



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

A.A. 2024/2025

Sessione di Laurea Marzo 2025

**Studio geo-morfologico per il ripristino
della strada Fenils-Chaberton
(Cesana Torinese)**

Relatore:

Prof. Federico Vagnon

Correlatrice:

Prof.ssa Maria Migliazza

Candidato:

Matteo Putzu

RIASSUNTO

Lo scopo di questo elaborato di tesi consiste nello studio e nell'analisi dei fenomeni di debris flow, con particolare riferimento al caso studio dell'ex strada militare del Monte Chaberton, in località Fenils, nel comune di Cesana Torinese (TO). A tale riguardo è stata svolta un'analisi geo-morfologica e sono state suggerite delle soluzioni ingegneristiche per la messa in sicurezza di tale strada, più volte interessata da frane e colate di detrito e attualmente chiusa al transito veicolare.

I fenomeni di colata detritica (o debris flow) rappresentano una delle tipologie di frane più pericolose e difficili da interpretare a causa della loro imprevedibilità ed energia distruttiva che possono sviluppare. Consistono in flussi composti da materiale solido e acqua, che si originano, solitamente, in seguito a forti piogge in aree montane o collinari particolarmente pendenti. In seguito al loro innesco, sono capaci di propagarsi lungo canali verso valle con velocità elevatissime, mettendo a rischio le infrastrutture, i centri abitati e l'incolumità delle presone insediate nelle zone di conoide, spesso rendendo molto complicate le operazioni di emergenza e messa in sicurezza.

Dopo una dettagliata analisi geologica, geomorfologica e, soprattutto, storica, si è potuto constatare che l'area di studio presenta un livello di suscettibilità non trascurabile a tali fenomeni. Per questo motivo si è indagato ulteriormente in questo senso, raccogliendo quanti più dati necessari per poter ricreare una vera e propria mappa di suscettibilità dell'area, utilizzando il metodo RES, Rock Engineering System.

I fenomeni di colata sono risultati la causa principale dell'innesco di frane superficiali che hanno coinvolto il sedime stradale in seguito ad erosione al piede. A tal proposito, sono state effettuate delle back analyses per simulare la configurazione attuale mediante l'utilizzo del software Slide2 (©RocScience). Queste analisi, seppur preliminari, hanno permesso di stimare le caratteristiche geologico-tecniche dei litotipi presenti nell'area al fine di verificare la stabilità globale dell'area ipotizzando la costruzione di un ponte, come soluzione migliore per superare quest'area critica interessata da colate di detrito con frequenza pressoché annuale.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to study and analyze debris flow phenomena, with particular reference to the case study of the former military road of Monte Chaberton, located in Fenils, within the municipality of Cesana Torinese (TO). In this regard, a geomorphological analysis has been carried out, and engineering solutions have been suggested to secure the road, which has been affected by landslides and recurrent debris flows and is currently closed to vehicular traffic.

Debris flow phenomena are one of the most dangerous and difficult types of landslides to interpret due to their unpredictability and the destructive energy they can develop. They consist of flows made up of solid material and water, typically triggered by heavy rainfall in steep mountainous or hilly areas. Once initiated, they are capable of rapidly propagating down channels towards the valley, posing a risk to infrastructure, inhabited areas, and the safety of people living in the fan areas. They often complicate emergency and safety operations significantly.

After a detailed geological, geomorphological, and especially historical analysis, it was found that the study area shows a non-negligible susceptibility to these phenomena. For this reason, further investigation was carried out, gathering as much data as necessary to create a susceptibility map by using the RES method, Rock Engineering System.

The debris flow phenomena were found to be the main cause of the initiation of shallow landslides, which affected the roadbed due to foot erosion. In this regard, back analyses were conducted to simulate the current configuration using the Slide2 software (©RocScience). Although preliminary, these analyses allowed for the estimation of the geological and technical characteristics of the lithotypes present in the area to assess the global stability, hypothesizing the construction of a bridge as the best solution to overcome this critical area affected by debris flows, which occur almost annually.

SOMMARIO

RIASSUNTO	1
ABSTRACT	2
SOMMARIO	3
1. INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	5
1.1 STATO DELL'ARTE	5
1.2 SCOPO DELLA TESI E STRUTTURA	6
2. INSTABILITA' DI VERSANTE	7
2.1 GENERALITÀ E CLASSIFICAZIONI	7
2.2 LE COLATE DETRITICHE	8
3. CASO DI STUDIO: RIO FENILS	16
3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	16
3.2 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	18
3.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO	20
3.4 LE PROBLEMATICHE DI SITO E LA EX STRADA MILITARE DELLO CHABERTON ...	26
4. EVENTI STORICI CHABERTON RIO FENILS-RIO INFERNO	30
4.1 1708-1999	30
1708	30
1957	31
1987	31
1990	31
1998	31
1999	32
4.2 2002-2019	32
2002	32
2004	34
2013	36
2015	39
2017	39
2019	41
4.3 SITUAZIONE ATTUALE	44
5. SUSCETTIBILITA'	49
5.1 VALUTAZIONE DEL RISCHIO	49
5.2 SUSCETTIBILITA'	50
5.3 METODO RES	52

5.4	APPLICAZIONE DEL METODO RES AL CASO STUDIO	55
5.5	RISULTATI	68
6.	ANALISI DI STABILITÀ E PROPOSTE.....	71
6.1	ANALISI DI STABILITÀ E SENSITIVITÀ.....	71
6.2	BACK ANALYSIS E PROPOSTA DI GABBIONATURE	78
6.3	PROPOSTA DI UN PONTE TIBETANO COME SUPERAMENTO DELL'AREA FRANATA 82	
6.4	LIMITAZIONI ALLE SOLUZIONI PROPOSTE	85
	CONCLUSIONI	86
	BIBLIOGRAFIA.....	87

1. INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

1.1 STATO DELL'ARTE

Le colate detritiche, note anche come debris flows, consistono in miscele costituite principalmente da acqua ed alte concentrazioni di sedimenti di diverse dimensioni, e si generano generalmente in seguito a fenomeni di intense precipitazioni o di fusione nivale.

A causa delle elevate velocità con cui si manifestano e per via della forza devastante che possono raggiungere riescono a percorrere grandi distanze, rendendole tra i fenomeni franosi maggiormente pericolosi e difficili da controllare. Questo tipo di fenomeni si verifica nelle zone montane e collinari e negli ultimi decenni è in crescita la frequenza di accadimento a causa, probabilmente, del ritiro dei ghiacciai e della degradazione del permafrost, oltre che dell'aumento delle precipitazioni dovuto ai cambiamenti climatici globali. Di conseguenza, sono aumentati sempre di più gli studi di questi eventi, al fine di migliorare le conoscenze riguardo ai meccanismi di innesco e propagazione e di mitigazione dei rischi ad essi dovuti.

Le colate di detrito possono avvenire ovunque nel mondo e anche in Italia rappresentano un fenomeno molto ricorrente, soprattutto nelle Alpi e lungo gli Appennini, con la percentuale di fatalità maggiore tra gli eventi di dissesto (Figura 1.1).

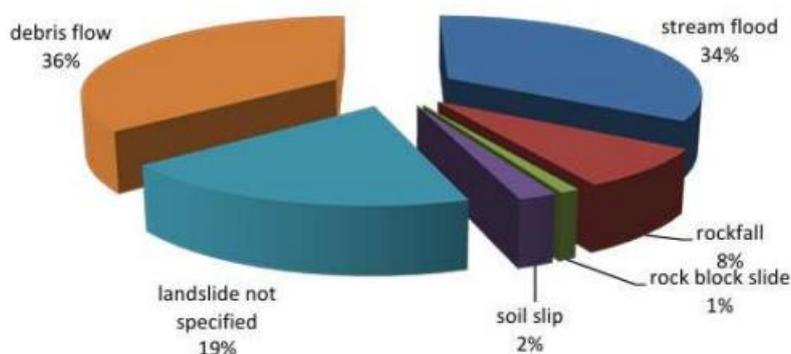


Figura 1.1 Fatalità dei diversi eventi franosi nel Nord Italia negli ultimi 150 anni (Tropeano e Turconi, 2006).

Fino agli anni Settanta le colate detritiche non erano ben definite e non era del tutto chiara la differenza rispetto agli eventi franosi. Varnes nel 1978 diede una delle prime definizioni di colata, che poi rimase nel tempo come una delle più note e utilizzate, definendola una frana che imita un flusso (traslazione spazialmente continua), composta da materiale con un'alta percentuale di materiale grossolano. Hungr et al. (2001) descrissero il fenomeno come un movimento rapido di materiale all'interno di un canale confinato, generatosi dalla saturazione dei detriti. Secondo Van Dine (1996) il fenomeno del debris flow deve rispettare determinati valori di alcune proprietà

caratteristiche, come concentrazione dei solidi, velocità e pendenza del canale. Questi valori sono variabili lungo tutto il tratto di percorrenza della colata, spiegando la difficoltà nella definizione del fenomeno, che ancora oggi continua nonostante i progressi della ricerca.

Un altro problema legato alla difficoltà dello studio è rappresentato dalla forte imprevedibilità del fenomeno. Tuttavia, negli ultimi anni la tecnologia ha mosso importanti passi in avanti per migliorare il grado di previsione, fornendo attrezzature maggiormente sofisticate che permettono di ottenere informazioni fondamentali principalmente sulla superficie libera e la velocità media. Inoltre, sempre più spesso migliorano gli strumenti di monitoraggio e di mitigazione del rischio, con la costruzione di opere di difesa come reti di protezione, briglie o casse di espansione, accompagnate dalla creazione di mappe di suscettibilità che permettono di individuare le aree maggiormente soggette agli eventi.

1.2 SCOPO DELLA TESI E STRUTTURA

L'obiettivo della presente tesi è lo studio geo-morfologico di un sito frequentemente soggetto a fenomeni di debris flow, situato nella frazione Fenils del comune di Cesana Torinese (TO). Più precisamente la ricerca si è concentrata sul bacino del Rio Fenils, torrente che scorre a monte dell'abitato omonimo e ha come ulteriore obiettivo il ripristino della ex strada militare che da Fenils conduce alla cima del Monte Chaberton, ormai interrotta da alcuni anni a causa dei continui dissesti. Lo scopo finale è, dunque, l'analisi del caso studio in toto e, dopo aver analizzato la suscettibilità del sito, la ricerca di eventuali proposte e soluzioni per poter rendere nuovamente l'area accessibile in maniera sicura.

Per ottenere questo risultato si è resa necessaria, inizialmente, un'analisi bibliografica dei fenomeni di colata detritica seguita dall'inquadramento dell'area di studio dal punto di vista geografico, geomorfologico e geologico. Inoltre, per avere un quadro completo riguardo l'evoluzione della situazione nel corso degli anni, è stato stilato un archivio comprendente tutti i dissesti più impattanti nella storia del bacino di Fenils. Si è proceduto, poi, a definire la mappa di suscettibilità dell'area, attraverso l'applicazione del metodo Rock Engineering System (RES), in maniera tale da comprendere le zone maggiormente a rischio all'interno del bacino. Infine, attraverso il software Slide2 (©RocScience), si è studiata dapprima la messa in sicurezza di una sezione di frana tramite l'utilizzo di supporti ingegneristici e in seguito è stata ipotizzata, lungo una seconda sezione, la messa in opera di un ponte per garantire il superamento del tratto di strada franato e continuamente interessato da colate di detrito.

2. INSTABILITÀ DI VERSANTE

2.1 GENERALITÀ E CLASSIFICAZIONI

Per instabilità di versante si intende il movimento lungo un pendio di una massa di roccia, terra o detriti, con gravità e spesso l'azione dell'acqua come principali fattori trainanti di questo processo geomorfologico. La differenziazione tra le varie tipologie di movimento è ampia e ognuna può presentare uno specifico stato di attività (attivo, quiescente, riattivato, relitto ecc.). Quest'ultimo incide in maniera importante nel passaggio dalle condizioni stabili a quelle instabili, il quale dipende nel tempo da fattori di predisposizione, preparazione e innesco. Infatti, la stabilità dei pendii è solitamente intesa come un sistema fisico che si sviluppa attraverso diverse fasi, che comprendono, oltre al cedimento del pendio stesso (o frana), ulteriori complessi meccanismi di processo pre- e post-evento. Le cause delle instabilità di versante possono essere molteplici: sia di origine naturale (intense precipitazioni o terremoti), sia di origine antropica (urbanizzazione o deforestazione). Questi fenomeni rappresentano uno dei principali responsabili delle trasformazioni morfologiche, impattanti nei confronti del paesaggio e spesso causando ingenti danni alla popolazione e al territorio.

Le frane si possono manifestare in maniera localizzata o presentandosi come grandi fenomeni regionali, i cui depositi possono arrivare a coprire decine o centinaia di chilometri quadrati. Tra i vari parametri che permettono di effettuare una distinzione e di identificare differenti tipologie di movimento vi è la velocità del fenomeno: le frane, infatti, possono variare da quelle a movimenti molto lenti (mm/anno) ad altre estremamente rapide (m/s). Varnes nel 1978 (Figura 2.1) introdusse una delle classificazioni più note e diffuse (aggiornata poi nel 1996 insieme a Cruden), basata sul tipo di materiale e sul tipo di movimento del fenomeno, considerando anche altri parametri, tra cui proprio la velocità e la quantità di acqua mobilitata. Varnes distinse, in particolare, cinque tipi di instabilità: crollo (fall), ribaltamento (topple), scivolamento superficiale (slide), espansione (spread) e colata (flow). Successivamente si aggiunsero alla classificazione anche le deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV) e i fenomeni complessi, dati dalla combinazione di più tipologie. In ambito montano si possono considerare maggiormente diffusi i crolli, gli scivolamenti superficiali e le colate.

È definito crollo un distacco improvviso di materiale da un pendio molto ripido, senza scivolamento. Lo scivolamento superficiale rappresenta la formazione di una superficie di scorrimento che, a seconda della forma (piana o cilindrica), causa un movimento traslazionale o rotazionale. Le colate, invece, si differenziano principalmente per la tipologia di materiale mobilitato e per la sua

composizione più vicina a un liquido che a un solido. Si distinguono, inoltre, i materiali in: terra (granulometria prevalentemente fine, con diametro inferiore ai 2 mm, e granulometria grossolana inferiore al 20%), detriti (maggior presenza di materiale grossolano, tra il 20 e l'80%) e roccia (massa intatta composta da granuli aggregati con elevata coesione). Tuttavia, a causa della complessità nella precisa individuazione della tipologia del materiale e del movimento, le classificazioni sono in continuo aggiornamento negli anni, con la presa in considerazione di diversi parametri.

Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FALLS		Rock fall	Debris fall Scree Debris cone	Earth fall Fine soil Rock Colluvium Debris cone
	TOPPLES	Rock topple	Debris topple Debris cone	Earth topple Cracks Debris cone
SLIDES	Rotational	Single rotational slide (slump) Failure surface	Multiple rotational slide Crown Scarp Head Scarp Minor Scarp Failure surface	Successive rotational slides
	Translational (Planar)	Rock slide	Debris slide	Earth slide
SPREADS				Earth spread
FLOWS		Solifluction flows (Periglacial debris flows)	Debris flow	Earth flow (mud flow)
	COMPLEX	e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe

Figura 2.1 Classificazione dei fenomeni franosi per tipologia di movimento e materiale coinvolto.

