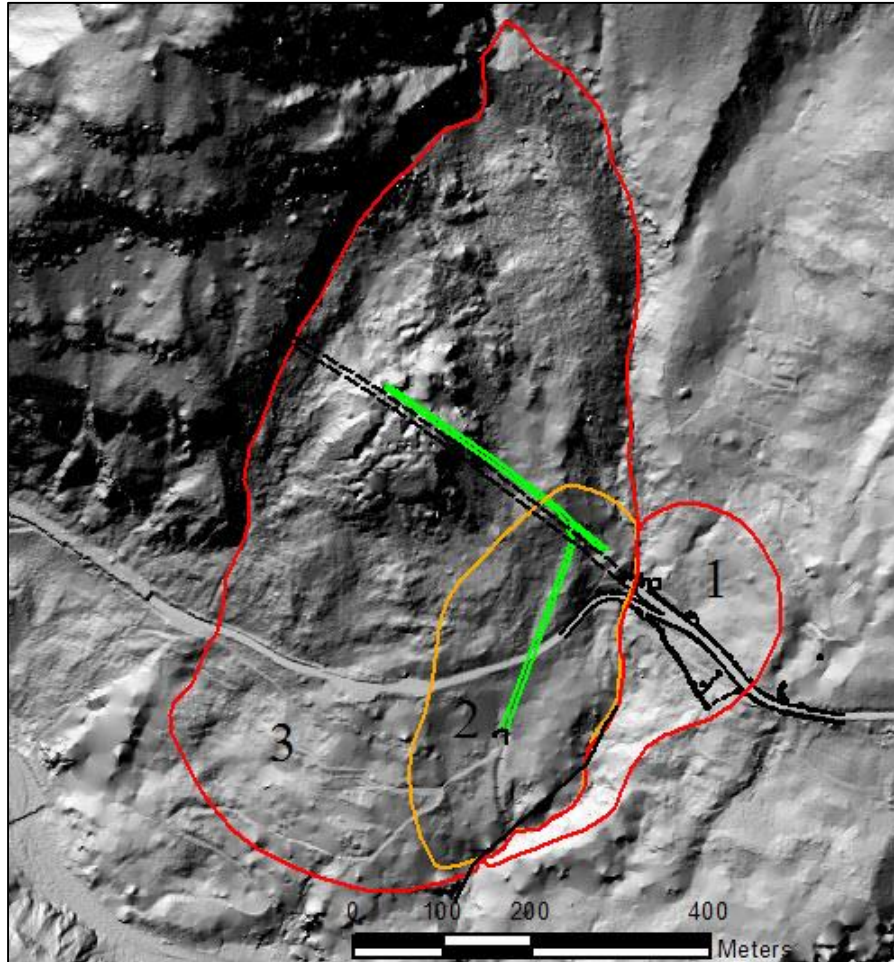


Figura 4.0.1. Area orientale del passo della Morte con presenza di tre frane e delle principali strutture viarie

Nell'immagine si notano le frane 1 e 2 che interessano rispettivamente il tratto precedente l'imbocco della galleria e il primo tratto della stessa, mentre la paleofrana numero 3 di tipo block slide interessa un tratto molto più ampio del versante. In nero è indicata la strada statale prima dell'imbocco e la sua continuazione tratteggiata in galleria. In verde si evidenzia la presenza di una galleria drenante, costruita per drenare le acque della frana 2 e convogliarle verso il Rio Verde. Per queste ragioni legate all'instabilità dell'area, nel tempo, sono stati installati diversi strumenti di monitoraggio tra cui sistemi di posizionamento satellitare, inclinometri, piezometri, idrometri e una stazione

pluviometrica. Inoltre sono state effettuate numerose prove geotecniche in laboratorio. Le indagini sono state operate congiuntamente dall'ANAS e dall'IRPI-CNR allo scopo di ottenere informazioni sul comportamento dei fenomeni franosi e pianificare adeguati interventi di messa in sicurezza dell'area.

Di seguito si riporta la descrizione delle principali indagini effettuate, le metodologie e le finalità delle stesse.

4.1 Sistemi di monitoraggio

Con questi strumenti si riesce ad ottenere una buona analisi temporale dei fenomeni franosi e dei parametri ad essi associati per comprendere meglio quale sia la cinematica dell'evento. In particolare al Passo della Morte si è proceduto all'installazione di sistemi di monitoraggio delle deformazioni superficiali e profonde, dei parametri meteo-climatici e dei livelli piezometrici.

4.1.2 Sistemi di posizionamento satellitare

Lo studio degli spostamenti superficiali è stato effettuato mediante l'utilizzo di un sistema GPS, il NAVSTAR-GPS, ovvero Navigation System with Time And Ranging (**Figura 4.1.2**), che permette di monitorare, rispetto ad un determinato sistema di coordinate, la posizione di un punto nello spazio al variare del tempo. In particolare, sono state utilizzate tre stazioni fisse di controllo in cui sono stati posizionati tre ricevitori mentre un quarto occupa a rotazione uno dei 18 capisaldi di riferimento dislocati sull'intero versante.

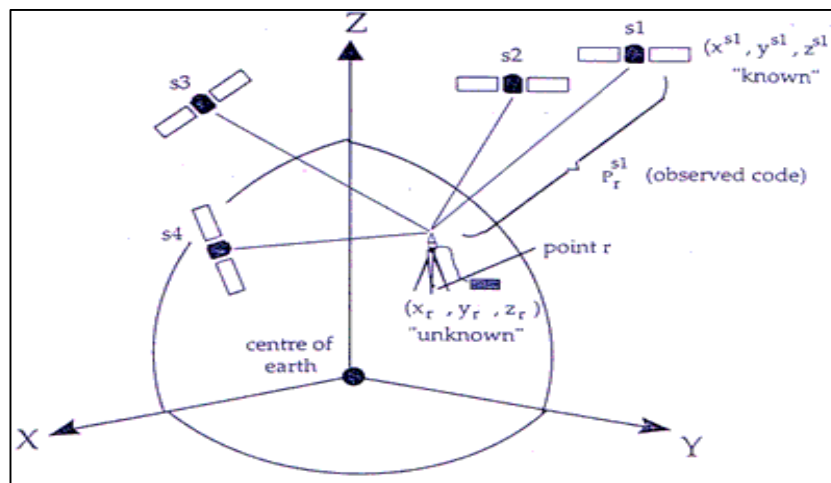


Figura 4.1.2. Schema posizionamento GPS

In questo modo si sono potuti determinare gli spostamenti di ciascun caposaldo nel tempo, calcolando anche il vettore della direzione di movimento superficiale.

4.1.3 Inclinatori

Lo studio delle deformazioni profonde è avvenuto tramite l'utilizzo di oltre 20 sonde inclinometriche dislocate in tutta l'area del Passo della Morte. L'installazione prevede la creazione nel terreno di un foro in cui si inserisce un tubo, generalmente in PVC o in metallo, dotato di quattro scanalature poste a 90° tra loro che fungeranno da guide per la sonda inclinometrica (**Figura 4.1.3.1**) che viene calata all'interno del tubo (**Figura 4.1.3**). La sonda è costituita da quattro sensori servo-accelerometrici disposti ortogonalmente tra loro e rispetto alle scanalature, così da registrare le deformazioni nelle due direzioni perpendicolari. La post elaborazione, effettuata mediante opportuni software, consente di convertire i dati acquisiti in spostamenti. Questo strumento permette quindi di quantificare le deformazioni profonde ed individuare il numero e la profondità dei piani di scivolamento presenti.

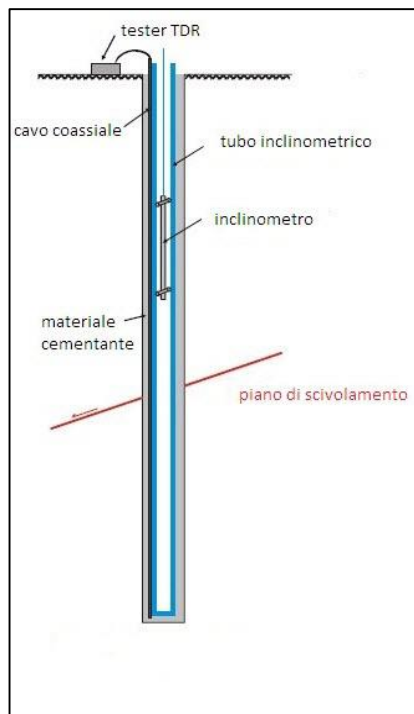


Figura 4.1.3. Schema sonda-tubo inclinometrico



Figura 4.1.3.1 Sonda inclinometrica

Una volta individuata una possibile superficie di scivolamento, possono essere installate sonde inclinometriche fisse, in corrispondenza della

profondità individuata, che collegate in superficie con un data logger permettono di registrare con intervallo temporale prefissato i valori di deformazione.

4.1.4 Piezometri

Uno degli aspetti più critici nello studio di un fenomeno franoso è l'altezza della falda acquifera presente nella zona instabile e la relativa pressione dei pori in profondità. Per effettuare un adeguato monitoraggio della stessa si è provveduto negli anni ad installare un certo numero di piezometri e celle piezometriche. Il piezometro è costituito da un tubo fenestrato, circondato da un filtro, all'interno del quale la pressione dell'acqua è uguale a quella circostante. La misura del livello dell'acqua può avvenire manualmente attraverso l'uso di un freaticometro che viene calato nel pozzetto oppure automaticamente nel caso di piezometrici elettrici, grazie ai quali è anche possibile registrare in continuo la variazione della pressione neutra.

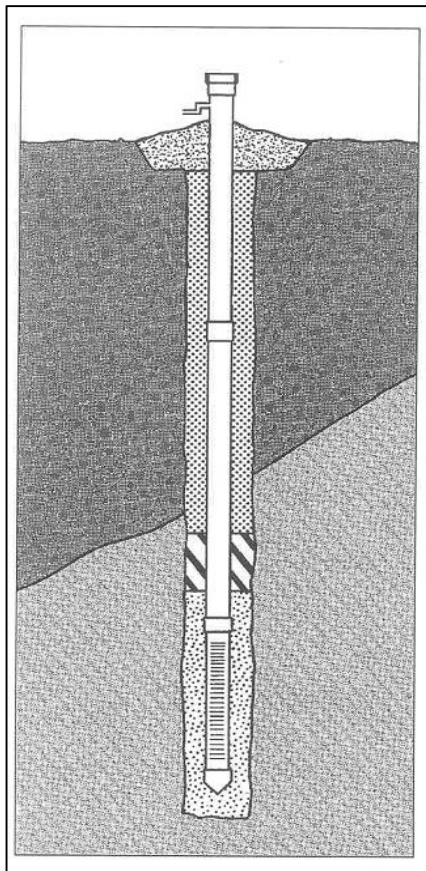


Figura 4.1.4 Piezometro a tubo aperto

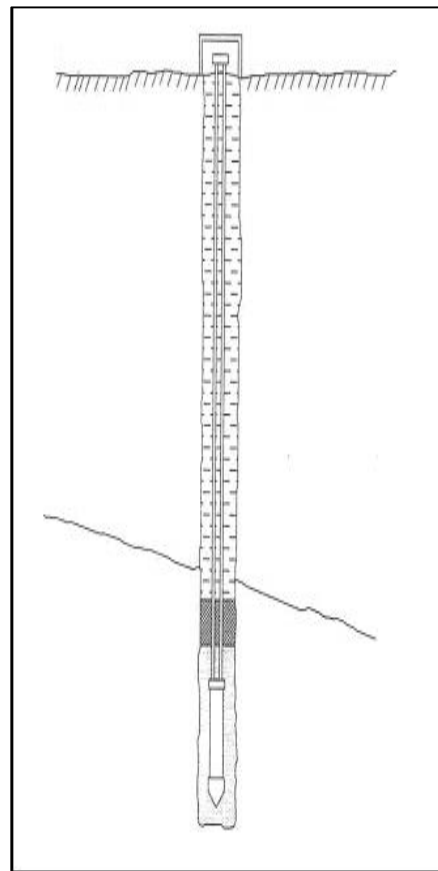


Figura 4.1.4.1. Piezometro Casagrande

Uno dei problemi che possono presentarsi è relativo al ritardo nella risposta della variazione del livello piezometrico all'interno del tubo rispetto all'ambiente circostante dovuto al tempo necessario all'acqua per attraversare il materiale filtrante che riveste la parte fenestrata del tubo, di conseguenza è sempre consigliabile scegliere adeguati intervalli di misurazione del dato in relazione alle variazioni previste.

Al Passo della Morte sono stati installati 18 piezometri di tipo Casagrande e 5 a “tubo aperto” (**Figura 4.1.4.1; Figura 4.1.4**). I primi vengono utilizzati generalmente per misurare la pressione interstiziale del terreno, in terreni permeabili, mentre i secondi forniscono una misura del livello di falda.

4.1.5 Stazione pluviometrica

Nella zona è stata installata una stazione pluviometrica in prossimità dello stavolo Mezzan ad una quota di 660 m s.l.m. La stazione di misura è dotata di un pluviometro e i dati sono raccolti con intervalli regolari di 15 minuti.

4.1.6 Idrometro

A partire da gennaio 2012 è entrato in funzione sul Rio Verde un idrometro (**Figura 4.1.6**) ubicato sotto il ponte della S.S. 52. Lo strumento rileva l'altezza idrometrica del battente idraulico che passa nella sezione obbligata.



Figura 4.1.6. Idrometro per la misura della portata del Rio Verde

Di conseguenza, conoscendo le dimensioni della sezione e l'altezza del battente risulta immediato il calcolo della portata in l/s. La frequenza di aggiornamento del dato è di 15 minuti.

4.2 Prove di laboratorio

La messa in posto di inclinometri e piezometri è stata ovviamente preceduta dalla creazione di un foro che, al fine di fornire materiale utile all'analisi stratigrafica e geotecnica, in alcuni casi, è stato eseguito mediante la tecnica del carotaggio continuo. In altri casi invece la perforazione è stata eseguita a distruzione di nucleo e non è stato dunque possibile ottenere del materiale valido per la stratigrafia. La tecnica del carotaggio continuo permette di ottenere campioni di terreno alle diverse profondità che vengono poi adagiati in appositi contenitori divisi in scompartimenti della lunghezza di un metro. Successivamente alcuni campioni, a diverse profondità, sono stati analizzati e su di essi sono state eseguite alcune prove per determinarne i parametri geotecnici principali.

Per i campioni indisturbati è stata anche realizzata una documentazione fotografica.

Le prove eseguite possono dividersi in due gruppi principali:

1) Prove di classificazione

2) Prove meccaniche

1) Analisi granulometriche;

Determinazione del peso di volume;

Determinazione del contenuto in H₂O;

Determinazione dei limiti di Atterberg (plasticità e liquidità).

2) Taglio diretto consolidato drenato;

Prova di taglio torsionale consolidata anisotropicamente drenata;

Prova edometrica ad incrementi di carico, misura del rigonfiamento.

Tutte queste prove sono state eseguite da ditte specializzate per conto dell'ANAS negli anni passati, mentre alcune si sono realizzate nell'ambito del presente lavoro di tesi. I campioni di tali prove appartengono al foro di

sondaggio per la posa dell'inclinometro I21bis, la cui ubicazione è indicata in **figura 4.3.2**.

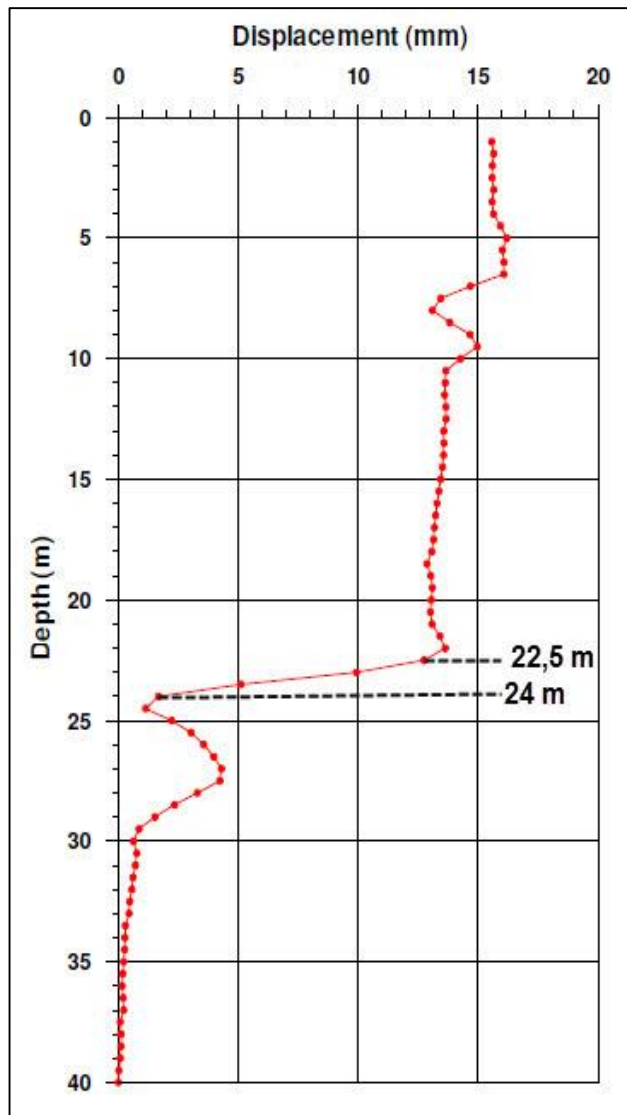


Figura 4.2.1.
Grafico dell'inclinometro I21bis con l'indicazione della superficie di scivolamento

Analizzando il grafico di questo inclinometro (**Figura 4.2.1**) si nota chiaramente la presenza di una superficie di scivolamento ad una profondità compresa tra 22,5 e 24 metri dal piano campagna.

Perciò i tre campioni analizzati provengono rispettivamente da profondità di 22,5 - 23 - 23,5 metri.

In **Figura 4.2.2** è mostrata la cassetta contenente le carote di materiale che coprono un range di profondità da 20,50 a 25,50 metri, da cui sono stati estratti i tre campioni sopra citati indicati con i riquadri rossi

Su di essi sono state svolte le seguenti prove:

- 1) Determinazione dei limiti di liquidità e plasticità di Atterberg;

- 2) Analisi granulometrica per vagliatura della frazione grossolana e per aerometria della frazione fine;
- 3) Prova di taglio diretto consolidata drenata.



Figura 4.2.2. Contenitore per carote di terreno (foro per inclinometro I21bis)

Limiti di Atterberg

La prima fase della prova consiste nell'ottenimento di un'adeguata quantità di materiale passante al setaccio n.40 ASTM. Successivamente per il limite di liquidità si pone parte del materiale ottenuto all'interno del cucchiaio di Casagrande (**Figura 4.2.3**), si pratica un solco nel mezzo con un apposito utensile



Figura 4.2.3. Cucchiaio di Casagrande

e si calcola il numero di colpi necessario, tra 15 e 35, affinché il materiale si chiuda in un tratto di almeno un centimetro. Il materiale nella zona di chiusura viene pesato e messo in forno, cosicché, una volta essiccato si effettua la pesatura e per differenza si determina la quantità di acqua che è evaporata.

Per convenzione il limite liquido è inteso come la quantità di acqua presente nel materiale quando il solco creato si chiude in 25 colpi. Per trovare il valore esatto si eseguono più misurazioni e si crea una retta di interpolazione così da determinare il contenuto in acqua relativo a 25 colpi esatti.

La seconda fase è rappresentata dalla determinazione del limite di plasticità. Questa si esegue creando dei cilindretti di circa 3 mm di diametro che vengono fatti rotolare con la mano su una superficie che assorbe l'acqua in modo da seccare progressivamente il materiale. Se questo risulta ancora troppo plastico per accelerare il processo di perdita d'acqua lo si stende su una pietra porosa che drena più velocemente. Una volta che i cilindretti di terreno iniziano a creparsi si è raggiunto il limite di plasticità. Si pesa così il materiale e lo si mette a seccare in forno a 105° per pesarlo successivamente all'evaporazione dell'acqua. Si ripete la prova tre volte per una maggior sicurezza essendo questa soggetta ad errori dovuti alla sensibilità dell'operatore.

Infine si calcola l'indice di plasticità IP, che dipende dalla percentuale e dal tipo di argilla presenti, come differenza tra LL e LP (**Tabella 4.2.4**).

Campione	Profondità (m)	LL%	LP%	IP%
1	22,5	26	18	8
2	23,0	28	18	10
3	23,5	----	----	----

Tabella 4.2.4. Risultati della prova dei limiti di Atterberg

Sul terzo campione, non si è potuto effettuare il test dei limiti a causa del suo scarsissimo grado di plasticità, dovuto alla quasi totale assenza di materiale fine argilloso.

Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica consta di due fasi; la prima è rappresentata dal processo necessario ad ottenere 40g di materiale fine passante al setaccio n.200 (0,074 mm) che, se ottenuto, verrà analizzato mediante tecnica aerometrica. La seconda fase prevede il lavaggio di un'altra porzione di materiale al setaccio n.200 così da trattenere solo la frazione più grossolana che verrà analizzata per vagliatura.

L'aerometria si effettua utilizzando un cilindro graduato in cui viene prima versata una soluzione anti flocculante di esametafosfato (40 g/l) e poi la miscela acqua sedimento. Per misurare la variazione di densità a step

successivi si utilizza un densimetro che viene immerso nella soluzione. La prova si considera conclusa quando la densità della soluzione si approssima ad uno, cioè vicina a quella dell'acqua (**Figura 4.2.5**).

La vagliatura si effettua facendo vibrare una pila di setacci, da quello a maglia più larga al più piccolo, e pesando la quantità di materiale trattenuta da ogni setaccio. Unendo le due misure si crea una curva granulometrica.

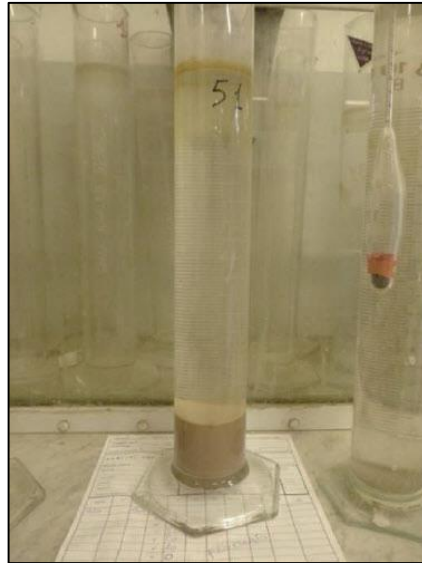


Figura 4.2.5. Cilindro per aerometria

L'analisi aerometrica ha però presentato alcuni problemi. Dopo aver ottenuto dai campioni una quantità di frazione fine passante al setaccio n.200 di 40g, durante la prova aerometrica questi hanno mostrato una sedimentazione troppo rapida (inferiore a 60 minuti, ancora meno nel campione 3), non consentendo un calcolo significativo della variazione di densità della miscela acqua-sedimento tramite la lettura del densimetro. La rapida deposizione del materiale non permette quindi una descrizione quantitativa della frazione fine, ma fa capire indicativamente quale sia la sua composizione; presenza prevalente di limo grossolano e scarsissima componente argillosa dimostrata anche dai bassi indici di plasticità dei campioni, in particolare il numero 3, il più vicino alla superficie di scivolamento.

Inoltre il gradino che si nota all'inizio della curva 1 è dovuto alla presenza di due ciottoli con dimensioni superiori a 2,5 cm presenti nel campione.

I risultati dei tre campioni analizzati sono i seguenti:

Campione 1 (22,5 m) curva nera: Tout venant principalmente sabbioso con matrice limosa, debolmente argilloso.

Campione 2 (23,0 m) curva rossa: Tout venant principalmente sabbioso con matrice limosa, debolmente argilloso.

Campione 3 (23,5 m) curva blu: Tout venant principalmente sabbioso con matrice limosa.

In **Figura 4.2.6** si riportano le curve granulometriche dei tre campioni.

Taglio diretto consolidato drenato

L'ultima prova effettuata è stata di tipo meccanico, e ha riguardato l'analisi della resistenza al taglio del campione 2 (22,5m) e del campione 3 (23,0m). La prova prevede l'inserimento del materiale passato al setaccio n.40 all'interno di una scatola metallica. Sopra e sotto il campione si pongono due fogli di carta filtro e della pietra porosa che agevola il processo di drenaggio del terreno. Il provino utilizzato ha dimensioni, altezza 2,5 cm e larghezza 6 cm. Il materiale viene poi posto in una vaschetta riempita d'acqua, per simulare le condizioni sottofalda, e viene applicata una pressione verticale di consolidazione coerente con la profondità a cui è stato prelevato. Terminata questa prima fase, in base al tempo che è stato necessario al provino per consolidare, si applica una tensione tangenziale necessaria allo scorrimento generata da un motorino elettrico dotato di selettore di velocità. Lo spostamento che ne deriva è misurato da appositi trasduttori. La prova viene ripetuta su tre provini fatti consolidare sotto tre pressioni di confinamento diverse, in questo caso 100, 200 e 300 KPa. Con i dati che si ricavano, relativi all'abbassamento in fase di consolidazione e allo scivolamento in fase di taglio, con velocità di deformazione imposta, si ottengono delle curve $X-\tau_{\max}$ (**Figura 4.2.7; Figura 4.2.8**), e $\sigma' - \tau_{\max}$ con indicazione del valore R^2 riferito alla retta di interpolazione (**Figura 4.2.9; Figura 4.2.10**).

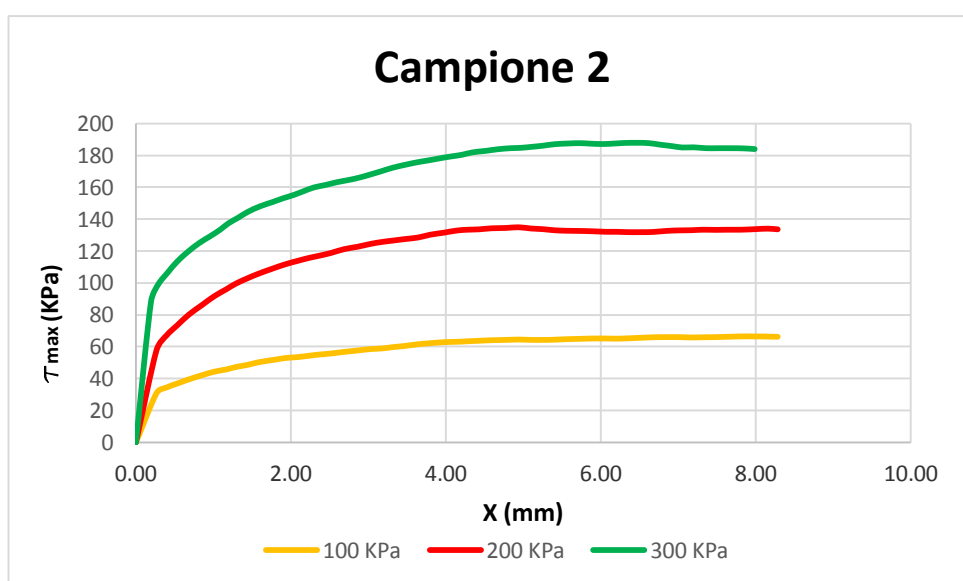


Figura 4.2.7. Curva spostamento-sforzo di taglio campione 2

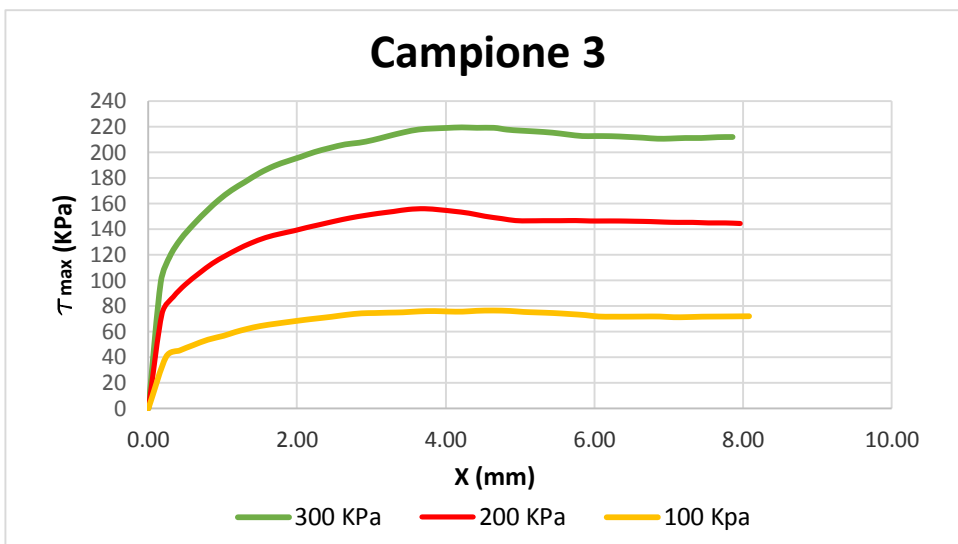


Figura 4.2.8. Curva spostamento-sforzo di taglio campione 3

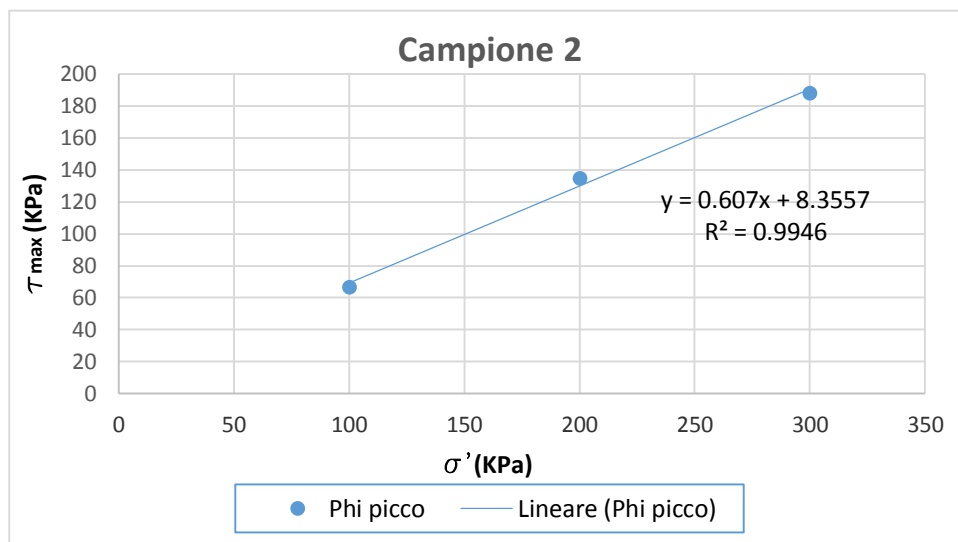


Figura 4.2.9. Retta d'interpolazione per il calcolo di coesione e angolo d'attrito, campione 2

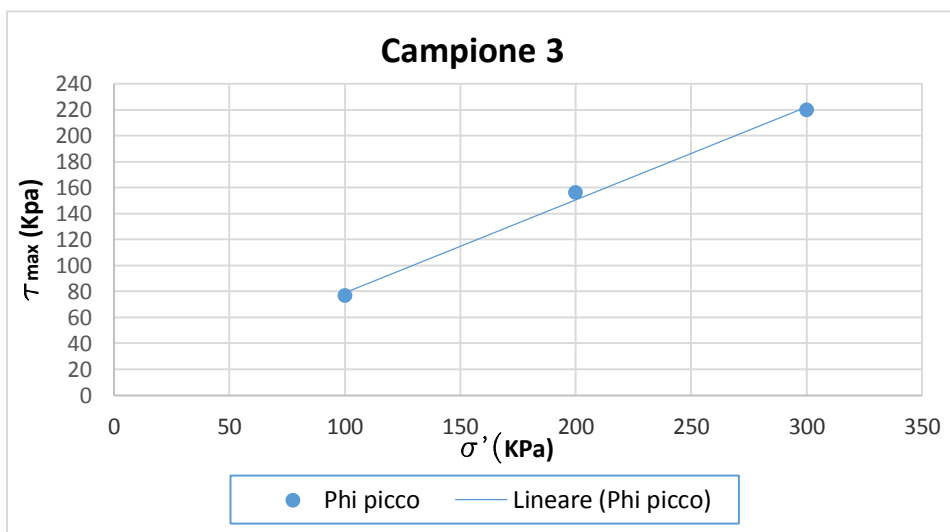


Figura 4.2.10. Retta d'interpolazione per il calcolo di coesione e angolo d'attrito, campione 3

Interpolando i tre valori del massimo sforzo di taglio τ in corrispondenza delle tre tensioni di confinamento σ' si ottiene una retta la cui intercetta rappresenta la coesione c' del materiale analizzato, mentre la pendenza indica l'angolo d'attrito φ di picco. Nella **Tab. 4.2.11** sono indicati i valori ottenuti, comprensivi del valore di angolo d'attrito residuo.

Camp. 2	σ' [KPa]	100	200	300	c' [KPa]	φ_p [°]	φ_r [°]
	$\tau_{\text{picco max}}$	66.48	134.04	187.88	8.4	31.3	30.5
Camp. 3	σ' [KPa]	100	200	300	c' [KPa]	φ_p [°]	φ_r [°]
	$\tau_{\text{picco max}}$	76.18	156.06	219.59	7.6	35.6	35

Tabella 4.2.11. Valori di σ' , τ_{max} , c' , φ_p per i campioni 2 e 3

Dalle analisi effettuate e da quelle pregresse si nota come i litotipi presenti spazino dai limi debolmente argillosi alle ghiaie con una diminuzione generale degli indici di plasticità all'approssimarsi della superficie di scivolamento e valori di coesione e angoli di attrito variabili dovuti proprio alla mutevolezza dei terreni. Si tratta di un materiale eterogeneo, che deriva in gran parte dall'alterazione delle argille siltose alternate a detrito carbonatico di versante proveniente dal retrostante massiccio del Tinisa e alle alluvioni del Rio Verde. Questo materiale è stato successivamente rimescolato da una serie di fenomeni gravitativi succedutisi nel tempo. In generale, però, gli angoli di attrito di picco ottenuti sono risultati, nelle prove sui campioni degli inclinometri I21bis, I3 e I4, superiori o prossimi ai 30°, con valori di angoli di attrito residuo molto simili con curve tipiche di materiali granulari. Ciò dimostra come la resistenza al taglio, in termini di angolo d'attrito, in questi terreni, sia offerta prevalentemente dalla frazione più grossolana presente all'interno della matrice fine limosa. Una volta venuto a contatto con l'acqua, però, il materiale vede una drastica riduzione della propria coesione ed è per questo motivo che la circolazione idrica profonda rappresenta un aspetto fondamentale per la comprensione del fenomeno.

In Allegato I è presentato il profilo geotecnico longitudinale del versante con le indicazioni degli inclinometri, delle proprietà geotecniche dei campioni indagati e della loro definizione stratigrafica. La mancata corrispondenza della profondità della superficie di scivolamento rappresentata nel profilo,

con quella indicata dagli inclinometri I3, I4 e I8 è dovuta al fatto che questi sono proiettati sulla sezione e non giacciono su di essa, a differenza dell'inclinometro I21bis.

4.3 Risultati delle prove geotecniche pregresse

Nella **Tabella 4.3.1** sono inseriti i principali sondaggi eseguiti, la profondità del foro e quella della superficie di scivolamento.

SONDAGGIO	I1	I2	I3	I4	I7	I8	I13	I15	I21bis	PC1
PROF. (m)	72	87	90	84.1	82	75.5	80	39	40	60
SUP. SCIV (m)	35	19	10	36	18	32	60	22	23	22

Tabella 4.3.1. Inclinometri frana 1 e 2 Passo della Morte

In **Figura 4.3.2** è mostrata l'ubicazione dei fori di sondaggio.