2.2 LE COLATE DETRITICHE

Sicuramente tra le varie instabilità di versante quelle più pericolose in ambiente montano sono le colate a causa della loro velocità e difficoltà di previsione. Possono verificarsi in seguito a forti

precipitazioni o nei periodi di fusione nivale in terreni sia rocciosi che costituiti da materiale sciolto. La colata descrive un movimento di una massa di materiale fluido lungo un letto basale più rigido, tipico di questi fenomeni e che lo differenzia dalle altre tipologie di instabilità di versante. Essendo fenomeni abbastanza complessi, non sempre si riesce a individuarne le esatte caratteristiche (soprattutto in termini di granulometria) e ad effettuare una corretta e precisa classificazione. Infatti, nel tempo tanti studiosi hanno contribuito alla ricerca di termini e fattori capaci di descrivere nel miglior modo possibili le diverse tipologie di colata.

Già dai primi del '900, Stiny ("Die Muren", 1910) mise in evidenza le diversità dei movimenti detritici nei canali montani austriaci, distinguendo alluvioni e piene cariche di detriti ("muren") e colate detritiche con fronte di massi ("murgänge"). Negli Stati Uniti, Sharpe (1938) introdusse un sistema di classificazione tridimensionale (ispirando, poi, Varnes e Cruden) che riconosceva il tipo di movimento, il materiale e la velocità del movimento. Coniò, inoltre, i termini debris flow (incanalato), debris avalanche (a pendio aperto) ed earth flow. Quest'ultimo fu, poi, rafforzato e descritto in modo più approfondito nel lavoro di Keefer e Johnson (1983) ed è ancora oggi utilizzato in Nord America come sinonimo del termine inglese "mudslide" (Hutchinson 1988), anche se spesso in modo improprio nei resoconti dei media: pertanto, è preferibile "earth flow". Fenomeni simili a quelli visti in Austria furono descritti, poi, nelle regioni aride del sud-ovest degli Stati Uniti da Bull nel 1964 che per primo parlò di mud flows, mentre nelle aree vulcaniche del nord-ovest statunitense si studiarono alluvioni "iperconcentrate" cariche di detriti.

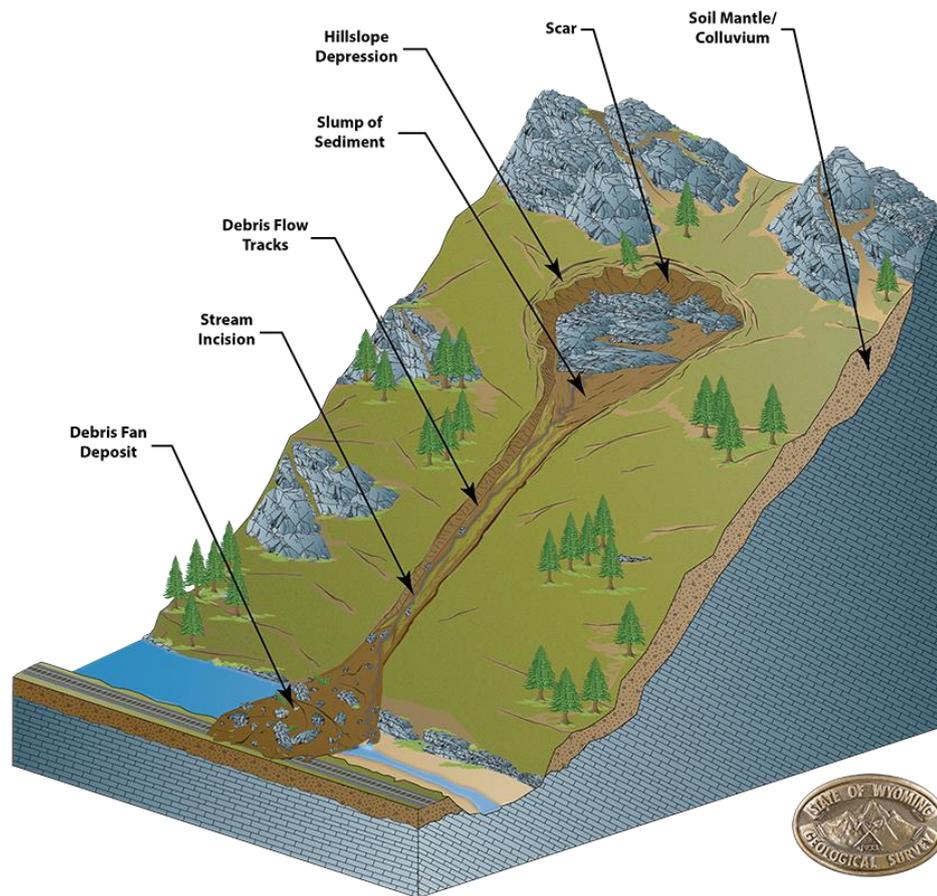


Figura 2.2 Esempio di debris flow. (Fonte: www.intrageo.it)

Oldrich Hungr nel 2001 (Tabella 2.1) propose una distinzione dei differenti possibili fenomeni di colata basata principalmente sulla tipologia del materiale presente e su altri parametri come il contenuto d'acqua, la tipologia del movimento e la velocità. In particolare, definì col termine “terra” il colluvium, materiale maggiormente argilloso e di comportamento plastico, distinguendolo dai più diffusi termini “detrito” e “fangò”. Questi ultimi non hanno chiari equivalenti nella terminologia geotecnica, ma hanno acquisito un importante status nella geologia e nello studio delle frane. Si tratta di materiali che sono composti da varie componenti a causa di processi geomorfologici e di alterazione di varia natura. Solitamente vengono indicate con “debris” miscele detritiche sciolte, principalmente grossolane di sabbia, ghiaia, ciottoli e massi (spesso anche con quantità minori di limo e argilla), con un indice di plasticità IP inferiore al 5%. Le colate di detrito possono essere estremamente rapide, raggiungendo anche velocità di 5-10 m/s e possono verificarsi come successione di più ondate, percorrendo lunghe distanze a causa delle inondazioni. Le colate di fango (“mud flow”), invece, presentano un materiale argilloso liquido o semiliquido, con un contenuto di limo e argilla sufficiente a produrre plasticità ($IP > 5\%$) e con un elevato contenuto di umidità. Inoltre, entrambi i fenomeni possono contenere porzioni di materia organica, che vengono solitamente denominati “diamicton”. Un altro protagonista importante dei movimenti detritici durante i fenomeni di colate è sicuramente il contenuto d'acqua, il quale varia durante l'evento a causa del

mescolamento con l'acqua di superficie e potrebbe, quindi, essere significativamente diverso dal contenuto d'acqua del materiale di partenza. Il contenuto d'acqua, insieme alla concentrazione dei sedimenti, definisce la densità della colata, dalla quale dipende il comportamento reologico della stessa, che può presentarsi con un fronte denso e a grana più grossa o come flusso iperconcentrato maggiormente fluido.

Tabella 2.1 Classificazione delle colate di detrito di Hungr et al. (2001).

Material	Water content ¹	Special condition	Velocity	Name
Silt, sand, gravel, and debris (talus)	Dry, moist, or saturated	No excess pore-pressure Limited volume	Various	<i>Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow</i>
Silt, sand, debris, and weak rock ²	Saturated at rupture surface	Liquefiable material ³ Constant water content	Extremely rapid	<i>Sand (silt, debris, rock) flow slide</i>
Sensitive clay	At or above liquid limit	Liquefaction <i>in situ</i> ³ Constant water content ⁴	Extremely rapid	<i>Clay flow slide</i>
Peat	Saturated	Excess pore-pressure	Slow to very rapid	<i>Peat flow</i>
Clay or earth	Near plastic limit	Slow movements Plug flow (sliding)	Less than rapid	<i>Earth flow</i>
Debris	Saturated	Established channel ⁵ Increased water content ⁴	Extremely rapid	<i>Debris flow</i>
Mud	At or above liquid limit	Fine-grained debris flow	Greater than, very rapid	<i>Mud flow</i>
Debris	Free water present	Flood ⁶	Extremely rapid	<i>Debris flood</i>
Debris	Partly or fully saturated	No established channel ⁵ Relatively shallow, steep source	Extremely rapid	<i>Debris avalanche</i>
Fragmented rock	Various, mainly dry	Intact rock at source Large volume ⁷	Extremely rapid	<i>Rock avalanche</i>

¹ Water content of material in the vicinity of the rupture surface at the time of failure.

² Highly porous, weak rock (examples: weak chalk, weathered tuff, pumice).

³ The presence of full or partial *in situ* liquefaction of the source material of the flow slide may be observed or implied.

⁴ Relative to *in situ* source material.

⁵ Presence or absence of a defined channel over a large part of the path, and an established deposition landform (fan). *Debris flow* is a recurrent phenomenon within its path, while *debris avalanche* is not.

⁶ Peak discharge of the same order as that of a major flood or an accidental flood. Significant tractive forces of free flowing water. Presence of floating debris.

⁷ Volume greater than 10,000 m³ approximately. Mass flow, contrasting with fragmental rock fall.

Nel 1987 Pierson e Costa definirono un range di concentrazione solida in volume, C_v , necessario per l'innescò di una colata detritica, ossia tra il 20% e il 70%. Una concentrazione minore genera flusso in sospensione del materiale fine e sul fondo di quello grossolano. Distinsero, quindi, i flussi d'acqua (o water flow) dai flussi iperconcentrati e dalle colate detritiche (debris flow). I primi, con C_v minore del 20%, presentano un comportamento newtoniano e densità vicine a quelle dell'acqua. I flussi iperconcentrati (C_v tra il 20% e il 47%) sono, invece, delle colate lente se il materiale è principalmente fine o rapide se grossolano. Infine, i debris flow (C_v tra il 47% e l'80%), presentano comportamento più viscoso e densità doppia rispetto a quella dell'acqua. Nel tempo le colate detritiche sono state classificate più volte, considerando diversi parametri riguardanti prettamente la massa in movimento come le velocità di propagazione (Lorenzini e Mazza, 2004), le frazioni solido/liquido (Coussot e Meunier, 1996), il comportamento meccanico della massa (Ancey, 2002) o le dimensioni dei sedimenti trasportati e la loro concentrazione volumetrica (Takahashi, 2007). Tiranti et al. (2014), offrono, invece, una classificazione basata sulle caratteristiche geomorfologiche del bacino in cui il fenomeno si origina. In particolare, è stato individuato un indice CWI (Clay Weathering Index), che valuta la propensione del bacino a produrre materiale fine dall'alterazione del substrato, ottenendo

tre possibili tipologie di bacino alpino: ECM (excellent clay maker), GCM (good clay maker), BCM (bad clay maker). Un bacino ECM è caratterizzato da flussi detritici coesivi, conoidi alluvionali irregolari con dimensioni ridotte rispetto all'area alimentante e pendenze non troppo elevate. Si tratta di bacini sensibili nei confronti delle piogge di moderata intensità (superiori ai 20 mm/h), per cui la frequenza di innesco è molto elevata. Anche i bacini di tipo GCM sono contraddistinti da flussi detritici coesivi, ma presentano aree di deposito regolari e poco pendenti. Essi sono maggiormente suscettibili alle precipitazioni di forte intensità (superiori ai 30 mm/h) e quindi la frequenza di innesco è inferiore rispetto ai bacini ECM. Infine, i BCM sono bacini caratterizzati da flussi detritici non coesivi, ventagli di deposizione di forma lobata e pendenze elevate. Di conseguenza, sono vulnerabili alle piogge di elevata intensità (oltre i 50 mm/h) e la loro frequenza di innesco risulta più bassa.

Solitamente un evento di debris flow si divide in tre momenti principali: l'innesco, il trasporto e il deposito. Spesso, l'innesco è generato da uno scivolamento superficiale nella parte frontale o laterale di un versante, che si trasforma subito dopo in una colata detritica, incanalata lungo un canale o più ampia (debris avalanche). Alle volte, il letto del canale stesso può diventare instabile a causa dei continui carichi e scarichi estremi e ciò può generare spontaneamente un debris flow. Generalmente, l'area di innesco presenta elevate pendenze che vanno dai 20° ai 45°, poichè aree più pianeggianti non possono avere energia sufficiente per generare questo tipo di fenomeno, mentre pareti troppo verticali tendono piuttosto a causare crolli e non scivolamenti e colate. Anche l'importanza del volume del materiale di scorrimento in fase di innesco può variare considerevolmente: infatti poche decine di metri cubi possono generare importanti colate detritiche, ma possono anche semplicemente essere una piccola parte di uno scorrimento di una potenziale frana notevolmente più estesa. In seguito alla fase di innesco, inizia quella di trasporto in cui il materiale comincia la sua discesa lungo il pendio, durante la quale si disgrega. La massa in movimento assume qui un comportamento di tipo fluido e subisce un rimodellamento quasi completo, caratterizzato da un profilo di velocità più o meno uniformemente distribuito. Quando il corpo di frana si incanala lungo l'alveo di un torrente nella maggior parte dei casi lo percorre fino a raggiungere una pendenza sufficientemente bassa da depositarsi ai piedi del versante, formando il caratteristico conoide a ventaglio, riconoscibile come unità di terreno distinta. Altre volte, una volta entrata lungo il canale, la massa in movimento può ridurre la propria velocità fino ad arrestarsi, creando una diga, che interrompe il flusso detritico. Quando la diga viene erosa e successivamente rotta, si genera una nuova ondata detritica lungo il canale e la fase di trasporto riprende il suo corso verso fondo valle. Generalmente il corpo principale della massa in movimento (Figura 2.3 e 2.4) è costituito da una massa più fine di detriti liquefatti, mentre la coda è maggiormente diluita, turbolenta e carica di sedimenti. Nella testa del corpo si accumulano, invece, i massi, causando un innalzamento del livello del flusso retrostante, con conseguente ingrandimento proporzionale del

picco di portata. La deposizione avviene a causa della riduzione combinata della pendenza e del confinamento, il quale, una volta esaurito, provoca il collasso della parte principale dell'ondata dietro il fronte e il fronte stesso viene privato della spinta idraulica che lo spingeva in avanti. All'interno del conoide di deposito distinguiamo detriti più grossolani nella parte più prossimale e depositi più fini e sottili nella parte distale, dove le velocità sono ridotte.

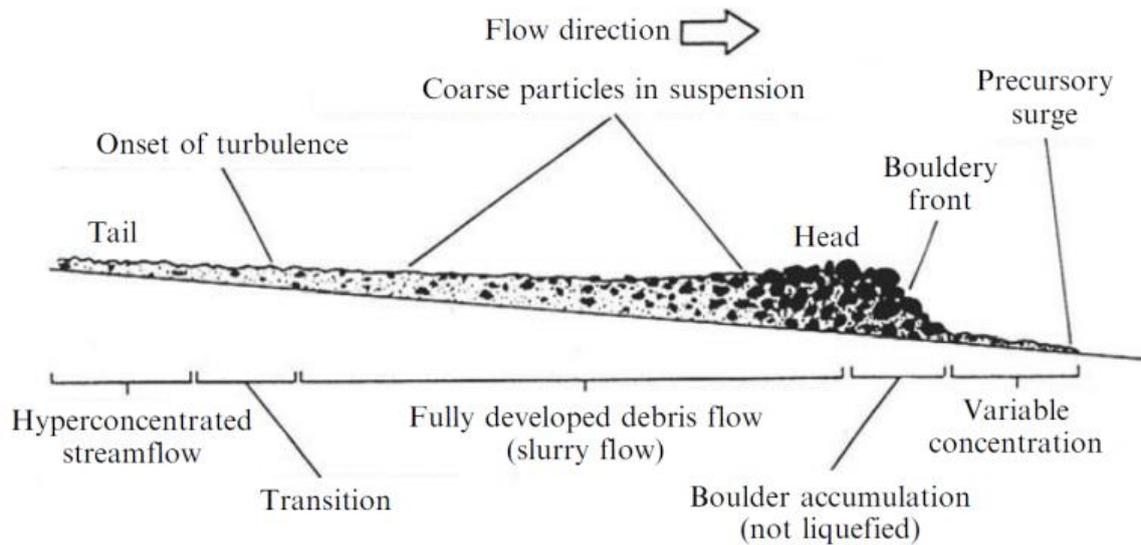


Figura 2.3 Rappresentazione schematica di debris flow (Pierson & Costa, 1987).