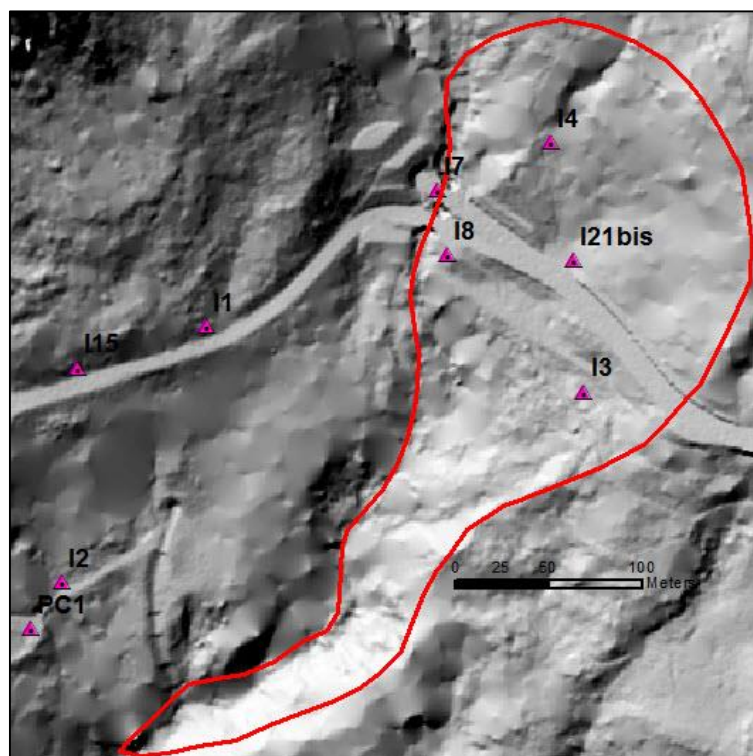


Figura 4.3.2. Ubicazione delle sonde inclinometriche nell'area della frana 1 e dintorni

Di seguito, inoltre, si riportano i dati relativi alle prove geotecniche pregresse effettuate su campioni provenienti da alcuni dei fori di sondaggio degli inclinometri indicati. Le prove prevedono l'analisi granulometrica, il calcolo

dei limiti di Atterberg, dell'indice di plasticità e un taglio diretto consolidato drenato per trovare i valori di coesione e angolo d'attrito di picco e residuo. I dati relativi agli inclinometri I1, I2, I7, I15 e PC1, seppur non ubicati all'interno dell'unità di frana 1, sono stati riportati per fornire una descrizione geotecnica e stratigrafica d'insieme della zona di imbocco della galleria essendo le frane 1 e 2 in relazione tra loro. Tra i campioni non sono presenti quelli relativi all'inclinometro I21bis già trattati al paragrafo 4.2.

SOND.	CAMPIONE profondità (m da p.c.)	PROFONDITA' (m da p.c.) prova di taglio	DESCRIZIONE	c' (MPa)	Φ_{picco} [°]	$\Phi_{res.}$ [°]	IP
I1	C1 18,20-18,50	18,20 - 18,32	18,11-18,50m sabbia eterogenea M/F limosa debolmente argillosa grigio molto scuro.	0,05	37,3	33,8	5
	C2 28,50-29,00	28,52- 28,64	28,48-28,76mlimo con sabbia M/F argilloso debolmente ghiaioso.28,76-29,00 sabbia eterogenea angolare con limo argillosa ghiaiosa M/F allungata angolare subangolare grigio scuro	0,02	30,9	26,5	10
I2	C1 3,00-3,66	3,00 - 3,66	3,21-3,65m sabbia eterogenea angolare subangolare ghiaiosa F limosa bruno rossastro scura	/	/	/	/
	C2 6,00-6,66	6,00 - 6,66	6,02-6,58m sabbia eterogenea angolare subangolare con limo ghiaiosa F	/	/	/	/
	C3 12,00-12,50	12,00 - 12,50	12,07-12,48m ghiaia M/F allungata angolare subangolare con sabbia eterogenea debolmente limosa grigio rossastro scuro.	/	/	/	/
	C4 57,00-57,50	57,01 - 57,21	57,04-57,21mlimo con argilla sabbioso eterogeneo rosso debole-57,21-57,49 limo sabbioso M/F con lenti di limo argilloso sabbioso grigio rossastro scuro.	0,05	22,7	18,6	19
	C5 61,00-61,50	61,14 - 61,24	61,08-61,48m limo con sabbia eterogenea angolare subangolare debolmente ghiaioso M/F allungato angolare subangolare	0,03	29,3	26,8	8
	C6 67,00-67,55	67,38 - 67,50	67,04-67,54m limo argilloso sabbioso eterogeneo angolare subangolare con tracce di ghiaia medio M/F allungata angolare subangolare bruno grigiastro.	0,05	35,9	35,4	7
	C7 83,00-83,50	83,15 - 83,25	83,10-83,49m limo argilloso sabbioso eterogeneo angolare subangolare ghiaioso M/F allungata angolare subangolare bruno grigiastro.	0,09	28,8	29	6

SOND.	CAMPIONE profondità (m da p.c.)	PROFONDITA' (m da p.c.) prova di taglio	DESCRIZIONE	c' (MPa)	φ_{picco} [°]	$\varphi_{res.}$ [°]	IP
I3	C1 12,00-12,60	12,41 - 12,54	12,04-12,39m Ghiaia F da angolare a subangolare con sabbia G deb. Limosa bruno grigiastro scuro 12,39-12,59m Sabbia eterogenea con limo ghiaiosa M/F argillosa di colore bruno scuro	0,015	29,4	27,4	/
	C2 16,50-17,10	16,86 - 17,04	16,81-17,09m Sabbia eterogenea con limo con ghiaia M/F da angolare a subangolare di colore bruno grigiastro	0,023	36	36	/
	C3 44,00-44,50	/	44,09-44,25 Ghiaia M/F da arrotondata a subarrotondata 44,25-44,30 Sabbia F limosa bruno grigiastro 44,30-44,49 Limo argilloso sabbioso M/F Ghiaioso M/F da angolare a subangolare bruno	/	/	/	/
	C4 54,00-54,50	/	Limo con ghiaia M/F da angolare a subangolare con sabbia eterogenea e tracce di argilla grigio chiaro e bruno pallido	/	/	/	/
	C5 58,50-59,00	/	Ghiaia M/F da angolare a subangolare sabbiosa M/G con tracce di limo	/	/	/	/
	C6 69,00-69,50	/	Limo sabbioso eterogeneo argilloso ghiaioso M/F da angolare a subangolare bruno oliva.	/	/	/	/
I4	CR1 6,00-6,40	/	Ghiaia M/F allungata da angolare a subangolare sabbiosa eterogenea limosa argillosa bruno rossastro scuro	/	/	/	/
	C1 12,30-12,50	/	Ghiaia eterogenea allungata da angolare a subangolare con limo sabbiosa debolmente argillosa bruno rossastro scuro e grigio oliva	/	/	/	/
	CR2 13,80-14,50	/	Ghiaia eterogenea allungata angolare subangolare con limo sabbiosa e argillosa bruno grigiastro molto scuro.	/	/	/	/
	C2 19,50-20,00	19,50-20,00	Sabbia eterogenea con ghiaia eterogenea allungata sferoidale da angolare a subangolare limosa	0,004	36,4	33,9	11
	CR3 25,20-25,40	/	Limo con ghiaia eterogenea allungata da angolare a subangolare sabbioso con rari ciottoli discoidali angolari subarrotondati grigio chiaro	/	/	/	/
	C3 32,50-33,10	32,80 - 32,90	Sabbia eterogenea con limo con ghiaia M/F allungata da angolare a subangolare con tracce di argilla grigio.	0,08	26,0	32,2	8
	CR4 37,90-38,20	/	Limo con argilla con sabbia eterogenea debolmente ghiaioso M/F allungato da angolare a subangolare bruno grigiastro scuro. Lente di sabbia fine bianco	/	/	/	/
	CR5 44,00-44,20	/	Limo con sabbia eterogenea argilloso ghiaioso M/F allungato da angolare a subangolare grigiastro oliva pallido	/	/	/	/

SOND.	CAMPIONE profondità (m da p.c.)	PROFONDITA' (m da p.c.) prova di taglio	DESCRIZIONE	c' (MPa)	φ_{picco} [°]	$\varphi_{res.}$ [°]	IP
	C4 48,00-48,40	48,09-48,39	Limo con argilla sabbioso eterogeneo debolmente ghiaioso M/F allungato da angolare a subangolare bruno grigiastro scuro	0,17	21	27,8	14
	C5 52,5-53,10	/	Limo argilloso deb. Sabbioso M/F grigio scuro, frequenti inclusi di ghiaia M/F allungata angolare subangolare	/	/	/	/
	CR6 49,90-50,20	/	Limo con sabbia eterogenea argilloso ghiaioso M/F allungato da angolare a subangolare bruno grigiastro molto scuro	/	/	/	/
I7	C1 50,00,-50,50	50,11 -50,25	50,06-50,49m limo con sabbia M/F argilloso rosso debole con nodi estremamente compatti bianco.	0,07	21,8	18,3	12
	C2 61,50,-62,00	61,67 -61,79	61,56-61,98m sabbia eterogenea angolare subangolare con limo argilloso debolmente ghiaiosa	0,1	33,2	26,1	8
PC1	C1	23-23,35	Tout venant principalmente sabbioso, con matrice limosa debolmente argillosa	11,8	30,5	30,5	9
I15	C1	14.4-14.6	Argilla debolmente limosa con sabbia	/	/	/	17
	C2	17-17.17	Limo argilloso con sabbia	7,1	27,7	27,7	9
	C3	19-19.22	Limo debolmente argilloso con sabbia	/	/	/	12

In allegato II sono riportate le stratigrafie semplificate e interpretate degli inclinometri a disposizione, con particolare riferimento a quelli della frana 1 (I3, I4, I8).

4.4 Caratterizzazione geologico-stratigrafica

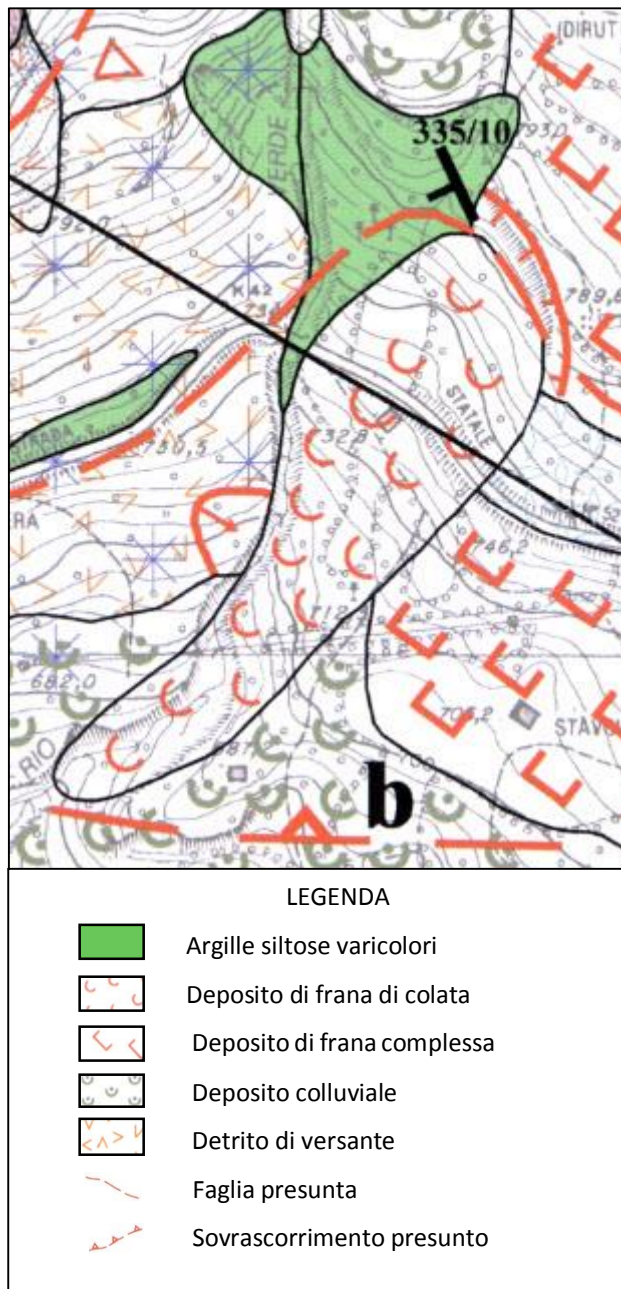


Figura 4.4.1. Particolare della carta geologica

In base ai dati derivati dalle analisi sui sondaggi e i relativi campioni si può procedere ad una descrizione stratigrafica semplificata della zona di frana e dei suoi immediati dintorni.

Il corpo di frana è formato da un insieme caotico di materiali, con caratteristiche molto variabili sia dal punto di vista granulometrico che mineralogico. Gran parte di esso è costituito da siltiti fortemente alterate che al loro interno contengono clasti di prevalente natura carbonatica provenienti dal retrostante massiccio del Tinisa (conoide di deiezione).

Nell'area a monte del corpo di frana sono presenti affioramenti, non coperti da depositi quaternari, di argille siltose varicolori con grado di alterazione minore sovrascorse sui gessi del Carnico superiore. Questi materiali emergono dalla copertura quaternaria, in corrispondenza della venuta a giorno delle scaturigini idrauliche.

In base ai dati stratigrafici raccolti si segnala la presenza di un substrato gessoso domiforme il cui profilo è dovuto a fenomeni di erosione che ne

hanno modificato l'iniziale forma. L'apice della cupola si trova al di sotto dell'inclinometro I21bis a profondità di circa 25 m, e digrada velocemente da entrambi i lati tanto che lo si rinviene sia in corrispondenza dell'inclinometro I3 che dell'I4 attorno agli 80 metri di profondità, alterato e tettonizzato a causa delle vicende geologiche dell'area. Nonostante ciò si può affermare che questo rappresenti il materiale in posto al di sotto della superficie di scivolamento e lo si rinviene occasionalmente in orizzonti fortemente alterati anche al di sopra di questa.

Per fornire una visualizzazione grafica dell'assetto geologico sono state create due sezioni semplificate che indicano i principali aspetti fin qui descritti. La sezione A-A' (**Figura 4.4.3**), passante per l'inclinometro I21bis, mostra un profilo longitudinale della frana mentre la sezione B-B' è trasversale al corpo di frana. Gli inclinometri I3, I4 e I8 sono indicati come proiezioni sulla sezione.

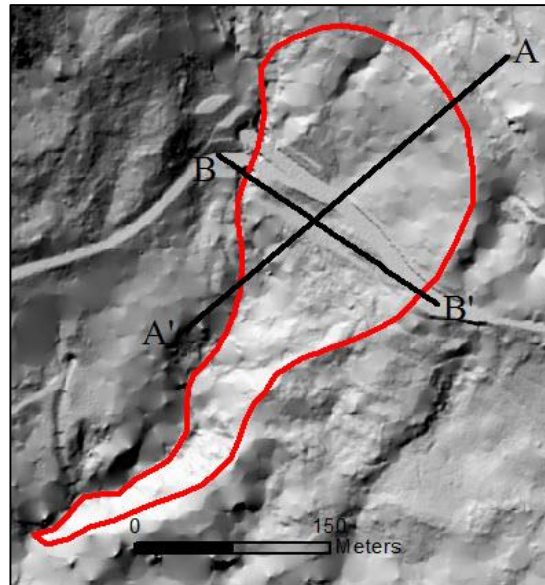


Figura 4.4.2 Planimetria delle sezioni rispetto alla frana 1

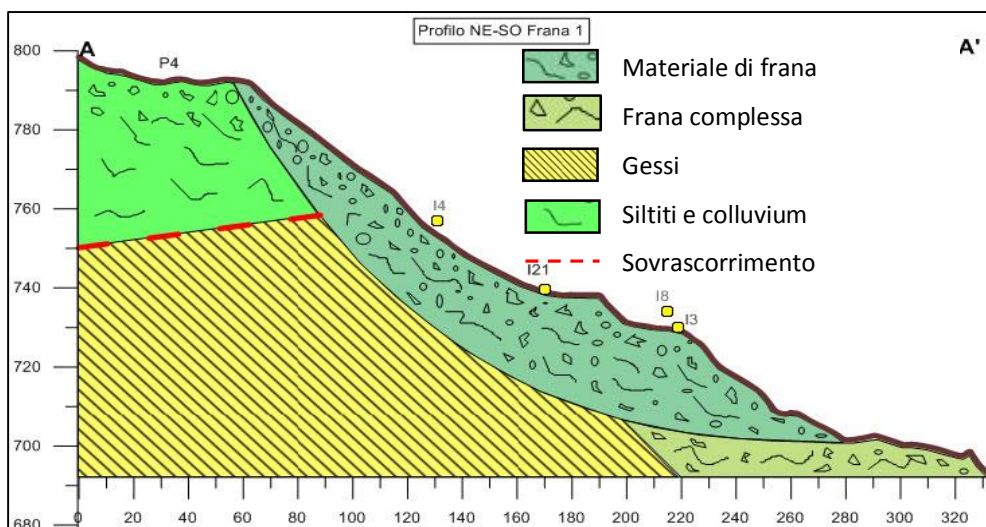


Figura 4.4.3. Sezione geologica longitudinale dell'area di frana

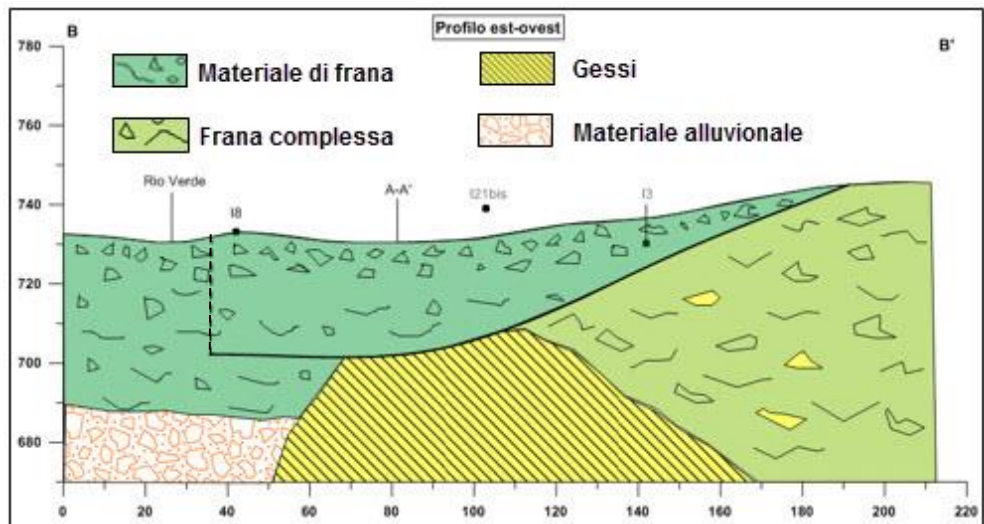


Figura 4.4.4 Sezione geologica trasversale del corpo di frana

La sezione trasversale B-B' (**Figura 4.4.4**) mostra invece la forma a cupola del substrato gessoso che ha il suo massimo spessore sotto l'inclinometro I21bis che è proiettato sulla sezione così come l'I3 mentre l'I8 giace su di essa.

Il tratteggio nella zona terminale indica la troncatura operata per la determinazione della superficie di scivolamento dovuta all'incertezza riguardante i rapporti morfologici che intercorrono tra la frana 1 e la frana 2, sulla sponda opposta del Rio Verde, ad essa adiacente.

5 GEOMETRIA E CINEMATISMO DELLA FRANA 1

5.1 Dimensioni e geometria

La determinazione delle dimensioni e della geometria del corpo di frana 1 è stata eseguita partendo dall'analisi dei fotogrammi aerei della regione Friuli Venezia Giulia. Nel dettaglio i file utilizzati sono stati il fotogramma 031132 SO e 048011 SO del luglio 2007.

L'osservazione delle foto aeree ha permesso di individuare un primo perimetro del corpo di frana basato sulla presenza di evidenze geomorfologiche quali orli di scarpata, contropendenze ed altri elementi topografici caratteristici. Oltre alle foto aeree si è fatto largo utilizzo del DTM (Digital Elevation Model) generato per conto dell'Ente regionale della protezione civile del Friuli Venezia Giulia.

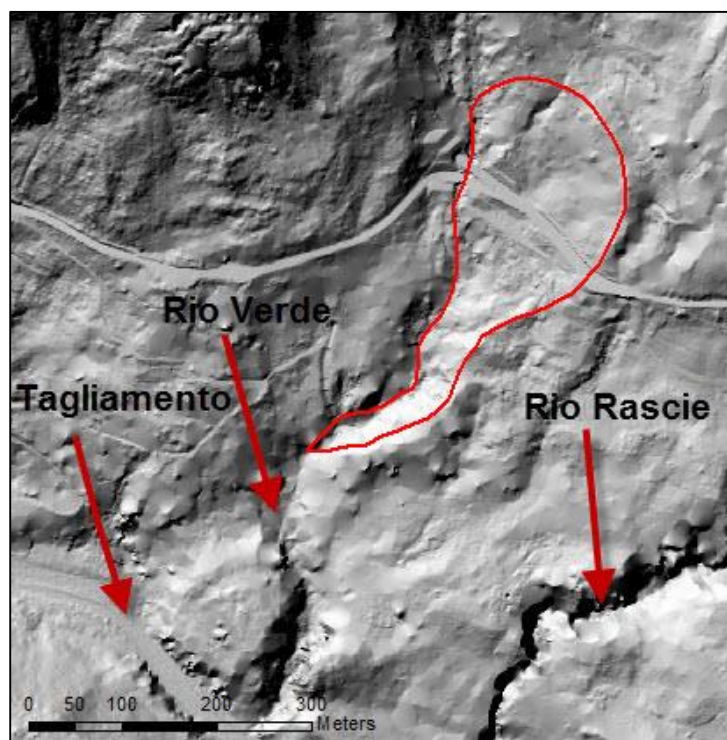


Figura 5.1.1. Planimetria dell'area di frana

Questo modello ad elevata risoluzione (1m x 1m), creato a partire dalla nuvola di punti generata dalla scansione del terreno, tramite apposita apparecchiatura laser scanner elitrasportata, si è rivelato molto utile per una migliore definizione della massa instabile, evidenziando dei particolari che erano sfuggiti analizzando le sole foto aeree. Si è riusciti così ad ottenere una definizione spaziale del fenomeno più precisa (**Figura 5.1.1**).

I principali lineamenti che si distinguono nell'intorno della frana 1 sono il Rio Verde che la delimita ad ovest per poi confluire nel Tagliamento e il Rio Rascie che si sviluppa nella parte sud orientale dell'immagine. Questi corsi d'acqua si sono impostati su strutture secondarie correlate ai principali lineamenti tettonici descritti nella carta geologica illustrata nel capitolo 3.

Lo sviluppo areale della frana 1 è pari a circa 45.200 m². In particolare l'unità di frana (**Figura 5.1.2**), può essere suddivisa a sua volta, in due sub-unità.

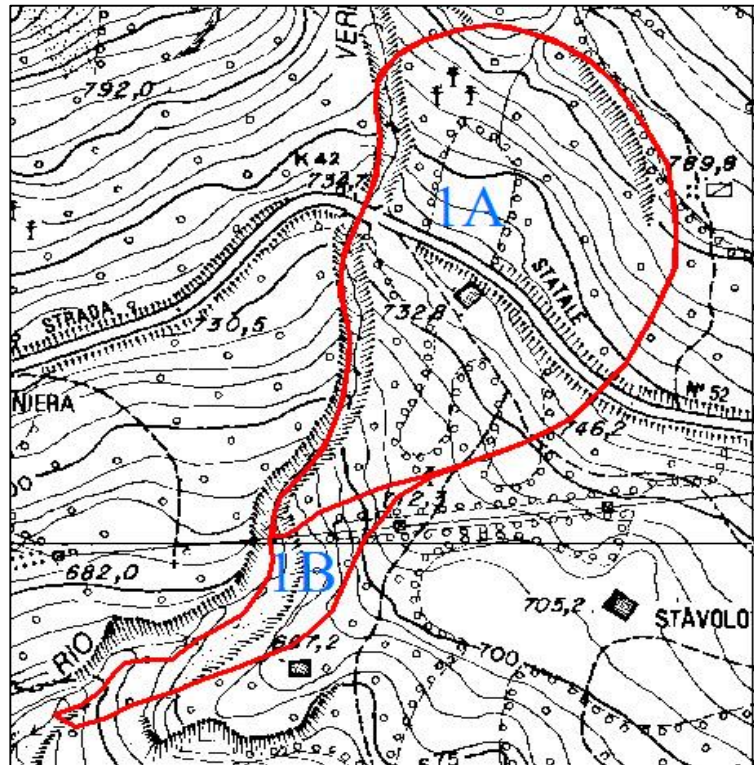


Figura 5.1.2. Suddivisione frana 1 in due sub-unità

L'unità 1A è stata quella a cui si è dedicata la maggior attenzione, proprio a causa del fatto che essa interessa una porzione della S.S. 52 in prossimità dell'imbocco della nuova galleria.

Questo settore può essere definito come un fenomeno complesso generato da uno scivolamento rotazionale nella parte alta, evidenziato dalla presenza di una orlo di scarpata, che poi evolve in colata.

L'unità 1B invece, ubicata nella zona di valle, può considerarsi come un'appendice della frana vera e propria. Il suo movimento è dovuto essenzialmente all'azione congiunta della spinta proveniente da monte e dall'erosione al piede operata dal Rio Verde (sponda sovracorrente).

L'unità principale 1A, risulta avere uno sviluppo di circa 38.300 m², mentre l'unità secondaria 1B si estende per circa 6.900 m².

5.2 Spostamenti superficiali e profondi

Come già indicato nel capitolo precedente uno degli strumenti più utili nella determinazione della deformazione in profondità di un corpo di frana è l'inclinometro.

Questo strumento, però, oltre a fornire un dato sull'entità degli spostamenti può indicare anche la direzione di movimento del mezzo in frana espressa mediante un vettore di spostamento. Questo dato per l'inclinometro I21bis è rappresentato in **Figura 5.2.1** che mostra la direzione dei vettori di spostamento alla profondità della superficie di scivolamento dal 16/12/2010 al 22/12/2011.

L'importanza di questo dato emerge maggiormente se lo si confronta con i valori di spostamento superficiali indicati dai capisaldi installati nell'area e monitorati mediante sistema GPS. L'analisi congiunta dei dati di spostamento superficiali e profondi può fornire informazioni sulle caratteristiche del corpo di frana e, come vedremo in seguito, sulle sue proprietà cinematiche.

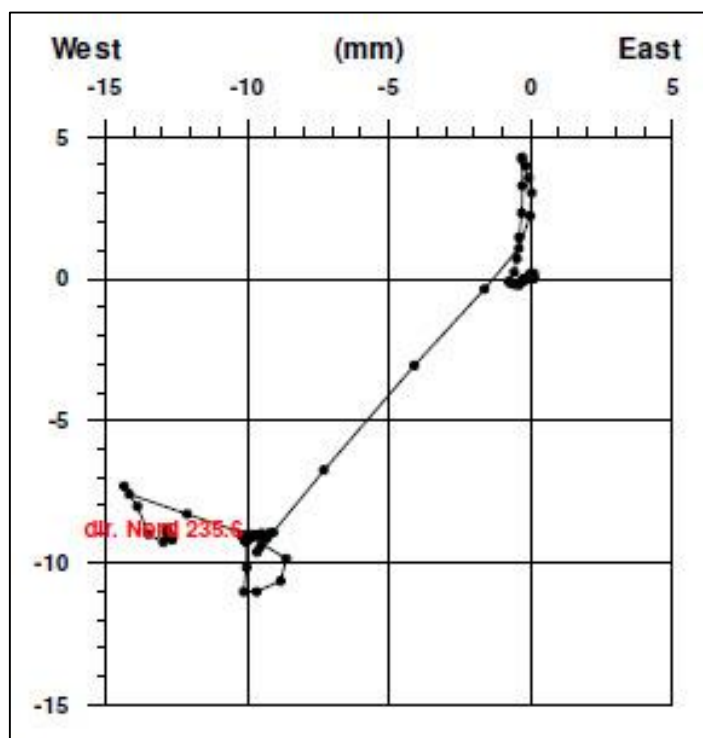


Figura 5.2.1. Vettore spostamento I21bis

In particolare si sono presi come riferimenti i capisaldi PM18, PM21 e PM22 che fanno parte della rete di monitoraggio GPS. La distribuzione dei capisaldi e dell'inclinometro I21bis assieme alla direzione dei loro vettori di movimento è indicata in **Figura 5.2.2**. Quello a cui si è prestata maggiore attenzione è stato il caposaldo PM18 ubicato nei pressi dell'inclinometro I21bis.

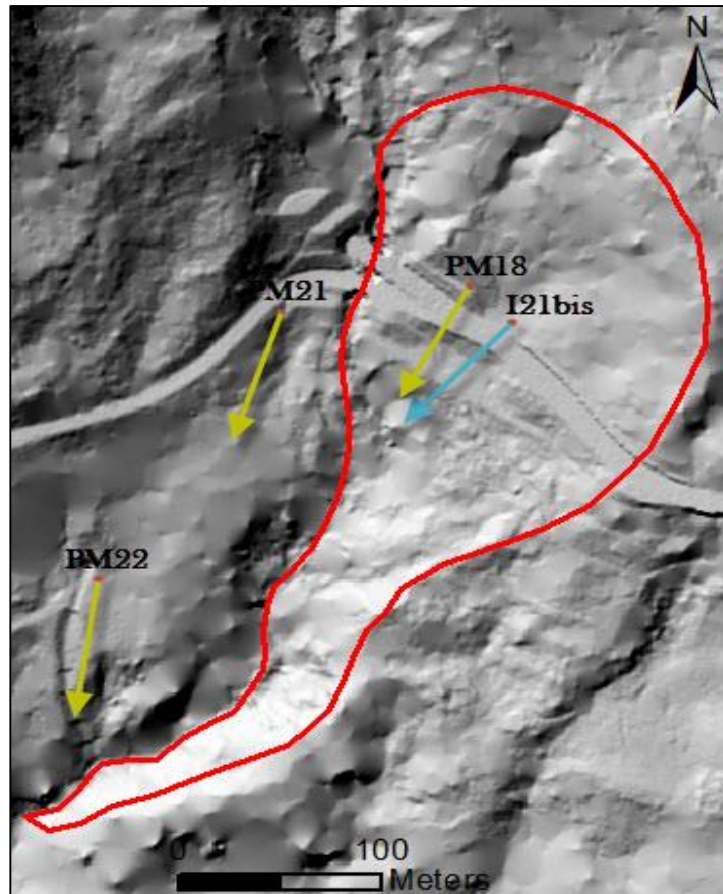


Figura 5.2.2. Capisaldi e I21bis con rispettive direzioni dei vettori di spostamento.

Per operare un confronto tra PM18 e I21bis si sono considerati i valori di spostamento nel periodo di tempo compreso tra dicembre 2010 (installazione I21bis) e luglio 2013 (ultima misura PM18).

I dati dell'inclinometro sono relativi alla direzione di misura X poiché questa è isorientata con la direzione di movimento del corpo di frana verso valle e fornisce dunque i risultati più significativi.

Per il calcolo della deformazione profonda nella direzione X si è utilizzata la seguente formula:

$$Spostamento = L \sin \theta$$

L = distanza tra i carrelli dell'asta inclinometrica, nel nostro caso 1 m;

θ = angolo di deformazione in gradi.

Per la determinazione di θ si è ricorsi all'utilizzo del grafico inclinometrico degli spostamenti, calcolando la deformazione totale nel periodo considerato che è risultata pari a 5.5° (**Figura 5.2.3**), fornendo un valore di spostamento di 0,11 metri.

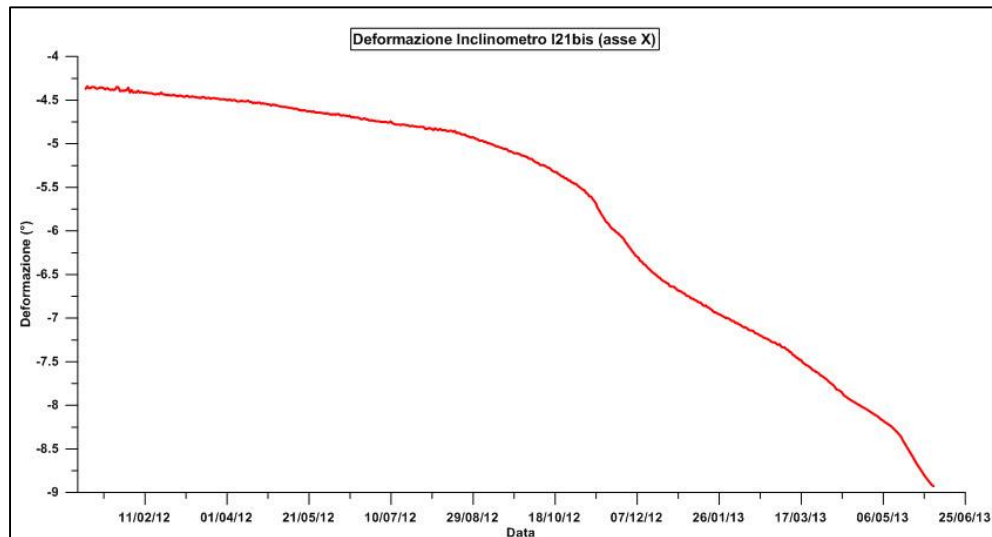


Figura 5.2.3. Grafico della deformazione indicata dall'inclinometro I21bis

Lo spostamento superficiale è stato ottenuto mediante l'analisi della **Figura 5.2.4**, con il calcolo del vettore di spostamento totale risultato pari a 0.115 m.

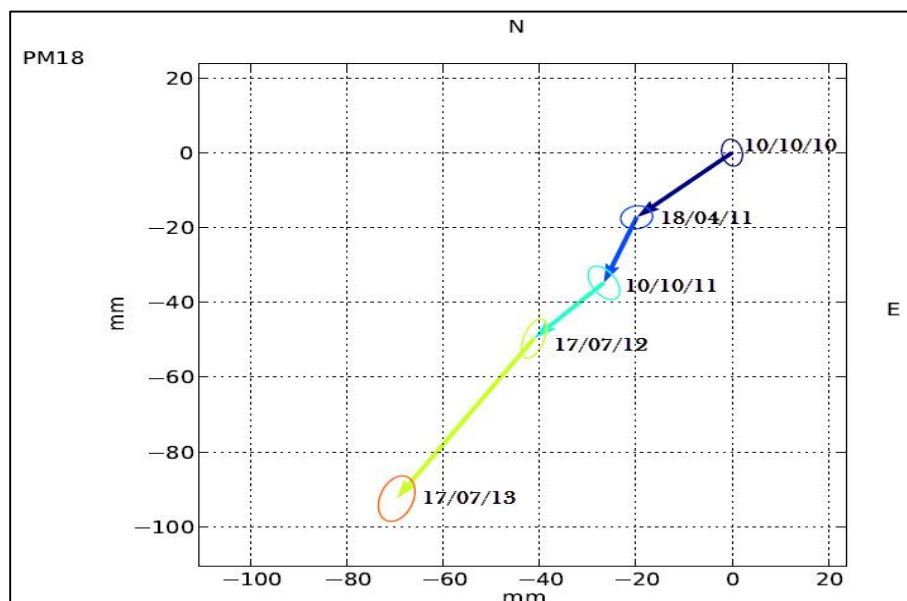


Figura 5.2.4. Vettore spostamento PM18

La dimensione e l'orientazione delle ellissi associate alle misurazioni indicano la precisione di stima del posizionamento del caposaldo.

Confrontando i valori di spostamento alla profondità di scivolamento forniti dall'I21bis (0,11 m) e quelli in superficie dati dal caposaldo PM18 (0,115 m) si nota un'ottima corrispondenza di valori, il che significa che la deformazione è concentrata interamente lungo la superficie di scivolamento e trascina con sé l'intera massa fino in superficie, così come si poteva già intuire osservando il grafico inclinometrico (**Figura 4.2.1**).

Oltre al valore dello spostamento superficiale è interessante notare la direzione del vettore che lo rappresenta che vale N218, concorde con il valore di N235 indicato dell'inclinometro I21bis (**Figura 5.2.1**). I valori ottenuti inoltre precisano la buona affidabilità dei dati provenienti dall'inclinometro.

Infine, per comprendere meglio l'evoluzione planimetrica degli spostamenti della frana 1 in relazione alla frana 2 che si sviluppa sul lato opposto del Rio Verde, si sono analizzati i vettori di spostamento degli altri 2 capisaldi, PM21 (**Figura 5.2.5**) e PM22 (**Figura 5.2.6**). I dati riferiti a questi capisaldi sono disponibili solo dal 17/07/12, ovvero l'ultimo tratto di misura del caposaldo PM18 (tratto verde **Figura 5.2.4**).