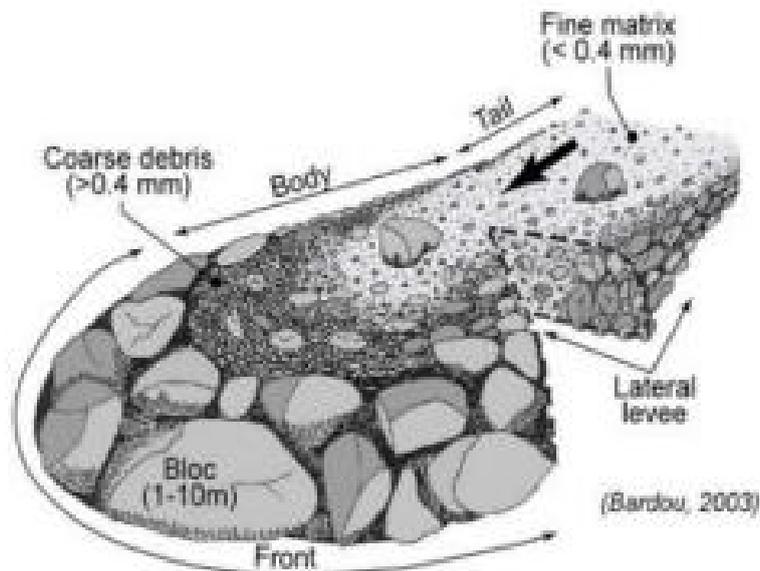


Figura 2.4 Rappresentazione schematica di debris flow (Bardou et al. 2003).

Le colate detritiche si distinguono da altre tipologie di frane soprattutto perché si verificano periodicamente nei terreni montuosi, su percorsi prestabiliti, di solito canali e canali di drenaggio

di primo o secondo ordine. Quindi, il rischio dovuto ai debris flows è specifico del percorso e dell'area di deposizione. Questo aspetto, insieme alla periodicità di occorrenza nello stesso luogo, influenza la metodologia di studio della pericolosità e si contrappone a fenomeni affini, come le valanghe di detriti, a pendio aperto, i quali non sono legati a un percorso preciso. Gli eventi di debris flow, spesso, si verificano contemporaneamente alle alluvioni, innescati da una frana, da una valanga di detriti o da una caduta di massi da una sponda ripida, oppure dall'instabilità spontanea del letto ripido del torrente. Una volta che il materiale del suolo inizia a muoversi in un canale ripido, il letto diventa soggetto a un rapido carico non drenato, a tal punto che anche il materiale più grossolano può liquefarsi, o almeno subire un significativo aumento della pressione dei pori. Il materiale del letto viene, così, intrappolato in un'ondata crescente e man mano che questa si sposta a valle, l'erosione mina le sponde scoscese e al flusso si aggiunge altro materiale terroso e detriti organici. La maggior parte del materiale coinvolto in una colata detritica proviene solitamente dal trascinarsi lungo il percorso, mentre il volume dello scivolo iniziale è poco significativo. Come risultato della canalizzazione, una colata detritica cresce e diventa fronteggiata da una concentrazione di massi o da una "testa" turbolenta. Possono verificarsi sbarramenti e rilasci periodici che contribuiscono alla crescita dei picchi di portata: infatti, un evento di debris flow può consistere in una singola ondata o in molte successive, le quali sono in grado di generare fronti ripidi e i loro picchi di portata sono amplificati da questo fenomeno. La portata di picco della più grande ondata coinvolta in un evento di colata detritica può essere superiore di oltre un ordine di grandezza rispetto alla piena idrologica più estrema e, infatti, questo spiega le grandi profondità delle colate, gli elevati carichi d'impatto e le capacità di spostare grandi massi durante questi fenomeni. Quindi, per ottenere una definizione completa di colata detritica (o colata di fango) si dovrebbero considerare due criteri paralleli, applicati alla più grande ondata della serie che forma un "evento": la portata di picco è più di tre volte superiore a quella di una portata di piena maggiore, oppure la concentrazione volumetrica media di solidi al picco di ondata è superiore a circa il 60% e le fasi acquose e solide sono completamente mescolate.

A causa delle elevate velocità raggiungibili, delle forze di impatto e dei lunghi tratti che possono percorrere, combinati alla scarsa prevedibilità temporale, i debris flow rappresentano uno dei più pericolosi fenomeni franosi esistenti. Molti dei più grandi disastri mondiali dovuti alle instabilità di versante, misurati in termini di perdita di vite umane e di beni economici e ambientali, sono causati da colate detritiche, sia canalizzate che valanghive o vulcaniche (anche dette lahars). I danni diretti dovuti ai fenomeni di debris flow includono, oltre la perdita di vite umane, anche la distruzione di case, attività, strade e infrastrutture, con conseguenti incidenti tra veicoli e deragliamenti di treni, oltre che danni di natura ambientale, come la devastazione di terreni agricoli, foreste e sistemi di approvvigionamento idrico. Sono, inoltre, elevati anche i danni indiretti che si riconducono sia alle

interruzioni del traffico stradale e ferroviario, sia alle sospensioni delle lavorazioni agricole e industriali in seguito ai danni alle terre coltivabili o alle linee elettriche, con le corrispettive perdite in termini economici. Per affrontare i rischi dovuti alle colate detritiche e ai fenomeni simili, le società si basano sui concetti di esperienza, previsione e protezione, cercando di evitare le zone maggiormente esposte al rischio o, dove questo non è possibile, accettandolo e provando a minimizzare le probabilità di danno.

3. CASO DI STUDIO: RIO FENILS

3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area di studio è situata nel Piemonte Occidentale, nei pressi del confine di Stato tra Italia e Francia, nel complesso montuoso del Monte Chaberton, cima delle Alpi Cozie. In particolare, il sito d'interesse è collocato nella frazione Fenils nel comune di Cesana Torinese (TO), in alta Valle di Susa.

Cesana è un comune di quasi 900 abitanti distante circa 90 chilometri da Torino e meno di 4 dal territorio francese. Si erge a 1354 metri di altitudine e si estende per una superficie di 121 chilometri quadrati, in un'area chiave per le vie di comunicazione internazionali tra Italia e Francia. È situato subito dopo la confluenza dei torrenti Ripa e Piccola Dora, i quali danno origine alla Dora Riparia. La piccola frazione Fenils (Figura 3.1) si trova poco più a nord del comune di Cesana e si sviluppa lungo la valle attraversata dal Rio Fenils, fino all'immissione di quest'ultimo nella Dora Riparia.

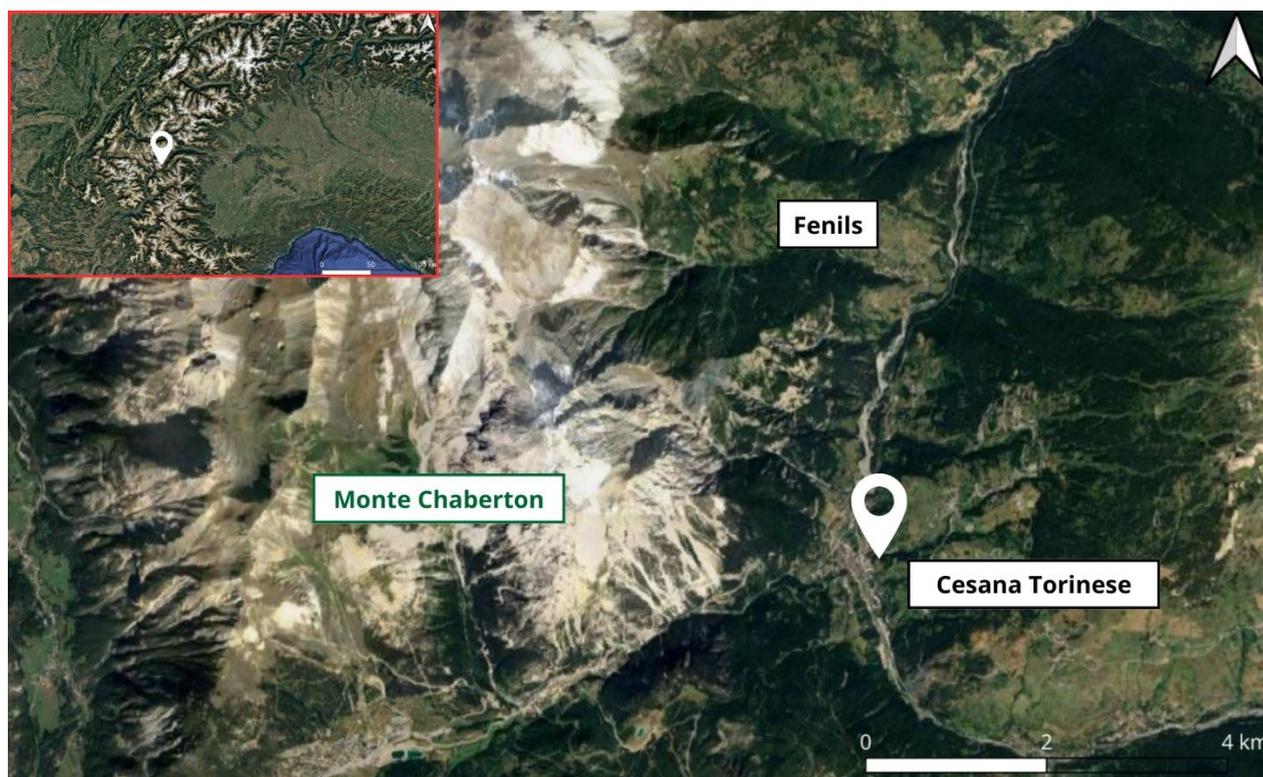


Figura 3.1 Inquadramento geografico dell'area di studio.

Proprio a partire dall'abitato di Fenils si estende l'area di indagine trattata nella presente tesi (Figura 3.2), ossia un sito percorso dalla ex strada militare che collega lo stesso abitato con la vetta del Monte Chaberton (3131 m s.l.m.). La strada è sterrata e, ad oggi, si interrompe dopo circa 5 chilometri a causa dei continui fenomeni franosi oggetto di studio del lavoro di tesi. Come accennato precedentemente, la strada è attraversata dal noto Rio Fenils e, ancora più a monte, dal Rio Inferno

(o Rio Enfer), i quali si rendono spesso protagonisti delle colate detritiche canalizzate, che mettono a repentaglio l'incolumità dell'abitato a valle di Fenils e dei suoi abitanti. Il Rio Inferno nasce a nord-ovest rispetto allo Chaberton e si sviluppa verso est (dove prende il nome dell'omonimo abitato più a valle) percorrendo la valle fino a Fenils, oltre il quale si immette nella Dora Riparia.

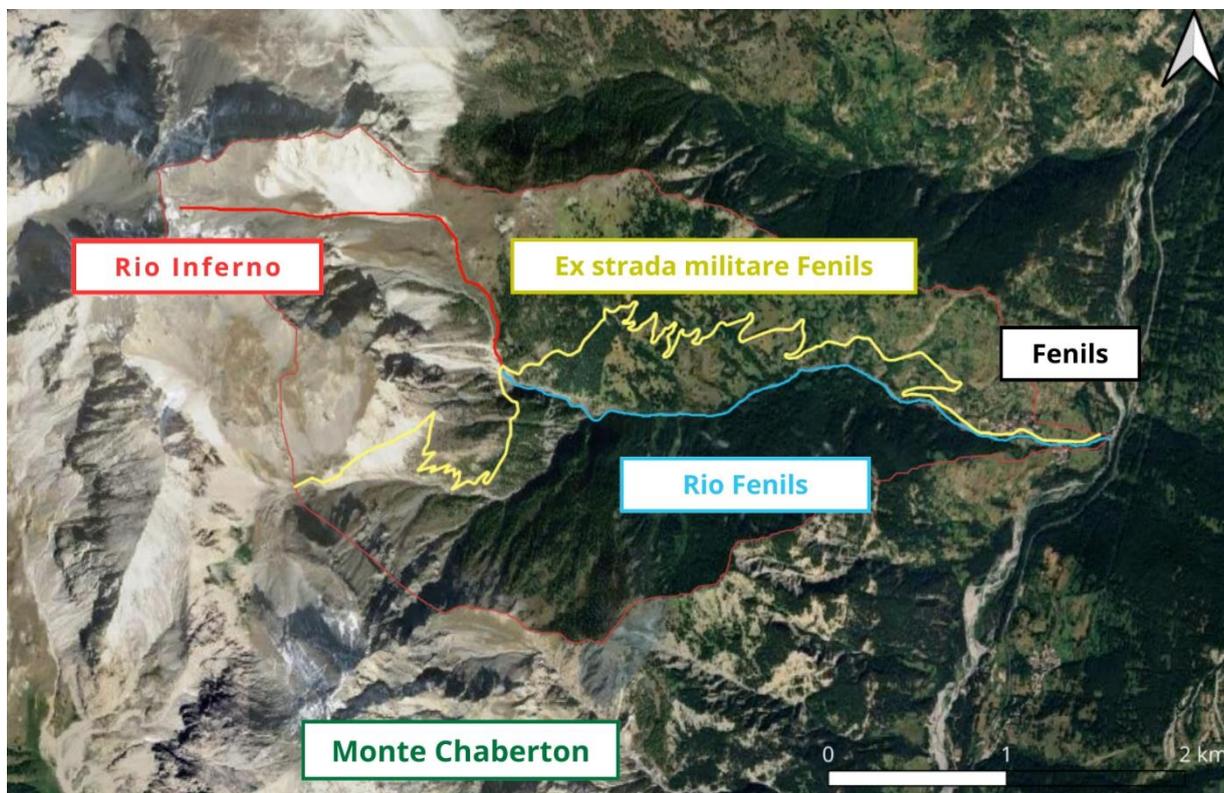


Figura 3.2 Inquadramento del bacino di Fenils, all'interno del quale si evidenziano il Rio Inferno, il Rio Fenils e la ex strada militare dello Chaberton.