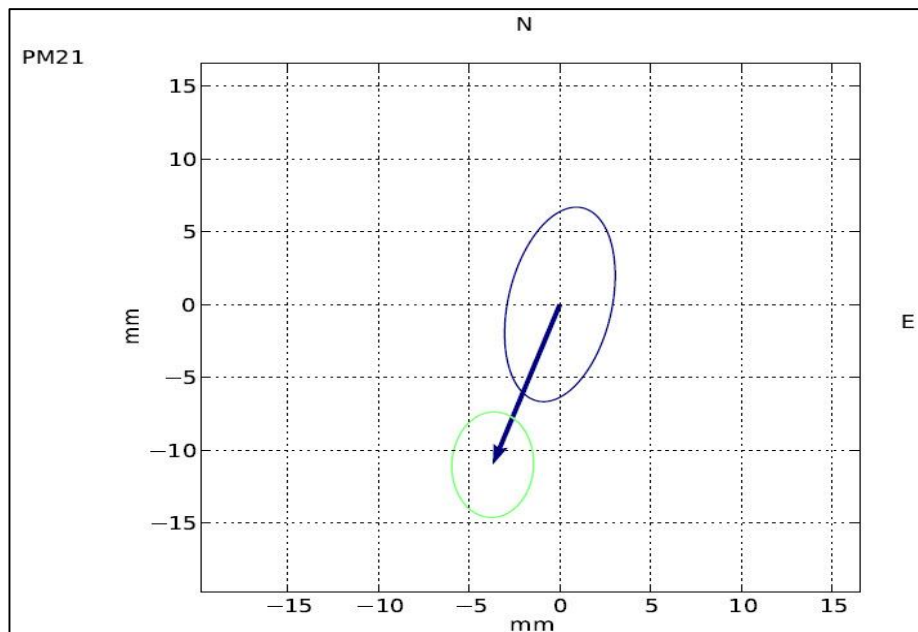


Figura 5.2.5. Vettore di spostamento caposaldo PM21

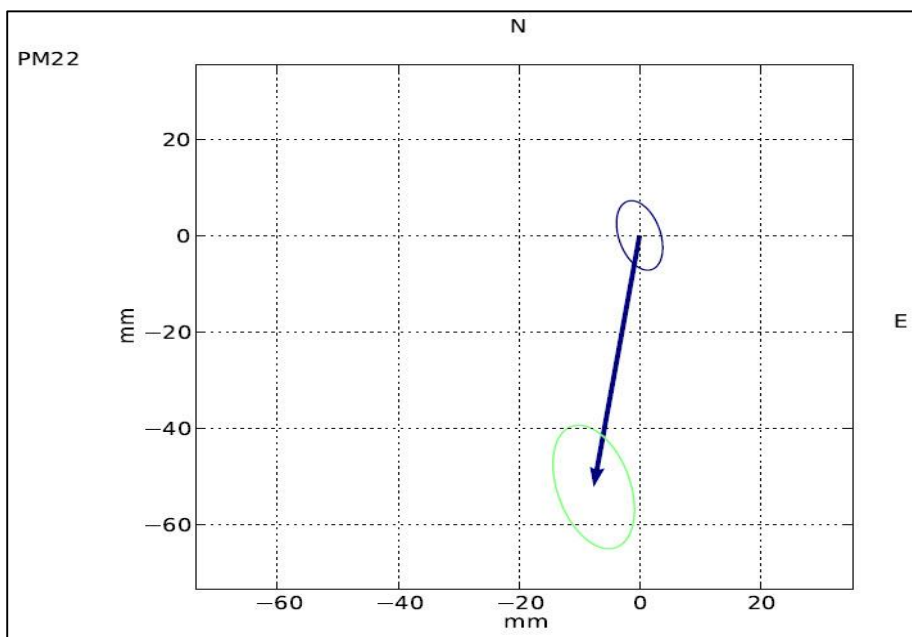


Figura 5.2.6. Vettore di spostamento caposaldo PM22

PM21, nonostante un errore associato maggiore dovuto alla breve distanza percorsa, ha mostrato una deformazione pari a 0,011 metri (1,1 cm) mentre PM22 di 0,049 metri (4,9 cm), con una direzione del vettore di spostamento rispettivamente di N211 e N189. I due capisaldi, posti sulla superficie della frana 2 indicano dunque direzioni di movimento confrontabili con quella fornita dal PM18 di frana 1, il che lascia intendere una forte influenza tra i due corpi che pur se separati dal Rio Verde seguono direzioni di movimento analoghe.

Dal punto di vista del valore di deformazione è interessante notare la distanza molto inferiore percorsa dal caposaldo PM21 (1,11 cm) rispetto a PM18 e PM22 che nello stesso lasso di tempo (17/07/12 – 17/07/13) hanno coperto distanze comprese tra 5,2 e 5,1 cm che può essere definita come la velocità di movimento media annua della frana 1 (**Figura 5.2.7**).

I dati raccolti indicano quindi una correlazione parziale dal punto di vista cinematico tra i due corpi di frana. Tale legame dovrà essere studiato più approfonditamente per capire se le due unità possano essere considerate come un'unica struttura morfologica, almeno in parte, o come due entità distinte, con direzioni di movimento simili, come determinato dall'analisi geomorfologica di base.

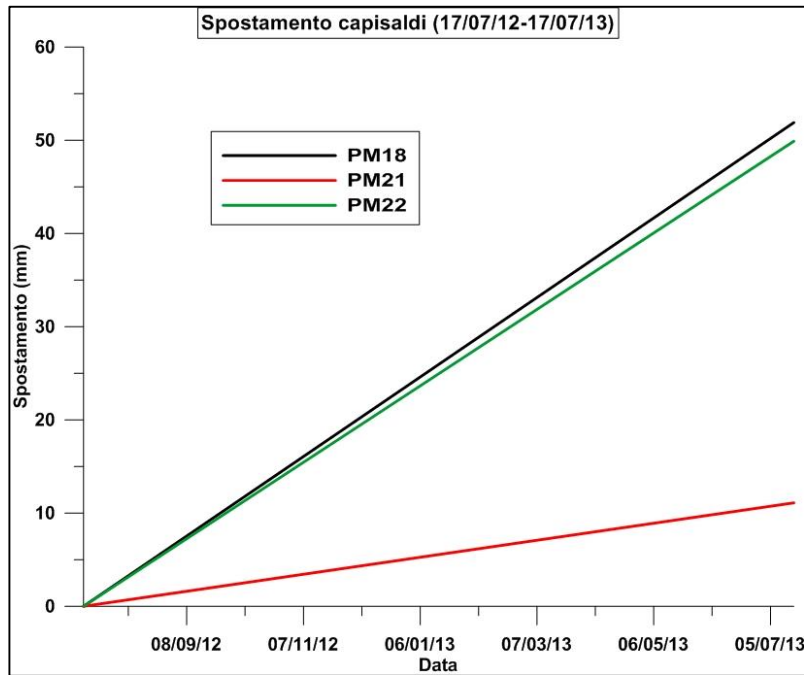


Figura 5.2.7. Confronto spostamenti capisaldi PM18, PM21 e PM22

5.3 Geometria del corpo di frana

Dall'analisi degli inclinometri installati nell'area della frana 1 si è riusciti ad avere importanti informazioni in merito alla profondità della superficie di scivolamento limitatamente alla sub-unità di frana 1A.

La dislocazione delle sonde inclinometriche è indicata in **Figura 5.3.1**.

Nella figura è segnalata la planimetria delle sezioni impiegate per determinare la geometria della superficie di scivolamento. Si è cercato di coprire in maniera omogenea l'intera area di frana.

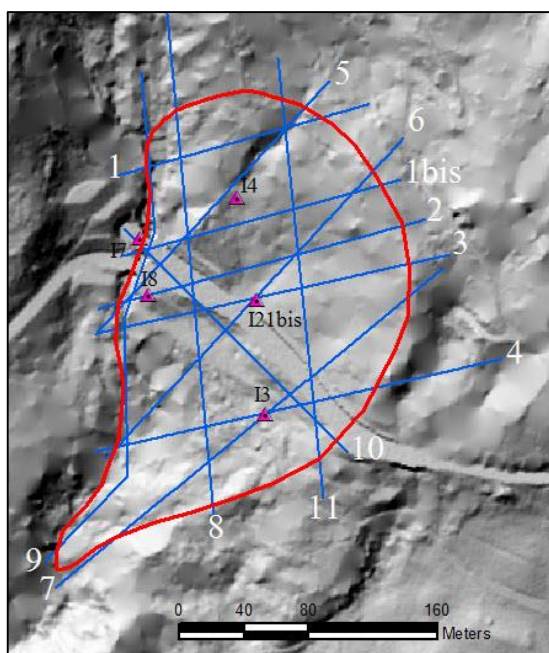


Figura 5.3.1. Ubicazione inclinometri e reticolo sezioni

Le profondità della superficie derivante dalle misure inclinometriche è indicata in **Tabella 5.3.2**.

Inclinometri	Profondità (m)
I3	10
I4	36
I8	33
I21bis	23

Tabella 5.3.2. Inclinometri e profondità della superficie di scivolamento

Con questi dati e l'interpolazione delle 11 sezioni (**Figura 5.3.1**) che intersecano l'area di frana si è creata una rete di punti quotati la cui altezza è riferita alla profondità della superficie di scivolamento. In **Figura 5.3.3** è riportato l'esempio di una sezione. In allegato III sono riportate tutte le sezioni utilizzate.

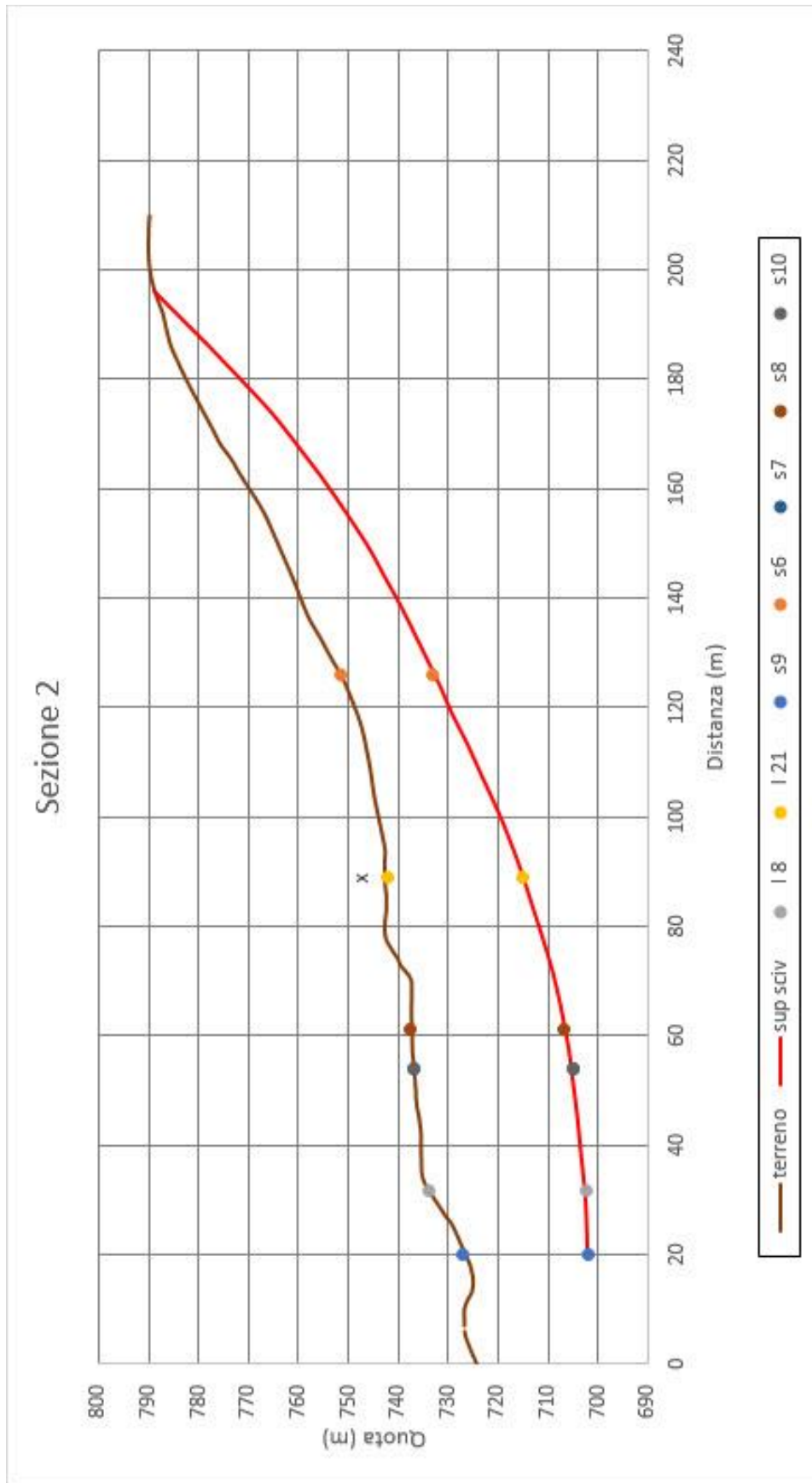


Figura 5.3.3. Sezione per la determinazione della superficie di scivolamento

Nella figura si possono notare i punti preceduti da una “I” che rappresentano la profondità della superficie di scivolamento data dagli inclinometri. La lettera “x”, rappresentata in corrispondenza dell’inclinometro I21bis indica che questo non giace esattamente lungo la sezione ma ad una distanza inferiore ai 15 metri e quindi il suo grado di affidabilità è più basso essendo una proiezione. I punti indicati con “s” rappresentano invece le intersezioni della sezione in esame con alcune delle altre. I punti che formano la superficie di scivolamento sono stati campionati con passo variabile tra i 5 e i 7 metri nelle diverse sezioni. Come si può osservare la sezione non ritorna in superficie nel tratto occidentale della frana, questo accade a causa della coalescenza, nella zona sottostante il Rio Verde, rappresentato dalla s9 (Allegato III), con l’unità di frana 2 che si sviluppa sulla sponda opposta del Rio. Per questo motivo, al fine di semplificare la modellazione 3D della superficie di scivolamento, si è deciso di operare questa troncatura, rilevabile nel mancato completamento della sezione 2, che non rispecchia l’esatta morfologia sotterranea, non del tutto chiara al di sotto del Rio Verde, ma ne permette un’analisi quantitativa in termini volumetrici.

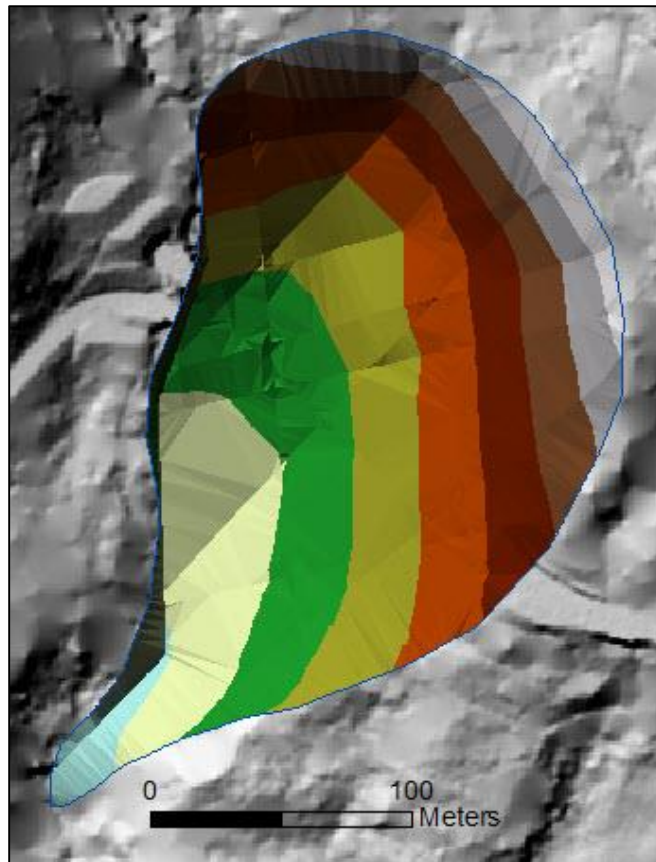


Figura 5.3.4. Modello TIN della superficie di scivolamento

L'insieme di punti così ottenuto è stato interpolato col metodo del *Triangulated irregular network* (TIN) che permette la creazione di superfici regolari tra i punti senza che si realizzino artifici grafici improbabili che si riscontrano con altri metodi di interpolazione (**Figura 5.3.4**).

Il TIN così creato è stato trasformato in un raster con risoluzione pari a quella del DTM iniziale ed è poi stato mosaicato con quest'ultimo al fine di creare una superficie unica contenente la depressione rappresentata dalla superficie di scivolamento (**Figura 5.3.5**) che può essere confrontata con la situazione naturale per una miglior comprensione visiva delle dimensioni del fenomeno (**Figura 5.3.6**). Nel confronto è stato inserito anche il tracciato della strada statale per evidenziare il grado di interessamento della struttura.



Figura 5.3.5. Visuale 3D dell'area di frana dopo la creazione della superficie di scivolamento.

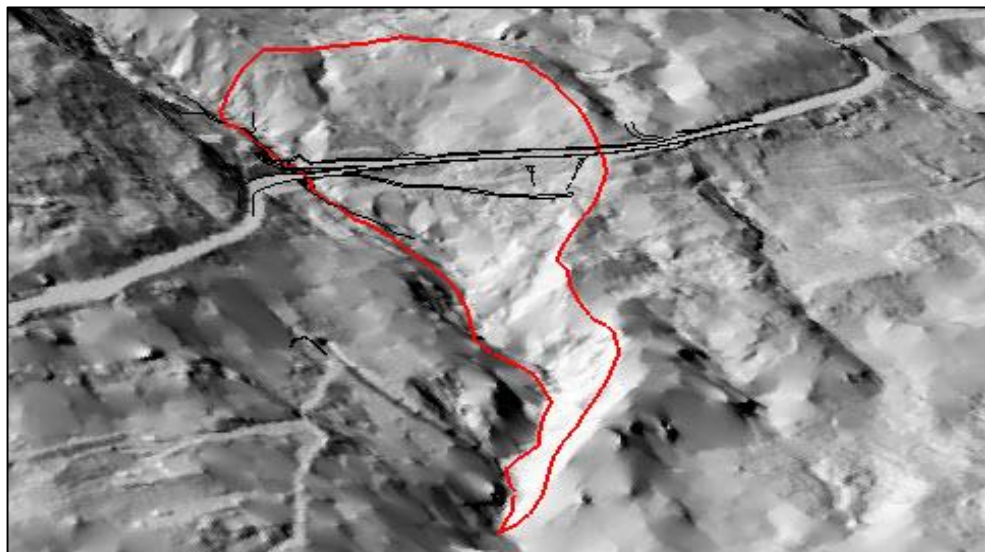


Figura 5.3.6. Visuale 3D dell'area nelle condizioni naturali attuali

5.4 Calcolo del volume di frana

Dopo aver determinato la superficie di scivolamento si è passati al calcolo del volume dell'ammasso di frana.

Questo valore era già stato calcolato in maniera più speditiva, quando non era ancora stata creato un modello 3D, approssimando il solido ad un quarto di ellissoide (**Figura 5.4.1**) avente i seguenti parametri relativi ai 3 semiassi:

- $Wd/2$ rappresenta la larghezza massima della massa spostata misurata perpendicolarmente alla lunghezza della massa spostata Ld ;
- Ld è la distanza fra il punto sommitale ed il punto inferiore della massa spostata;
- Dd è la profondità massima della superficie di rottura sotto la superficie originaria del versante misurata perpendicolarmente al piano contenente Ld e Wd .

Mentre i parametri Wd e Ld sono stati ricavati graficamente, Dd è stato ottenuto da dati strumentali acquisiti dagli inclinometri, ed è stato stimato in 32 m.

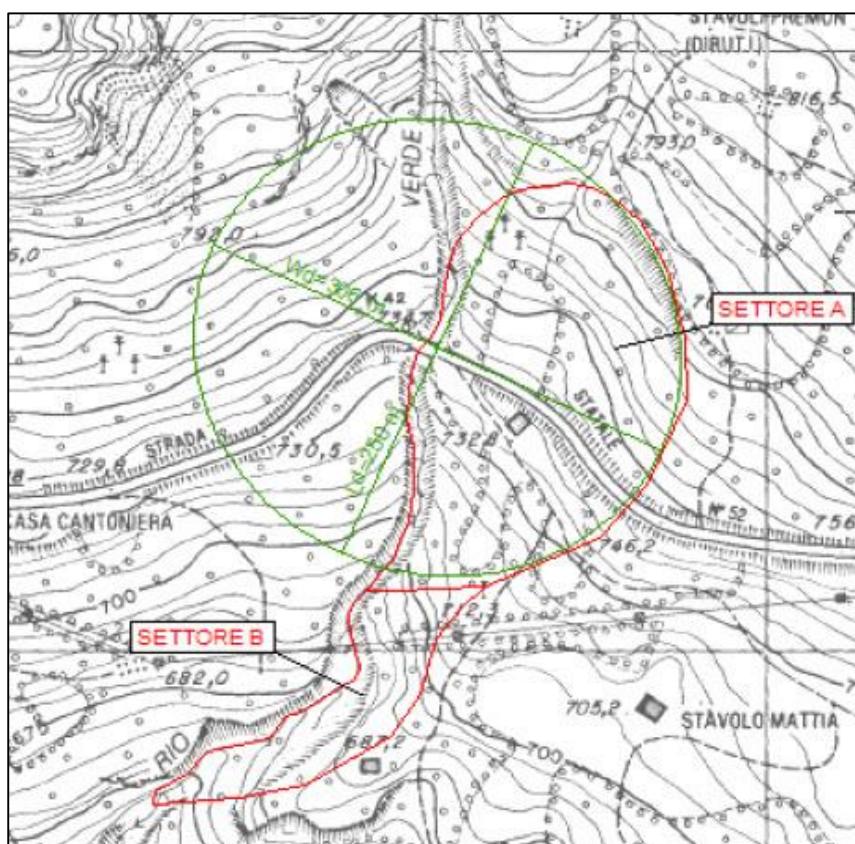


Figura 5.4.1. Calcolo dei volumi mediante quarto di ellissoide

Il volume dell'Unità di frana 1 è stato quindi stimato mediante la seguente relazione (WP/WLI 1990, Equation 1):

$$\text{Volume} = \frac{1}{4} \left(\frac{3}{4} \times p \times Dd \times \frac{Wd}{2} \times \frac{Ld}{2} \right) = 730.238 \text{ m}^3$$

La nuova esecuzione di questo calcolo effettuata mediante il tool di ArcGis “*Cut and Fill*” ha permesso di stimare il volume dell’ammasso in 608.242 m³, Con una profondità massima della superficie di scivolamento di circa 40 metri (**Figura 5.4.2**).

Questo confronto è utile per validare l’analisi volumetrica iniziale. Infatti la differenza tra i due metodi risulta essere di 112.000 m³, ovvero il volume calcolato col metodo dell’ellissoide è risultato circa il 15% superiore. Nonostante questo valore possa apparire elevato bisogna tener conto del fatto che, in questo caso, i dati a disposizione per poter creare una superficie tridimensionale erano più che buoni. Nella maggior parte delle situazioni i dati a disposizione sono molto meno numerosi sia a causa dei costi sia a causa dei tempi di intervento che devono essere immediati e necessitano quindi di stime speditive che possono essere ritenute abbastanza affidabili in presenza di fenomeni franosi analoghi a questo.

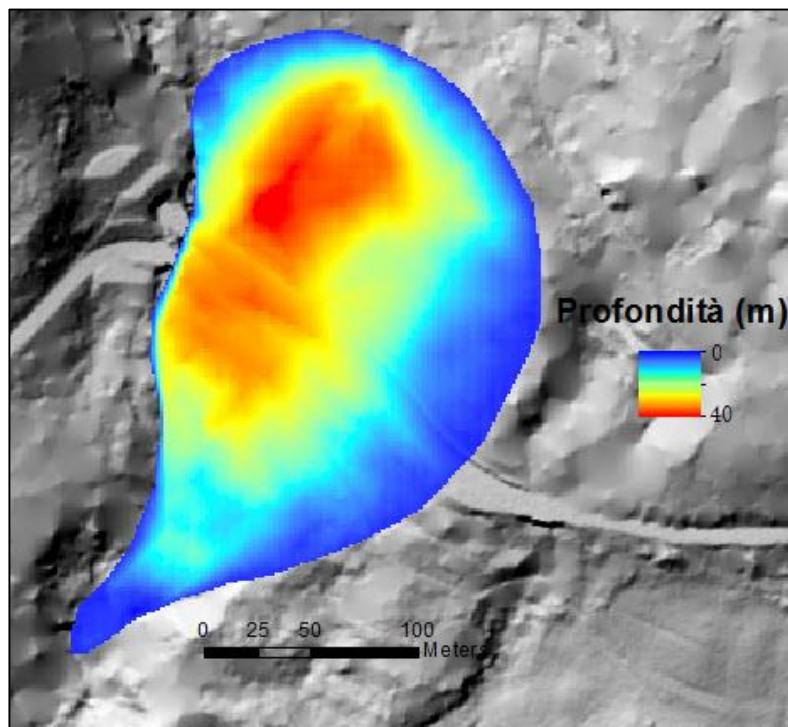


Figura 5.4.2. Profondità di scivolamento rispetto al piano campagna

Nonostante ciò effettuando un'analisi del volume di frana più accurata, con la procedura sopra descritta, è possibile ottenere dati di partenza più affidabili per successive stime del rischio connesse alla severità geometrica del dissesto, per la modellazione numerica del fenomeno o per la progettazione di adeguate misure di messa in sicurezza del versante che altrimenti potrebbero non sortire l'effetto desiderato.

6 ANALISI IDROGEOLOGICHE

6.1 Definizione del bacino idrografico

Uno degli aspetti su cui ci si è soffermati maggiormente anche per comprendere meglio le dinamiche di versante che caratterizzano la frana 1 del Passo della Morte è stato quello idrologico e idrogeologico.

La frana ricade in parte all'interno del bacino del Rio Verde (**Figura 6.1.1**), affluente in sinistra idrografica del fiume Tagliamento.

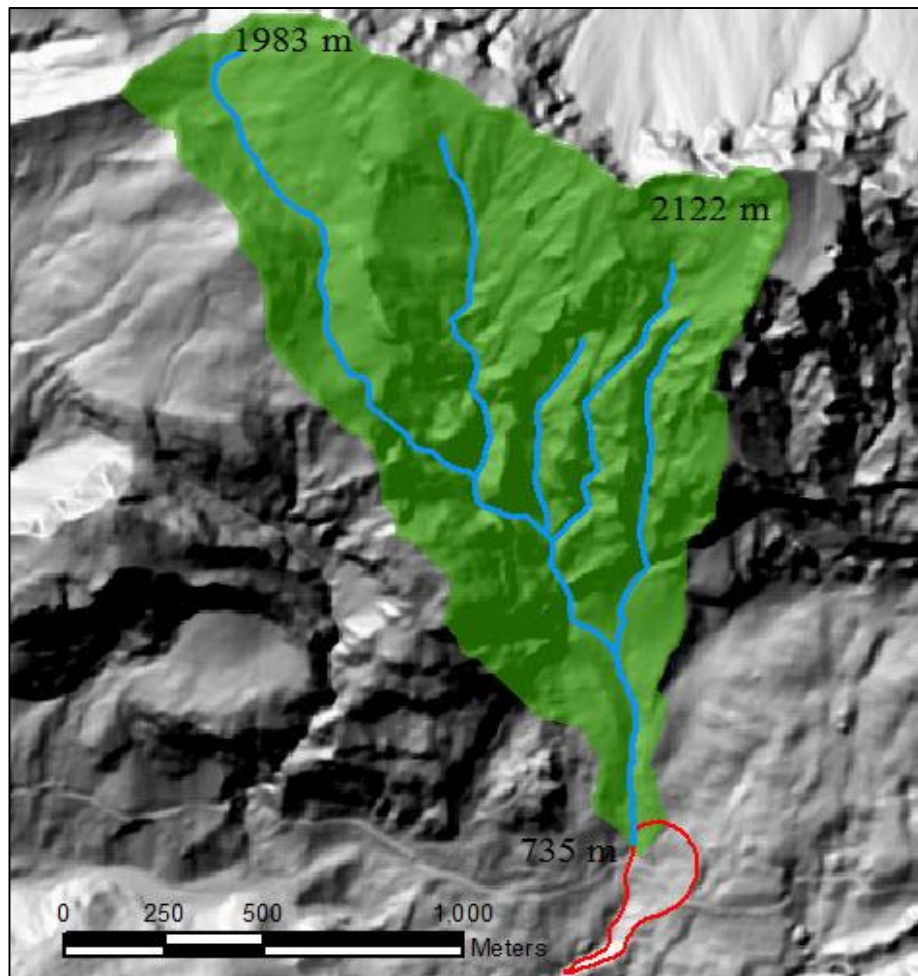


Figura 6.1.1. Definizione areale del bacino del Rio Verde

La definizione areale del bacino è stata condotta prendendo come sezione di chiusura l'idrometro posto al di sotto del ponte utilizzato dalla S.S. 52 per attraversare il torrente.

A causa della posizione della sezione di chiusura, il bacino sotteso risulta essere di dimensioni inferiori rispetto a quelle del reale bacino calcolato alla confluenza del Rio Verde col Tagliamento. Si è optato per questa soluzione

perché in corrispondenza del ponte è ubicato l'idrometro che fornisce i dati di portata del Rio. In questo modo l'area sottesa alla sezione di chiusura è risultata essere di circa 1,68 km² e copre un dislivello compreso tra i 735 m s.l.m. della sezione di chiusura e i 2122 metri del Monte Tinisa, punto di maggior elevazione della cresta montuosa che separa la valle del Tagliamento a sud dalla conca di Sauris a nord.

6.2 Sorgente e scaturigini

Nella parte sommitale della frana sono state individuate una serie di scaturigini (**Figura 6.2.1**) che, soprattutto a seguito di periodi di pioggia abbondanti, riversano una elevata quantità di acqua nel Rio Verde.

Queste emergenze appartengono ad un'unica sorgente, in parte sfruttata anche dal comune di Ampezzo a scopi idropotabili.

La zona è caratterizzata dalla presenza di una struttura coniugata (**a'**) della linea di Sauris (**a**), riportata nel profilo geologico a pagina 17, che fa sovrascorrere le argille siltose varicolori sul complesso gessoso del



Figura 6.2.1. Scaturigine lungo il versante

Carnico superiore. Questo assetto strutturale determina una via preferenziale di flusso verso sud, attraverso i materiali argillosi alterati e tettonizzati e con grado di fratturazione e permeabilità elevata.

Per lo studio delle caratteristiche di portata della sorgente è stata effettuata una pulizia del dato, in modo da eliminare i picchi dovuti a fenomeni di ruscellamento superficiale delle acque durante gli eventi precipitativi e negli istanti successivi così da ottenere un idrogramma significativo che rappresenti solo la portata della sorgente. Questa assunzione risulta giustificata poiché,

durante il resto dell'anno, la porzione del Rio Verde a monte delle scaturigini idrauliche è sempre in secca e quindi la portata misurata alla sezione di chiusura è data esclusivamente dall'apporto idrico della sorgente dove la falda freatica intercetta la superficie topografica.

I calcoli eseguiti hanno permesso di stabilire una portata media annua delle scaturigini di circa 33 litri/s. Questo dato, facendo riferimento alla classificazione delle sorgenti, in base alla portata, di Meinzer, fa rientrare l'insieme di scaturigini nella classe III (28.3-283 litri/s). Il picco massimo di portata si è verificato a seguito dell'evento piovoso di novembre (10-13/11/12) ed è risultato essere pari a circa 190 litri/s, mentre il valore minimo, registrato in data 26/03/12 è stato di 12 litri/s. Ciò significa che anche nei periodi di magra, come l'inverno 2012, la sorgente ha mantenuto un minimo flusso, che poi è andato crescendo all'inizio della primavera successiva con l'arrivo delle piogge. Questo dimostra che esiste una riserva regolatrice in grado di fornire un minimo volume d'acqua anche nei periodi più secchi. Avendo a disposizione i valori minimi e medi di portata si è calcolato l'indice di variabilità della sorgente con la formula di Meinzer:

$$R = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{media}} 100$$

Il valore così calcolato fornisce un indice di variabilità R del 539%, largamente superiore al 100%, il che definisce la sorgente come variabile. Questo dato era preventivabile poiché, come vedremo più avanti, la portata risente in tempi molto rapidi delle precipitazioni che cadono nel bacino, in parte a causa dell'acqua che si infiltra alla base delle pareti rocciose del massiccio del Tinisa, costituite da falde detritiche ad elevata permeabilità, e in parte a causa di una circolazione profonda, impostata nei calcari dolomitici, proveniente dal massiccio stesso.

In **Figura 6.2.2** è riportato lo schema delle scaturigini indicate mediante rilievo GPS dell'area il 14 maggio 2013 in un periodo che ha fatto seguito ad un evento piovoso durato dal 10/05/13 al 12/05/13 con cumulata 59,2 mm e che ha visto proprio in questo giorno un picco di portata pari a 77,6 l/s. Con il pallino blu è indicata anche la presenza di un inghiottitoio che raccoglie l'acqua di una scaturigine che si trova isolata ad est ma il cui contributo alla circolazione idrica profonda nel corpo di frana a valle non può essere

trascurato. Come si può notare la maggior concentrazione di venute idrauliche è presente nella parte nord occidentale della frana 1 in corrispondenza del limite del bacino del Rio Verde considerato. La presenza o meno e la localizzazione di alcune delle scaturigini è variabile a seconda della quantità di acqua che circola all'interno dell'acquifero.

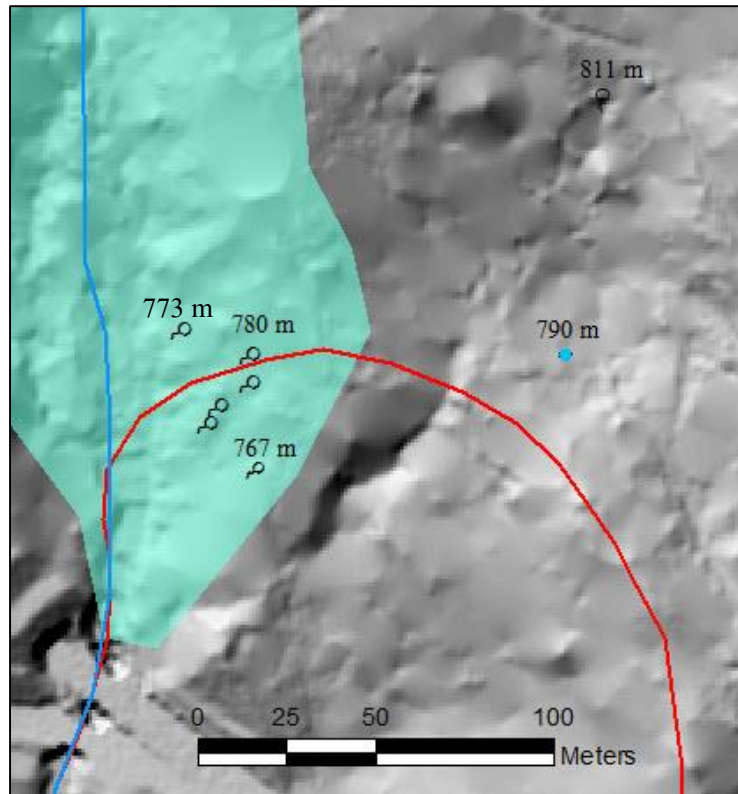


Figura 6.2.2. Ubicazione scaturigini e inghiottitoio (rilievo 14 maggio 2013)

6.3 Curva di esaurimento

Analizzando le variazioni di portata nel tempo di una sorgente si notano, in genere, delle curve (curva di esaurimento, **Figura 6.3.1**) con determinate caratteristiche che possono fornire informazioni sia sulla sorgente che sul tipo di circolazione che la alimenta:

- Un certo intervallo di tempo tra l'inizio della pioggia e l'aumento della portata;
- Un ramo ascendente della curva di portata con pendenza più o meno accentuata fino al picco massimo;
- Un ramo discendente con pendenza più o meno accentuata;

- Delle piccole variazioni di portata che conferiscono alla curva un aspetto a “denti di sega” sia nel ramo ascendente che in quello discendente.

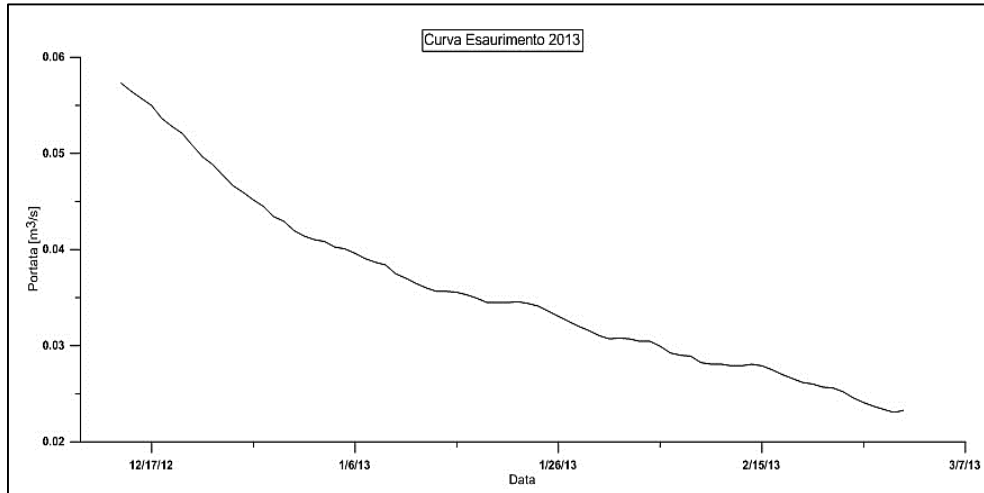


Figura 6.3.1. Curva di esaurimento della sorgente

Ovviamente, in prossimità del picco di portata, l’immagazzinamento all’interno dell’acquifero è massimo, poi col tempo, se non intervengono altre precipitazioni importanti, la curva degraderà fino al raggiungimento di un valore minimo, oltre il quale inizierà una nuova risalita.

Lo studio del tratto di esaurimento, seppur limitato nel tempo, fornisce indicazioni sullo scarico della sorgente in funzione del volume di acqua presente nell’immagazzinamento.

Esistono diversi metodi di calcolo sia di tipo esponenziale che di tipo iperbolico o composito, ma quello più utilizzato per indagare la curva di svuotamento di una sorgente è quello esponenziale di Maillet (1911).

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t}$$

$Q(t)$ è la portata della sorgente al tempo t , Q_0 è la portata al tempo iniziale $t = 0$, t è il tempo intercorso tra il primo e l’ultimo dato della curva, e è la base dei logaritmi neperiani, α è il coefficiente di esaurimento e ha dimensione $1/t$.

Il valore di α dà un’indicazione della permeabilità generale dei materiali, soprattutto nella zona insatura. Valori di α elevati (0,1-0,2) indicano elevate permeabilità, rapidi drenaggi e scarso immagazzinamento dell’acquifero.

Il valore del coefficiente α si ottiene arrangiando la formula così da avere:

$$\alpha = \frac{\log Q_2 - \log Q_1}{0.4343(t_2 - t_1)} = 0,011$$

Questo valore indica tempi di residenza delle acque brevi, un'elevata permeabilità del materiale entro cui l'acqua circola prima di fuoriuscire in corrispondenza della sorgente e drenaggi rapidi della massa d'acqua che avvengono attraverso vie di deflusso preferenziale. Inoltre è possibile calcolare l'immagazzinamento dinamico dell'acquifero al tempo zero (W_0) e al tempo $t \neq 0$ (W), ossia il volume idrico che determina le variazioni di portata durante i periodi di esaurimento (CELICO, 1986).

$$W_0 = \frac{Q_0}{\alpha} = 455.564 m^3$$

La formula deve essere normalizzata esprimendo α in s^{-1} , poiché precedentemente il t usato per calcolarlo era espresso in giorni. Il valore va dunque moltiplicato per 86400, ovvero i secondi presenti in un giorno.

Il valore dell'immagazzinamento dinamico per $t \neq 0$ risulta:

$$W = \frac{Q_0 \cdot 86400}{\alpha \cdot e^{\alpha t}}$$

In particolare, con riferimento alle riserve regolatrici (W_r) calcolate a fine esaurimento, responsabili del mantenimento di una minima portata anche in periodi secchi, il loro volume risulta pari a:

$$W_{tn} = W_r = \frac{Q_0 \cdot 86400}{\alpha \cdot e^{\alpha t_n}} = 182.826 m^3$$

Facendo la differenza tra le due quantità il risultato che si ottiene è il volume di acqua defluito nel tempo t dalla sorgente.

$$\Delta W = W - W_{tn} = 272.738 m^3$$

6.4 Descrizione geo-litologica del bacino

Dal punto di vista geologico e delle caratteristiche idrauliche il bacino può essere suddiviso in tre aree principali (**Figura 6.4.1**).

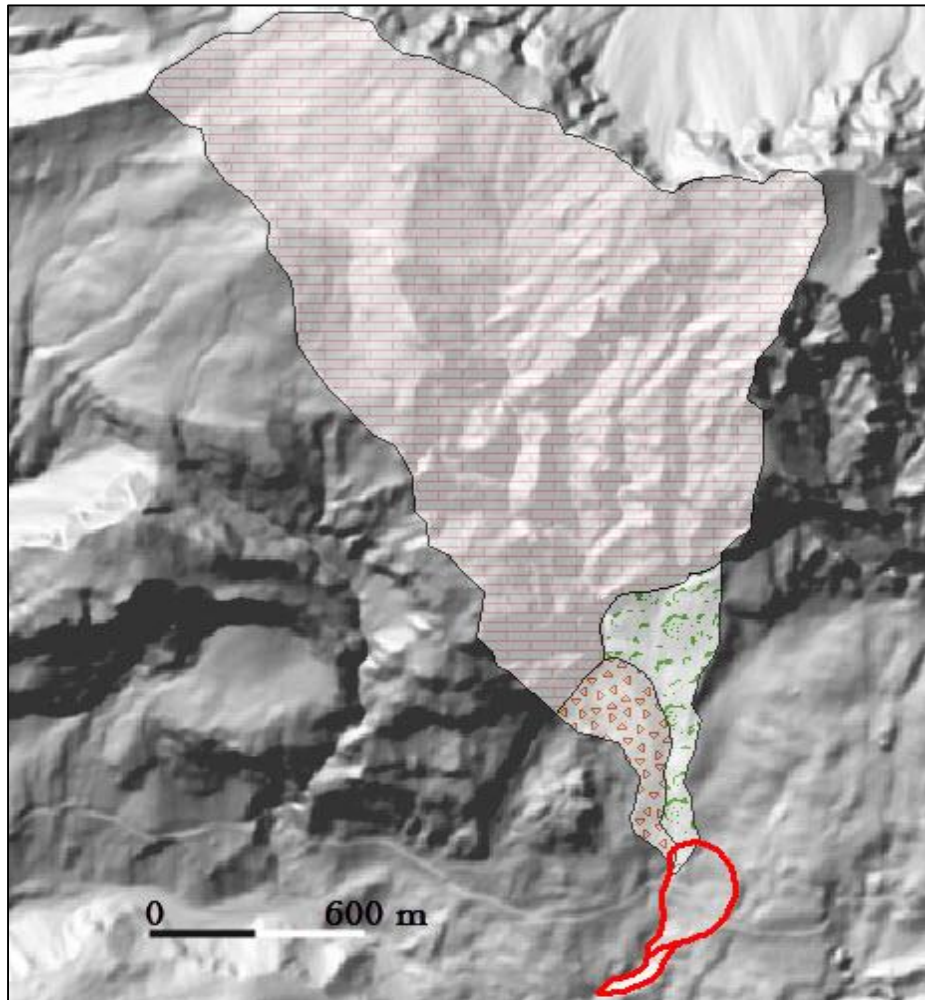


Figura 6.4.1. Caratterizzazione geo-litologica del bacino del Rio Verde

L'area occupata dalla formazione dei calcari dolomitici del Monte Tiarfin è di circa 1,52 km², quelle occupate dal deposito di materiale franoso e dalla zona boschiva coprono rispettivamente un'estensione di 0,096 e 0,065 km². I tre domini hanno permeabilità diversa; massima per il deposito di frana, intermedia per la zona boschiva e bassa per i calcari dolomitici che, però, sono permeabili per fratturazione. La porzione del bacino impostata sui calcari dolomitici costituisce il 95% della superficie totale, ed è separata dalla porzione inferiore di falde detritiche e depositi colluviali da un banco roccioso verticale di circa 50 metri di spessore, che durante le precipitazioni genera una cascata d'acqua che, successivamente, viene in gran parte dispersa dall'alveo del Rio Verde all'interno del versante e va ad alimentare la

circolazione sotterranea. Non possedendo dati di portata relativi alla parte in calcari dolomitici del bacino, alla formazione rocciosa è stato attribuito un coefficiente di infiltrazione potenziale (CIVITA, 2005) che indica la quota parte di precipitazioni efficaci medie annue che s'infiltra. Questo valore varia in base al tipo di roccia, al grado di porosità primaria/secondaria, alle caratteristiche del suolo che ricopre l'area di alimentazione, alla morfologia di questa e al relativo uso del suolo. Un CIP pari a zero indica che tutta la pioggia caduta ruscella senza infiltrarsi, mentre un CIP prossimo a uno indica una quasi totale infiltrazione della precipitazione. In **Figura 6.4.2** sono indicati i range di variabilità del CIP in funzione dei diversi tipi di substrato.

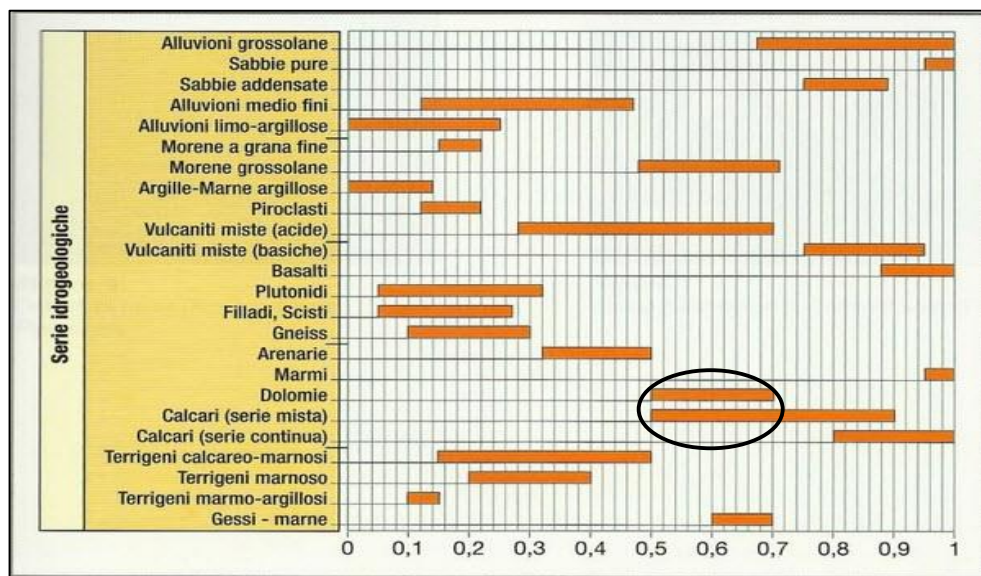


Figura 6.4.2. Campi di variazione dei coefficienti di infiltrazione potenziale delle principali sequenze idrogeologiche. (Civita, 2005, p. 75)

Il valore utilizzato nel nostro caso è variato da 0,5 a 0,7 come indicato dal range di variabilità a cavallo tra dolomie e calcari (serie mista). L'analisi è presentata nel paragrafo successivo.

6.5 Analisi delle precipitazioni

Il dato fondamentale da cui si è partiti per questo studio è stato quello relativo alle precipitazioni.

Non avendo molte informazioni a disposizione relative al bacino e alle sue caratteristiche si è voluta dare una stima indicativa della precipitazione efficace media annua e del tasso di infiltrazione per avere un'idea dei volumi

idrici sotterranei in gioco. Il primo step ha previsto l'analisi delle precipitazioni cumulate e delle temperature medie mensili della stazione di Passo della Morte e di altre 4 stazioni ad essa vicine. Con questi dati si è proceduto al calcolo della precipitazione efficace per ogni stazione in base alla relazione:

$$P_{eff} = P - ETR = I + R$$

P = precipitazione totale media annua;

ETR = evapotraspirazione media annua;

I = Infiltrazione efficace;

R = ruscellamento superficiale.

Per giungere a questo valore si è utilizzato il metodo di Thorntwaite (1948) che si basa sulla relazione esponenziale esistente tra l'evapotraspirazione potenziale e la temperatura media mensile dell'aria.

$$ETR = K \left[1,6 \left(\frac{10T_i}{I} \right)^a \right]$$

K = coefficiente di correzione di latitudine riferito al mese i-esimo, pari al rapporto tra le ore diurne e la metà (12) delle ore giornaliere;

T_i = temperatura media mensile del mese i-esimo;

I = indice di calore medio;

a = fattore di f(I).

Nel nostro caso l'indice di calore medio $I = 39,7$ mentre il fattore $a = 1,12$ per un'evapotraspirazione media annua di 641 mm.

Tramite un foglio di calcolo Excel opportunamente impostato, immettendo i dati di precipitazione e temperatura media mensili si è ottenuto, per ogni stazione, il valore di pioggia efficace. Si sono successivamente georeferenziati i punti relativi alle diverse stazioni di misura al fine di visualizzarle in ArcGis (ArcMap) e creare una suddivisione del territorio tramite poligoni di Thiessen o tassellatura di Voronoi. Questo metodo permette di suddividere geometricamente lo spazio in zone di pertinenza di ogni punto definite in questo caso topoleti. A ciascuna stazione viene attribuita un'area che si trova più vicina ad essa rispetto a qualunque altra stazione. Lo spazio viene così suddiviso da una serie di linee che sono equidistanti dalle due stazioni di misura ad esse più vicine.

Il risultato sarà, pertanto, una serie di poligoni, tanti quante sono le stazioni, all'interno dei quali se ne troverà solo una. Una volta creati i poligoni si è provato come il bacino del Rio Verde si trovi completamente all'interno del topoiete relativo alla stazione di Forni Di Sotto (**Figura 6.5.1**).

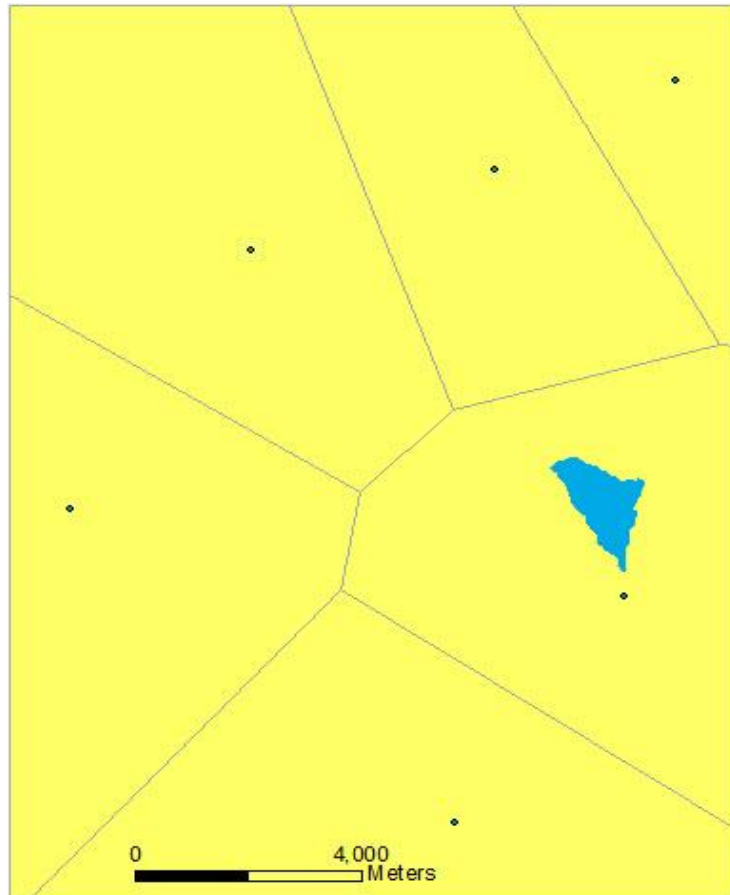


Figura 6.5.1. Suddivisione dell'area in topoiets, in blu il bacino del Rio Verde.

Di conseguenza gli unici valori utilizzati sono stati quelli relativi alla stazione di Passo della Morte.

I dati mensili di pioggia sono stati sommati per ottenere un dato annuale per l'anno 2012, così da raggiungere un valore di 1.200 mm. Lo stesso procedimento per il calcolo della precipitazione efficace annua sul bacino è stato eseguito non più suddividendo il territorio in topoiets bensì con la creazione di un file raster (**Figura 6.5.2**) in cui le stazioni pluviometriche vengono interpolate utilizzando un metodo di *inverse distance weighting*, mediando poi il risultato ed ottenendo un valore di 1.250 mm, molto simile ai 1200 mm calcolati col metodo di Thiessen. Ciò comporta che non si sia riscontrata, su base annuale, una differenza importante nel risultato finale con l'applicazione di due metodi.

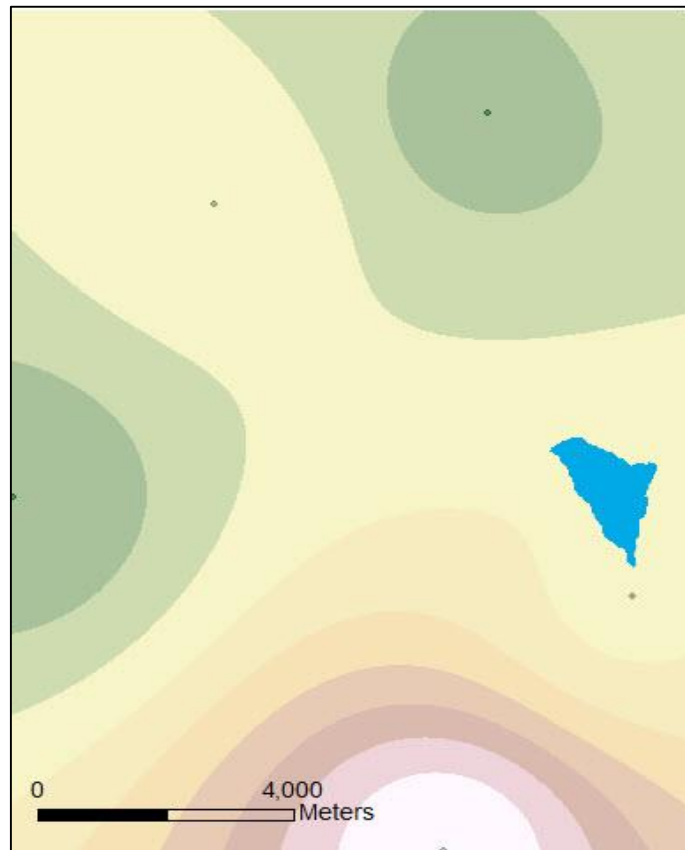


Figura 6.5.2. Raster d'interpolazione mediante IDW

Al fine di ricavare il volume di pioggia efficace caduta sull'intero bacino si è moltiplicato il valore ottenuto con l'applicazione del metodo dei topoi per l'area del bacino stesso:

$$Pioggia\ efficace = 1,2\ m \times 1.683.100\ m^2 = 2.020.000\ m^3$$

Applicando il coefficiente di infiltrazione potenziale (CIP) indicato nel paragrafo 6.4 con valori limite di 0,5 e 0,7 relativi al 95% dell'area totale, cioè la porzione costituita da calcari dolomitici, separata dalla parte inferiore del bacino da un salto in roccia di circa 50 metri, si ottiene una quantità pari rispettivamente a 1.010.000 e 1.415.000 m³ di acqua che si infiltra. Il resto della precipitazione che ruscella verso valle con i due valori di CIP risulta rispettivamente valere 1.010.000 e 605.000 m³. Trasformando queste grandezze totali annue in un ruscellamento medio si ottengono rispettivamente 32 e 19 l/s. Confrontando questi dati con il runoff medio del Rio Verde, estrapolato dalla curva di portata, che risulta di soli 2 l/s, in corrispondenza della sezione di chiusura, si nota come il resto della precipitazione ruscellata dalla parte alta del bacino si disperda quasi

completamente una volta entrata nella zona di valle attraverso i materiali detritici grossolani che costituiscono il letto del torrente a partire dalla base della cascata fino alla parte alta della frana 1. Per differenza tra i valori di runoff iniziali (cascata) e finali (sezione di chiusura) si ottengono i volumi di acqua che si è infiltrata nella parte bassa del bacino che valgono rispettivamente 950.000 e 540.000 m³. L'acqua che si perde in questa parte del bacino viene convogliata, attraverso il materiale detritico, verso sud ovest, in direzione della frana 3 (frecche blu **Figura 6.5.3**).

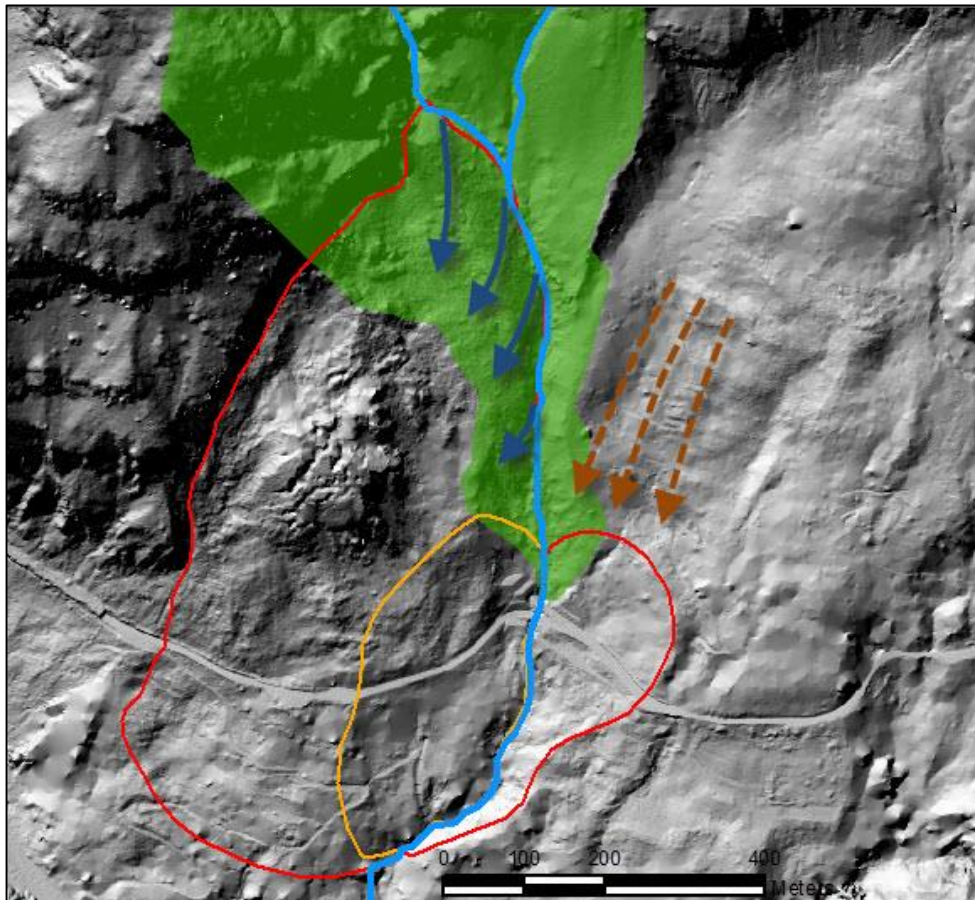


Figura 6.5.3. Dispersione in alveo attraverso i materiali di frana e possibile diversa area di alimentazione della sorgente della frana 1

L'acqua che si disperde quindi a causa delle diverse condizioni di permeabilità dei materiali, va ad alimentare in massima parte la circolazione profonda sulla sponda opposta del Rio Verde verso la paleofrana 3 e la frana 2. Ciò significa che il contributo principale alla sorgente deve provenire da un'altra area di alimentazione (frecche marroni). Questa va ricercata in parte nella zona posta direttamente a monte della frana, al di fuori del bacino del Rio Verde, e in parte in una circolazione più profonda connessa ad uno

sviluppo carsico del retrostante massiccio del Tinisa costituito sempre da calcari dolomitici con caratteristiche di permeabilità identiche a quelle dei calcari dolomitici che formano la parte alta del bacino del Rio Verde.

Successivi studi, anche con l'ausilio di traccianti, potranno fornire importanti informazioni sull'area di alimentazione della sorgente e su eventuali apporti provenienti da altri bacini circostanti ricordando che, soprattutto in presenza di fenomeni carsici e situazioni tettoniche complesse come quelle dell'area in esame, viene meno la corrispondenza tra l'estensione areale dei bacini imbriferi superficiali e i rispettivi spartiacque idrogeologici.

6.6 Relazione pioggia-portata

Gli eventi piovosi sono stati analizzati considerando solo quelli con cumulata nelle 48 ore superiore ai 10 mm. Inoltre è stato considerato come unico evento piovoso quello costituito da precipitazioni distanti non più di 48 l'una dall'altra. Lo studio delle variazioni della portata è significativo poiché è un riflesso dell'aumento della circolazione interna al versante.

I maggiori aumenti di portata, si verificano nel periodo primaverile ed autunnale (**Figura 6.6.1**). In particolare, come si nota dalla **Tabella 6.6.4** che raggruppa i principali eventi piovosi del periodo considerato, tra quelli che hanno dato un aumento di portata, i primi 3 sono concentrati nel mese di novembre 2012, che ha visto una cumulata di pioggia pari a 495 mm. Questo valore è notevole se consideriamo che la cumulata di pioggia per l'intero 2012 è stata di 1954 mm, il che significa che nel mese di novembre è caduta oltre un quarto della pioggia annuale. Agli aumenti di portata autunnali del 2012 succedono eventi verificatisi nei mesi primaverili di marzo e aprile e in quelli autunnali di settembre e ottobre.

Nei mesi estivi e invernali non ci sono stati eventi in grado di far aumentare di almeno 10 l/s la portata delle sorgenti partendo da una condizione stazionaria in assenza di precipitazioni fino ad un picco di portata susseguente alla pioggia. I motivi sono probabilmente da ricercare nei tempi di ricarica dell'acquifero, nella temperatura dell'aria, nella presenza di vegetazione, nella saturazione del suolo, nonché nelle precipitazioni.

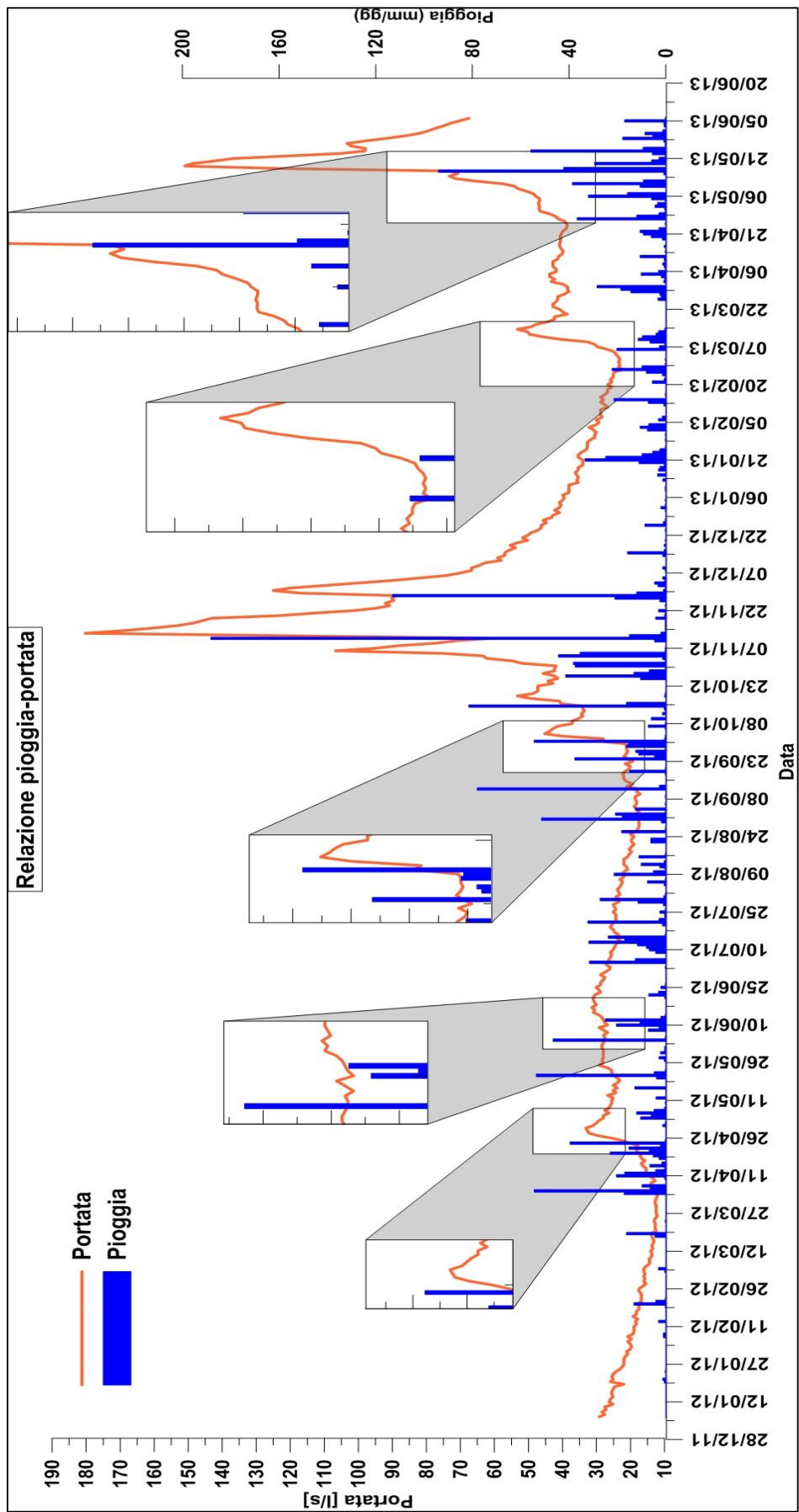


Figura 6.6.1. Relazione precipitazioni-portata Rio Verde (gennaio '12- maggio '13)

Nei riquadri ingranditi sono evidenziati alcuni eventi significativi che mostrano il comportamento della curva di portata nei confronti delle precipitazioni.

In particolare, nei mesi estivi, dal 01/06/2012 al 04/09/12, pur essendosi verificate piogge per un totale cumulato di 436 mm, a causa dell'intercettazione da parte della vegetazione e della maggior evapotraspirazione indotta da fattori quali le alte temperature e la maggior insolazione, dovuta anche all'esposizione verso sud del versante meridionale del monte Tinisa, vi sono stati solo due eventi, dall' 8/06 al 14/06 e dal 9/07 al 16/07 che sono stati in grado di far aumentare la portata della sorgente rispettivamente di 5,2 e 3,6 l/s. (**Figura 6.6.2**).

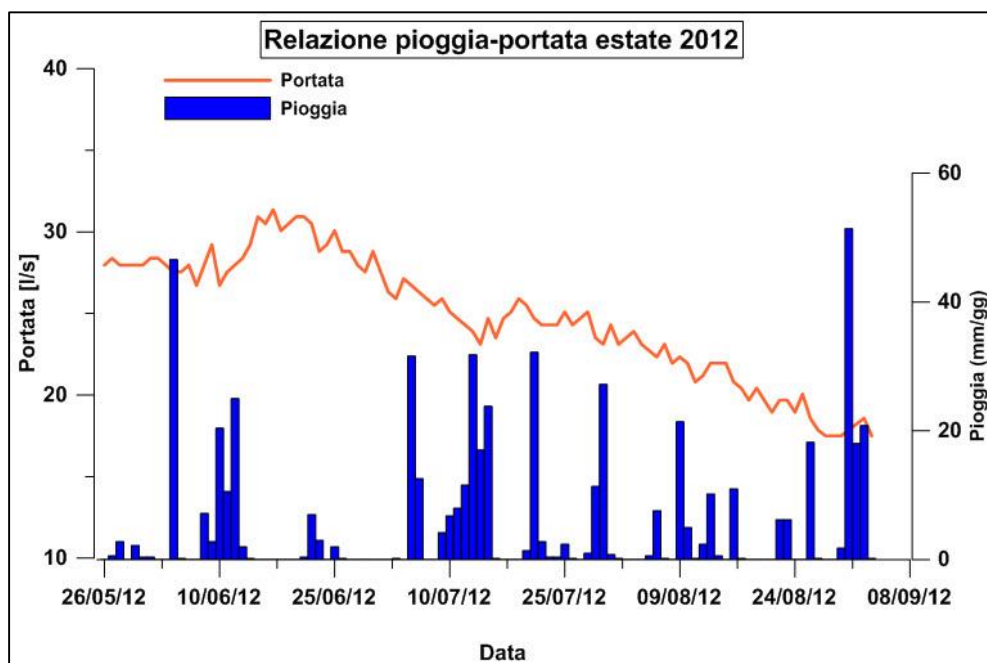


Figura 6.6.2. Zoom estivo sulla relazione pioggia-portata per la stagione 2012

Ciò è dovuto, alla lunga durata degli eventi, che hanno fatto sì che in quei periodi l'umidità relativa fosse maggiore mentre il soleggiamento, la temperatura dell'aria, e di conseguenza il tasso di evapotraspirazione fossero minori permettendo ad una maggior quantità di acqua di infiltrarsi andando ad alimentare la circolazione profonda che in data 17/06 e 20/07 ha mostrato i suddetti picchi.

Per quel che concerne altri eventi pluviometrici significativi che non hanno prodotto aumento di portata, uno si è verificato tra il 04-07/04/12 e l'altro tra il 26-29/10/12 (**Figura 6.6.3**).

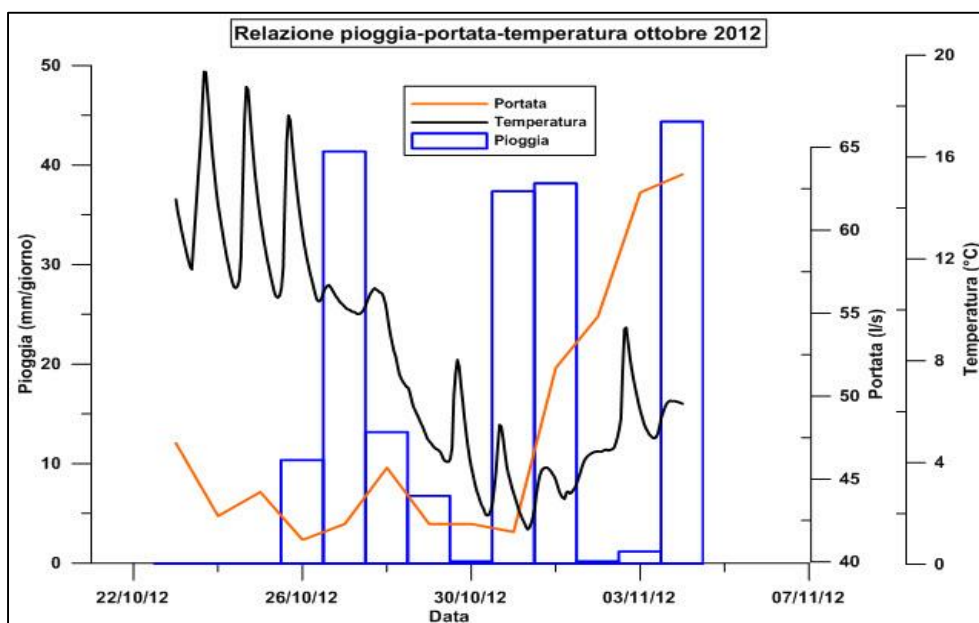


Grafico 6.6.3. Relazione pioggia-portata-temperatura evento 26-29/10/12

In entrambi i casi il mancato aumento di portata è dovuto alle basse temperature, che si aggiravano attorno ai 5°C ai 660 m s.l.m. della stazione del Passo della Morte che ha permesso che la pioggia, nella parte alta del bacino, si trasformasse in neve e non si infiltrasse andando ad alimentare la portata della sorgente.

Per lo stesso motivo risulta particolare l'evento del maggio 2013 in cui, pur con una cumulata di 174 mm in dieci giorni, la portata massima è salita fino ad un picco di 151 l/s a causa del rialzo termico che ha contribuito, insieme alla pioggia, a far sciogliere la neve ancora presente nella parte alta del bacino e nelle zone circostanti.

Nella **Tabella 6.6.4** sono analizzati gli eventi piovosi con cumulata nelle 48 ore superiore a 10 mm, due eventi sono stati considerati separati quando il tempo trascorso tra la fine di uno e l'inizio dell'altro fosse superiore a 48 ore. Sono così state create 3 classi di valori per i parametri di durata, cumulata e intensità della precipitazione oltre che per la variazione di portata, la portata iniziale e quella di picco. Le classi sono state create in base alla densità di distribuzione dei valori dei parametri analizzati.