I due rii appartengono a un bacino di circa 9 km², con quote che vanno dai 1242 m s.l.m. (punto di confluenza tra il rio Fenils e la Dora Riparia) ai 2777 m s.l.m. (origine del Rio Inferno). L'asta fluviale principale è costituita dal Rio Fenils, il quale, per la maggior parte dell'anno, non offre una consistente portata d'acqua. Tuttavia, in caso di precipitazioni intense, il Rio Fenils potrebbe essere alimentato da un gran numero di piccoli corsi d'acqua secondari, che convergono da entrambi i lati del Rio Fenils verso di esso lungo tutta la valle (Figura 3.3). In quest'area, il deflusso è prevalentemente superficiale piuttosto che sotterraneo o ipodermico. La maggior parte degli alvei presenti in questo bacino si sono originati in seguito a eventi di debris flow, che hanno lasciato il segno più o meno evidente nella vallata attraverso le numerose incisioni presenti in essa, in particolar modo nella zona di origine del Rio Inferno e all'interno del suo sub-bacino. Queste incisioni da ruscellamento manifestano la dinamica erosiva e il comportamento di carattere torrentizio delle acque durante questi fenomeni.

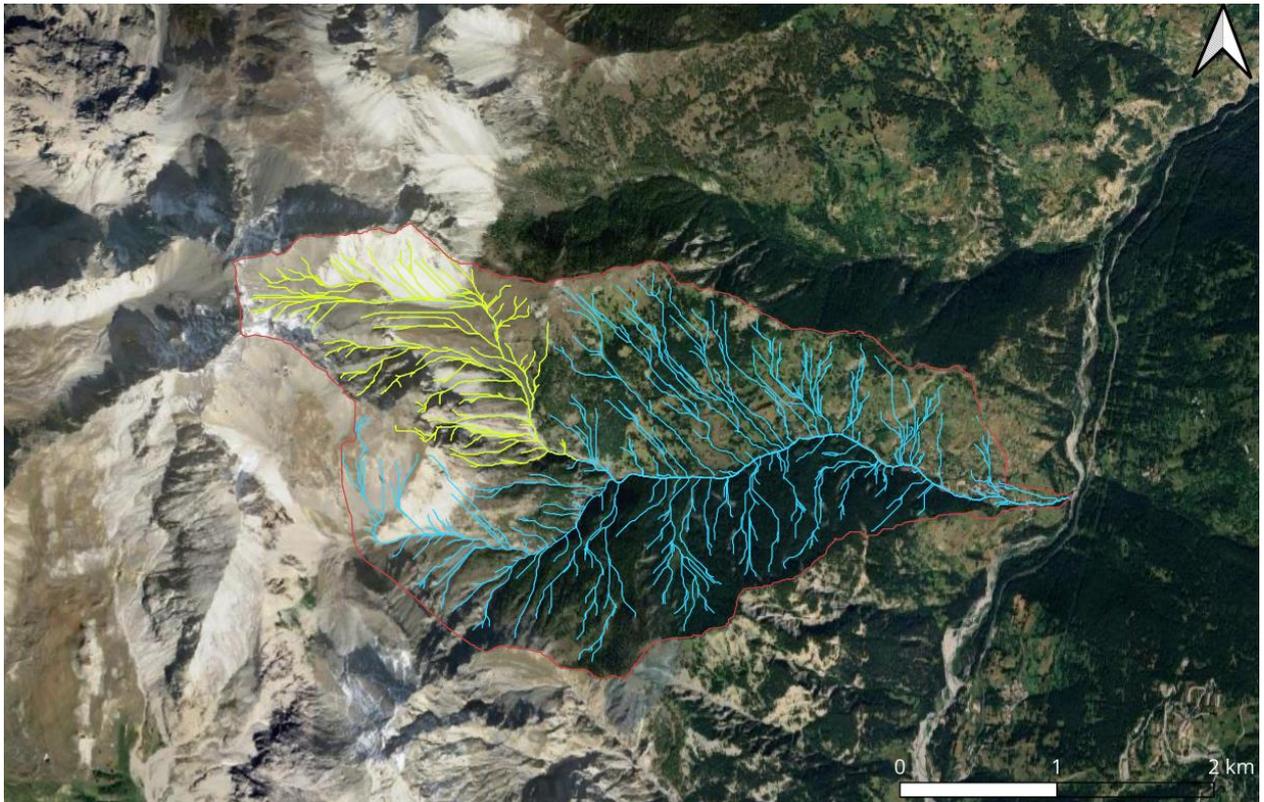


Figura 3.3 Ramificazioni del Rio Fenils (celeste) e del Rio Inferno (giallo).



Figura 3.4 Profilo del Rio Inferno/Fenils.

3.2 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il sistema morfologico dell'area in questione è frutto della migrazione dello spartiacque principale, che inizialmente faceva parte del versante occidentale della catena alpina. Durante il Miocene, infatti, quando si registrò il sollevamento della placca tettonica alpina questo divenne parte dell'attuale versante orientale (Staub, 1934). Durante quest'era (e anche in quelle successive) l'evoluzione della rete di drenaggio, le fluttuazioni dei ghiacciai e le conseguenti frane hanno determinato lo sviluppo morfologico della zona e delle sue caratteristiche. Tutte le valli presenti in quest'area mostrano la tipica sezione a U, dovuta alle attività di scotico e di erosione dei ghiacciai (Figura 3.5).



Figura 3.5 Veduta della sezione a U nell'alta Valle di Susa. (Fonte: "Defining debris flow susceptibility: from databases to site investigation.", Vianello D.)

Un'altra caratteristica frequente nel sito è data dalla giustapposizione di litologie molto dure (dolomie) e altre più morbide (calcari), la quale ha dato origine a creste delimitate da un'alternanza di versanti ripidi e graduali. Inoltre, la presenza di numerosi corsi d'acqua ha permesso la formazione dei fondivalle pianeggianti, i quali rappresentano le principali aree di sedimentazione. Oggi i ghiacciai non sono più presenti, però la loro traccia è rimasta e la si ritrova nei depositi glaciali, ancora evidenti in vari versanti (Giardino et al., 1998; Ivy-Ochs et al., 2018). L'evoluzione postglaciale della Valle di Susa sembra essere in gran parte caratterizzata da processi legati alla dinamica fluviale e torrentizia, ma anche al movimento di massa per gravitazione: sia le carte del Piano Assetto Idrogeologico (PAI) che quelle del Sistema Informativo Frane Piemonte (SIFRAP) manifestano la presenza abbondante di fenomeni attivi di colate di detrito e quiescenti di DGPV. Lungo tutto il versante a monte del Rio Inferno sono ben riconoscibili i segni erosivi dei fenomeni passati di debris flow e, più a valle, anche i canali creati dalle colate e i conoidi di deposito ai piedi di essi.

Per uno studio morfologico più preciso sull'area di Fenils è stato analizzato, tramite il software QGIS, il DTM, con risoluzione 5x5 m, del sito d'interesse ed è stata elaborata la carta delle pendenze (Figura 3.6), la quale è stata suddivisa in cinque classi (0°-8°, 8°-15°, 15°-25°, 25°-35°, >35°). I settori con maggiore pendenza sono i più rocciosi e caratterizzati da scarsa vegetazione, presentando bruschi cambi di pendenza al contatto con i detriti disposti con angolazioni di circa 40°. L'andamento del Rio Inferno mostra una progressiva diminuzione della pendenza fino ad essere quasi orizzontale nei pressi della confluenza con la Dora Riparia.

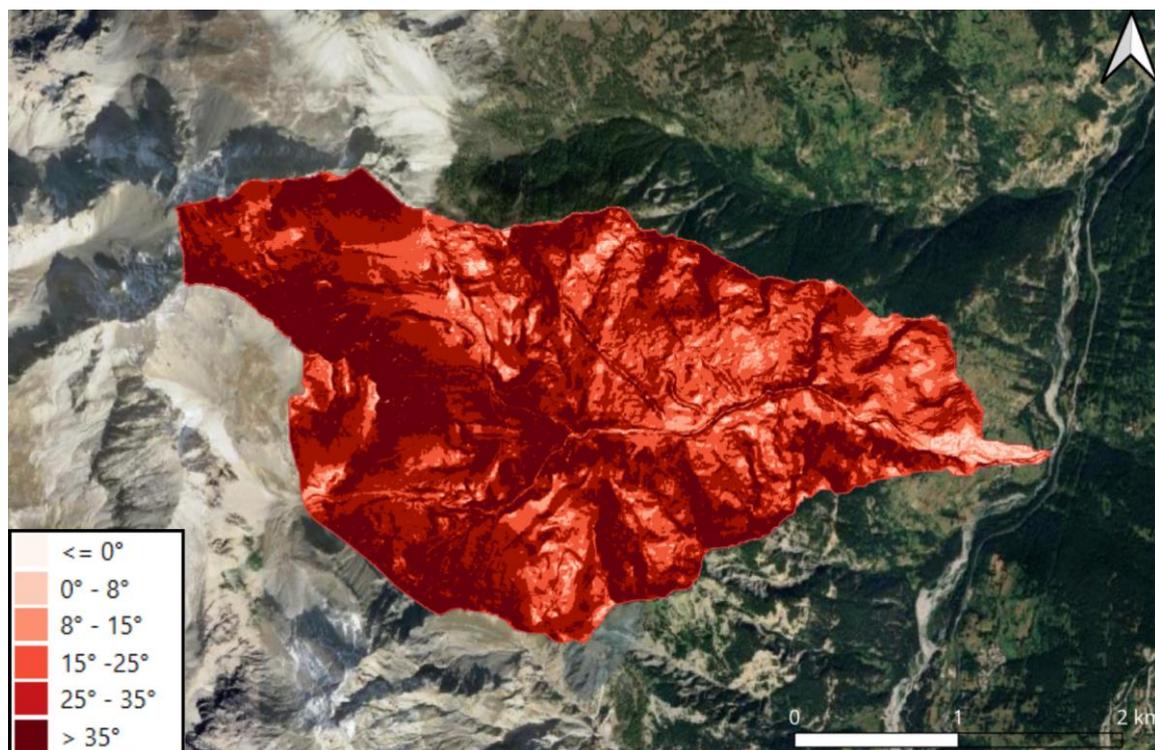


Figura 3.6 Carta delle pendenze

3.3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Dal punto di vista geologico l'area di Fenils pone le sue radici in quella che è l'orogenesi alpina, in particolare nel settore di dominio Pennidico. Le Alpi si originarono a partire dal Cretacico, in seguito alla convergenza e alla collisione tra la placca europea e Adria, con la successiva subduzione e scomparsa dell'Oceano Ligure-Piemontese apertosi tra le due placche già nel periodo Giurassico. Dopo la collisione si distinsero quattro domini tettonici: il dominio Sudalpino, il dominio Austroalpino, il dominio Elvetico-Delfinato e, per l'appunto, il dominio Pennidico (Figura 3.7). Quest'ultimo deriva dal margine continentale europeo e dalla placca oceanica dedotta dall'oceano Ligure-Piemontese e si è deformata nel tempo, a causa dell'evoluzione tettonico-metamorfica alpina. La maggior parte dei contatti tettonici dell'unità Pennidica sono generalmente inclinati verso ovest.

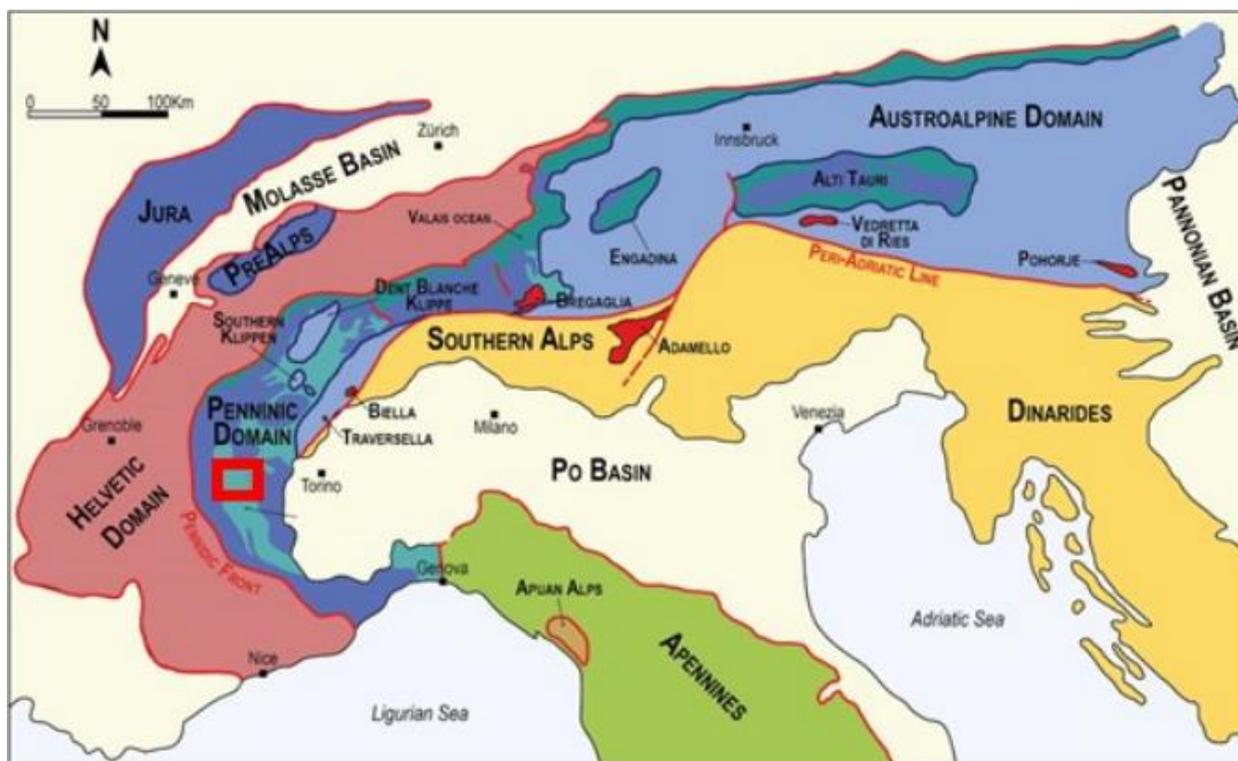


Figura 3.7 Mappa della suddivisione alpina, con inquadramento in rosso della Valle di Susa. Fonte: "Defining debris flow susceptibility: from databases to site investigations", Vianello D.

Per l'analisi geologica dettagliata si è sfruttato il Foglio Cesana 171 (scala 1:50000) della Carta Geologica d'Italia, realizzato da ISPRA per il progetto CARG.

All'interno del dominio Pennidico si possono distinguere, dunque, più unità tettoniche pre-plioceniche aventi sia origine continentale che oceanica, che vanno dal Triassico superiore fino al Cretacico superiore. Sono, inoltre, presenti diversi depositi glaciali e detritici appartenenti al più recente periodo del Quaternario. Tra le diverse unità presenti la più antica (tra i 228 e i 175 milioni di anni) è un'unità di origine continentale, ossia l'unità tettonostratigrafica dello Chaberton-Grand Hoce-Grand Argentier (Figura 3.8). Si tratta di un complesso appartenente alla zona Pre-Piemontese, composto da una spessa successione dolomitica noriana, da calcari retico-ettangiani e da scisti e filladi calcarei giurassici, con livelli discontinui di breccia del Giurassico inferiore-medio (Polino et al., 1983; Figura 3.9). Tale unità presenta un basso grado metamorfico e conserva chiaramente la sua origine sedimentaria. Nello specifico, all'interno dell'unità, distinguiamo il Complesso di Les Arbours (CLW), i Calcari di Côte Belle (CBL) e le Dolomie dello Chaberton (DCB).

BASAMENTO PRE-PLIOCENICO

UNITÀ DI MARGINE CONTINENTALE

UNITÀ TETTONOSTRATIGRAFICA CHABERTON - GRAND HOICHE - GRAND ARGENTIER



Figura 3.8 Unità tettonostratigrafica Chaberton-Grand Hoiche- Grand Argentier. (Fonte: Carta Geologica d'Italia (Foglio 171- Cesana Torinese)).



Figura 3.9 Successione dolomitica dell'unità dello Chaberton, vista dal monte Fraiteve. (Fonte: "Defining debris flow susceptibility: from databases to site investigations", Vianello D.)

D'altra parte, le unità di origine oceanica presenti nell'area possono fare riferimento a due particolari unità tettono-stratigrafiche: l'unità del Lago Nero e l'unità di Puys-Venaus. La prima, risalente al periodo Giurassico superiore-Cretacico inferiore (tra i 160 e i 100 milioni di anni), comprende il complesso delle Unità Ofiolitiche presenti spesso in sequenza, ad esempio serpentiniti (TIN), quarziti (QLN), marmi (MPB) e il complesso del Lago Nero (CNR), composto da diverse tipologie di calcescisti (Figura 3.10).

UNITÀ OFIOLITICHE

UNITÀ TETTONOSTRATIGRAFICA DEL LAGO NERO

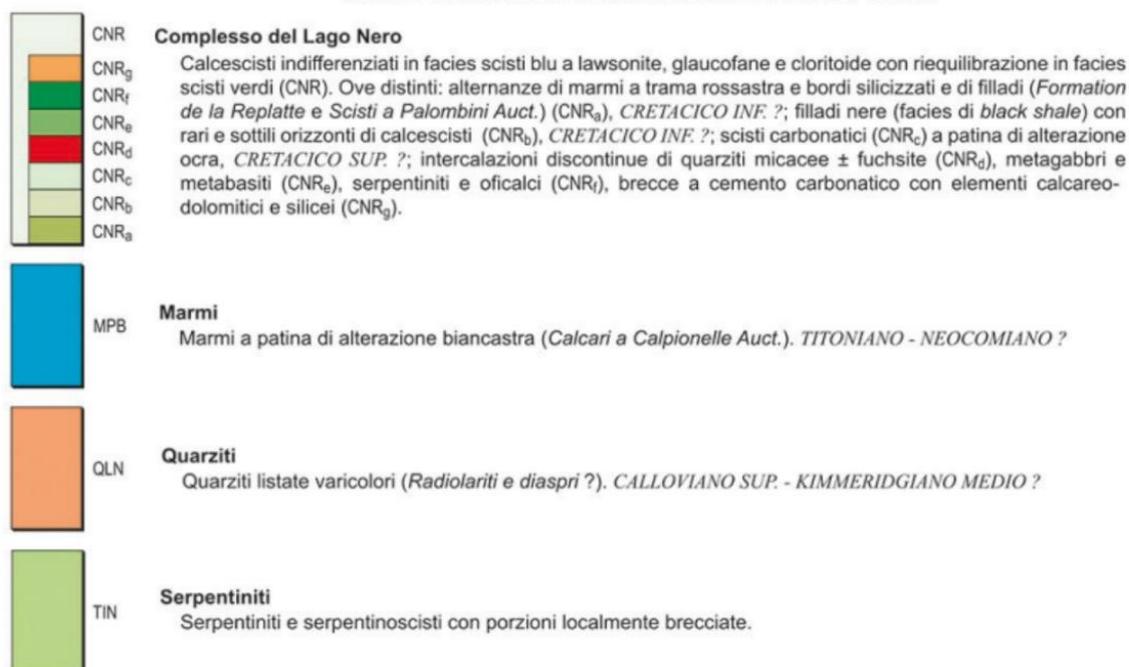


Figura 3.10 Unità tettonostratigrafica del Lago Nero. (Fonte: Carta Geologica d'Italia (Foglio 171-Cesana Torinese)).

L'altra unità facente parte del margine oceanico è il complesso del Puys (CPY), principale nucleo dell'unità Incertae Sedis (a sua volta compresa nell'unità tettono-stratigrafica del Puys-Venaus; Figura 3.11). Si tratta di una delle unità maggiormente presenti nell'area di Fenils, composta da calcescisti e subordinati marmi di origine cretacea (tra i 145 e i 65 milioni di anni).

UNITÀ INCERTAE SEDIS

UNITÀ TETTONOSTRATIGRAFICA DI PUY-VENAUS

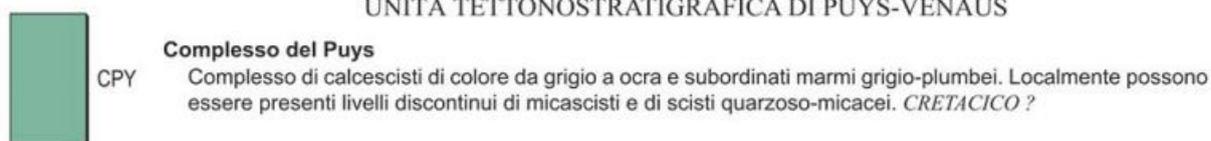


Figura 3 Unità tettonostratigrafica di Puys-Venaus. (Fonte: Carta Geologica d'Italia (Foglio 171-Cesana Torinese)).

Inoltre, nelle zone di contatto tra i due diversi margini tettonici si riscontra la presenza di gessi in grosse masse (GSE) e breccie a cemento carbonatico (BCC).

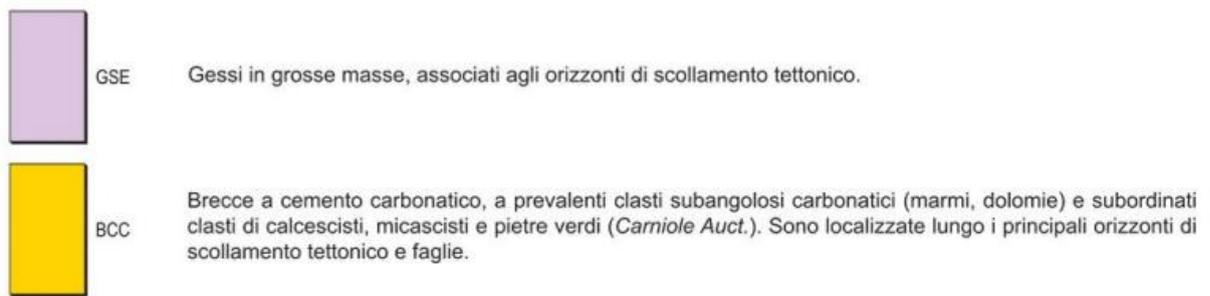


Figura 3.12 Unità tettonostratigrafica della zona di contatto. (Fonte: Carta Geologica d'Italia (Foglio 171-Cesana Torinese)).

Durante la fine del Pliocene e nel pieno del Quaternario quest'area ha subito il rimodellamento della morfologia a causa dello scioglimento dei ghiacciai e dei diversi fenomeni franosi avvenuti nel tempo, i quali hanno contribuito in maniera importante a conferire alle Alpi la forma attuale, con le valli profonde attraversate da diversi corsi d'acqua e laghi glaciali. Ovviamente, si conservano ancora oggi le tracce di questi eventi nell'area di Fenils. Più precisamente, si evidenziano depositi glaciali, detti anche till, indifferenziati (MOc1), appartenenti al supersistema del Moncenisio dell'Ultimo Massimo Glaciale. Inoltre, lungo il tratto finale del Rio Fenils si riconoscono diversi depositi torrentizi ghiaioso-sabbiosi (CSN2b), appartenenti al Subsistema di Crescentino (facente parte del più ampio Sistema di Palazzolo) e derivanti molto probabilmente da fenomeni di debris flow, avvenuti già nell'ultimo periodo del Pleistocene e durante tutto il Quaternario. Infine, sono presenti numerosi depositi di frana, identificate sia come unità ubiquitarie in formazione (UIDa3 e UIDb2), sia come unità completamente formate (UINa1).

SUCCESSIONE PLIOCENICO - QUATERNARIA

Unità ubiquitarie in formazione

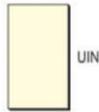
Coltre colluviale e detritico-colluviale a spese essenzialmente di substrato particolarmente degradabile (UID_{b2}). Depositi caotici costituiti da clasti e blocchi eterometrici con matrice sabbioso-siltosa in percentuali variabili; ammassi rocciosi costituiti da porzioni di substrato rilasciato e disarticolato anche di cospicue dimensioni (depositi di frana) (UID_{a1}). Sedimenti con tessitura aperta e parzialmente aperta, costituiti da clasti e blocchi angolosi e subordinata matrice sabbioso-siltosa e sabbioso-ghiaiosa (depositi detritici) (UID_{a3}). Accumuli caotici di blocchi con struttura parzialmente aperta passanti a *diamicton* a matrice siltoso-sabbiosa con clasti e blocchi eterometrici (*till* indifferenziato della Piccola Età Glaciale) (UID_{e1}). Accumuli caotici di clasti e blocchi angolosi con tessitura aperta e parzialmente aperta, poggianti su *diamicton* con matrice prevalentemente siltoso-sabbiosa e ghiaccio (depositi di *rock glacier*) (UID_{c7}). Alternanza di livelli siltoso-argillosi grigio-azzurrognoli e di livelli torbosi con scarsa frazione minerale (depositi palustri e di torbiera) (UID_s). Concrezioni carbonatiche massive e/o stratificate e breccie di versante a cemento carbonatico (travertini) (UID_{t1}). Accumuli di origine antropica (UID_h). *PLEISTOCENE SUP. - ATTUALE*



UID

Unità ubiquitarie completamente formate

Depositi caotici costituiti da clasti e blocchi eterometrici con matrice siltoso-sabbiosa (depositi di frana) (UIN_{a1}). Accumuli caotici di clasti e blocchi angolosi con tessitura aperta e parzialmente aperta, poggianti su *diamicton* con matrice prevalentemente siltoso-sabbiosa (depositi di *rock glacier*) (UIN_{c7}). Concrezioni carbonatiche massive e/o stratificate e breccie di versante a cemento carbonatico (travertini) (UIN_{t1}). *PLEISTOCENE SUP. - OLOCENE*



UIN

SINTEMA DI PALAZZOLO

Subsistema di Crescentino

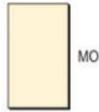
Depositi ghiaioso-sabbiosi a supporto di clasti con subordinata presenza di blocchi e stratificazione mal espressa (depositi torrentizi e di *debris flow*) (CSN_{2b}). Sedimenti sabbiosi, sabbioso-ghiaiosi e ghiaiosi stratificati con intercalazioni di sabbie siltose e silt a laminazione piano-parallela e incrociata (depositi lacustri) (CSN_{2e2}). *Diamicton* con matrice sabbioso-siltosa e clasti da angolosi a subangolosi, localmente contenente livelli con struttura parzialmente aperta (depositi misti) (CSN₂). *PLEISTOCENE SUP. - OLOCENE*



CSN₂

SUPERSINTEMA DEL MONCENISIO

Diamicton con clasti e blocchi eterometrici da subangolosi a subarrotondati, talvolta sfaccettati levigati e striati, immersi in una matrice siltoso-sabbiosa variamente addensata (*till* indifferenziato) (MO_{c1}). *Diamicton* con clasti e blocchi da subarrotondati ad arrotondati, sfaccettati, levigati e striati, immersi in un'abbondante matrice siltosa e siltoso-sabbiosa molto addensata (*till* di alloggiamento) (MO_{s4}). Accumuli caotici di blocchi da angolosi a subangolosi, frammisti a una matrice siltoso-sabbiosa addensata (*till* di ablazione) (MO_{c5}). Alternanza di livelli centimetrico-decimetrici di sabbie e sabbie siltose a laminazione piano-parallela (depositi glacialacustri) (MO_{s6}). *PLEISTOCENE SUP. - OLOCENE*



MO

Figura 3.13 Successione Pliocenico-Quaternaria. (Fonte. Carta Geologica d'Italia (Foglio 171-Cesana Torinese)).

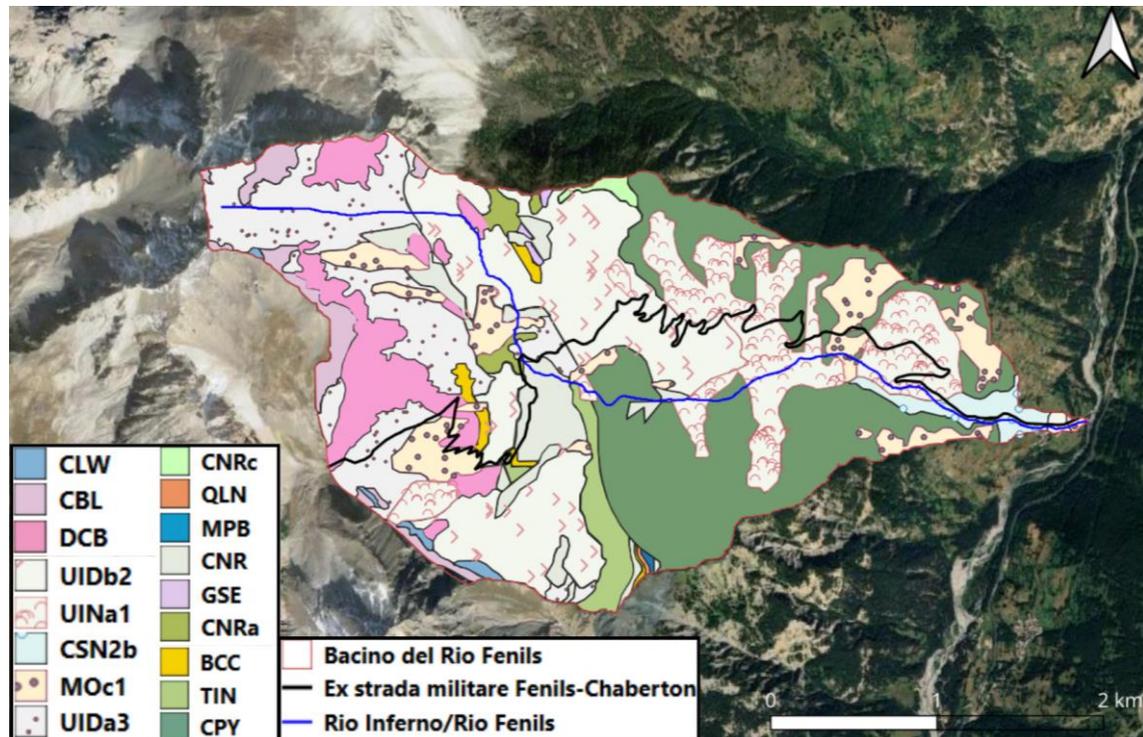


Figura 3.14 Inquadramento geologico dell'area con tutte le unità tettono-stratigrafiche riportate.

3.4 LE PROBLEMATICHE DI SITO E LA EX STRADA MILITARE DELLO CHABERTON

L'intera area montana dell'Alta Valle di Susa è frequentemente soggetta a fenomeni di colate di detrito. Buona parte del sito di Fenils è caratterizzato da pareti rocciose fratturate molto acclivi e ben segnate da canali creatisi durante eventi passati (Figura 3.15). Nella parte più alta dell'area di studio le pareti si rompono, dando inizio a fenomeni di caduta massi, i quali si accumulano alla base dei pendii, dopo aver percorso gli alvei dei corsi d'acqua spesso in secca. L'accumulo di materiale costituisce, accompagnato dalle intense precipitazioni, uno dei principali fattori d'innesco di debris flow riattivando le azioni di modellamento e ampliamento degli alvei già interessati da eventi passati.