Eventi piovosi	Inizio	Fine	durata (h)	cumulata (mm)	Intensità (mm/h)	picco pioggia	Lag picco Pieggi-Q (ore)	Inizio anomalia Q	Q iniz (l/s)	Data picco Q	Picco Q (l/s)	ΔQ (l/s)
1	4/4/12 17:00	7/4/12 17:45	72.75	88	1.21	5/4/12 10:15	----	----	----	----	----	----
2	10/4/12 23:15	16/4/12 11:15	132	50.6	0.38	11/4/12 16:15	----	----	----	----	----	----
3	18/4/12 20:45	24/4/12 15:45	139	94.6	0.68	24/4/12 14:00	95.50	24/4/12 2:15	19.00	30/4/12 0:30	36.30	17.30
4	4/5/12 10:45	8/5/12 1:00	52	34	0.65	4/5/12 11:00	----	----	----	----	----	----
5	16/5/12 1:45	16/5/12 8:45	7	10	1.43	16/5/12 6:30	----	----	----	----	----	----
6	20/5/12 21:45	23/5/12 4:45	55	62.4	1.13	21/5/12 6:00	8.75	21/5/12 14:45	25.10	25/5/12 13:00	31.80	6.70
7	4/6/12 1:00	4/6/12 23:00	22	47	2.14	4/6/12 12:45	----	----	----	----	----	----
8	8/6/12 12:45	14/6/12 6:00	161.25	68.2	0.42	10/6/12 8:30	172.00	14/6/12 7:15	29.20	17/6/12 12:30	34.40	5.20
9	5/7/12 12:00	6/7/12 13:00	25	44.4	1.78	6/7/12 10:15	----	----	----	----	----	----
10	9/7/12 18:15	16/7/12 3:15	153	103.4	0.68	15/7/12 10:15	122.75	17/7/12 7:00	23.90	20/7/12 13:00	27.50	3.60
11	20/7/12 21:30	21/7/12 14:30	17	34	2.00	21/7/12 12:45	----	----	----	----	----	----
12	29/7/12 12:30	31/7/12 3:00	39.5	39	0.99	30/7/12 19:00	----	----	----	----	----	----
13	30/8/12 22:00	2/9/12 10:45	60.75	92	1.51	31/8/12 17:00	139.00	3/9/12 3:00	17.50	5/9/12 12:00	20.10	2.60
14	12/9/12 10:00	13/9/12 3:30	17.5	80.4	4.59	12/9/12 15:15	118.50	12/9/12 12:45	18.60	17/9/12 13:45	24.70	6.10
15	24/9/12 15:00	1/10/12 14:15	124.5	151.4	1.22	1/10/12 4:45	81.00	29/9/12 10:30	21.60	4/10/12 15:45	47.20	25.60
16	15/10/12 0:15	16/10/12 7:00	30.75	98	3.19	15/10/12 16:15	81.75	16/10/12 17:30	38.50	19/10/12 1:30	53.80	15.30
17	26/10/12 13:15	29/10/12 11:15	70	63	0.90	27/10/12 21:45	----	----	----	----	----	----
18	31/10/12 17:30	1/11/12 13:15	19.75	75.2	3.81	1/11/12 1:00	56.75	1/11/12 11:15	50.20	3/11/12 9:45	68.90	18.70
19	3/11/12 12:45	5/11/12 14:15	49.5	81	1.64	5/11/12 0:45	12.25	5/11/12 9:00	68.90	5/11/12 13:00	106.70	37.80
20	10/11/12 18:45	13/11/12 6:00	59.25	209.6	3.54	11/11/12 14:30	7.75	10/11/12 21:15	67.30	12/11/12 10:15	189.50	122.20
21	26/11/12 9:00	29/11/12 23:30	86.5	148.4	1.72	28/11/12 16:00	15.00	28/11/12 2:30	89.60	30/11/12 7:00	125.20	35.60
22	6/3/13 8:15	14/3/13 1:15	185	58	0.31	6/3/13 18:15	52.75	2/3/13 3:00	23.50	14/3/13 3:00	54.00	30.50
23	28/3/13 17:30	31/3/13 15:00	69.5	63.8	0.92	30/3/13 19:30	88.25	31/3/13 15:15	40.40	3/4/13 11:45	45.70	5.30
24	27/4/13 10:15	29/4/13 10:15	48	52	1.08	27/4/13 20:45	69.00	28/4/13 20:45	40.90	30/4/13 17:45	48.20	7.30
25	5/5/13 15:45	7/5/13 21:15	53.25	52	0.98	7/5/13 20:00	42.00	6/5/13 17:45	46.20	9/5/13 14:00	57.50	11.30
26	10/5/13 11:15	12/5/13 19:30	56.25	59.2	1.05	11/5/13 2:00	54.80	11/5/13 7:00	55.40	14/5/13 14:15	77.60	22.20
27	16/5/13 0:00	21/5/13 21:15	141.25	174	1.23	17/5/13 9:15	44.00	16/5/13 10:15	65.60	18/5/13 13:15	151.80	86.20

Tabella 6.6.4. Analisi dei principali eventi piovosi (gennaio '12-maggio '13) e aumenti di portata

Il dato più significativo è rappresentato dalla variazione di portata registrata dalle scaturigini che indica l'effetto della precipitazione sulla circolazione idrica sotterranea. Per comprendere meglio quale parametro relativo alle piogge sia più strettamente connesso all'aumento della portata si sono realizzati tre grafici che legano la variazione di portata rispettivamente a:

- 1) Durata della precipitazione (ore);
- 2) Intensità della precipitazione (mm/ora);
- 3) Cumulata della precipitazione (mm).

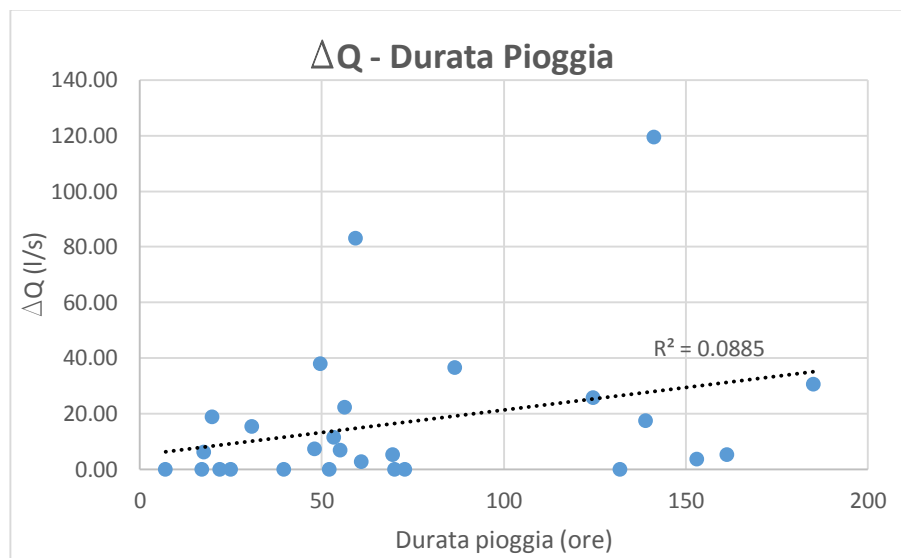


Figura 6.6.5. Relazione Durata pioggia – variazione di portata

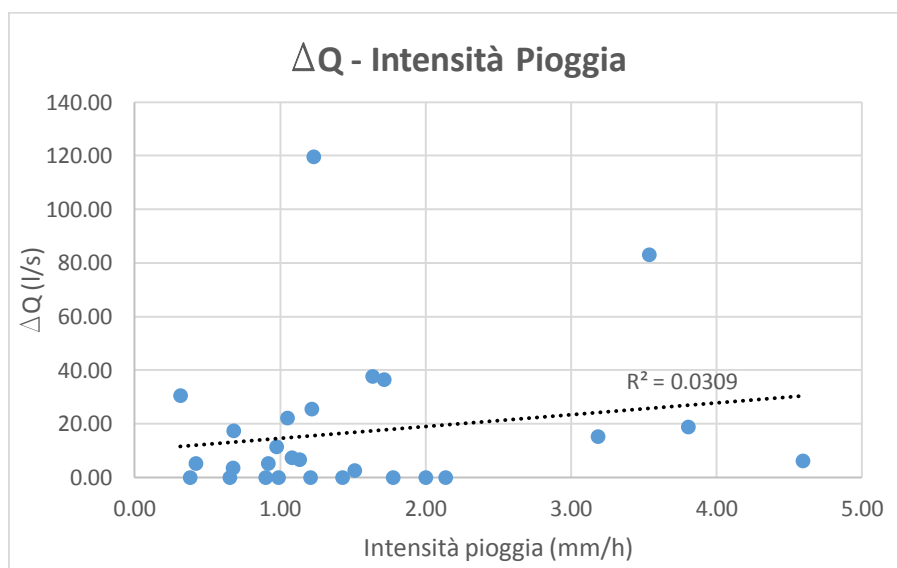


Figura 6.6.6. Relazione intensità pioggia – variazione di portata

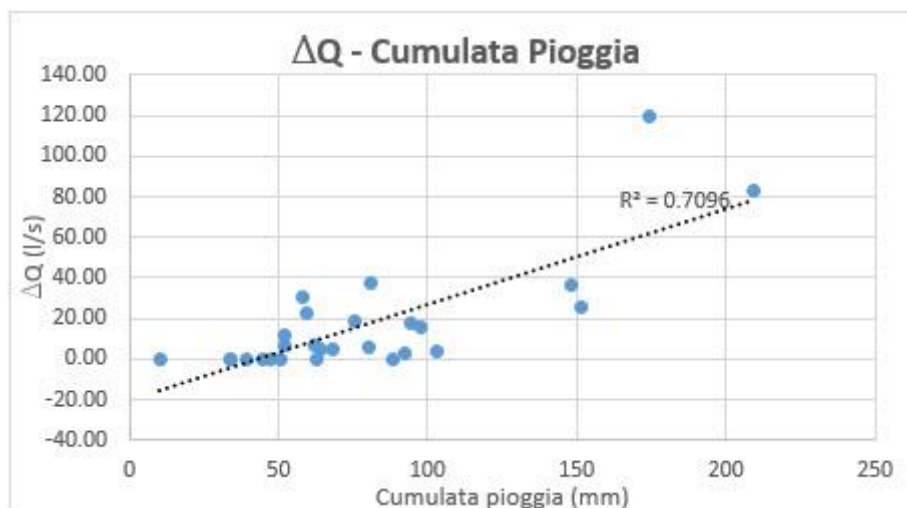


Figura 6.6.7. Relazione cumulata pioggia – variazione di portata

La proporzionalità più evidente si riscontra nell'ultimo grafico, con un valore di $R^2 = 0,71$. Mentre la proporzionalità nei primi due casi è quasi nulla con R^2 rispettivamente pari a 0,09 e 0,03, il che dimostra un'indipendenza della portata rispetto all'intensità e alla durata della precipitazione.

Il fattore più determinante per l'aumento della portata risulta dunque essere la cumulata della pioggia.

Un'ulteriore analisi di cross-correlazione effettuata con il software PAST tra il dato di portata, opportunamente detrendizzato, e la pioggia ha indicato come il massimo indice di correlazione si verifichi entro 2 giorni dalla precipitazione con un valore di 0,26, per poi andare a diminuire velocemente già dal terzo giorno (**Figura 6.6.8**).

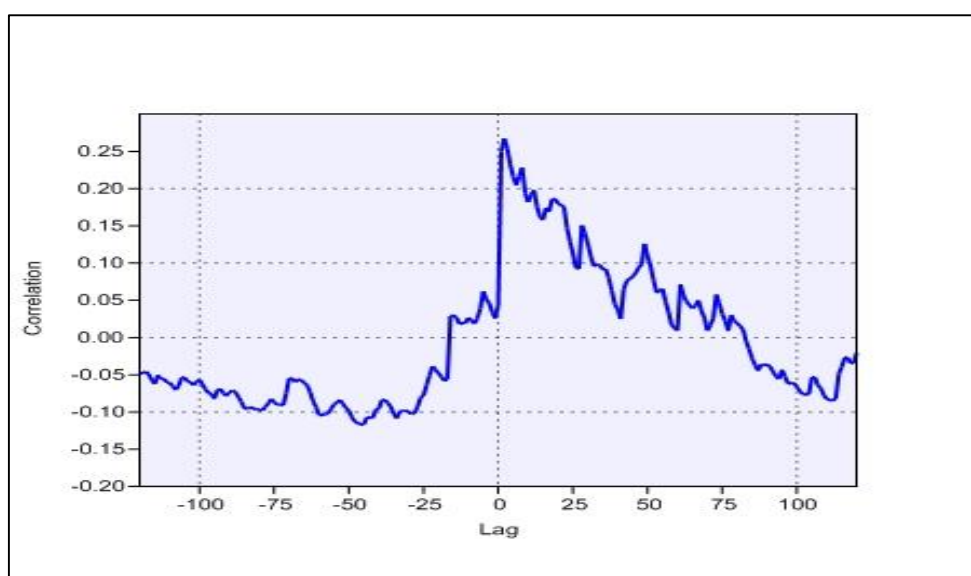


Figura 6.6.8. Cross-correlazione tra i valori di portata e di pioggia

Questo significa che il tempo medio di influenza dell'acquifero è molto breve, come ci si aspetta da complessi idrogeologici di questo genere a causa dell'elevato grado sia di permeabilità primaria dei terreni sia per fratturazione dei materiali carbonatici che permette una trasmissione di acqua rapida dal momento dell'infiltrazione a quello della eventuale fuoriuscita attraverso le scaturigini, specialmente nei periodi autunnali delle forti piogge, e primaverili, con precipitazioni accompagnate da scioglimento nivale alle quote più elevate.

6.7 Relazione portata-inclinometro

Nel paragrafo 5.3 sono stati analizzati i tassi di deformazione superficiali e profondi e le direzioni dei vettori ad essi associati. Di fondamentale importanza è però comprendere quali siano le cause di tali spostamenti e quali fattori li influenzino maggiormente.

Perciò si sono analizzati i dati dell'asse X dell'inclinometro I21bis, che come già detto è la direzione planimetrica che approssima il senso di spostamento dell'ammasso in frana meglio della direzione Y, che invece risulta perpendicolare allo stesso e quindi di scarsa utilità.

Il tratto di curva analizzata va dal 06/01/2012 al 06/06/13 (**Figura 6.7.1**).

Come si può notare dal grafico inclinometrico lo spostamento è di tipo continuo senza fasi di quiescenza ma solo con diminuzioni o incrementi di velocità. Ciò indica una deformazione lenta ma continua del versante con accelerazioni in corrispondenza di periodi di pioggia abbondanti e aumenti di portata della sorgente.

La curva degli spostamenti è stata suddivisa in più tratti caratterizzati da diverse pendenze. I punti rossi, in cui varia l'inclinazione della curva, sono indicati come flessi e rappresentano l'avvio di un'accelerazione della frana.

I flessi esaminati sono solo quelli che hanno portato ad una deformazione cumulata superiore a $0,10^\circ$ prima di una fase di rallentamento o di un'ulteriore accelerazione marcata da un altro flesso.

Per capire meglio i rapporti di causa-effetto tra l'accelerazione del corpo di frana, le precipitazioni e la portata registrata dalla sorgente si andranno successivamente a descrivere nel dettaglio gli 11 flessi della **Figura 6.7.1**.

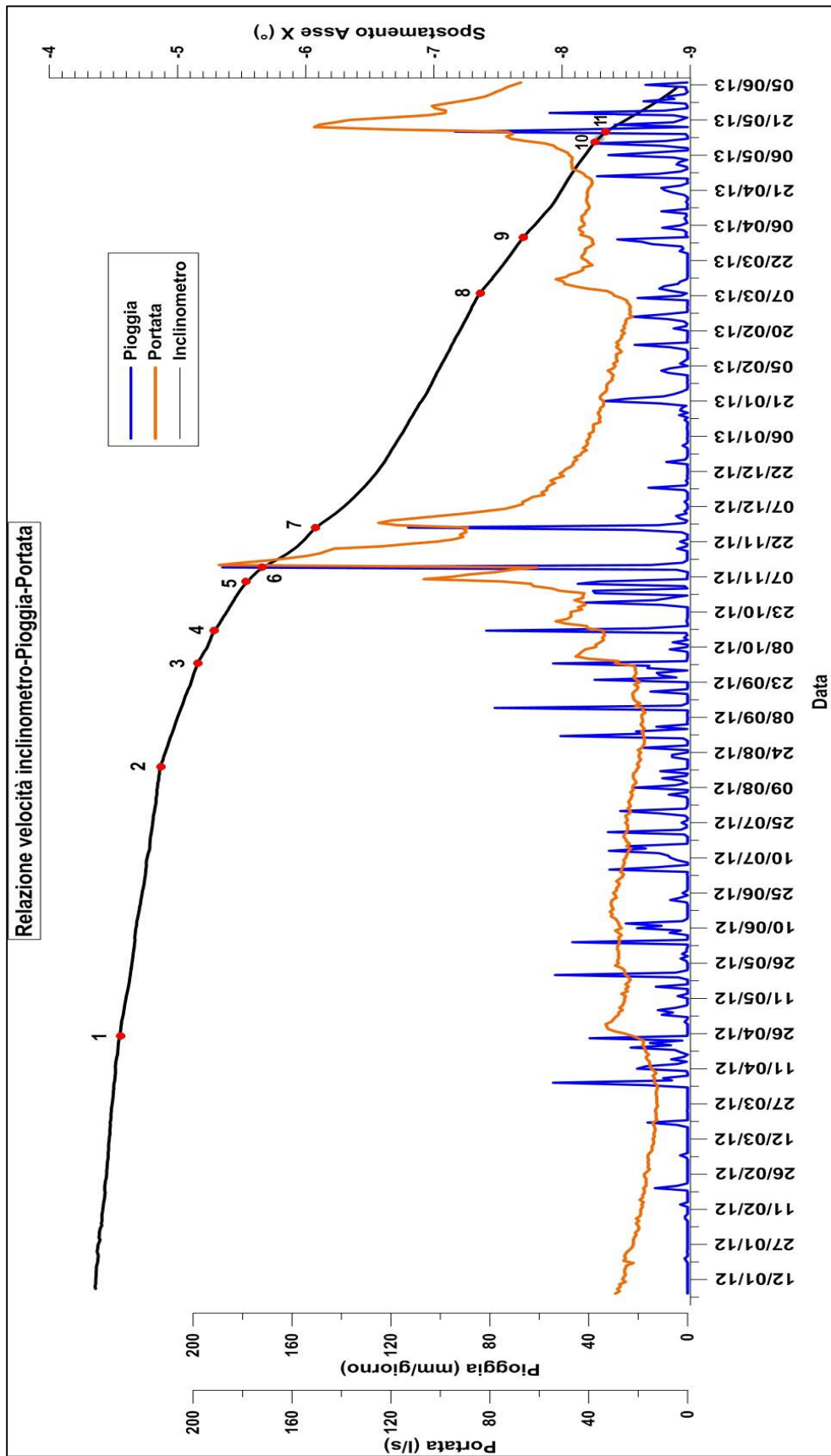


Figura 6.7.1. Relazione Inclinometro I21bis – pioggia - portata

Flesso1

Il primo flesso si è verificato in data 26/04/12 e ha accumulato una deformazione totale pari a $0,3^\circ$. L'accelerazione si è manifestata in seguito ad un evento piovoso la cui cumulata è stata pari a 94.6 mm con un picco in data 24 aprile di 39 mm. Come si nota dalla **Figura 6.7.2** il flesso si pone nella fase crescente della curva di portata con un ritardo di 2 giorni dalla fine della precipitazione.

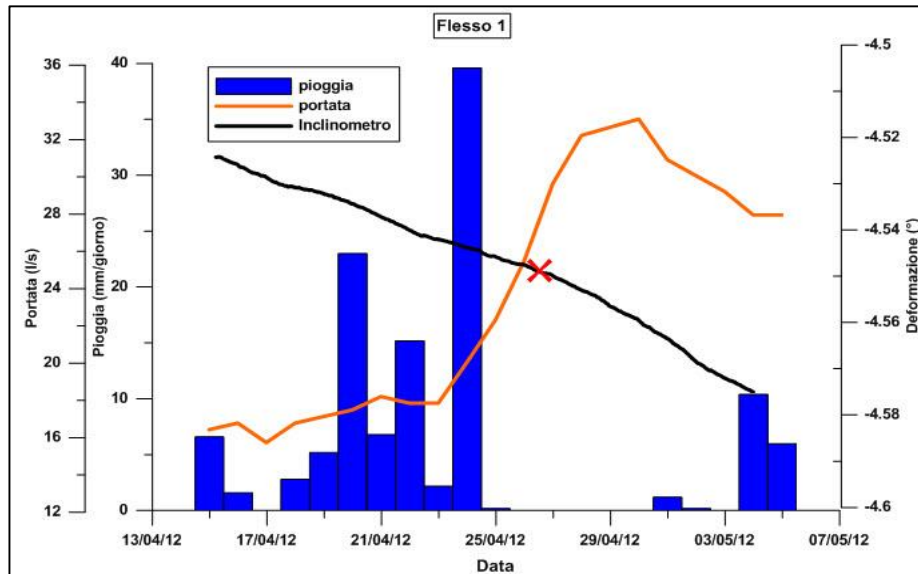


Figura 6.7.2. Relazione pioggia-portata-flesso 1

Flesso 2

Questo flesso verificatosi in data 18/08/12 (**Figura 6.7.3**) risulta particolare rispetto a tutti gli altri poiché non è associato a fenomeni meteorologici importanti né a conseguenti aumenti di portata, la quale, nel periodo considerato, è rimasta compresa tra 22 e 17 l/s, mentre l'ultima precipitazione si è verificata in data 16/08/12 con una cumulata di soli 10 mm. E' probabile che a causa dell'elevata evapotraspirazione questa pioggia non sia riuscita ad infiltrarsi; si nota infatti una diminuzione della portata che non risente in alcun modo dell'evento piovoso.

Per questa ragione la causa di quest'accelerazione risulta non collegabile, almeno direttamente, con la componente idrica sia essa superficiale che

profonda. Avendo escluso anche il verificarsi di sismi, probabilmente, la causa può essere ricercata in un assestamento del corpo di frana.

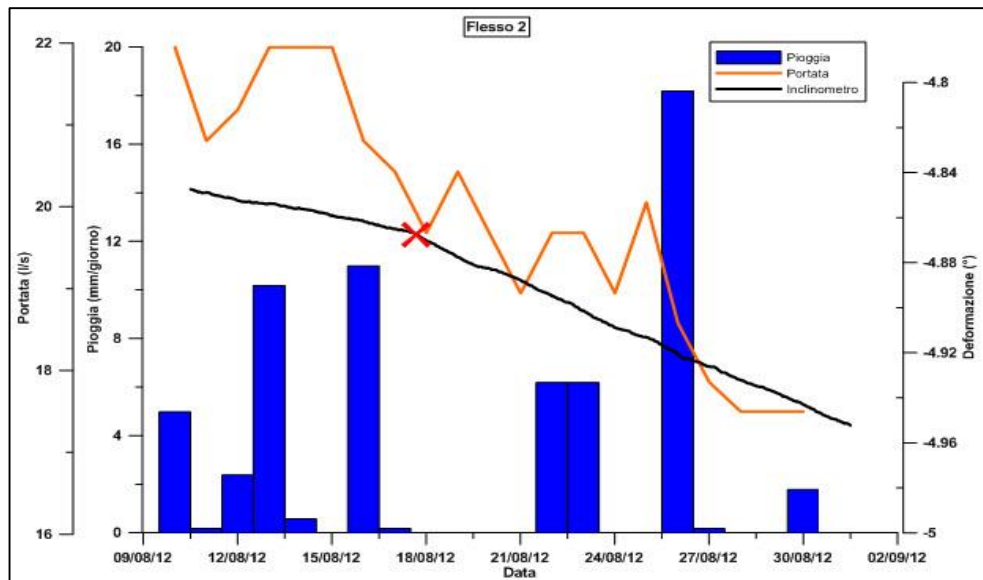


Figura 6.7.3. Relazione pioggia-portata-flesso 2

Flesso 3

Il terzo flesso si è verificato in data 01/10/12 in corrispondenza di un evento piovoso durato circa 8 giorni. Esso coincide con il brusco aumento della portata segnalato dalla curva arancione e si inserisce in un periodo piovoso che vede il suo culmine proprio il 1 ottobre con un valore di pioggia cumulata pari a 151,4 mm (**Figura 6.7.4**). Anche in questo caso si ravvisa la stretta

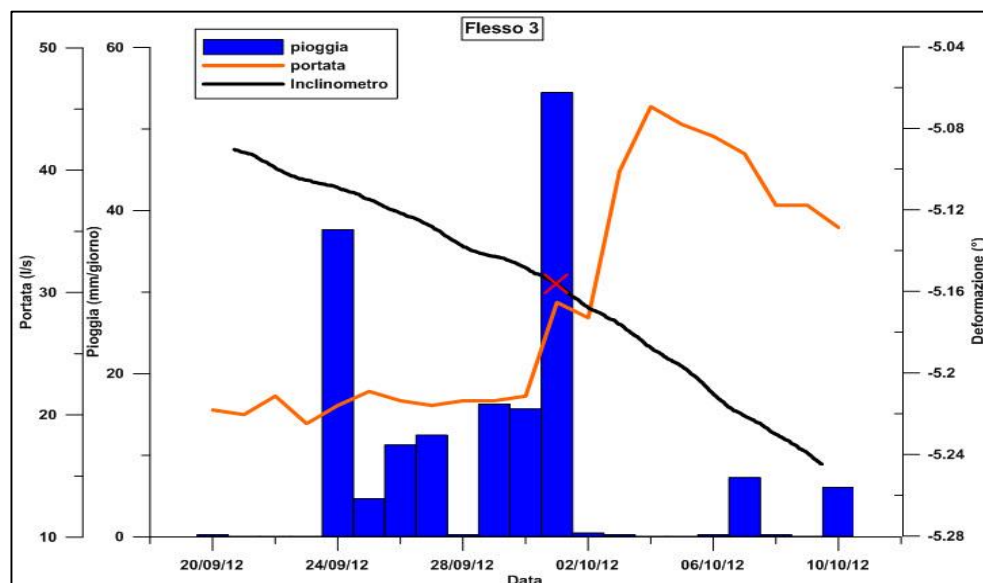


Figura 6.7.4. Relazione pioggia-portata-flesso 3

corrispondenza tra l'aumento di portata successivo alla precipitazione e l'accelerazione del movimento.

Flesso 4

L'accelerazione verificatasi il 16 ottobre 2012 ha generato un aumento di velocità che ha portato ad un valore di deformazione totale pari a $0,18^\circ$, con un tasso di deformazione giornaliera di $0,021^\circ/\text{giorno}$. Anche in questo caso il flesso si è manifestato in corrispondenza del ramo ascendente della curva di portata che ha fatto seguito ad un evento precipitativo di 98 mm con picco di 81.4 mm in data 15/10/12.

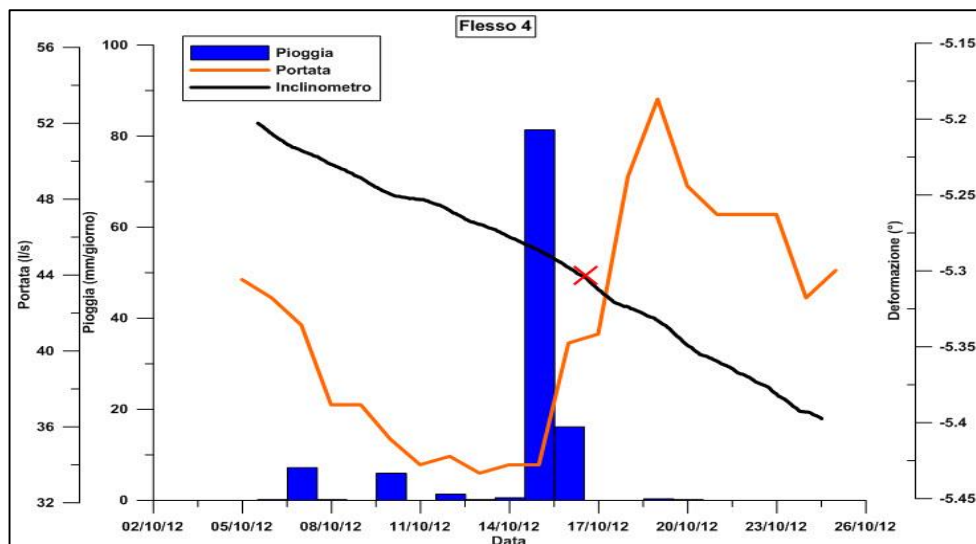


Figura 6.7.5. Relazione pioggia-portata-flesso 5

Flessi 5 e 6

I due flessi, ravvicinati nel tempo, si sono verificati rispettivamente in data 05/11/12 e 11/11/12 e sono inseriti in un contesto di elevatissime precipitazioni. Entrambi mostrano una diretta correlazione con l'aumento della portata della sorgente che il 12 novembre ha presentato un picco massimo di portata di 189,5 l/s. Nel solo mese di novembre la deformazione cumulata è stata pari a $0,84^\circ$ su un totale calcolato da gennaio 2012 a giugno 2013 di circa $5,5^\circ$.

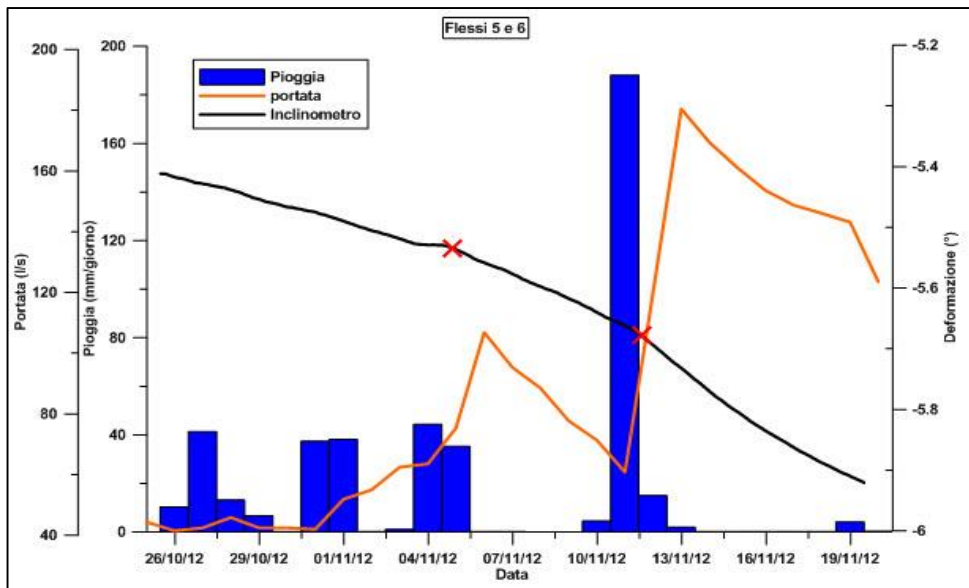


Figura 6.7.6. Relazione pioggia-portata-flessi 5 e 6

Flesso 7

L'incremento di velocità associato alla curva di deformazione dell'inclinometro si è manifestato a cavallo tra 28 e 29 novembre, sempre in corrispondenza di un aumento di portata seguito ad un evento piovoso di circa 3 giorni con cumulata di 148,4 mm e picco di pioggia giornaliera in data 29/11/12 di 113 mm (**Figura 6.7.7**). Come si nota, in seguito al raggiungimento del picco di portata della sorgente, la curva di deformazione mostra una progressiva diminuzione di pendenza correlata alla flessione della portata.

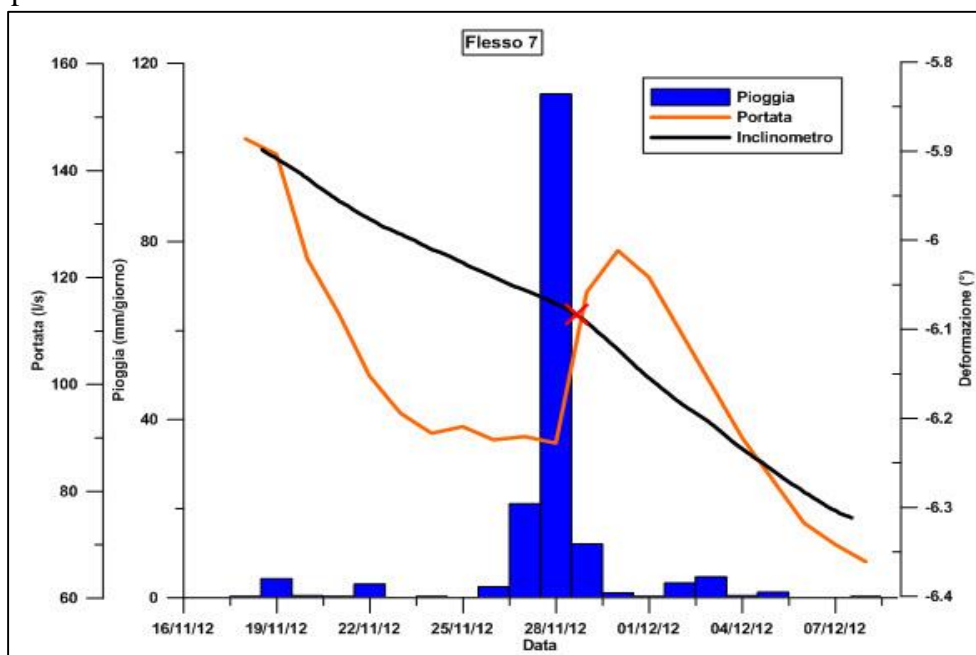


Figura 6.7.7. Relazione pioggia-portata-flesso 7

Flesso 8

Il flesso numero 8 del 7 marzo 2013 ha fatto seguito ad un periodo invernale che, nonostante le abbondanti precipitazioni, non ha registrato la presenza di significanti accelerazioni del corpo di frana. Ciò è dovuto alle basse temperature che hanno fatto sì che la pioggia cadesse sotto forma di neve fino alle quote di fondo valle senza contribuire al ruscellamento superficiale e all'infiltrazione nel versante. In corrispondenza dell'inizio della primavera, grazie ad alcune giornate con temperature fino a 18°C (01-05/03/13, curva verde **Figura 6.7.8**), la portata ha subito un aumento dovuto allo scioglimento della neve senza che si verificassero precipitazioni. Questo motivo, associato al picco piovoso di 20,2 mm del 6 marzo è stato la causa di questo flesso.

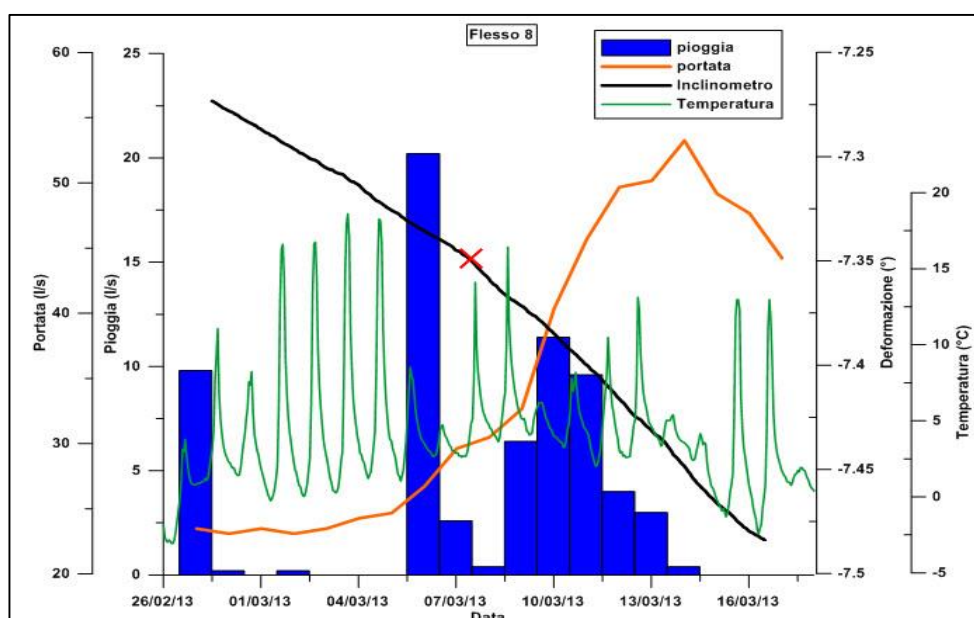


Figura 6.7.8. Relazione pioggia-portata-flesso 8

Flesso 9

L'evento occorso tra il 28 e il 31 marzo con cumulata di 63,8 mm e picco in data 31/03 di 28,4 mm ha generato un aumento di portata passata da 38 a 44 l/s (**Figura 6.7.9**). In corrispondenza di questo incremento si colloca il flesso numero 9 che, come i precedenti, si pone in stretta relazione con la quantità di acqua che fuoriesce dalle scaturigini idrauliche. I dati di temperatura sono disponibili fino alle ore 03:00 del 31 marzo e indicano valori di poco superiori allo zero, il che dimostra come la precipitazione appena a monte della stazione fosse di tipo nevoso. Purtroppo dopo questa data, per circa venti

giorni, i dati provenienti dalla sonda termometrica, non sono più utilizzabili a causa di problemi legati all'errata registrazione del dato.

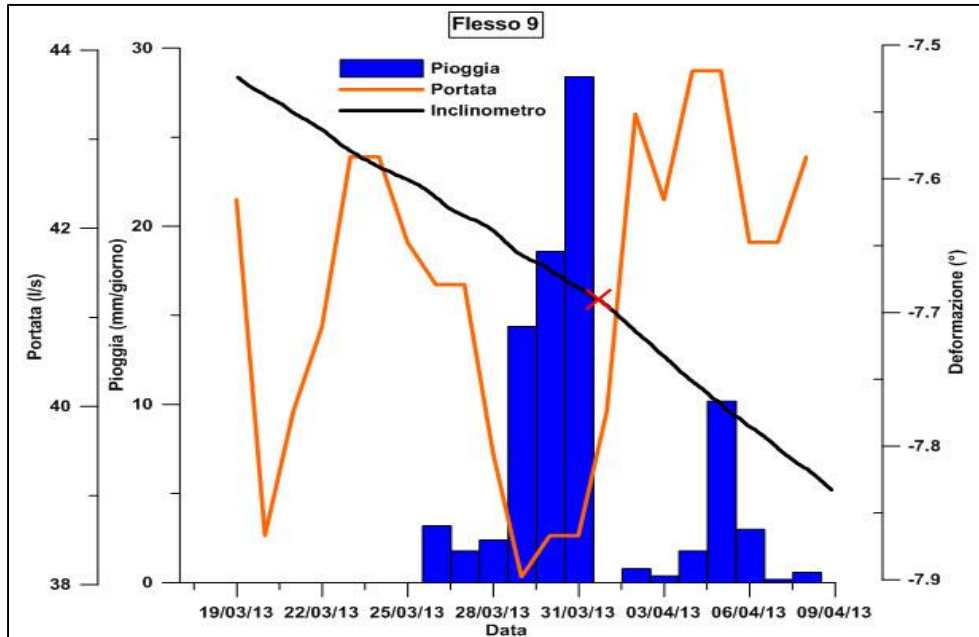


Figura 6.7.9 Relazione pioggia-portata-flesso 9

Flessi 10 e 11

Gli ultimi due flessi si sono verificati rispettivamente l'11 e il 17 maggio a seguito di due eventi piovosi che hanno registrato cumulate di 59 e 174 mm con picchi di 38,6 e 94 mm l'11 e il 16 maggio (**Figura 6.7.10**).

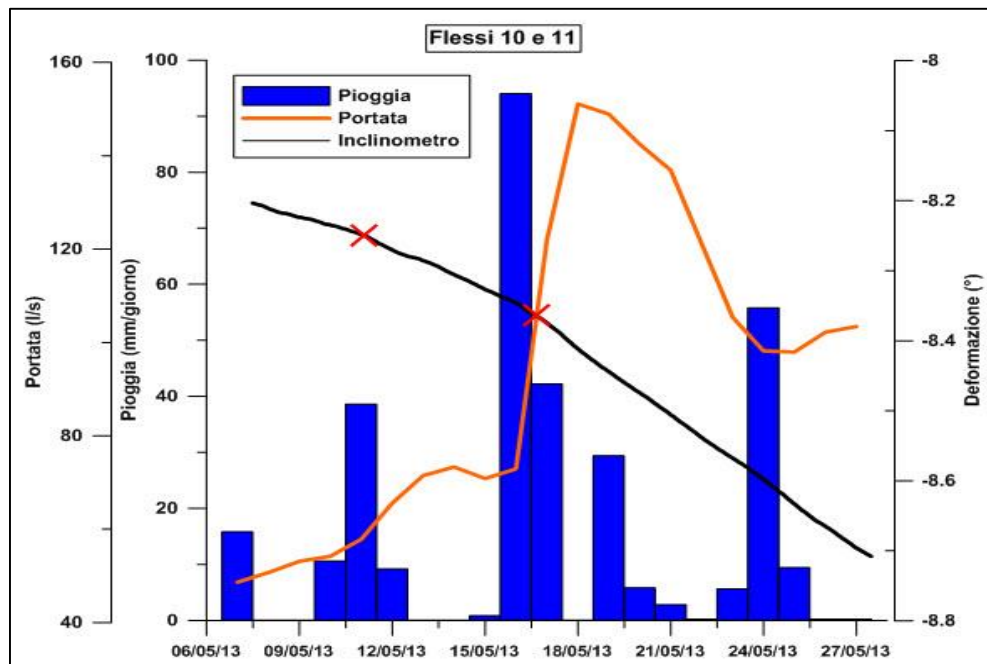


Figura 6.7.10. Relazione pioggia-portata-flessi 10 e 11

Ancora una volta gli incrementi di velocità della deformazione si localizzano in corrispondenza di aumenti di portata generati a seguito dei picchi di pioggia più significativi.

Di seguito (**Tabella 6.7.11; 6.7.12**) è riportato l'elenco dei flessi discussi precedentemente così da fornire un quadro riassuntivo che mette in relazione l'accelerazione del movimento con i parametri relativi alla portata e alla pioggia rispettivamente. In rosso sono indicati i valori di soglia di attivazione minima relative alla portata e alle precipitazioni.

Flesso	Data Flesso	Durata (giorni)	Def (°/giorno)	Def. Tot (°)	Picco Q associato (l/s)	Data Picco Q	ritardo aumento Q-flesso(gg)	ΔQ a flesso (l/s)
1	26/04/2012	198	0.0015	0.3	33.1	30/04/2012	4	9
2	18/08/2012	44	0.0068	0.3	---	---	---	---
3	01/10/2012	14	0.0079	0.11	45.2	04/10/2012	1	7
4	16/10/2012	20	0.0090	0.18	53.3	19/10/2012	2	11
5	05/11/2012	11	0.0209	0.23	106.7	05/11/2012	1	12
6	11/11/2012	8	0.0288	0.23	189.5	12/11/2012	1	45
7	29/11/2012	9	0.0222	0.2	125	30/11/2012	1	15
8	07/03/2013	25	0.0168	0.42	53.3	14/03/2013	2	20
9	01/04/2013	10	0.0180	0.18	44.2	02/04/2013	3	4
10	11/05/2013	6	0.0183	0.11	77.6	14/05/2013	4	12
11	17/05/2013	20	0.0355	0.71	151.8	18/05/2013	1	17

Tabella 6.7.11. Elenco flessi inclinometro I21bis e studio di portata

Flesso	Data Flesso	Durata (giorni)	Def (°/giorno)	Def. Tot (°)	cumulata (mm)	picco pioggia	picco pioggia (mm)	cumulata a flesso (mm)	ritardo da picco pioggia (gg)
1	26/04/2012	198	0.0015	0.3	94.6	24/04/2012	39.6	94.6	2
2	18/08/2012	44	0.0068	0.3	---	---	---	---	---
3	01/10/2012	14	0.0079	0.11	151.4	01/10/2012	54.4	147	0
4	16/10/2012	20	0.0090	0.18	98	15/10/2012	81.4	96	1
5	05/11/2012	11	0.0209	0.23	81	04/11/2012	44	81	1
6	11/11/2012	8	0.0288	0.23	209.6	11/11/2012	188.2	192	0
7	29/11/2012	9	0.0222	0.2	148.4	29/11/2012	113	148	1
8	07/03/2013	25	0.0168	0.42	58	06/03/2013	20.2	24*	1
9	01/04/2013	10	0.0180	0.18	63.8	31/03/2013	28.4	63.8	1
10	11/05/2013	6	0.0183	0.11	59.2	11/05/2013	38.6	52	0
11	17/05/2013	20	0.0355	0.71	136.2	16/05/2013	94.2	94	1

Tabella 6.7.12. Elenco flessi inclinometro I21bis e studio delle precipitazioni

Si nota come l'aumento di velocità di deformazione sia associato ad eventi piovosi importanti ed ai conseguenti aumenti di portata della sorgente, tranne per il flesso del 18/08/12 che rappresenta un'anomalia.

Tutti i flessi si verificano con un ritardo non superiore a 2 giorni rispetto al picco della pioggia, inserito in un evento precipitativo in cui il valore minimo di cumulata è pari a 58 mm. Gli eventi con cumulata superiore ai 100 mm hanno innescato in 3 casi su 4 degli spostamenti con tasso di deformazione superiore a 0,020°/gg indicati (**Tabella 6.7.12**).

L'unico evento con cumulata 151,4 mm che ha generato un incremento di velocità minore, flesso 3, è stato quello del 01/10/12, con ΔQ associato al

flesso pari a 7 l/s e picco di portata pari a 45,2 l/s, inferiore rispetto ai massimi di novembre 2012 e maggio 2013 che sono stati rispettivamente di 189 e 151 l/s.

Analizzando la **Tabella 6.7.11** si nota come i flessi si verificano, al massimo, entro 4 giorni dall'inizio dell'aumento della curva di portata e la soglia minima di ΔQ necessaria a generare un flesso sia di 4 l/s. Da notare però che si sono verificati, nel periodo di analisi, altri 4 eventi (15%) in grado di far aumentare la portata di 4 l/s senza che si generassero flessi apprezzabili.

Nonostante ciò, si può indicare come limite minimo di allerta, per possibili aumenti di velocità della frana, la soglia di 4 l/s di aumento di portata.

Se si mettono in relazione i flessi con i dati di precipitazione (**Tabella 6.7.12**) si rileva come la soglia minima di pioggia cumulata necessaria al verificarsi di un incremento di velocità sia di circa 52 mm (il flesso generato in corrispondenza di una cumulata di soli 24 mm è spiegabile con lo scioglimento nivale primaverile che ha aumentato la portata in maniera maggiore rispetto a quanto si sarebbe registrato grazie alla sola pioggia).

Inoltre, confrontando la cumulata totale degli eventi con la cumulata al momento di attivazione del flesso, si nota come quest'ultimo si verifichi quando sia caduto oltre l'87% della precipitazione, tranne in un caso (17/05/13) dove il flesso si è verificato al 70% dell'evento piovoso.

Come per la portata, si sono individuati gli eventi piovosi con cumulata superiore ai 52 mm cui non sono seguiti flessi apprezzabili. Nel caso delle piogge, ben 9 eventi su 20 (45%), con cumulata superiore a 52 mm non hanno generato flessi.

Ciò significa che la soglia determinata con i dati di precipitazione risulta meno affidabile rispetto a quella associata alla portata. Secondo lo studio condotto la correlazione degli incrementi di velocità rispetto alla portata della sorgente è pari all'85% mentre scende al 55% con le precipitazioni.

Per questo motivo, l'acqua circolante nel versante, di cui la portata delle scaturigini è un riflesso superficiale, è indicata come la principale causa degli incrementi di velocità dell'ammasso in frana.

Inoltre, se in futuro dovessero essere predisposti dei sistemi di allerta di tipo

early warning, questi dovrebbero basarsi maggiormente sui valori di portata registrati all'idrometro, più affidabili rispetto a quelli di precipitazione.

Per valutare gli sforzi incrementali a cui è sottoposto il versante in conseguenza di determinati eventi meteo-climatici si sono messe in relazione la pioggia, la curva di portata e la proiezione di velocità dell'asse X dell'inclinometro I21bis (**Figura 6.7.14**). Il termine proiezione di velocità si riferisce alla distanza che la frana coprirebbe se mantenesse per tutto l'anno la velocità che ha in un determinato istante. I numeri nel grafico indicano i flessi precedentemente identificati dalla curva di deformazione (**Figura 6.7.1**) che qui si traducono in una variazione della velocità di spostamento.

Questo grafico serve ad osservare le accelerazioni importanti che si verificano nei periodi piovosi, come quelli di novembre 2012 (**Figura 6.7.13**). Infatti il succedersi ravvicinato di eventi analoghi può essere assimilato ad un episodio alluvionale. Il picco di velocità, raggiunto a seguito dell'evento più intenso (cumulata di 209 mm in 59 ore), è stato di 22 cm/anno in proiezione. Quindi se sommassimo gli eventi da fine ottobre a novembre in modo che questi costituiscano un unico episodio precipitativo otterremmo una cumulata pari a 597.5 mm in pochi giorni, come già accaduto in passato (i.e. ottobre 1996). Pertanto se si concentrassero anche le velocità raggiunte nei diversi episodi, in un unico evento, il versante difficilmente sarebbe in grado di accomodare la deformazione, andando probabilmente incontro ad una rottura di tipo estensivo.

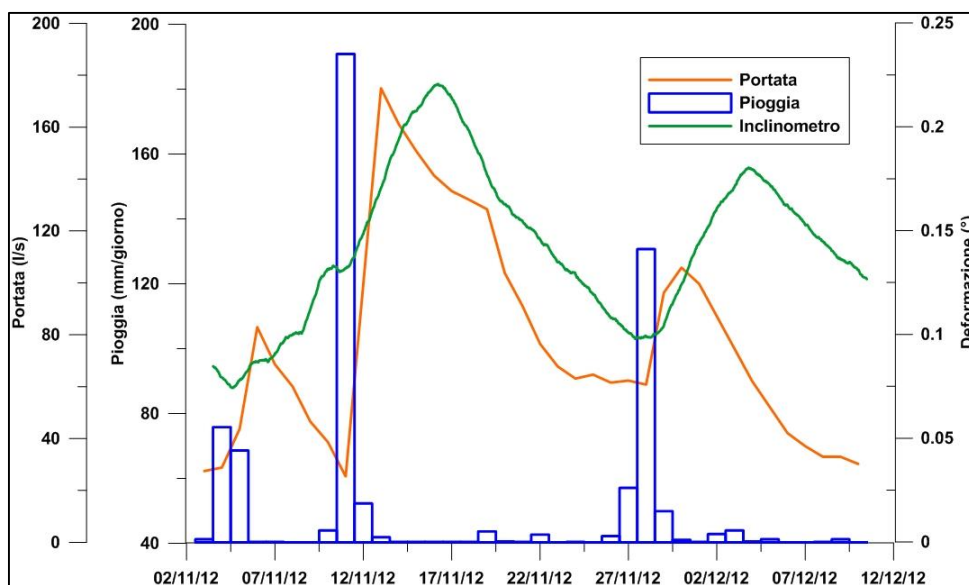


Figura 6.7.13. Zoom curve portata-pioggia-proiezione velocità nel mese di novembre 2012

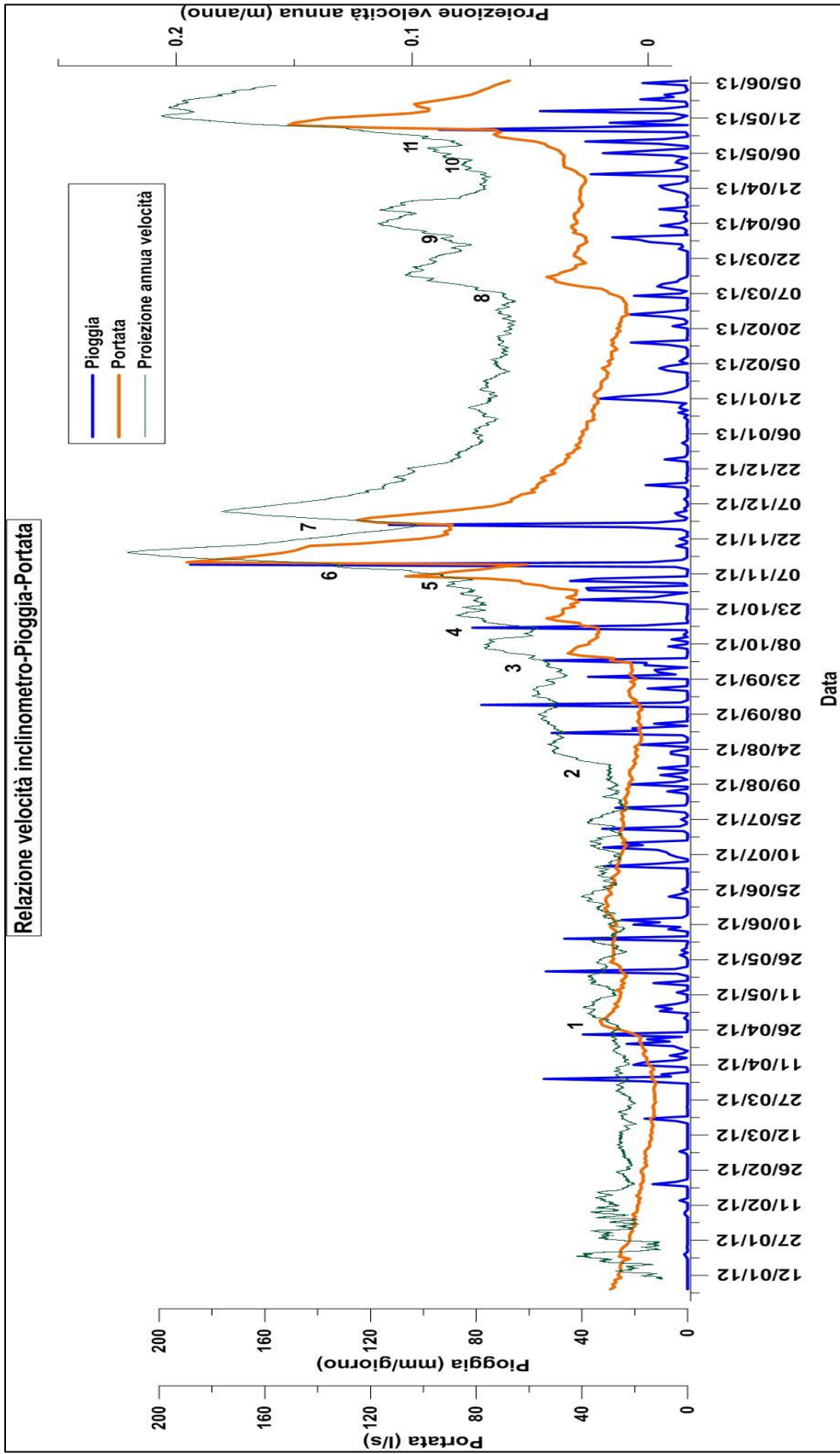


Figura 6.7.14. Relazione proiezione annua di velocità I21bis - pioggia - portata

Per una maggior completezza sono stati inseriti anche i dati forniti dall'inclinometro per il 2011. In quell'anno i valori di deformazione sono stati molto inferiori (**Figura 6.7.15**) e l'unico flesso degno di nota si è verificato in data 15/11/2011 con una deformazione cumulata di $0,11^\circ$, proseguita fino ad aprile 2012, dove si è verificato il primo flesso del nuovo anno. L'accelerazione ha fatto seguito a due eventi piovosi con picco rispettivamente in data 26/10/12 e 08/11/2011 con cumulate di 184 e 125 mm.

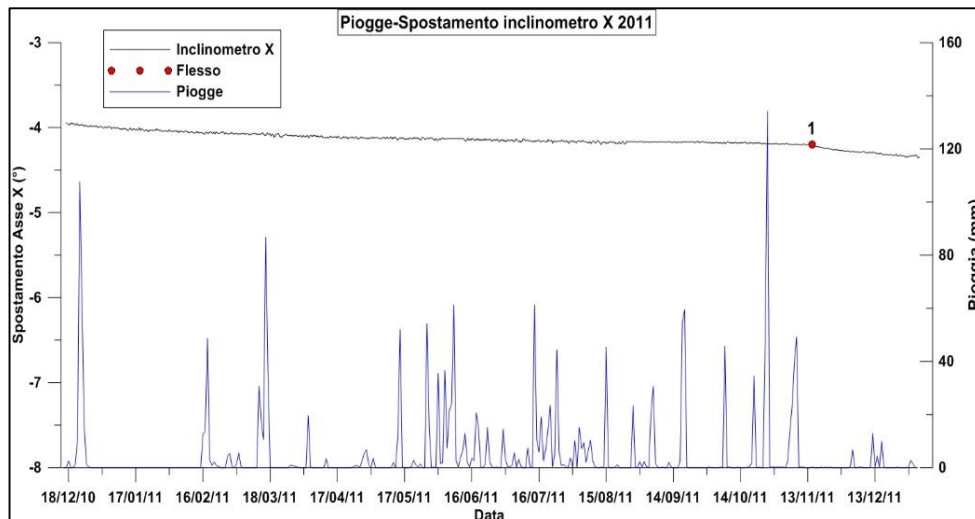


Figura 6.7.15. Relazione spostamento inclinometro I21bis – pioggia

Questo comportamento è dovuto in parte alle più scarse precipitazioni dell'autunno 2011 (01/09/2011-01/12/2011), la cui cumulata è risultata pari a 571 mm, rispetto allo stesso periodo del 2012 in cui sono caduti 1063 mm.

Un altro motivo può essere dovuto ai tempi di messa in esercizio dell'inclinometro, poiché appena installato, nei primi mesi, gli spostamenti del corpo di frana non influiscono direttamente sulle misurazioni delle deformazioni o comunque ne attenuano i valori. Ciò si verifica poiché bisogna dare il tempo al terreno di compattarsi e, inizialmente, la deformazione viene assorbita dal terreno che si assesta attorno al tubo inclinometrico. Successivamente, una volta compattato il terreno circostante, la sonda produrrà dati maggiormente affidabili e risulterà più sensibile agli spostamenti dell'ammasso franoso.

Si nota inoltre, come il flesso si produca 7 giorni dopo il picco di precipitazione dell'ultimo evento, in contrapposizione con i dati rilevati nel periodo gennaio '12 – maggio '13, sopra discussi. Purtroppo i dati di portata

si sono resi disponibili dal gennaio 2012 e quindi non possono essere fatte valutazioni in merito per questo flesso.

6.8 Falda acquifera

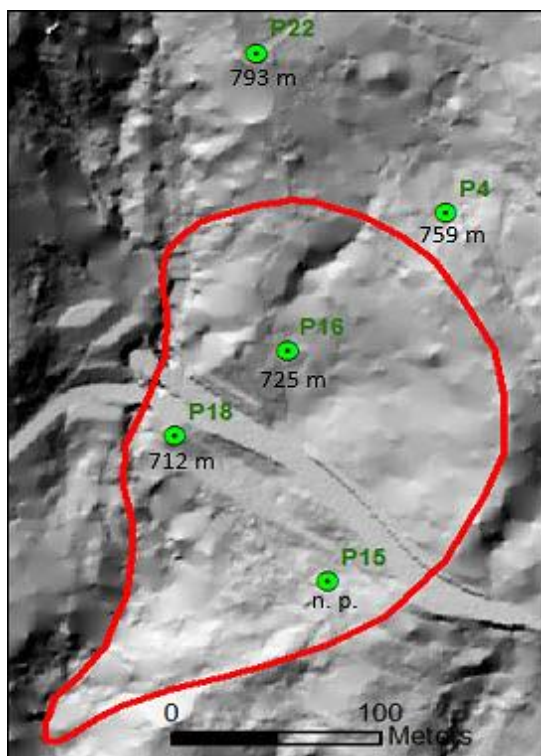


Figura 6.8.1. Dislocazione dei piezometri nell'area di studio

A seguito della provata relazione causa - effetto esistente tra l'aumento di portata delle scaturigini e le accelerazioni del corpo di frana, merita particolare attenzione l'analisi dell'altezza della falda nel versante. I dati provengono da una serie di piezometri dislocati lungo il pendio (**Figura 6.8.1**). Per alcuni le misurazioni sono eseguite manualmente mentre altri (P4) forniscono una lettura in continuo del dato da maggio 2013.

Il piezometro P4 (790 m) posto oltre il limite di monte della frana, più a est rispetto alle scaturigini, ha indicato nel tempo un'oscillazione del livello di falda molto limitata, con una soggiacenza media rispetto al piano campagna di 31-32 m, con livello che si attesta attorno ai 759 m s.l.m. (**Tabella 6.8.2**). Più significativo per la portata delle sorgenti, poste tra i 768 e i 780 m s.l.m., è il dato del piezometro P22, a monte della frana, che indica una soggiacenza della falda di 23 m dal piano campagna, con una quota assoluta del livello di falda di 793 m s.l.m.

PIEZOMETRO P4	
Quota s.l.m 790	
Quota m dal p.c. 67	
data	Freatimetro (m)
16/10/2003	32.2
06/11/2003	31.3
22/12/2003	31.3
06/02/2004	31.0
15/04/2004	31.5
12/05/2004	33.3
15/07/2004	32.1
17/08/2004	31.2
22/10/2004	32.4
29/11/2004	33.8
21/03/2005	32.7
05/04/2005	32.7
14/06/2013	31.9
14/07/2013	31.3
14/08/2013	31.2

Tabella 6.8.2. Variazioni livello falda piezometro P4

Al piezometro P16 la quota della falda si riduce a 725 m per arrivare al P18 a un valore di 712 m. Mentre il piezometro P15, posto nella parte orientale di frana non ha mai rivelato presenza di acqua pur essendo profondo circa 90 m.

Inclinometri	Prova	Profondità (m)	permeabilità (cm/s)
I3	1	19.00 - 19.50	3.1x10E-03
	2	44.00 - 44.50	2.23x10E-06
I4	1	15.00 - 15.50	2.55x10E -03
	2	30.00 - 30.50	4.71X10E-03
	3	66.00 - 66.50	3.19x10E-04

Tabella 6.8.3. Risultati delle Prove di permeabilità LeFranc inclinometri I3 e I4

Se si analizzano i dati (**Tabella 6.8.3**) relativi alle prove di permeabilità puntuali di tipo LeFranc a carico costante effettuate nei fori degli inclinometri I3 e I4 si notano valori di permeabilità elevati nell'ordine dei 10^{-3} cm/s nelle parti più superficiali del corpo di frana e una sostanziale diminuzione del parametro in profondità. Questo significa che l'acqua appena entrata nella zona di frana ha una cadente elevata. Il versante in frana è costituito oramai da materiale con caratteristiche di permeabilità elevata, poiché la frazione più fine del terreno si è dilavata nel tempo. Il drenaggio si disperde poi lungo il Rio Verde, probabilmente nella paleovalle costituita da materiali alluvionali grossolani.

6.9 Analisi di stabilità preliminari

Le simulazioni preliminari dell'influenza del livello di falda all'interno del versante sul fattore di sicurezza, la stabilità e lo spostamento orizzontale del corpo di frana sono state effettuate negli anni passati (CRISTANTE, 2011) (MARCATO, 2011). Le analisi sono state condotte mediante i metodi di studio dell'equilibrio limite e degli elementi finiti. Gli studi, pur non avendo a disposizione alcuni dei nuovi dati provenienti dalle prove geotecniche dell'inclinometro I21bis e dalla determinazione tridimensionale della superficie di scivolamento forniscono importanti indicazioni in merito alle dinamiche cinematiche del fenomeno franoso (**Figura 6.9.1**).

Si sono analizzate tre situazioni con 3 diversi livelli della falda nel versante:

- 1) Falda alta;
- 2) Falda bassa

3) Falda “zero”, drenaggio totale del versante.

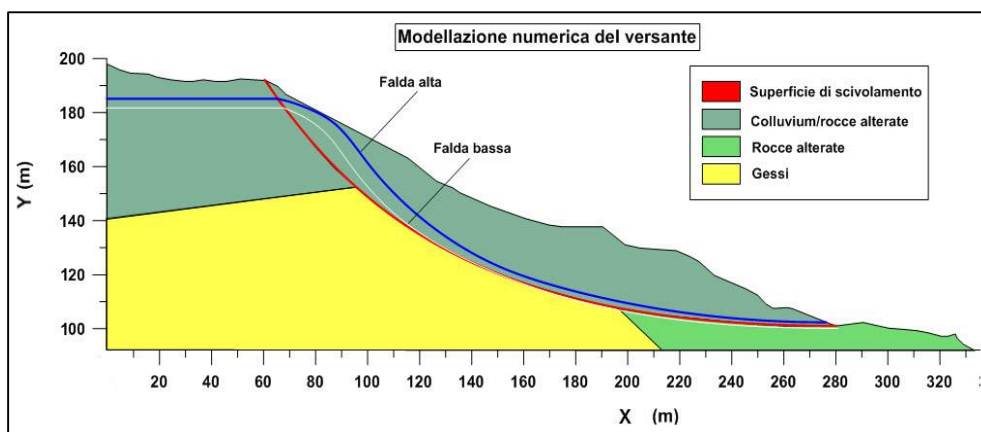


Figura 6.9.1. Profilo per modellazione numerica suddiviso in domini geotecnici

L'analisi ha evidenziato che inserendo i parametri geotecnici di coesione e angolo d'attrito rilevati con le prove di laboratorio in un modello elasto-plastico in tutti e tre i casi il coefficiente di sicurezza, calcolato con i parametri geotecnici ottenuti dalle prove, risulta superiore ad uno.

Livello falda	Fattore di sicurezza
alta	1,11
bassa	1,24
“zero”	1,28

Tabella 6.9.2. Variazione del FS rispetto all'altezza della falda

Di conseguenza il corpo di frana si trova comunque in sicurezza rispetto a un possibile collasso, ma si ritiene che tuttavia maturi degli spostamenti per fenomeni viscosi.

In particolare, modellando l'ammasso di frana con un modello visco-elastico alla Burger si sono potute spiegare le deformazioni in atto, e si sono riportati i valori per gli inclinometri I3 e I8 (**Figura 6.9.3**).

I risultati ottenuti con il modello visco-elastico mostrano un incremento lineare dello spostamento nel tempo. Si è inoltre evidenziato, conseguentemente ad un abbassamento della falda rispetto a condizioni di falda alta, un decremento del valore medio dello spostamento del 22,3 %, passando da 5,4 a 4,3 cm/anno. Invece il passaggio da condizioni di falda bassa a condizioni di falda azzerata non ha indicato una significativa

diminuzione degli spostamenti valutata in un 9%, passando da 4,3 a 4 cm/anno.

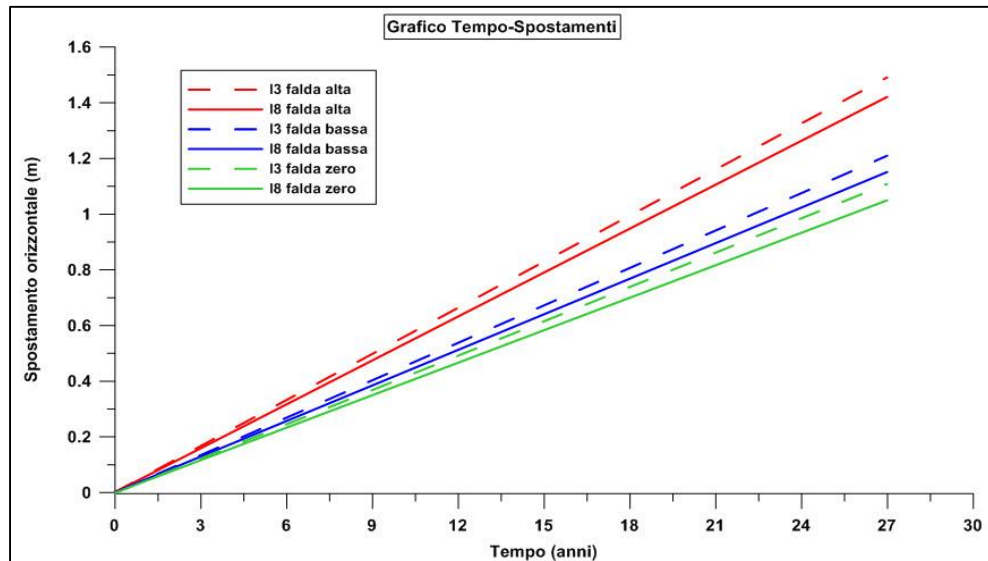


Figura 6.9.3. Grafico che mostra gli spostamenti orizzontali nel tempo agli inclinometri I3 e I8 conseguenti a variazioni del livello di falda

La quota della falda al piezometro P4, come detto, si è mantenuta circa costante negli anni, con oscillazioni non superiori ad 1-1,5 m dal 2003 ad oggi e di conseguenza la simulazione in condizioni di falda “alta” è da considerarsi come un evento estremo di improbabile realizzazione se non con tempi di ritorno che vanno ben oltre il tempo di studio del fenomeno. Inoltre, analizzando i dati provenienti dallo strumento, dopo l’installazione del sistema di registrazione in continuo (14 maggio 2013), si è notato come la variazione del livello di falda sia stata molto ridotta (circa 20 cm di aumento del livello piezometrico) in corrispondenza dell’evento piovoso durato dal 16 al 21 maggio con cumulata di 174 mm che ha innescato un brusco aumento della velocità di deformazione dell’ammasso. Questo *range* di variabilità rientra infatti nei normali valori di oscillazione registrati al piezometro durante il periodo estivo 2013 in assenza di eventi piovosi significativi.

A seguito di quest’ulteriore analisi e avendo già indicato il rapido inabissamento del flusso sotterraneo in direzione del Rio Verde segnalato dai piezometri, si può asserire che l’altezza della colonna d’acqua, al di sopra della superficie di scivolamento, risulti già tale da non giustificare un elevato tasso di *displacement*.

Per questo motivo si ipotizza la presenza di un fenomeno di *piping* sotterraneo che, andando ad asportare materiale fine nell'ammasso in frana, determina un riassetto gravitativo, creando, nella zona della superficie di scivolamento, dei vuoti responsabili del mancato sostegno dell'ammasso franoso e del suo conseguente movimento.

L'acqua infiltrandosi nel corpo di frana, soprattutto in corrispondenza di periodi di pioggia abbondanti, dilava il materiale, rimuovendo la frazione più fine. Si creano così delle vie di flusso preferenziale, specialmente nella zona prossima alla superficie di scivolamento. La tesi è supportata anche dalle prove di laboratorio (paragrafo 4.2) che vedono una diminuzione di plasticità e di contenuto di materiale fine nei campioni avvicinandosi alla superficie di scivolamento indicata dall'inclinometro I21bis.

Il dilavamento porterebbe ad una mancanza di sostegno, da parte del materiale, privato della sua frazione fine, generando uno "svuotamento" che si traduce in un fenomeno complesso di scivolamento rotazionale evolvente in colata nella parte terminale.

Alla luce dei parametri geotecnici considerati, delle limitate variazioni del livello di falda, delle caratteristiche idrogeologiche del versante e delle evidenti relazioni tra portata della sorgente e accelerazione dell'ammasso, questa sembra essere la causa più probabile del lento ma continuo movimento dell'ammasso franoso.

Ulteriori studi e simulazioni per la modellizzazione numerica del dissesto sono in corso e forniranno migliori risultati riguardo al cinematismo della frana 1 e alle dinamiche di versante che la caratterizzano.

7 OPERE DI SISTEMAZIONE

Come accade sempre in questi casi, lo scopo ultimo dell'indagine è quello di salvaguardare le opere interessate dal rischio geologico a cui sono esposte al fine di evitare perdite sia in termini economici che di vite umane.

Come già visto la frana 1 al Passo della Morte riveste particolare importanza a causa dell'interferenza con la strada S.S. 52 Carnica.

La maggior attenzione rivolta al dissesto numero 1 è dovuta inoltre al fatto che questo, trovandosi all'imbocco della galleria, in corrispondenza del bivio tra la vecchia e la nuova strada del Passo della Morte, in caso di collasso, andrebbe a lesionare gravemente entrambe le arterie viarie. Ciò comporterebbe il blocco totale della circolazione verso gli abitati di Forni di Sotto e Forni di Sopra dal lato friulano, nonché un'interruzione dei collegamenti regionali tra Veneto e Friuli Venezia Giulia, con gravi perdite in termini economici.

Per questo motivo è necessario analizzare dei possibili metodi di messa in sicurezza del versante sia in termini di drenaggi delle acque sia dal punto di vista meccanico di riduzione dei carichi sul versante.

Gli effetti del movimento della frana sono già visibili sia lungo il tracciato stradale sia in prossimità del ponte sul Rio Verde. (**Figure 7.0.1; 7.0.2**).



Figura 7.0.1. Fessure presso il ponte sul Rio Verde



Figura 7.0.2. Fessure presso il ponte sul Rio Verde

7.1 Drenaggio delle acque

Come risultato dalle analisi del capitolo 6 si è visto che l'acqua circolante all'interno del corpo di frana è la causa principale del dissesto. Uno degli interventi più urgenti che dovranno essere programmati riguarda quindi la captazione e il drenaggio delle acque così da intercettarle in maniera sistematica, prima che il flusso si diriga verso la superficie di scivolamento.

Una soluzione inizialmente vagliata è stata l'allungamento della galleria drenante già presente al di sotto del corpo di frana 2, all'imbocco della galleria S. Lorenzo, sul lato opposto del Rio Verde. (**Figura 7.1.1**).

La galleria è stata costruita per drenare le acque interne al versante interessato dalla costruzione della galleria stradale, per poi convogliarle più a valle nel Rio Verde ed evitare che queste vadano a destabilizzare il corpo di frana 2, a ovest del torrente, e di conseguenza la galleria.