Figura 3.15 Ripresa del bacino del Rio Fenils, in seguito all'evento temporalesco del 19/08/2002. (Fonte: "Eventi di piena e frana in Italia settentrionale nel periodo 2002-2004", D. Tropeano, F. Luino, L. Turconi, 2006.)

Come riportano i verbali dei sopralluoghi effettuati dal Consorzio Forestale dell'Alta Val Susa (C.F.A.V.S.) questi eventi si ripetono con cadenza annuale, quasi sempre nel periodo estivo, in seguito alla fusione nivale e innescati da eventi temporaleschi più o meno intensi.

Nel presente lavoro di tesi si analizza, in particolare, quanto questo tipo di eventi hanno influenzato (e influenzano ancora oggi) la ex Strada Militare dello Chaberton o Strada Militare Val Morino (Figura 3.16).

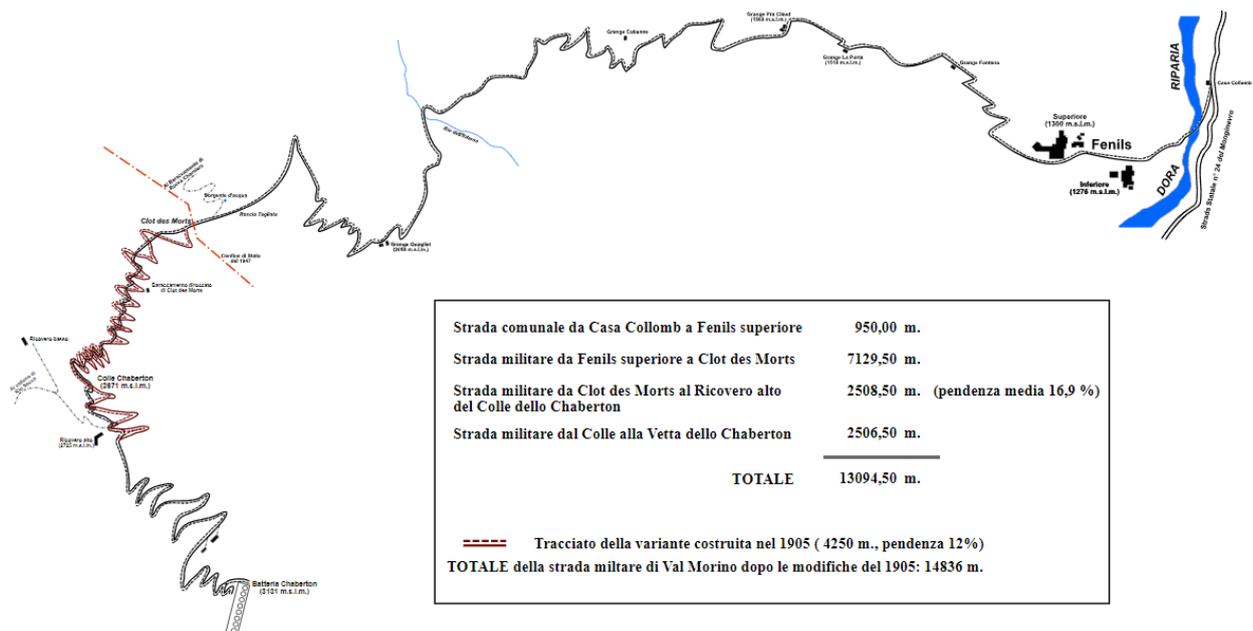


Figura 3.16 Tracciato della Strada Militare dello Chaberton. (Fonte: www.wikipedia.it)

La strada fu costruita dal Regio Esercito a partire dal 1898, per collegare il fondovalle e l'abitato di Fenils alla Batteria dello Chaberton, posta in vetta all'omonimo monte e ancora oggi fortificazione militare più alta d'Europa. I lavori si conclusero definitivamente nel 1910, ma già nel 1906 la batteria fu armata e la strada trafficata dai militari e dai loro mezzi a motore, anche se durante la Prima guerra mondiale fu disarmata e il presidio venne sospeso fino alla fine delle ostilità. Il forte fu, inoltre, attivo per la prima volta nel 1940 in occasione del bombardamento di alcuni obiettivi militari francesi, subendo diversi danneggiamenti. Fu, infine, abbandonato dai militari in seguito alla fine della Seconda guerra mondiale. In tempi più recenti la strada è spesso frequentata da escursionisti, bikers o appassionati di trekking e, ormai già dal 1987, è proibito l'accesso alla strada tramite mezzi a motore, a causa delle frane sempre più frequenti lungo tutto il suo percorso, che ne hanno ridotto notevolmente la carreggiata. Attualmente la strada è asfaltata soltanto fino all'abitato di Fenils e, una volta superato questo, inizia il tratto sterrato che continua in buone condizioni fino alla località Grange Pra Claude. Poco più avanti però, in prossimità dell'attraversamento della stessa da parte del Rio Inferno, la strada si interrompe bruscamente in un punto diventato ormai critico e soggetto a eventi franosi ed erosivi, innescati principalmente da debris flow (in Figura 3.17 l'evento del luglio 2019). Ad oggi la strada è chiusa al transito in questo punto ed è impossibile raggiungere la vetta percorrendo questa via, se non a piedi aggirando tale ostacolo.



Figura 3.17 Debris flow del 01/07/2019 che ha causato l'interruzione della ex Strada Militare dello Chaberton in prossimità dell'attraversamento del Rio Inferno. (Fonte: foto del Consorzio Forestale Alta Valle di Susa)

La strada è fiancheggiata da muretti in pietrame a secco, parzialmente divelti, fino alla località Grange Quagliet, oltre la quale le condizioni continuano a peggiorare. Da qui in poi cominciano una serie di tornanti che portano fino al Colle dello Chaberton (2670 m s.l.m.), che rappresentano un secondo punto critico non indifferente (Figura 3.18). La maggior parte di questi tornanti sono franati a causa della circolazione idrica superficiale, dalle valanghe e delle rocce friabili che caratterizzano il massiccio montuoso e i fenomeni più frequenti in questo tratto sono principalmente crolli e caduta di massi (Figura 3.19).



Figura 3.18 Veduta dei tornanti che portano al Colle dello Chaberton. In alto sulla destra si notano i fenomeni di crollo che franano sui versanti. (Foto scattata da drone del CFVAS)



Figura 3.19 Ultimo dei tornanti colpito da fenomeni di crollo. (Foto scattata da drone CFVAS)

4. EVENTI STORICI CHABERTON RIO FENILS-RIO INFERNO

4.1 1708-1999

A partire dal XVIII secolo fino al nuovo millennio sono stati documentati da ISPRA e ARPA (nel progetto CARG-Foglio Cesana Torinese) diversi eventi alluvionali nel settore della Dora di Cesana, con particolare riferimento a quelli riguardanti il Rio Fenils. Si tratta di eventi che hanno causato fenomeni di instabilità lungo il reticolato idrografico principale (Dora Riparia) e quello affluente (Rio Fenils), con danni sia al tessuto urbano che alla viabilità. La maggior parte degli eventi si è registrato nel periodo estivo, compreso tra maggio e agosto, con picchi di frequenza nei mesi di luglio e agosto. Spesso l'origine degli eventi è dovuta a precipitazioni brevi o intense che hanno generato fenomeni torrentizi e di trasporto solido in massa (debris flow), soprattutto lungo i reticolati secondari (come, ad esempio, nel settembre 1920 o nell'agosto 1998). Altre volte si è trattato di fenomeni originatisi in seguito a eventi meteorici più estesi, che hanno colpito più aree del Piemonte. Gli effetti morfologici lungo il reticolato idrografico principale, maggiormente evidenziati in seguito agli eventi, sono riconducibili a fenomeni di erosione spondale, alluvionale o divagazione dell'alveo lungo le fasce fluviali fino a fondovalle. Mentre i danni principali si riscontrano alla viabilità o alle opere di difesa e in alcuni casi anche agli edifici. Invece, gli effetti morfologici riscontrati nei confronti del reticolato idrografico affluente sono da ricondurre principalmente a fenomeni di debris flow o mud flow, con danni arrecati, anche in questo caso, a infrastrutture viarie e strade ex militari o di servizio.

La documentazione degli eventi fino al XX secolo, riassunta in Tabella 4.1, è caratterizzata da lacunosità delle fonti storiche con limitazione dei dettagli, riservati principalmente agli effetti sulle aree più urbanizzate. Questo è il motivo principale dell'apparente incremento del numero di eventi che sono sempre stati presenti ma precedentemente meno documentati. Oltre che gli archivi di ISPRA e ARPA sono stati consultati anche testi di alcuni autori del CNR, come Tropeano e Turconi (2002), che per anni hanno analizzato gli eventi dell'area interessata e diversi articoli di giornali locali.

1708

Il 17 agosto “un furioso temporale si scatenò sulle alture di Sestrières”. Nello spazio di un'ora furono travolti alberi, una decina di case da Bousson a Cesana, i ponti di Cesana, di Fenils, di Ventoux, di Exilles, il ponte provvisorio dell'Ange Gardien [a Oulx] (Bogge, 1975).

(Fonte: Tropeano D., Turconi L., 2002, L'evento del 13 giugno 2000 nelle Alpi Occidentali: effetti sui versanti e nella rete idrografica)

1957

Il 13-14 giugno “un’alluvione disastrosa ha sconvolto ieri notte e questa mattina la Val di Susa. Nessuno si ricorda qualcosa di simile. Nel 1920 c’era stata una piena, ma l’acqua si era limitata a riempire qualche cantina...Ieri la Dora più che acqua pareva portasse fango, la fiumana travolgente era così torbida e pesante che le ondate accavallandosi o frantumandosi neppure spumeggiavano. Aveva un colore marrone scuro e portava con sé la terra..., alberi...detriti” (*La Gazzetta del Popolo, venerdì 14 giugno 1957*).

[...]

“Le acque del Rio Grande Côte...a valle di Cesana...hanno interrotto il transito sulle strade di allacciamento alle frazioni Solomiac-Mollières e della frazione Fenils alla statale n. 24, asportando ponti o danneggiandoli gravemente” (GC TO, Relazione di perizia n. 7048, 23 agosto 1957).

(Fonte: Tropeano D., Turconi L., 2002, L’evento del 13 giugno 2000 nelle Alpi Occidentali: effetti sui versanti e nella rete idrografica)

1987

Il 24 agosto è stato effettuato un “pronto intervento” in località Fenils, come risulta da segnalazione danni da parte del Comune di Cesana alla Regione Piemonte, a seguito di piene torrentizie, come anche riferito da segnalazioni della Comunità Montana.

(Fonte: Tropeano D., Turconi L., 2002, L’evento del 13 giugno 2000 nelle Alpi Occidentali: effetti sui versanti e nella rete idrografica)

1990

3 agosto. In sponda sinistra della Dora di Cesana, un muddy debris flow ha interessato Rio di Fenils, asportando la passerella di collegamento con quell’abitato (IRPI).

(Fonte: Tropeano D., Turconi L., 2002, L’evento del 13 giugno 2000 nelle Alpi Occidentali: effetti sui versanti e nella rete idrografica)

1998

16 agosto. Colate di detrito lungo la falda meridionale del Monte Chaberton, con interruzione della S.S. 24. Nuovi fenomeni di massa lungo l’incisione torrentizia del Grand Vallon (Tropeano D. e Turconi L., 1998).

(Fonte: Tropeano D., Turconi L., 2002, L’evento del 13 giugno 2000 nelle Alpi Occidentali: effetti sui versanti e nella rete idrografica)

1999

21 luglio. Debris flow lungo il Rio Fenils (Dott. A. Dotta, Consorzio Forestale alta Valle Susa, comunicazione personale).

(Fonte: Tropeano D., Turconi L., 2002, *L'evento del 13 giugno 2000 nelle Alpi Occidentali: effetti sui versanti e nella rete idrografica*)

Tabella 4.1 Cronologia degli eventi alluvionali nel bacino del Rio Fenils dal XVIII secolo al 1999. (Tipo: P=piena torrentizia; DF=debris flow e/o mud flow. Effetti: E=erosione; Al=alluvionamento. Danni: V=viabilità; E=edifici)

DATA	COMUNE	LOCALITA'	BACINO	TIPO	EFFETTI	DANNI
17/08/1708	Cesana	Fenils	F. Dora Riparia	P	-	V
		Fenils	R. di Fenils ?	P	E	E
Jun-10	Cesana	Fenils	R. Fenils	P	-	V
Jul-19	Cesana	Chaberton	-	DF	Al	V
24/09/1920	Cesana	Fenils	R. Fenils	P	E	V
04-05/09/1948	Cesana	Fenils	Dora Riparia o R. Fenils	P	E	V
13-14/06/1957	Cesana	Fenils	Rio Grande Côte	P	Al	V
24/08/87	Cesana	Fenils	R. Fenils	DF	Al	V
03/08/1990	Cesana	Fenils	R. Fenils	DF	Al	V
21/07/1992	Cesana	Fenils	R. Fenils	DF	Al	-
16/08/1998	Cesana	M. Chaberton	-	DF	Al	V
21/07/1999	Cesana	Fenils	R. Fenils	DF	Al	-

4.2 2002-2019

Gli eventi avvenuti a partire dal 2002 sono stati raccolti tramite i verbali dei sopralluoghi effettuati dal Consorzio Forestale dell'Alta Val Susa (C.F.V.A.S.) e attraverso alcuni report storici e scientifici che ne hanno descritto gli effetti. In seguito, si riporta una sintesi dei fenomeni più impattanti di questo periodo storico.

2002

Un nubifragio ha interessato l'alta Valle di Susa, in particolare il settore montano afferente al M. Chaberton, ricorrentemente soggetto a fenomeni d'instabilità di versante e torrentizia che nella stagione estiva minacciano infrastrutture stradali e la sicurezza della popolazione, soprattutto fluttuante, che frequenta la zona. L'IRPI/CNR di Torino osserva dal 1990 tali processi nell'area citata, che hanno sinora offerto una casistica varia di situazioni, che sempre però rispecchiano uno stesso schema evolutivo e uno scenario replicante di effetti.

Quasi sempre alle piene del T. Grand Vallon sono abbinati fenomeni analoghi, a maggiore componente sabbioso-limosa (muddy-debris flow) lungo l'adiacente Rio di Fenils, che scorre in prossimità dell'omonimo abitato. Dal luglio 2001 è operante una stazione meteo-pluviometrica in alta quota (2250 m s.l.m.) sulla Cresta Nera, spartiacque tra i bacini del Grand Vallon e del Rio di Fenils, in posizione baricentrica ottimale per l'area in esame per le distanze subchilometriche dai settori di testata dei diversi impluvi suscettibili di produrre debris flow. Da diversi anni viene inoltre effettuato il monitoraggio dell'evoluzione geomorfologica, a piccola e grande scala, dei diversi fattori di «squilibrio» ambientale nell'area.