Per una maggior efficacia la galleria dovrebbe essere attrezzata con dreni tubolari disposti a raggiera che convogliano l'acqua verso il tunnel principale come indicato nell'esempio di **Figura 7.1.2** e come già eseguito per il tratto esistente. Il prolungamento comporterebbe, però, l'attraversamento della zona sottostante il Rio Verde, costituita da materiale alluvionale eterogeneo, passando poi appena sotto alla superficie di scivolamento del corpo di frana 1.

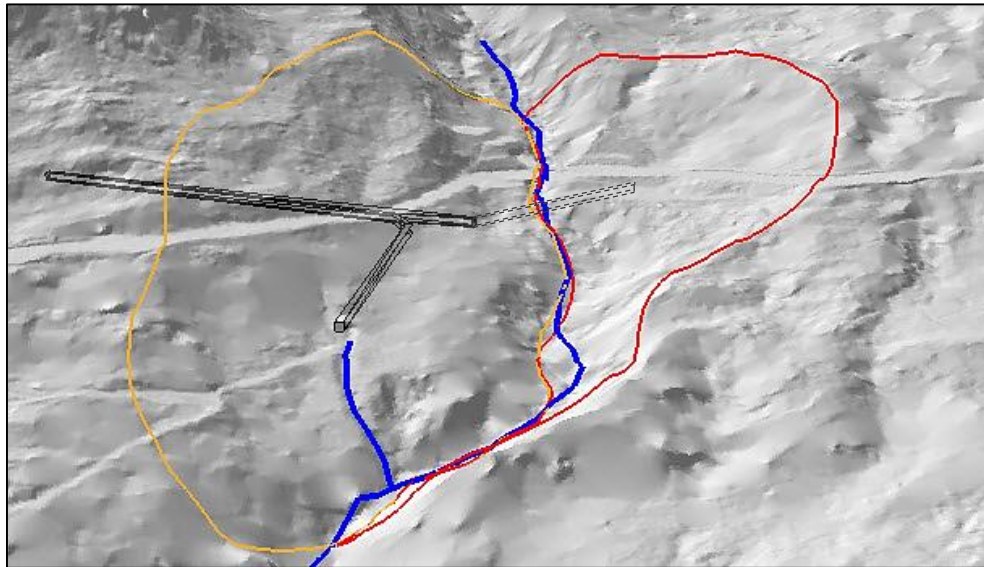


Figura 7.1.1. Visuale 3D delle frane 1 e 2 e della galleria drenante esistente

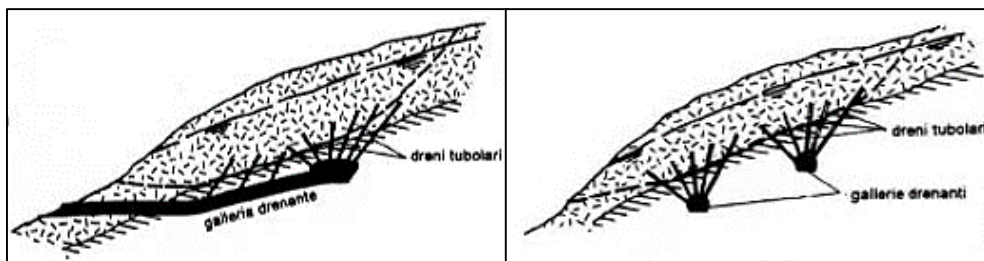


Figura 7.1.2. Schema longitudinale e trasversale del funzionamento di una galleria drenante con dreni tubolari a raggiera

Il prolungamento comporterebbe, però, l'attraversamento della zona sottostante il Rio Verde, costituita da materiale alluvionale eterogeneo, passando poi appena sotto alla superficie di scivolamento del corpo di frana 1. Di conseguenza le incognite costruttive, di mantenimento nel tempo e di efficacia della struttura sarebbero troppo grandi. Per andare ad intercettare effettivamente le scaturigini si dovrebbe compiere un allungamento di circa 70 metri dell'attuale galleria e un elevato dislivello tra l'attuale quota della galleria posta a 690 m e le emersioni collocate tra 760 e 780 m s.l.m. Tutto ciò senza contare che nel caso della frana 2 la costruzione della galleria non ha ancora raggiunto gli obiettivi di progetto.

Un'altra soluzione, più facilmente attuabile, è rappresentata dalla messa in opera di un sistema di dreni inseriti all'interno del versante nella parte più alta, in presenza delle scaturigini. I dreni consistono in fori di sondaggio contenenti canalette fenestrate avvolte in geotessile oppure anche in vere e

proprie piccole gallerie drenanti a sviluppo sub-orizzontale; rappresentano lo strumento più efficace per il drenaggio delle acque di frana. Generalmente la lunghezza dei dreni non può superare i 50-60 metri a causa di problemi di disassamento del piano di perforazione.

Ovviamente l'efficienza del sistema drenante dipende dalle condizioni del versante, dal materiale attraversato, dalla falda, dal tipo, dalla lunghezza e dalla spaziatura dei dreni.

Una delle soluzioni migliori, in genere, è rappresentata dall'adozione del sistema in **Figura 7.1.3**, in cui un dreno

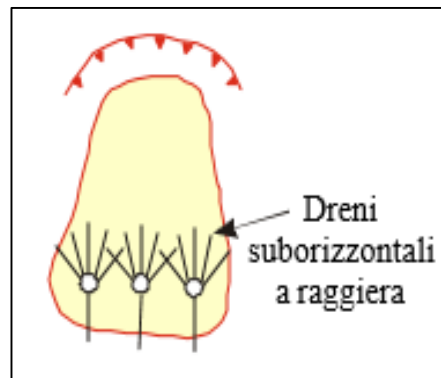


Figura 7.1.3. Schema di funzionamento di dreni a raggiera

portante di largo diametro funge da collettore per una serie di dreni secondari di lunghezza e diametro inferiore che si dipartono dalla sua estremità. Il sistema dunque risulta simile, nel funzionamento, alla galleria drenante, ma possiede il vantaggio di essere meno rischioso e meno costoso.

Un'opera complementare riguarda l'impermeabilizzazione e sistemazione del letto torrentizio a valle della strada, così da impedire fenomeni di erosione fluviale in grado di destabilizzare ulteriormente il corpo di frana.

Questo tipo di intervento prevede quindi una risagomatura e consolidazione dell'alveo fluviale a valle del ponte sulla statale che può essere eseguita mediante la realizzazione di scogliere lungo le sponde, e soglie sul fondo dell'alveo con associazione di un rivestimento che ne consenta l'impermeabilizzazione come

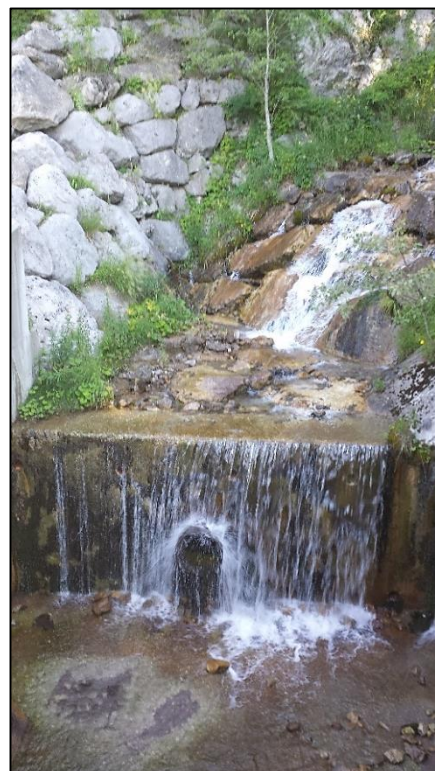


Figura 7.1.4. Sistemazione alveo in prossimità della S.S. 52

già avvenuto nel tratto prossimo all'attraversamento della strada statale (**Figura 7.1.4**).

Come visto nel capitolo 6 la dispersione in alveo costituisce un contributo importante alla circolazione profonda anche se non direttamente correlabile con la sorgente della frana 1.

Un intervento di sistemazione e impermeabilizzazione dell'alveo a monte della frana oltre che essere di secondaria importanza per la frana 1, risulterebbe anche di complessa realizzazione sia dal punto di vista logistico che economico a causa della lunghezza del tratto da sistemare che è di circa 600 metri (**Figura 7.1.5**).

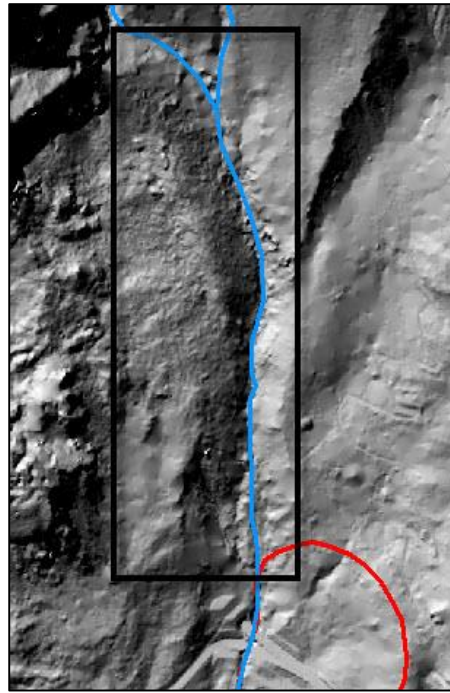


Figura 7.1.5. Tratto di Rio verde da sistemare a monte della frana

7.2 Riprofilatura

Le caratteristiche eterogenee del versante non consentono l'uso di opere attive di sistemazione quali pali di ancoraggio o palancolate di sostegno.

Nonostante ciò il drenaggio delle acque, non è l'unico intervento ipotizzato sul corpo di frana. Dal punto di vista geomeccanico la diminuzione di un'altra forza destabilizzante qual è il peso del terreno al di sopra della superficie di scivolamento, attraverso una riprofilatura, è indicato in questi casi. Inoltre nell'ottica di un'ingegnerizzazione del pendio il materiale asportato nella parte alta può essere ridistribuito al piede della frana così da limitarne il movimento aumentando le forze resistenti e migliorando la stabilità generale del versante, essendo questo interessato da un'altra frana (frana 2) sulla sponda opposta del Rio Verde.

Lo sbanco del versante può essere eseguito mediante la creazione di gradoni inclinati intervallati a piani orizzontali (pedate) (**Figura 7.2.1**).

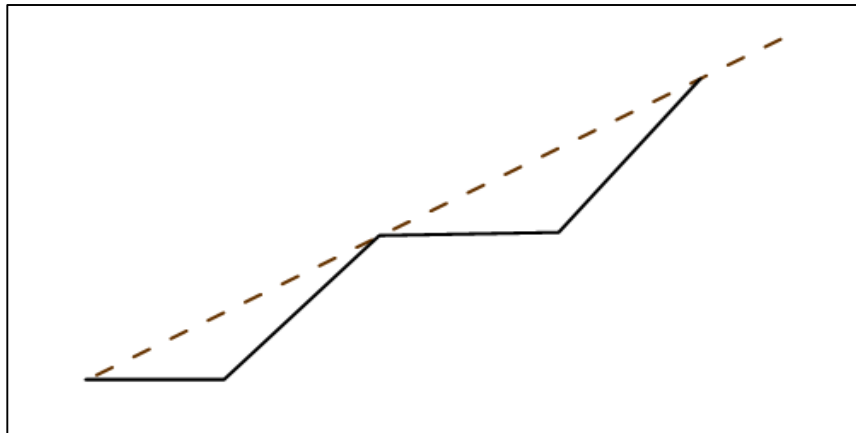


Figura 7.2.1. Schema di un intervento di riprofilatura, il tratteggio indica il versante naturale, la linea spezzata continua indica il nuovo profilo

La gradonatura deve essere eseguita partendo dalla parte alta del pendio poiché se si cominciasse dal basso si potrebbe verificare una momentanea destabilizzazione dell'ammasso a causa del carico di monte ancora presente, per questo motivo si parla di intervento di tipo *topdown*.

Nel caso specifico della frana 1 al Passo della Morte si sono sviluppate tre ipotesi preliminari di intervento.

Il primo passo affrontato per creare una rappresentazione tridimensionale dell'ipotesi progettuale dell'opera è stata la tracciatura delle sezioni (**Figura 7.2.2**), seguita dalla ricerca della giusta distribuzione e pendenza delle bancate in relazione all'inclinazione del pendio e alla sua geometria.

Dal punto di vista informatico il procedimento seguito è risultato simile a quello utilizzato per la creazione della superficie di scivolamento.

Si sono così creati dei punti quotati per ogni bancata che sono stati successivamente interpolati in un unico file TIN (*Triangulated Irregular Network*). Il passo seguente ha previsto la conversione del TIN ottenuto in un file raster con lo scopo di rendere in maniera indicativa lo sviluppo dell'intervento e il suo inserimento nel contesto circostante. Infine, con il *tool* "Cut and Fill" di ArcGis si sono calcolati i volumi di materiale da asportare per la realizzazione della riprofilatura, in previsione di un possibile successivo reimpiego dello stesso per fornire sostegno al piede della frana.

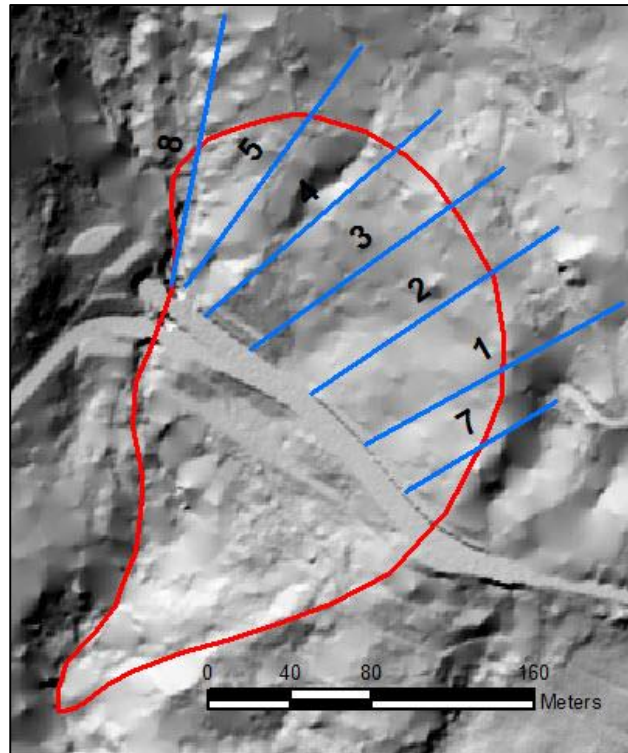


Figura 7.2.2.
Schema
planimetrico
delle sezioni
di sbanco

Le tre proposte di intervento risultano uguali in relazione al numero di bancate previste e alla loro inclinazione e coinvolgono l'unità di monte della frana 1. Ciò che le differenzia è la terminazione dello scavo nella zona occidentale presso il Rio Verde, con tre differenti approcci che portano ad una quantità di materiale escavato decrescente passando dal primo al terzo caso.

Una sezione caratteristica di sbanco (numero 4), valida per le tre proposte è rappresentata in **Figura 7.2.3**.

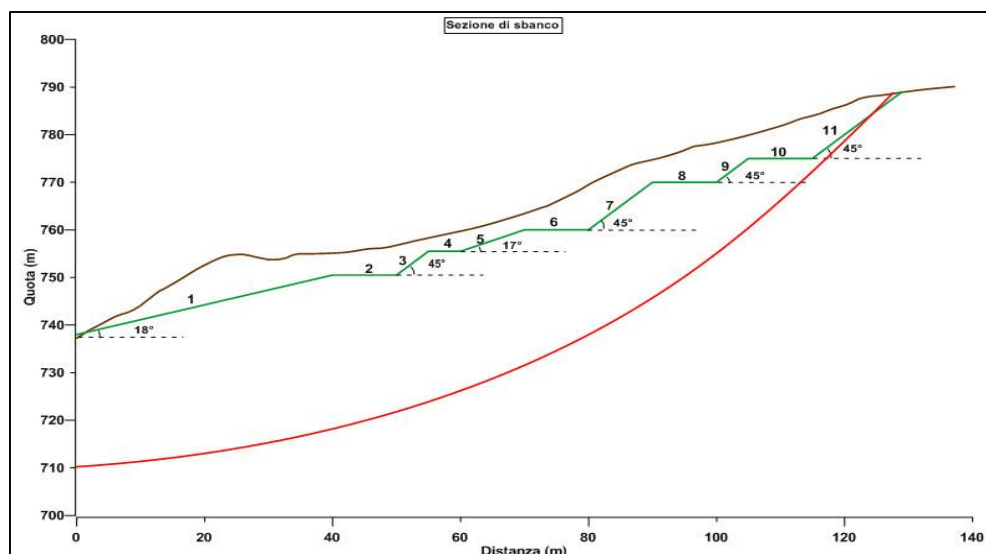


Figura 7.2.3. Sezione di sbanco caratteristica

La lunghezza delle banche inclinate è variabile a causa della ricerca del miglior adattamento alle condizioni del versante. Per quanto riguarda le pedate orizzontali la loro lunghezza è fissata in 10 metri tranne che per la pedata 4 lunga 5 metri. In termini di inclinazione la bancata 5 ha una pendenza coerente con le caratteristiche geotecniche del materiale mentre le bancate 3-7-9-11, per ragioni geometriche, hanno un'inclinazione di 45°. Per questo motivo, si è deciso di abbinare alla riprofilatura del versante un rinforzo delle scarpate con inclinazione maggiore mediante *soil nailing* (**Figura 7.2.4**) in grado di fornire una migliore resistenza e stabilità alle pareti realizzate con lo scavo, poiché queste hanno un'inclinazione superiore all'angolo d'attrito del materiale.

Questa tecnica è un intervento di tipo passivo, poiché il chiodo non è messo in trazione quando viene installato; solo successivamente, a seguito delle deformazioni che l'intera parete subisce durante lo scavo sotto la quota del chiodo, si sviluppano sforzi di trazione nel chiodo stesso. Questo sistema è in grado oltre che di migliorare la resistenza al taglio dei terreni anche di ridurre, al tempo stesso, la loro suscettibilità agli eventi erosivi superficiali o di degradazione fisica.

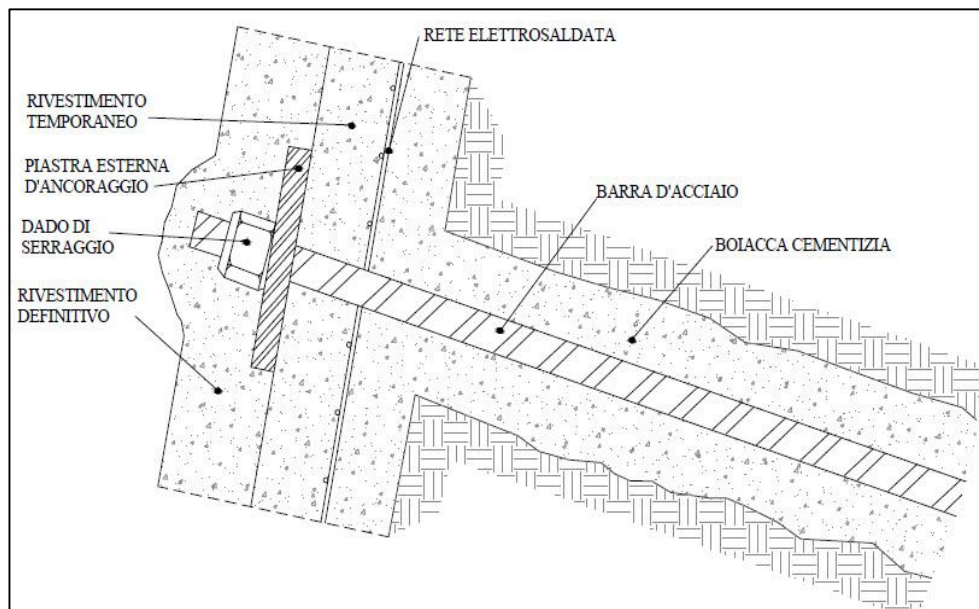


Figura 7.2.4. Schema di trattamento soil nailing

Una volta terminata la riprofilatura, si intende attenuare l'impatto visivo e ambientale dell'intervento attraverso il recupero a verde mediante inerbimento artificiale con idrosemina o posa in opera di geotessili pre-vegetati. In questo modo l'effetto ottenibile risulta simile a quello indicato in **Figura 7.2.5**.



Figura 7.2.5. Risultato di un trattamento come quello proposto

Bisogna inoltre notare come la riprofilatura si renda necessaria, almeno in parte, per la creazione del sistema di dreni descritto nel paragrafo 7.1, poiché per la collocazione di questi sarebbe necessario costruire dei piani lungo il versante ove possano agire le macchine preposte all'intervento.

Dal punto di vista della fattibilità e dell'accesso all'area di scavo, la costruzione dell'opera sarebbe agevolata dalla presenza di una strada carrabile costruita in passato per l'installazione della strumentazione di controllo.

Descrivendo gli interventi dal punto di vista della quantità di materiale da escavare, la prima ipotesi illustrata (**Figure 7.2.6; 7.2.7**) è la più significativa in termini volumetrici con una quantità stimata pari a circa 150.000 m³.

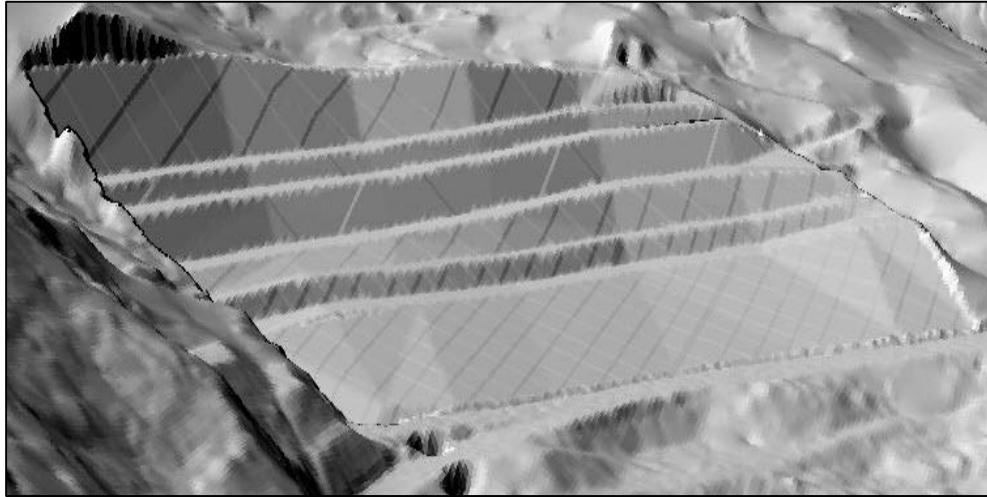


Figura 7.2.6. Rendering 3D dell'ipotesi di sbanco 1 ottenuta con software GIS

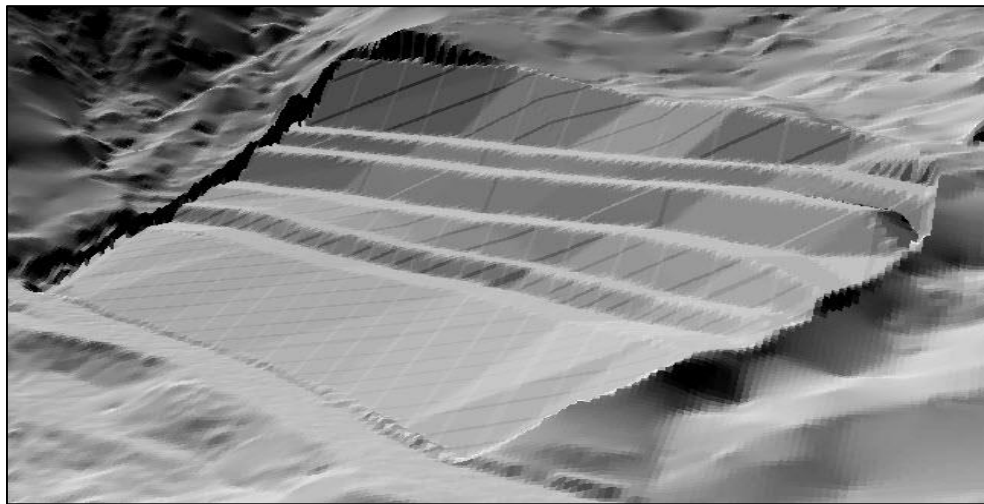


Figura 7.2.7. Rendering 3d dello sbanco visto da est

In questo caso, il manufatto andrebbe a demolire l'argine sinistro (**Figura 7.2.8; 7.2.9**) del corso del Rio Verde nella parte prossima al ponte della statale. Ciò comporterebbe ulteriori costi di ricostruzione dell'alveo, per la creazione di opere di difesa, in un tratto in cui peraltro sono già state realizzate opere di sistemazione fluviale (**Figura 7.1.4**).

La seconda ipotesi prevede invece un volume di scavo di 130.000 m³ che non comprenda, però, al suo interno la parte di alveo del Rio Verde escavata nella prima ipotesi.

Lo sbanco terminerebbe in corrispondenza dell'argine sinistro del torrente.

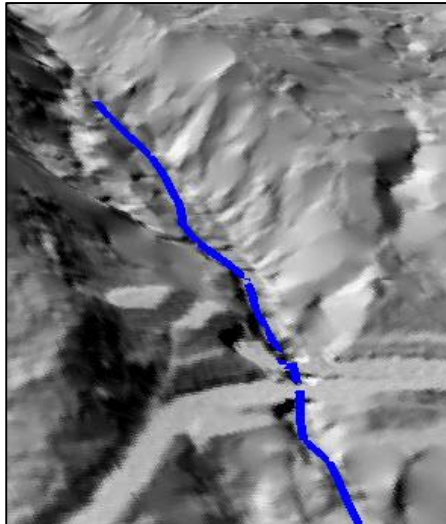


Figura 7.2.8. Argine sinistro Rio Verde

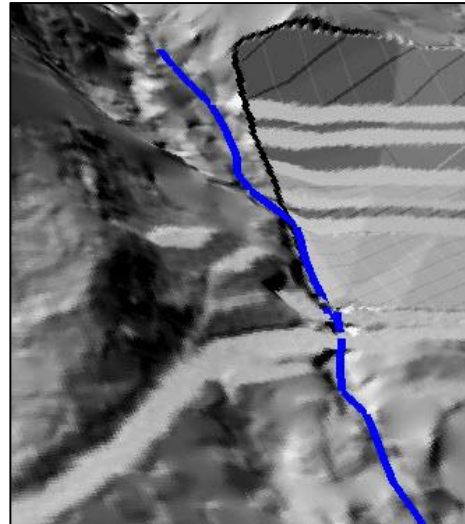


Figura 7.2.9. Distruzione dell'argine per riprofilatura del versante

Infine, nell'ultimo caso, lo sbanco avrebbe un volume pari a 86.000 m³, preserverebbe il corso del Rio Verde, conserverebbe la naturale presenza del suo argine sinistro e sfrutterebbe un impluvio naturale presente nel versante (**Figura 7.2.10**) per raccogliere le acque drenate e convogliarle più a valle nel Rio. Il problema relativo a questa soluzione è legato all'impossibilità di intercettare le venute d'acqua posizionate in corrispondenza della parte alta dell'argine.

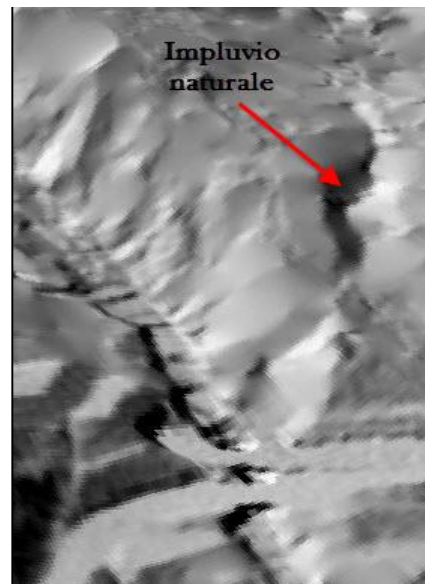


Figura 7.2.10. Impluvio naturale a fianco del Rio Verde

7.3 Rinforzo al piede del versante

Al fine di fornire una migliore stabilizzazione del versante si è studiata una possibile collocazione del materiale asportato nella parte sottostante la strada. Come già detto, però, al Passo della Morte è presente un complesso sistema di frane che nel caso della porzione più orientale dell'area (frane 1 e 2) sono in stretta relazione tra loro.

Per questo motivo l'iniziale ipotesi di collocamento del materiale subito a valle della strada statale (ipotesi 1) è stata scartata, poiché ciò stabilizzerebbe

ulteriormente la parte alta della frana 1 ma rischierebbe di indurre fenomeni di destabilizzazione nella contigua frana 2, visto il rapporto esistente tra le due (**Figura 7.3.1**).

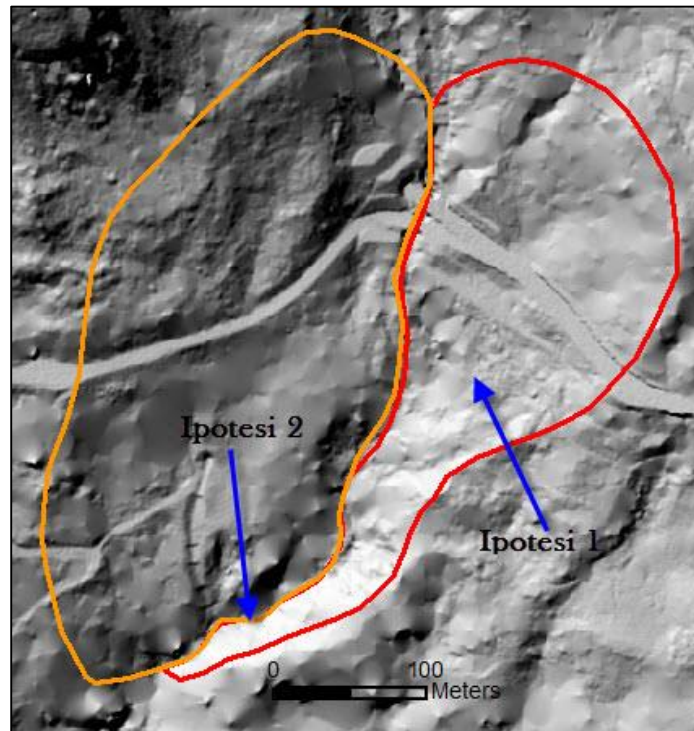


Figura 7.3.1. Perimetrazione dei due corpi di frana adiacenti e ipotesi di collocazione del materiale

Per questa ragione si è optato per una posa più ribassata del materiale di riporto (**Ipotesi 2**) che potesse così andare a fornire sostegno anche al piede del corpo di frana 2. Il risultato preliminare è presentato in **Figura 7.3.2**. Inoltre con questa soluzione si andrebbe anche ad eliminare il fenomeno di erosione al piede della frana 1 che è una delle cause, insieme alla spinta da monte dell'unità 1A, del movimento della piccola unità 1B che si trova nella sezione di valle (**Figura 5.1.2**).

L'area interessata dall'intervento avrà un'estensione di circa 2,5 ha e il volume stimato di materiale necessario è di 178.000 m³, i quali, in misura variabile a seconda

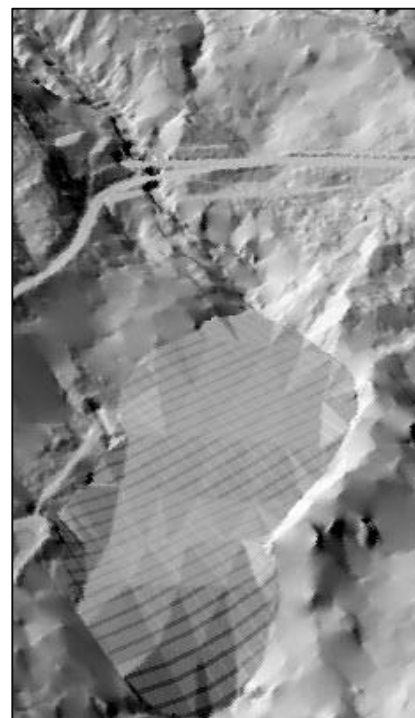


Figura 7.3.2. Rendering 3D dell'intervento di appesantimento al piede delle frane 1 e 2

dell'opzione di sbanco scelta, proverranno dagli interventi di riprofilatura descritti al paragrafo precedente. Il riempimento creerà una superficie con pendenza media di circa 13° rispetto all'orizzontale.

In **Figura 7.3.3** è mostrata la profondità massima, circa 20 metri, che si raggiungerà in corrispondenza del Rio Verde.

La direzione dell'asta fluviale, essendo scavata all'interno di materiale di riporto, potrà essere scelta in base alle condizioni costruttive più convenienti, essa potrà seguire il precedente corso del torrente o essere realizzata seguendo la linea di massima pendenza (**Figura 7.3.4**).

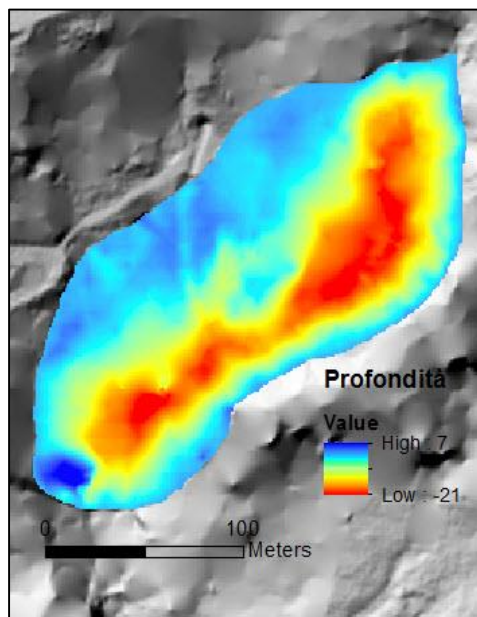


Figura 7.3.3. Profondità del riporto di materiale

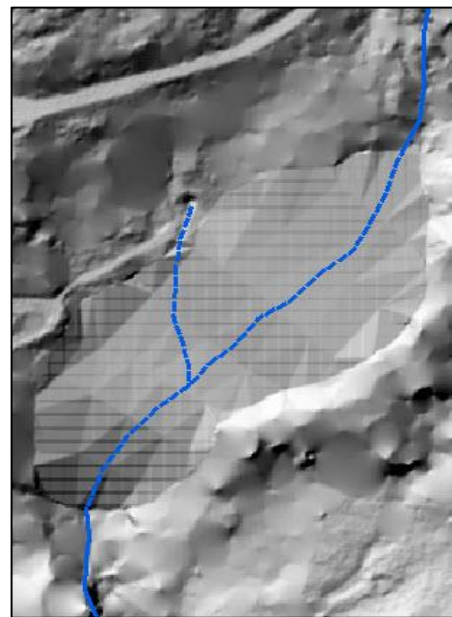


Figura 7.3.4 Traccia tratteggiata del corso del Rio Verde sul riempimento

In **Figura 7.3.5** sono mostrati il profilo attuale del Rio Verde (linea continua) e il futuro andamento altimetrico dell'alveo fluviale dopo l'intervento di riempimento con materiale di riporto (linea tratteggiata).

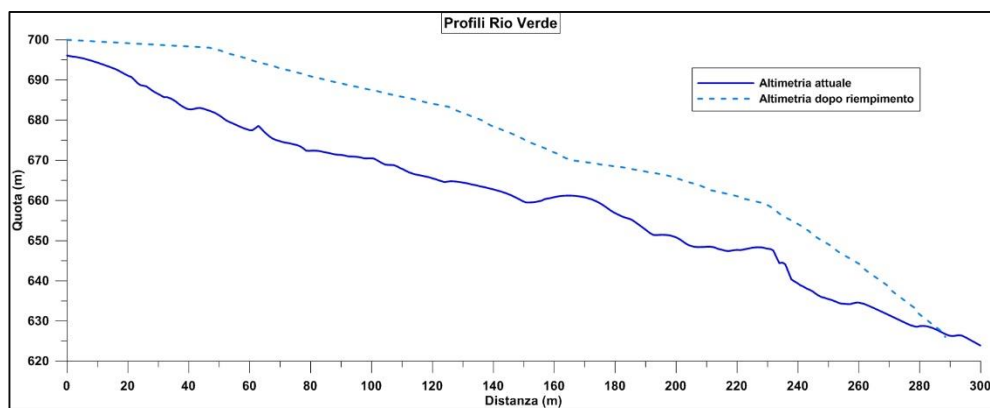


Figura 7.3.5. Differenza tra i profili altimetrici pre e post intervento

Il profilo non presenta interventi di regolarizzazione del letto torrentizio scavato all'interno del materiale di riporto poiché l'inclinazione risulta congruente con quella dell'attuale corso fluviale, il quale, inoltre, non ha presentato fenomeni di trasporto solido importanti negli anni di osservazione. Nonostante ciò, se in fase progettuale si dovessero realizzare condizioni tali per cui questo tipo di intervento si rendesse necessario, la regolarizzazione sarà da effettuarsi mediante un adeguato sistema di briglie o soglie fluviali, opportunamente dimensionate.