La sera del 19 agosto uno scroscio piovoso di particolare intensità (32 mm valutati in circa 40'), è stato registrato tra le ore 19 e le 20 (ora legale) alla stazione sopradetta. Tale situazione è stata verosimilmente favorita da celle temporalesche createsi anche per contrasto termico al suolo. In risposta più tardiva allo scroscio, giustificata dalle maggiori dimensioni del bacino idrografico, una colata fangoso-detritica, innescatasi nel tributario sinistro ed in zona prossimale alla cresta, discendeva lungo il Rio Fenils, occupando le piene rive del torrente e sfiorando la travata del ponte che immette nella frazione Vernin, in destra del torrente, ricostruito dopo che la piena dell'agosto 1990 aveva sormontato e distrutto il precedente in travatura di ferro e legname. Anche in questo caso i segni inequivocabili dei depositi residui dimostrano che per pochi decimetri il flusso non è fuoruscito dalle sponde. All'arrivo del primo fronte di colata, intorno alle ore 19:30, ne ha fatto seguito uno successivo dopo diversi minuti, con trascinamento di piante ed arbusti. Il tutto si è protratto per circa 35 minuti. La scogliera in destra, appena a valle dell'attraversamento centrale della frazione Vernin, a massi ciclopici subarrotondati e sovrapposti a scarpa verticale, poggianti direttamente sul fondo alveo, è stata in parte scalzata alla base.



Figura 4.1 Torrente Gran Vallon alla confluenza con la Dora Riparia di Cesana (19/08/2002).

Fonte: (Eventi di piena e frana in Italia settentrionale nel periodo 2002-2004, D. Tropeano, F. Luino, L. Turconi, 2006)

Il 23 agosto è stato compiuto un sopralluogo sul Rio Manet e a Fenils: a Fenils il trasporto solido del torrente risulta essere formato essenzialmente da materiali di granulometria media, ghiaie e ciottoli, con sporadici massi, alcuni dei quali strappati dalle scogliere a difesa dell'abitato. Anche in questo caso la velocità della piena è stata notevole e ha aggravato ulteriormente le erosioni presenti sulla sponda destra. Sulle sponde è ben evidente la traccia lasciata della piena, che in alcuni casi è giunta a pochi centimetri dall'orlo.

(Verbale di sopralluogo 12/2002, CFAVS, 23/08/2002)

2004

Il Rio Fenils, tributario di sinistra della Dora Riparia (Comune di Cesana t.se), è stato interessato nella notte tra venerdì 6 e sabato 7 agosto 2004 da un processo di trasporto in massa di tipo mud-debris flow ("colata di fango e detriti"). In base alle testimonianze di alcuni residenti della località Fenils, ubicata in area di conoide, il fenomeno si è verificato tra le ore 23:00 e le 24:00 (ora legale), caratterizzato da pulsazioni in cui la massa viscosa "rallentava la sua corsa fino quasi a fermarsi per poi ripartire con accelerazioni". Gli effetti della colata, nella lunga zona di transizione incisa in una stretta gola rocciosa fiancheggiata da coltri colluviali per lo più in frana e sovrastate da bosco di Conifere, sono stati amplificati proprio dalle anguste condizioni di deflusso in un letto roccioso a forti salti e con sostenuta pendenza, che prelude al lungo apice del conoide incuneato a quota 1400 m

s.l.m. a monte della borgata Fenils. Qui, la colata, prevalentemente contenuta all'interno delle sponde incise, è fuoriuscita dall'alveo del torrente in corrispondenza di due briglie alla quota 1370 m s.l.m. (al primo tornante della carrareccia per la località Pra Claud, a monte dell'abitato di Fenils), rientrandovi immediatamente a valle delle briglie stesse, dove si è formato un primo lobo frontale di deposito di materiale anche molto grossolano ma pur sempre eterogeneo, con massi isolati dell'ordine di diversi m³ che si sono aggiunti ad altri già in precedenza depositati. Più a valle, con esatta replica di quanto osservato altre volte, il fronte della massa detritica, stimata approssimativamente un migliaio di m³, si è poi arrestato, disponendosi a ventaglio, alla confluenza con la Dora di Cesana generando un modesto invaso, per riflusso, nell'asta principale. Non sono state osservate erosioni laterali e di fondo lungo il canale principale in conoide ed i depositi in alveo risultano alquanto scarsi, costituiti essenzialmente da patine (potenti al massimo pochi centimetri) prevalentemente limoso-sabbiose sulle sponde e localizzati lembi ghiaioso-sabbiosi nel canale. Le tracce del passaggio della colata ed i depositi riscontrati nei settori di canale a bassa pendenza permettono di definirne la composizione costituita da ghiaie (clasti di dimensioni prevalenti di circa 5÷20 cm) in matrice limoso-sabbiosa di colore grigio, mentre, in misura minore, sono presenti nel canale attivo blocchi di dimensioni maggiori. Alcuni tronchi sono stati osservati in corrispondenza e poco a valle della zona di confluenza con la Dora, e occasionalmente lungo l'asta torrentizia, a monte della borgata di Fenils. Inoltre, il sopralluogo ha permesso di evidenziare che alcune briglie in legno e pietrame, poste in corrispondenza di un importante fenomeno gravitativo sul versante destro del Rio Fenils, risultano pesantemente danneggiate.



Figura 4.2. Confluenza del Rio Fenils nella Dora Riparia di Cesana, in seguito all'evento del 07/08/2004.

(Eventi di piena e frana in Italia settentrionale nel periodo 2002-2004, D. Tropeano, F. Luino, L. Turconi, 2006)

2013

A seguito delle precipitazioni piovose della settimana 15-19 luglio si è verificato lungo il torrente un fenomeno di lava torrentizia, che non ha interessato in maniera significativa il canale in conoide e quindi l'abitato di Fenils. Il sopralluogo ha permesso di accertare che la colata ha raggiunto una altezza di circa m 2 lungo entrambe le sponde (Figura 4.3) e si notano in alveo alcuni depositi torrentizi composti da ciottoli di dimensioni decimetriche e pluricentriche in scarsa frazione ghiaioso-sabbiosa. In corrispondenza delle sponde si nota, invece, la prevalenza di depositi fini sabbioso-limosi. La briglia in legname e pietrame a quota 1595 m s.l.m. risulta integra e in ottime condizioni statiche (Figura 4.4), mentre è risultata danneggiata la copertina del coronamento di una briglia più a valle (Figura 4.5).



Figura 4.3 Condizioni dell'alveo del Rio Fenils in seguito all'evento del 2013, con riferimento alla quota massima raggiunta dalla colata.



Figura 4.4 Briglia in buone condizioni lungo il Rio Fenils, dopo l'evento del 2013.



Figura 4.5 Briglia danneggiata nel settore di Grangia Selleta, in seguito al trascinarsi di blocchi di dimensioni centimetriche.

(Verbale di sopralluogo 48/2013, CFAVS, 25/07/2013)

2015

Il 17 luglio 2015 alle ore 16-18:00 circa, a seguito di un temporale serale si sono originate colate detritiche lungo il rio Fenils in Cesana Torinese. Il Rio Fenils è stato percorso da un debris flow che ha depositato detriti essenzialmente ghiaiosi lungo l'asta in conoide, creando accumuli di spessore localmente anche di 3 m, che si sono esauriti prima di giungere alla confluenza con la Dora. In corrispondenza dell'apice del conoide le acque sono leggermente esondate in sinistra (Figura 4.6).



Figura 4.6 Alveo del rio Fenils, in seguito all'evento del 17/07/2015.

(Verbale di sopralluogo 27/2015, CFAVS, 23/07/2015)

2017

Venerdì 21 luglio 2017, lungo il Rio Fenils è transitata una lava torrentizia di notevoli proporzioni, innescata da una cella temporalesca che ha scaricato circa 18 – 20 mm di acqua nel bacino idrografico del torrente. La lava torrentizia ha percorso a velocità elevata il tratto compreso tra l'apice del conoide e la confluenza con il torrente Dora, dove si è depositata un'ingente quantità di detriti (Figura 4.7). Questi ultimi, di media e grossa pezzatura, hanno causato danni strutturali alla gaveta e alle ali della prima briglia in legno a valle della strada in località Sellette (Figura 4.8). È stato segnalato, inoltre, lo sradicamento laterale, con trasporto, di elementi della palificata di contenimento del versante in destra idrografica.



Figura 4.7 Area di conoide formatasi alla confluenza tra il Rio Fenils e la Dora Riparia.



Figura 4.8 Briglia in legno danneggiata in località Sellette.

In seguito al sopralluogo, si è proposta la rimozione del materiale inerte presente in alveo e tra le briglie e il trasporto dello stesso in un altro sito, suggerendo un tratto in destra idrografica della Dora Riparia in località Mollieres (Figura 4.9). È stato richiesto, inoltre, l'intervento di manutenzione per la

briglia in legname danneggiata e la rimessa in sicurezza della scogliera in destra idrografica, nei pressi del ponte Vernin.

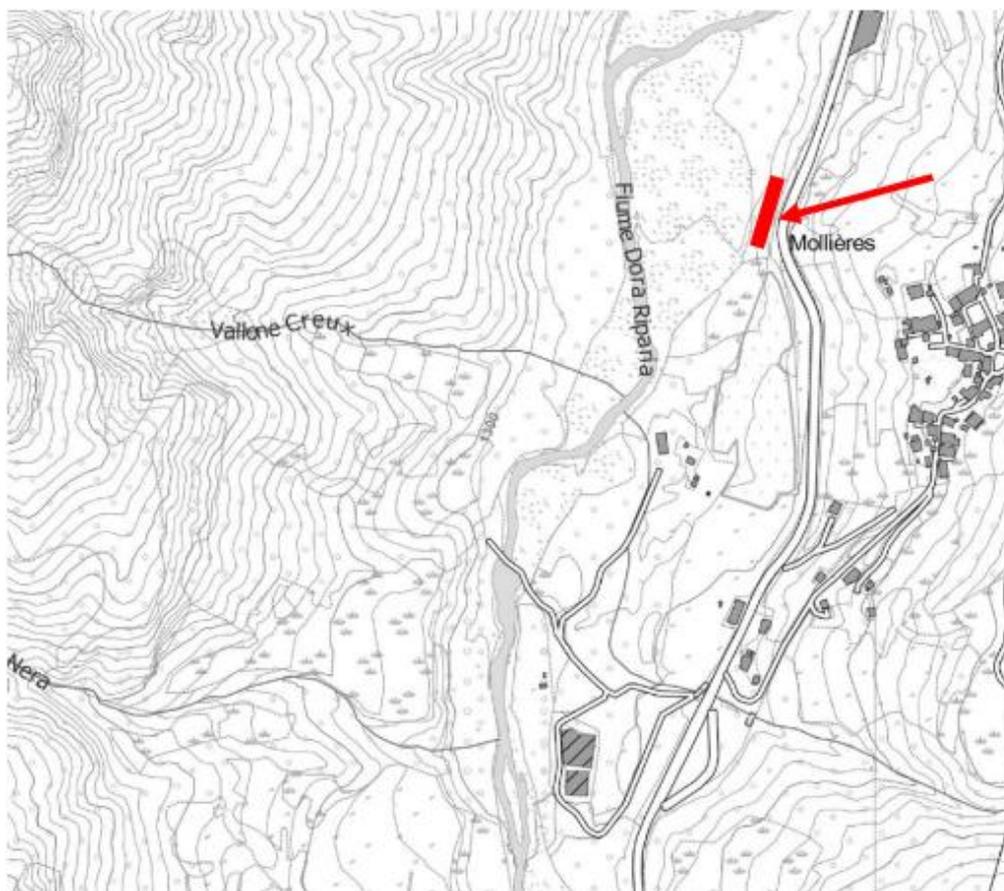


Figura 4.9 Sito suggerito per la ricollocazione del materiale disalveato.

(Verbale di sopralluogo 2065/2017, CFAVS, 22/07/2017)

2019

Le forti precipitazioni che hanno interessato l'alta Valle Susa il 1° luglio 2019, con l'innescò di una ondata di debris flow che ha interessato l'abitato di Fenils, hanno causato il cedimento della carreggiata dell'ex Strada Militare dello Chaberton (Figura 4.10), in prossimità dell'attraversamento del Rio Inferno. Il passaggio della colata detritica ha asportato il guado del Rio Inferno e le falde detritiche e i canali presenti in destra orografica si sono attivati, determinando il cedimento del sedime stradale in più punti (Figure 4.11 e 4.12).

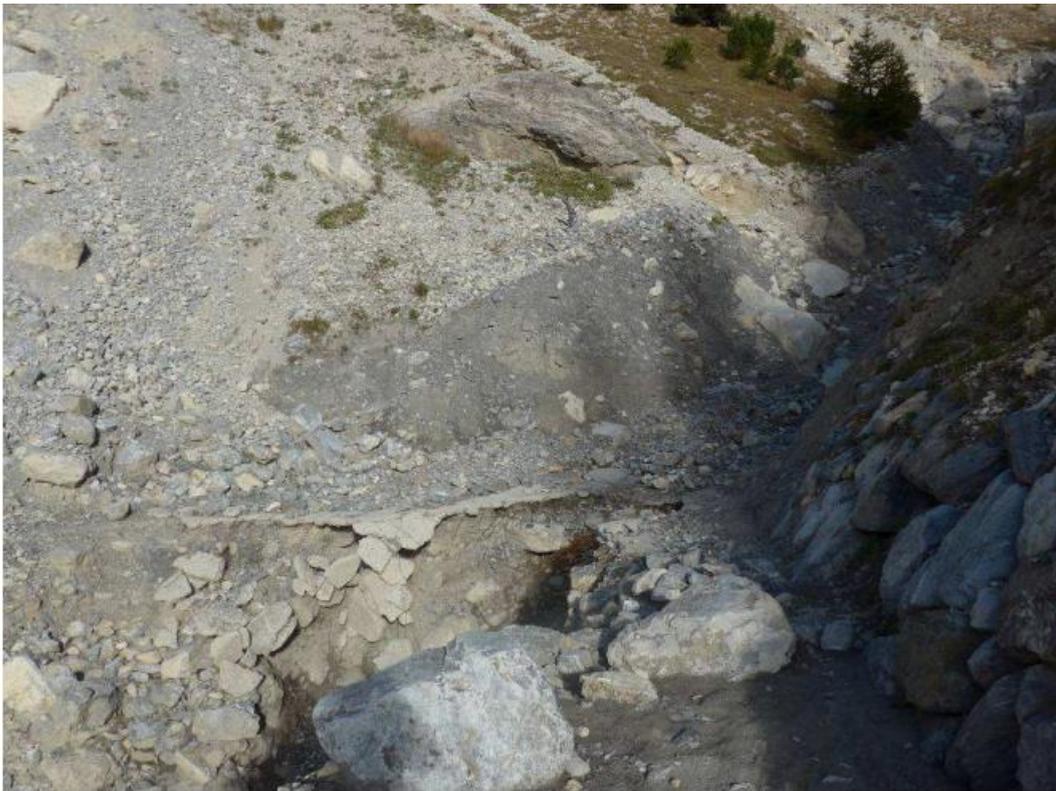


Figura 4.10 Sedime stradale devastato dal debris flow del 01/07/2019.



Figura 4.11 La ex strada militare interrotta dalla colata detritica in corrispondenza dell'attraversamento del Rio Inferno.



Figura 4.12 Colate detritiche anche sul tratto successivo della strada militare, dopo l'attraversamento del Rio Inferno.