In **Figura 7.3.6** è mostrata una panoramica 3D dell'area orientale del Passo della Morte, con i limiti delle frane 1 e 2 rispettivamente in rosso e arancione, in presenza delle opere di sistemazione e ingegnerizzazione proposte per il versante al fine di raggiungere, con un unico intervento, una miglior stabilizzazione sia della frana 1 che della frana 2.

La scelta della miglior soluzione progettuale dovrà essere analizzata in seguito sia dal punto di vista della modellazione numerica, per la stabilità globale del versante, sia dal punto di vista economico e operativo delle ipotesi di intervento proposte.

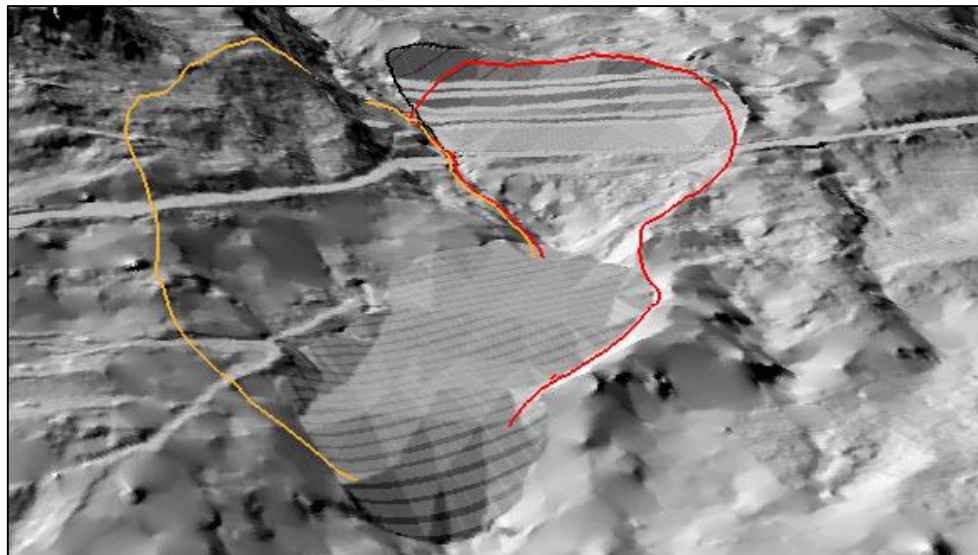


Figura 7.3.6. Visione 3D completa dell'intervento di riprofilatura a monte e riempimento a valle

8 CONCLUSIONI

Lo studio della frana 1 ha trattato diversi ambiti tematici a partire da un'analisi tridimensionale del corpo di frana mediante software GIS che ha permesso una dettagliata definizione areale e volumetrica del dissesto.

Lo studio idrogeologico ha fornito alcuni parametri relativi alla circolazione idrica sotterranea e alla sorgente. In particolare si sono stabiliti tempi di residenza delle acque molto brevi, elevata permeabilità dei materiali di frana e drenaggi rapidi del flusso.

Dall'analisi sugli spostamenti è emerso come il movimento della frana sia continuo nel tempo (velocità media 5 cm/anno) senza fasi di quiescenza, con rallentamenti e accelerazioni che portano a picchi di velocità superiori ai 20 cm/anno.

Dall'analisi comparata dei dati idrologici e inclinometrici si è notato come sia affidabile (85%), in termini di soglie di attivazione, la relazione tra l'aumento minimo di portata della sorgente, valutato in 4 l/s, e l'accelerazione del corpo di frana.

Al contrario la correlazione con il valore minimo di cumulata di pioggia necessaria all'attivazione di una fase di accelerazione (52 mm) è risultata statisticamente meno rilevante ed attendibile. Infatti solo il 55% degli eventi piovosi con tale caratteristica hanno prodotto flesso nella curva degli spostamenti.

Come spesso accade, quindi, l'acqua è la causa principale del movimento. Diversamente dal solito, però, non sarebbe la variazione del livello di falda, molto limitata nel tempo, la causa principale dell'instabilità, quanto piuttosto un fenomeno di circolazione profonda e piping sotterraneo, con rimozione della matrice più fine, e la creazione di vie di flusso preferenziali nell'intorno della superficie di scivolamento. Questa teoria è supportata dalle prove geotecniche che hanno stabilito l'estrema variabilità dei materiali di frana, costituiti da un mélange caotico composto da limi argillosi fortemente alterati derivanti dalle siltiti del Carnico e clasti di natura calcarea provenienti dal retrostante massiccio del Tinisa, caratterizzati, in generale, da un basso indice di plasticità e da angoli di attrito variabili tra 26 e 35°. Si osserva una forte perdita di coesione quando vengono a contatto con l'acqua.

L'asportazione della frazione fine, più pronunciata in corrispondenza di periodi piovosi, ad opera del flusso sotterraneo, indurrebbe un processo di svuotamento/collasso della massa in frana che si traduce in uno scivolamento rotazionale che evolve in colata nella parte terminale.

Pertanto, si rileva la necessità di un adeguato intervento di mitigazione strutturale del versante in frana a causa dell'interessamento di un'arteria viaria di grande importanza. Non sono infatti da escludere fenomeni parossistici in risposta a manifestazioni metereologiche estreme o anche a sismi di particolare intensità.

Le proposte di intervento volte a mitigare il rischio connesso alla frana 1, hanno perciò l'obiettivo primario di intercettare e regolare le acque sotterranee nella zona sorgiva impedendo la loro infiltrazione in profondità.

Il Passo della Morte è però una zona molto attiva dal punto di vista dell'instabilità di versante, ciò comporta che sulla destra idrografica del Rio Verde si sviluppi un altro fenomeno franoso (frana 2). Per questo motivo un'eventuale riprofilatura del versante deve tener conto di entrambi i fenomeni. Si è quindi previsto asporto del materiale dalla zona di coronamento della frana 1 e una sua ricollocazione al piede della stessa, nella zona di coalescenza con la frana 2, così da fornire supporto e stabilizzazione ad entrambi i fenomeni. La provenienza del materiale, in termini volumetrici, varierà a seconda dell'opzione di riprofilatura scelta tra quelle illustrate.

BIBLIOGRAFIA

- Amanti M., Conte G., Marino M., Martarelli L., Monti G.M., Motteran G., Perini P., Silvi A. (2011) *Caratteristiche idrogeologiche delle sorgenti d'alta quota dell'idrostruttura di Monte Cambio (Rieti, Italia) ed influenza dei processi meteo-climatici locali sulle portate sorgive*. ISPRA, Roma.
- APAT, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici. (2002) *Atlante delle opere di sistemazione dei versanti*, Roma.
- APAT, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici. Manuali e Linee Guida 39/2006, *Fenomeni di dissesto geologico-idraulico sui versanti*, Roma.
- Braga G. P., Carloni G.C., Colantoni P., Corsi M., Cremonini P., Frascari F., Locatelli D., Monesi A., Pisa G. Sassi F.P., Selli R., Vai G.B. & Zirpoli G. (1971) *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia, Fogli 4c-13 "M.Cavallino-Ampezzo" (II ed.)* - Serv. Geol. d'Italia, Roma, pag. 1-108.
- Carulli G.B., Frascari F. & Semenza E. (1982) Geologia delle Alpi Tolmezzine (Carnia). In CASTELLARIN A. & VAI G.B. (a cura di): *Guida alla geologia del Sudalpino centro orientale, Guide geol. reg. S.G.I.*, Bologna, pag. 337-348.
- Cristante S., (2011), *Analisi del dissesto in sinistra Rio Verde (Forni di Sotto) e possibili interventi di mitigazione*.
- Davis J.C., USA (2002). *Statistics Data Analysis Geology, third edition*. John Wiley and Sons.
- Falco M., Morelli A. (2000) *Idrogeologia e idrogeochimica delle aree montane*, Torino.
- Fetter C.W., University of Winsconsin-Oshkosh (2001), *Applied Hydrogeology, 4th ed.*, Prentice Hall.
- Lancellotta R. (1987) *Geotecnica* – Zanichelli, Milano.
- Marcato G., (2006), *Valutazione della pericolosità da frana in località Passo della Morte*.
- Marcato G., (2011), *Analysis of the creep of Passo Della Morte landslide (eastern bank of Rio Verde spring)*.
- Massei M., Dupont J.P., Mahler B.J., Laignel B., Fournier M., Valdes D., Ogier S., *Journal of Hydrology* (2006), *Investigating transport properties*

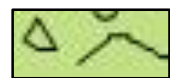
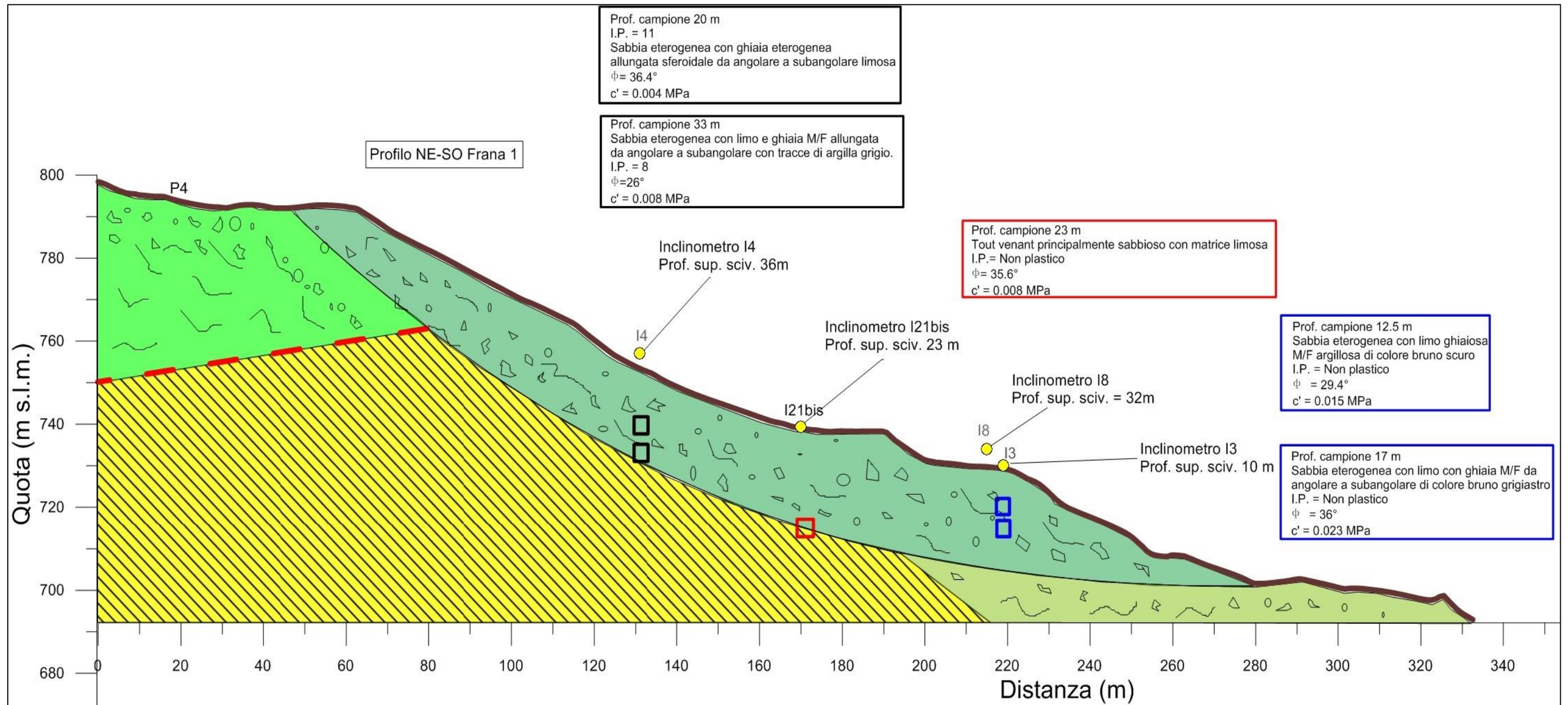
and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses, pag.244– 257.

- Pisa G., (1972), *Geologia dei monti a Nord di Forni di Sotto (Carnia occidentale)* - Giorn. Geol., 38, serie II, Bologna, pag.543-688.
- Regione autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione centrale risorse agricole, naturali, forestali e montagna, (2006). *F.R.A.N.E. Foreste: Recupero ambientale naturalistico ecologico, Linee guida per la mitigazione del rischio idrogeologico*, Fagagna (UD)
- Università degli studi di Firenze, Autorità di bacino del fiume Arno. (2007). Programma comune per l'integrazione e l'aggiornamento della cartografia del rischio da frana del piano di bacino. *Linee guida per la stabilizzazione delle frane e strategie di mitigazione del rischio*.
- Zanferrari A. *La geologia del bacino montano del Tagliamento: Dagli antichi oceani alle montagne d'oggi*, dal volume "Il Tagliamento", CiErre edizioni, 2006.
- Zicarelli M., Università degli studi di Palermo, Dipartimento di ingegneria strutturale, aerospaziale e geotecnica, (2010). *Stabilizzazione dei pendii mediante drenaggi*.

ALLEGATI

ALLEGATO I

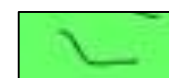
Profilo geologico-geotecnico del versante



Frana complessa



Gessi



Silti e colluvium



Materiale di frana

ALLEGATO II

Stratigrafie

II - q.p.d.c. 730 m - Profondità pozzo 72,0				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
7,5	722,5	7,5	Detrito breccie carbonatiche con matrice argilloso ocre	Frana complessa
8,5	721,5	1	Dolomia lapidea	Frana complessa
9	721	0,5	Detrito siltitico	Frana complessa
10,2	719,8	1,2	Ghiaia carbonatica	Frana complessa
12	718	1,8	Ghiaia con matrice limosa (siltitica)	Frana complessa
16	714	4	Siltite caoticizzata con frammenti lapidei carbonatici	Frana complessa
33	697	17	Siltiti policrome (grigio-rosse), alterate, con venature di gesso da rosa a grigio	Frana complessa
52	678	19	Frammenti carbonatici in matrice siltosa ocre; taluni livelli francamente siltosi; da 42,0 a 47,5 frammenti lapidei carbonatici	Frana complessa
72	658	20	Siltiti alterate con livelli gesso rosa	

II - q.p.d.c. 690 m - Profondità pozzo 87,0				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
21	669	21	Detrito carbonatico alterato a limo argilloso grigio scuro e chiaro	Frana complessa
21,5	668,5	0,5	Limo argilloso rossastro alterato, con livelli di gesso rosa	Frana complessa
24	666	2,5	Spezzoni lapidei di dolomia grigio-scuro	Frana complessa
51,4	638,6	27,4	Clasti carbonatici abbondanti con matrice siltoso-argillosa localmente rossastra	Frana complessa
87	603	35,6	Limi bruni a luoghi laminate nella parte alta e bruno-ocra a fine sondaggio	Depositi colluviali e fluviali

I3 - q.p.d.c. 730 m - Profondità pozzo 92,0				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
3	727	3	Limo argilloso grigio con clasti carbonatici centimetrici	Frana complessa
7,5	722,5	4,5	Limo argilloso grigio scuro con detrito carbonatico in matrice siltitica	Frana complessa
16	714	8,5	Limo calcareo grigio scuro a luoghi con clasti carbonatici	Frana complessa
21	709	5	Gessi grigi alterati con locali frammenti lapidei	Frana complessa
24	706	3	Complesso gessoso; frammenti lapidei e clasti di gesso con intercalazioni di calcari marnoso neri	Frana complessa
31	699	7	Argille siltose grigie fratturate ed alterate con frammenti carbonatici neri	Frana complessa
35,5	694,5	4,5	Complesso gessoso; frammenti lapidei di calcare marnoso nero con venature e spezzoni di gesso	Frana complessa
41	689	5,5	Limi argillosi bruno ocre	Depositi colluviali e fluviali
55,5	674,5	14,5	Limi argillosi da grigio a marrone chiaro	Depositi colluviali e fluviali
62,3	667,7	6,8	Limi argillosi alterati bruno ocre chiaro	Depositi colluviali e fluviali
82	648	19,7	Gesso alterato grigio-bruno nella parte alta e da 74,5 a 79 francamente marrone	Gessi alterati
90	640	8	Gessi laminati con intercalazioni carbonatiche	Gessi Carnico superiore

I4 - q.p.d.c. 757 m - Profondità pozzo 84,1				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
6	751	6	Detrito carbonatico con percentuale variabile di matrice siltosa	Frana complessa
13,7	743,3	7,7	Complesso siltitico alterato rosso con inclusi carbonatici di diametro 2-3cm	Depositi colluviali e fluviali
18,5	738,5	4,8	Breccie calcareo dolomitiche alternate a limi grigi	Depositi colluviali e fluviali
22,5	734,5	4	Argilla siltosa grigia con frammenti di gesso	Depositi colluviali e fluviali
38	719	15,5	Argilla siltosa grigia con frammenti di gesso	Depositi colluviali e fluviali
46	711	8	Frammenti siltosi bruno-rossicci e grigi con clasti carbonatici prevalentemente calcarei	Depositi colluviali e fluviali
52	705	6	Limi alterati di colore bruno	Depositi colluviali e fluviali
58	699	6	Limi alterati di colore bruno	Depositi colluviali e fluviali
72,3	684,7	14,3	Blocchi di gesso intercalati a limi gessosi grigio scuri	Gessi alterati
84,1	672,9	11,8	Gesso litoide laminato con taluni livelli alterati localizzati	Gessi Carnico superiore

I7 - q.p.d.c. 729 m - Profondità pozzo 82,0				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
1,5	727,5	1,5	Materiale di riporto	
10	719	8,5	Detrito siltitico policromo	Frana complessa
28	701	18	Detrito carbonatico	Frana complessa
37,2	691,8	9,2	Breccia prevalentemente carbonatica	Frana complessa
42	687	4,8	Breccia prevalentemente carbonatica	Frana complessa
43	686	1	Breccia prevalentemente carbonatica	Frana complessa
54	675	11	Argilla siltosa grigia con clasti	Depositi colluviali e fluviali
82	647	28	Materiale bruno-grigio alterato con frammenti di gesso	Depositi colluviali e fluviali

18 - q.p.d.c. 734 m - Profondità pozzo 75,5				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
3,2	730,8	3,2	Detrito carbonatico	Frana complessa
16	718	12,8	Orizzonti di limi alterato rosso policromi con elasti di siltiti marnose grigie	Frana complessa
19,8	714,2	3,8	Complesso siltitico-gessoso di colore rosso-grigio	Frana complessa
31,7	702,3	11,9	Complesso gessoso grigio-bianco	Frana complessa
33,3	700,7	1,6	Siltiti rosse	Frana complessa
34	700	0,7	Siltiti marnose	Frana complessa
42,7	691,3	8,7	Argille marnose bruno ocre con elasti spigolosi (3-4cm) dolomie grigie	Frana complessa
45	689	2,3	Materiale scaglioso grigio-rosso con inclusi marnosi; 50cm di materiale di colore ocre (dolomia cariata brecciata)	Frana complessa
48,8	685,2	3,8	Livello chiaro con frammenti lapidei diametro carotiere di dolomia grigia	Frana complessa
54	680	5,2	Siltiti alterate di colore prevalentemente rosse, con livelli ocre e verdi; ultimi 10cm con breccie dolomitiche	Frana complessa
54,8	679,2	0,8	Carota di dolomia vacuolare grigia	Frana complessa
58,2	675,8	3,4	Dolomia vacuolare grigia fratturata con spezzoni massimo 15cm	Frana complessa
62	672	3,8	Dolomia vacuolare grigia fratturata con elasti di 15cm con patine rossastre da 60 a 62m diminuisce la colorazione rossa	Depositi colluviali e fluviali
75,5	658,5	13,5	Argille siltose, marnosa o marne siltose alterate di colore bruno rossastro con livelli ocre	Depositi colluviali e fluviali

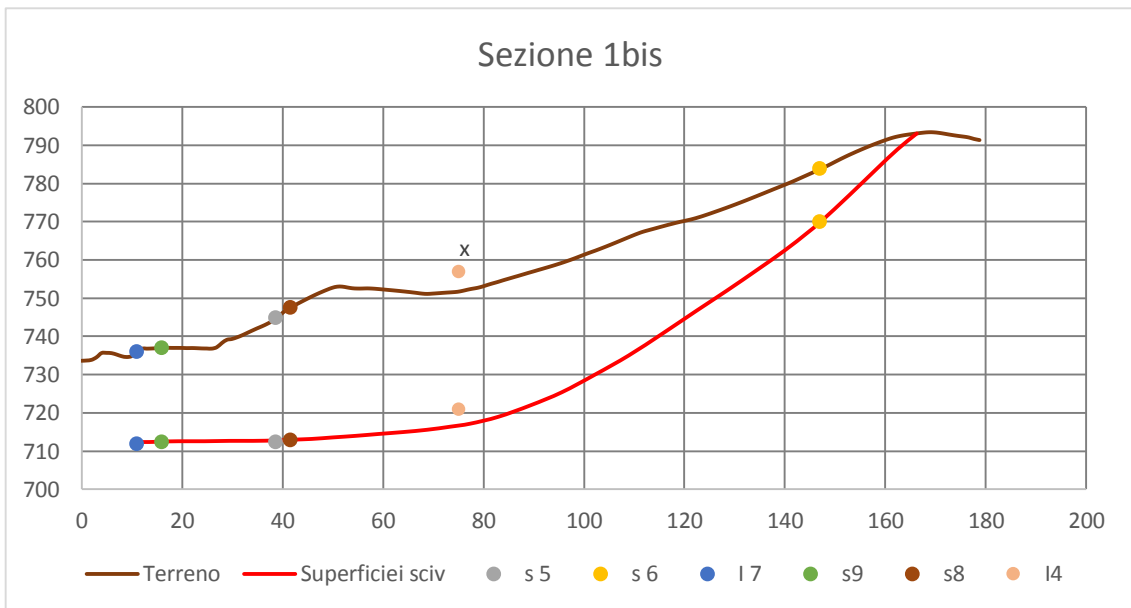
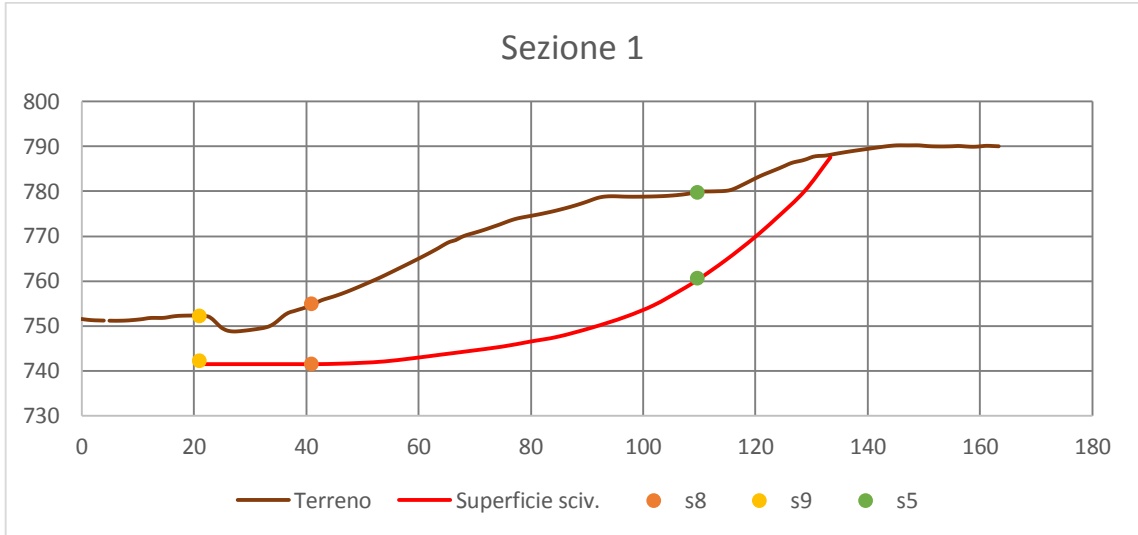
I13 - q.p.d.c. 793 m - Profondità pozzo 100,0				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
2	791	2	Suolo e pezzame lapideo	Detrito di falda
7	786	5	Breccie calcareo dolomitiche	Detrito di falda
31	762	24	Livelli argilloso-siltosi vinaccia e grigio scuro a luoghi laminati	Siltiti Carnico superiore
35	758	4	Breccie calcareo dolomitiche	Frana complessa
43	750	8	Frammenti di breccie marnoso calcaree	Frana complessa
46	747	3	Livelli di gessi litoidi	Frana complessa
66	727	20	Alternanze di livelli marnoso calcarei giallo-ocra bruno	Siltiti Carnico superiore
68,5	724,5	2,5	Siltiti vinaccia grigio scure	Siltiti Carnico superiore
100	693	31,5	Gessi da grigio chiaro a scuro	Gessi Carnico superiore

I15 - q.p.d.c. 729 m - Profondità pozzo 39,70				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
1,50	727,5	1,50	Detrito prevalentemente di alterazione siltitica	Alterazione siltiti
19,50	709,5	18	Siltiti rosse con livelli grigi; nei primi 3-4m più alterato	Siltiti Carnico superiore
28,60	700,40	9,10	Siltiti marnose con calcite bianca o rosata con livelli scagliosi nerastri (tettonizzato e alterato)	Siltiti Carnico superiore
32,20	696,80	3,60	Complesso marnoso gessoso nero con venature bianche e rosa (gesso), presenza di livelli neri di marna calcarea	Siltiti Carnico superiore
33,70	695,30	1,50	Complesso marnoso-calcareo nero con venature bianche gessoso calcitiche	Siltiti Carnico superiore
38	691	4,30	Siltiti marnose da rosse a grigie con reticolo di venature bianche calcitiche	Siltiti Carnico superiore
39	690	1,00	Marna calcarea nera con venature calcitiche	Siltiti Carnico superiore

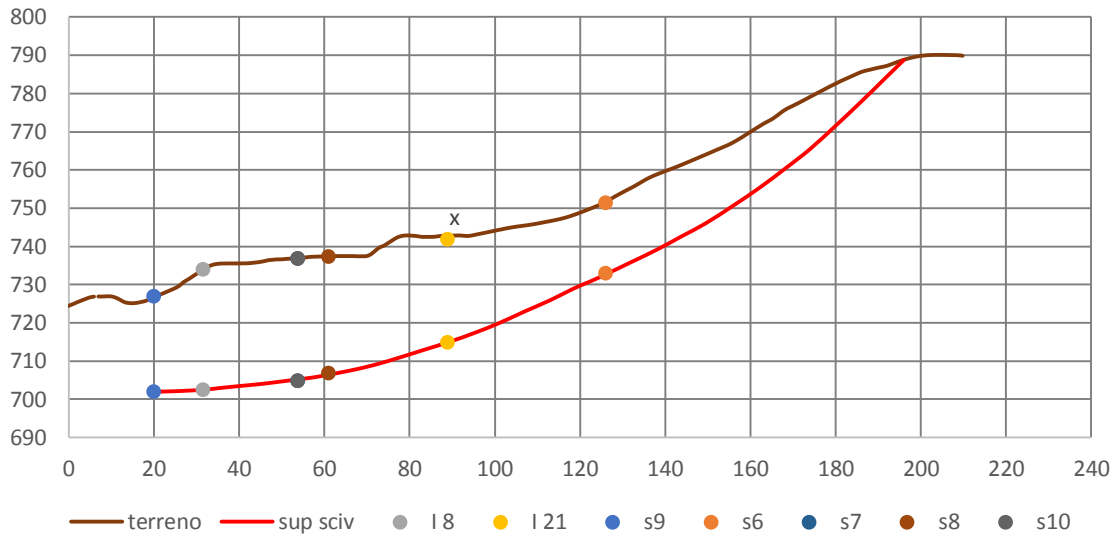
PCI - q.p.d.c. 685 m - Profondità pozzo 60,0				
Profondità letto orizzonte boccapozzo	Profondità letto orizzonte s.l.m.	Spessore orizzonte	Descrizione litologia	Interpretazione stratigrafica
12	673	12	Trovanti di calcari neri e grigi, detrito eterogeneo di natura calcarea con clasti spigolosi. Nei blocchi calcarei sono presenti delle venature di calcite biancastra, la matrice è limosa, sabbiosa. limosa di colore grigio con qualche inclusione argillosa.	Detrito superficiale
18	667	6	Limo sabbioso intercalato da livelli lievemente argillosi e compatti (rossastro)	Frana complessa
20	665	2	Argilla grigia con piccoli clasti prevalentemente calcarei e spigolosi	Frana complessa
20.5	664.5	0.5	Trovanti di calcare nero di forma spigolosa	Frana complessa
22.5	662.5	2	Argilla limosa nera lievemente fogliettata	Frana complessa
23	662	0.5	Trovanti di calcare grigio di forma spigolosa	Frana complessa
43.5	641.5	20.5	Limo sabbioso con trovanti di calcare con sfumature dal rossastro al nocciola	Deposito fluvio-glaciale
51	634	7.5	Sabbia limosa con clasti di calcare nero di forma spigolosa	Deposito fluvio-glaciale
60	625	9	Sabbia limosa con scarsi clasti arrotondati di calcare di dimensioni centimetriche e decimetriche	Deposito fluvio-glaciale

ALLEGATO III

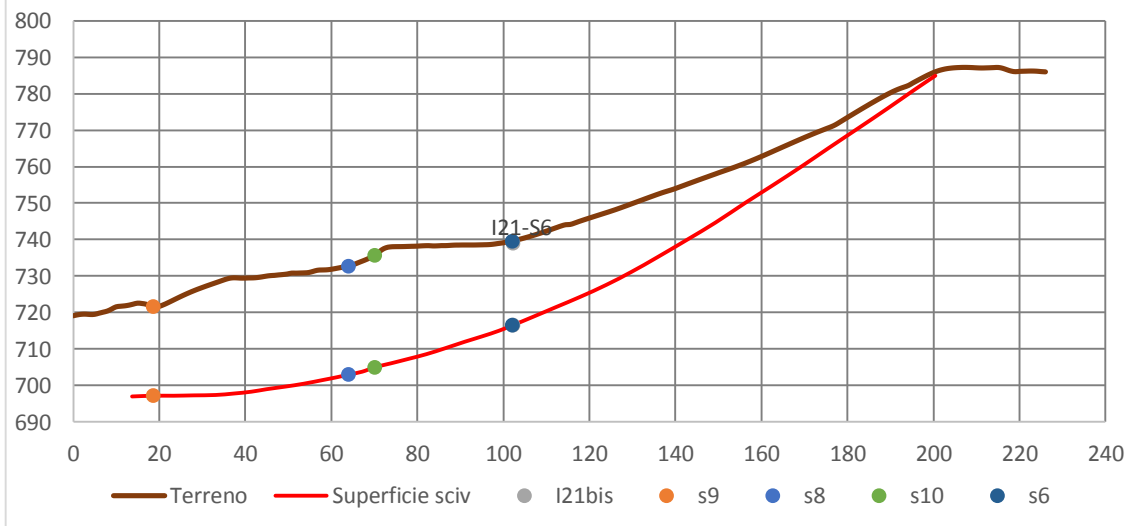
Sezioni superficie di scivolamento



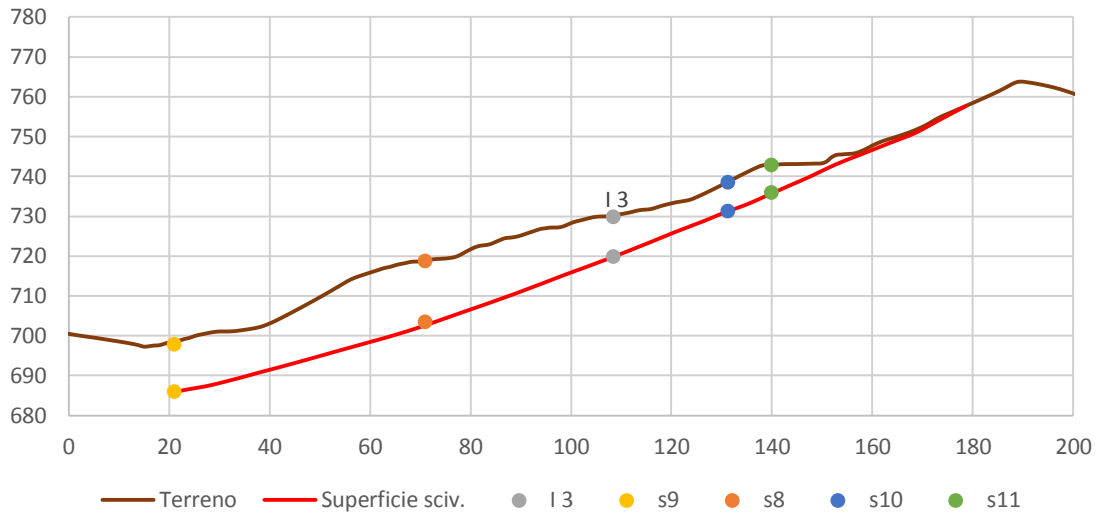
Sezione 2



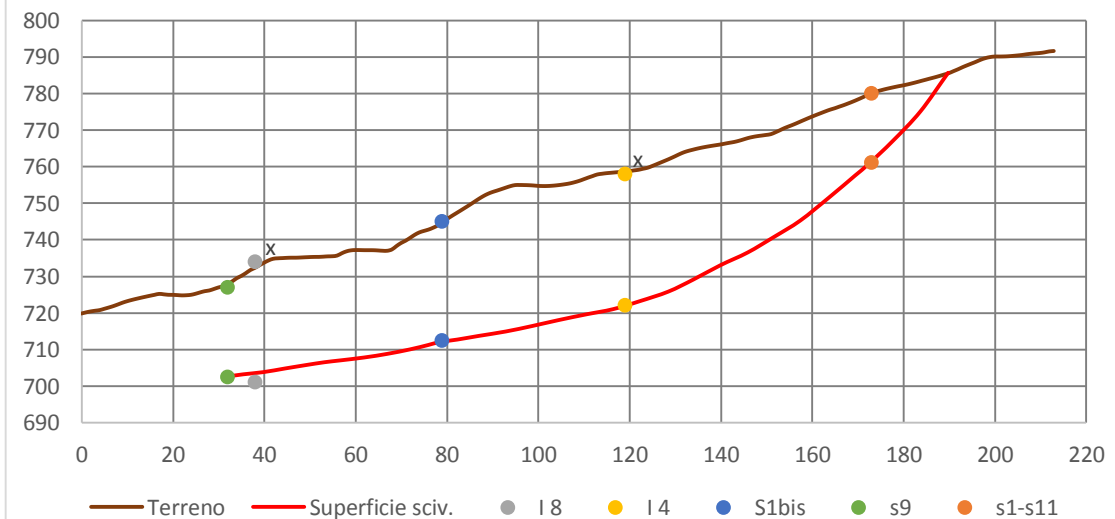
Sezione 3



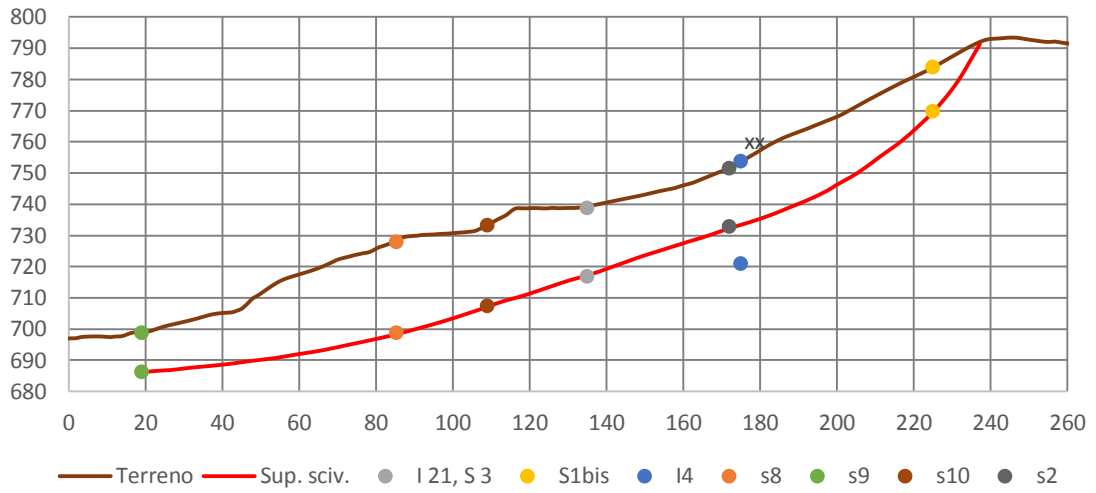
Sezione 4



Sezione 5



Sezione 6



Sezione 7