Questo evento rappresenta uno dei più gravi e impattanti fenomeni sul bacino del Rio Fenils, andando a distruggere completamente, o quasi, anche i muri in pietrame a valle e a monte della strada (Figura 4.13). In seguito a questo evento la strada è stata chiusa e l'accessibilità è sospesa ancora oggi, avendo peraltro subito nuovi fenomeni più recenti.

(Verbale di sopralluogo 97/2019, CFAVS, 02/10/2019)



Figura 4.13 Muri in pietra sommersi dalla colata detritica del 01/07/2019.

In Tabella 4.2 si riporta una sintesi analoga a quella già vista all’inizio del capitolo per gli eventi fino al 1999, che riassume tipologia, effetti e danni degli eventi avvenuti a partire dal 2002.

Tabella 4.2 Cronologia degli eventi alluvionali nel bacino del Rio Fenils a partire dal 2002. (Tipo: P=piena torrentizia; DF=debris flow e/o mud flow. Effetti: C=Collasso di sbarramento fluviale; E=erosione; Al=alluvionamento; S=sbarramento fluviale. Danni: V=viabilità; D=opere di difesa)

DATA	COMUNE	LOCALITA'	BACINO	TIPO	EFFETTI	DANNI
30/07/2002	Cesana	M. Chaberton	-	DF	Al	V
19/08/2002	Cesana	M. Chaberton	-	DF	Al	V
6/8/2004	Cesana	Fenils	R. Fenils	DF	Al,S	D
15/07/2013	Cesana	Fenils	R. Fenils	P	E	D
17/07/2015	Cesana	Fenils	R. Fenils	DF	E,S	-
21/07/2017	Cesana	Fenils	R. Fenils	P, DF	E	D
1/7/2019	Cesana	Fenils	R. Fenils/R. Inferno	DF	E,C,S	V,D

4.3 SITUAZIONE ATTUALE

Come detto in precedenza la strada risulta chiusa dal 2019 e, nel corso degli ultimi anni, ulteriori eventi si sono manifestati nell’area in esame contribuendo al peggioramento delle condizioni del

sito. Ogni anno si verificano costantemente fenomeni di debris flow lungo il Rio Inferno, fino a proseguire per tutto il corso del Rio Fenils e la ex strada militare risulta ormai cancellata dalle colate nel tratto in cui si incrocia con il corso d'acqua. Inoltre, le continue colate hanno causato anche alcune frane superficiali e contribuito all'erosione al piede dei versanti (Figura 4.14). La situazione attuale è testimoniata da diverse immagini scattate dal drone del CFVAS nel corso di alcuni sopralluoghi del 2023 e del 2024 e, di seguito, ne sono riportate alcune.

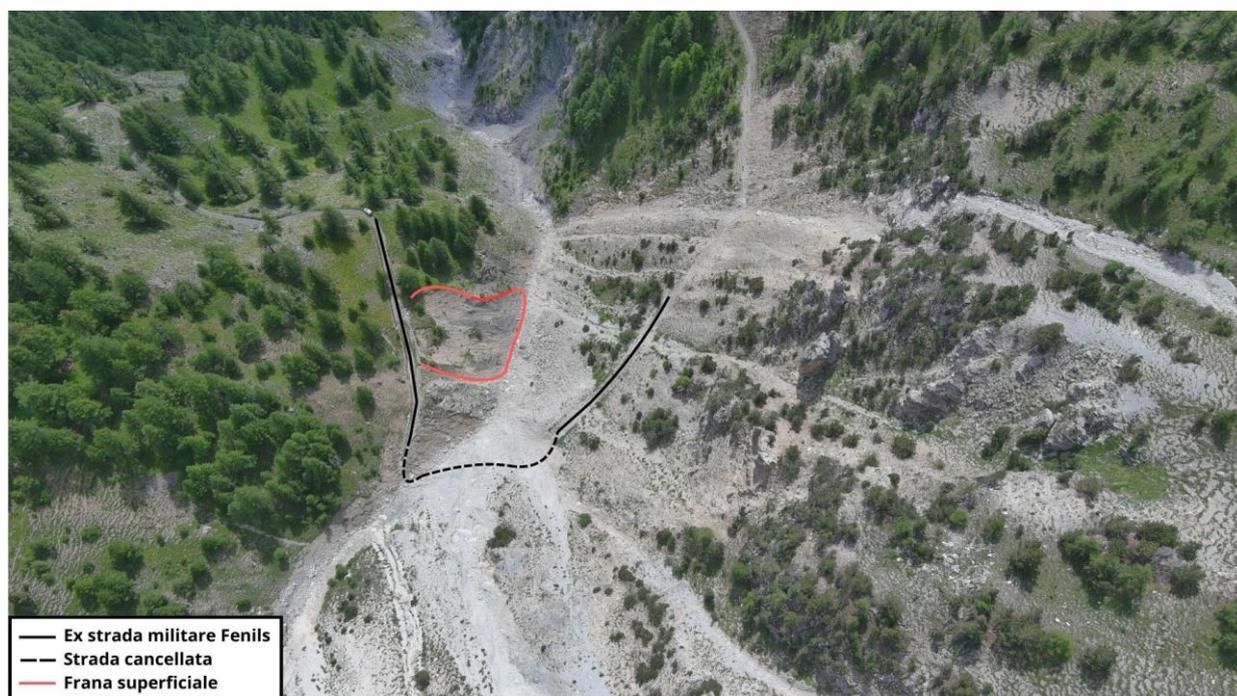


Figura 4.14 Vista verso valle della strada militare attraversata dalle colate detritiche. (Foto del 13/07/2023 scattata dal drone CFVAS – per gentile concessione di Federico Morra di Cella – presidente CFVAS)



Figura 4.15 Vista frontale del debris flow sul Rio Inferno che attraversa la strada. (Foto del 13/07/2023 scattata dal drone CFVAS – per gentile concessione di Federico Morra di Cella – presidente CFVAS)



Figura 4.16 Vista frontale del debris flow sul Rio Inferno che attraversa la strada. (Foto del 13/07/2023 scattata dal drone CFVAS – per gentile concessione di Federico Morra di Cella – presidente CFVAS)



Figura 4.17 Depositi a monte del Rio Inferno, nell'area d'innescò delle colate. (Foto del 13/07/2023 scattata dal drone CFVAS – per gentile concessione di Federico Morra di Cella – presidente CFVAS)



Figura 4.18 Vista aerea del sottobacino del Rio Inferno. (Foto del 30/05/2024 scattata dal drone CFVAS – per gentile concessione di Federico Morra di Cella – presidente CFVAS)



Figura 4.19 Vista dall'alto dell'area critica. (Foto del 30/05/2024 scattata dal drone CFVAS – per gentile concessione di Federico Morra di Cella – presidente CFVAS)

5. SUSCETTIBILITA'

5.1 VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Le colate di detrito, come già accennato, rappresentano uno dei fenomeni più frequenti in ambito montano e con un livello di rischio tra i più elevati a causa dell'alta energia d'impatto che essi trasferiscono negli ostacoli che vi si pongono davanti e delle caratteristiche dei flussi in azione. Inoltre, la poca prevedibilità di questi fenomeni contribuisce ad aumentare il loro livello di pericolosità, ossia la probabilità che un evento di una determinata intensità possa avvenire in un determinato luogo e in un determinato periodo di tempo (Varnes, 1984).

La pericolosità rappresenta uno dei tre elementi principali, assieme alla vulnerabilità e all'esposizione, che permettono l'identificazione del rischio. Infatti, quest'ultimo indica il numero atteso di vittime e danni in seguito ad un evento di una certa intensità, e varia a seconda dell'importanza che i tre parametri assumono in quel determinato evento. Se la pericolosità rappresenta la probabilità che un certo evento avvenga, l'esposizione tiene conto degli elementi esposti nell'area soggetta all'evento, come edifici, attività e soprattutto persone. La vulnerabilità, invece, si riferisce al grado di danno che tali elementi possono subire durante il fenomeno, a seconda della tipologia e dell'intensità dello stesso e anche a seconda della loro posizione rispetto all'evento.

Per un determinato fenomeno franoso, la formulazione del rischio può essere scritta come:

$$R = P(M_i) P(X_j | M_i) P(T | X_j) V_{ij} C$$

dove R è il rischio dovuto al verificarsi di una frana di magnitudo M_i su un elemento a rischio situato a una distanza X dalla sorgente della frana. $P(M_i)$ è la probabilità di verificarsi di una frana di magnitudo M_i , mentre $P(X_j | M_i)$ è la probabilità che quella frana raggiunga un punto situato a una distanza X dalla sorgente della frana con un'intensità j. Infine, $P(T | X_j)$ è la probabilità che l'elemento si trovi nel punto X al momento del verificarsi della frana; V_{ij} è la vulnerabilità dell'elemento a una frana di magnitudo i e intensità j, e C è il valore dell'elemento a rischio (Corominas et al., 2014).

Per una migliore mitigazione del rischio diventa fondamentale effettuare un'analisi del rischio, valutando e stimando la probabilità di accadimento di un evento con conseguente probabile perdita di vite umane o di proprietà o attività economiche. In questi casi è possibile seguire l'analisi quantitativa del rischio (QRA) di colate detritiche, con lo scopo di poter pianificare eventuali azioni di soccorso e programmare interventi di tipo strutturale e non per ridurre il rischio (Zhou et al., 2022).

La QRA è una valutazione oggettiva e riproducibile, quindi i risultati si possono considerare spazialmente indipendenti e confrontabili. Solitamente quest'analisi segue le seguenti fasi:

l'identificazione dei pericoli e la loro valutazione, l'inventario degli elementi a rischio esposti, la valutazione della vulnerabilità e, infine, la stima del rischio.

Per la buona riuscita dell'analisi è indispensabile l'utilizzo e la gestione di dati territoriali e di sistemi informativi geografici da parte delle autorità e dei decisori. Essi monitorano le mappe che raffigurano le aree maggiormente colpite dai fenomeni in questione al fine di poter considerare l'applicazione dei piani di sviluppo e di mitigazione del rischio (Corominas et al., 2014).

Per poter valutare al meglio il potenziale rischio è fondamentale lo studio delle tre componenti che lo caratterizzano e, di queste, la più complessa da stimare è sicuramente la pericolosità. Questa si basa principalmente su altri tre fattori: la suscettibilità, la magnitudo e la frequenza. La suscettibilità rappresenta la probabilità di occorrenza spaziale e viene trattata in maniera più approfondita nel paragrafo successivo; la magnitudo indica l'intensità, che dipende dalla velocità del flusso e dal volume depositato e la si studia tramite modellazione numerica; la frequenza, infine, coincide con la probabilità temporale e la si ricava tramite i tempi di ritorno relativi ai fattori d'innescio, come precipitazioni e la produzione di detriti. Come si nota, i fattori di magnitudo e frequenza dipendono da variabili dinamiche, basate sui fenomeni naturali che danno inizio agli eventi di debris flow. Tuttavia, sono maggiormente difficili da stimare per via del rapido cambiamento a cui possono essere soggette nel tempo e, infatti, fanno parte dell'analisi di pericolosità vera e propria, effettuata solo dopo l'analisi preliminare di suscettibilità.

5.2 SUSCETTIBILITA'

Come appena accennato, la vera analisi di pericolosità inizia soltanto in seguito all'analisi spaziale preliminare basata sulla suscettibilità. L'analisi di suscettibilità rappresenta, dunque, il passo iniziale dell'analisi di rischio da frana, ma secondo il punto di vista della pianificazione dell'uso del suolo e della riduzione dell'esposizione del territorio può anche essere vista come punto d'arrivo (Corominas et al., 2014). Quest'analisi si basa su variabili quasi-statiche (e non dinamiche, come quella di pericolosità), dette anche fattori predisponenti, come geologia, morfologia, pendenza del sito d'interesse e la relativa rete di drenaggio.

La suscettibilità da frana descrive la possibilità che una frana avvenga in una certa area, a causa delle condizioni locali presenti. La valutazione si esegue in maniera qualitativa e quantitativa, senza tenere conto del momento in cui l'evento potrebbe avvenire (Fell et al., 2008). Più precisamente, data L una detta regione soggetta a frane, la suscettibilità S è definita come probabilità condizionata congiunta che la regione sarà interessata da future frane date le m variabili ambientali predisponenti: v_1, v_2, \dots, v_m nella stessa regione (Guzzetti et al., 2005).

$$S = P[L] \quad S = P[L|v_1, v_2, \dots, v_m]$$

Tramite l'utilizzo di mappe di suscettibilità alle colate detritiche (DFSM) si cerca di prevedere la propagazione dei fenomeni e si individua il loro andamento spaziale, per cercare di contenerne gli effetti (Chen et al., 2016). Così, si effettua una zonizzazione delle unità di terreno in base alla loro propensione a produrre debris flow, considerando le diverse caratteristiche che generano l'innescò dei fenomeni. Ogni caratteristica (geologia, geomorfologia, topografia, ecc...) ha un impatto diverso dalle altre, poiché presentano ruoli diversi nei meccanismi di cedimento e mostrano, quindi, un peso diverso a seconda del tipo di instabilità specifico.

Per l'analisi della suscettibilità si possono applicare diversi metodi, sia di tipo qualitativo che di tipo quantitativo. I primi si basano sull'inventario e sulla conoscenza ed esperienza sul campo, che permettono ai professionisti di assegnare dei pesi ai vari fattori, mentre per i secondi ci si avvale di dati e della fisica per ricavare valori numerici per stimare le probabilità di accadimento delle frane. Per ogni metodo, indipendentemente dalla tipologia, si effettuano le seguenti assunzioni di base (Guzzetti et al., 1999):

- ogni evento lascia sul terreno delle tracce caratteristiche;
- i meccanismi di innescò di un qualsiasi fenomeno franoso obbediscono a leggi fisiche;
- i dissesti futuri si verificheranno per le stesse cause di quelli passati (per gli stessi processi geologici, geomorfologici e idrologici);
- è possibile determinare la probabilità spaziale e temporale dei dissesti attraverso l'analisi dei fattori geologico-ambientali
- le unità di terreno che hanno impostazioni ambientali simili (topografia, litologia, geomorfologia, uso del suolo) hanno lo stesso grado di suscettibilità.

Generalmente i metodi presenti in letteratura vengono suddivisi in alcune categorie (Fell et al., 2008):

- Il metodo di mappatura è alla base di qualsiasi studio di pericolosità. Costituire un inventario delle frane tramite registrazioni storiche e archivi passati fornisce una distribuzione spaziale dei fenomeni, che permette di ottenere una prima idea sulla suscettibilità di un'area.
- I metodi qualitativi si fondano sulla conoscenza e l'esperienza dei professionisti sul campo per ottenere una valutazione della suscettibilità. Gli esperti esprimono i propri giudizi basandosi su variabili quasi-statiche selezionando una serie di fattori che possono causare l'instabilità, che vengono poi combinati per tracciare una mappa di suscettibilità.
- I metodi statistici, basati sui dati, correlano i fattori di instabilità con la distribuzione degli eventi franosi, tenendo conto degli approcci di analisi statistica (bivariata, multivariata, ecc...). Queste analisi permettono di effettuare delle previsioni quantitative per le aree non colpite da frane, ma che presentano condizioni geologiche, topografiche e di uso del suolo simili. Lo svantaggio del metodo è dato dalla sua forte dipendenza dalla completezza delle mappe delle frane e dalla loro qualità.

- I metodi quantitativi basati sulla fisica, detti anche deterministici, si basano sull'utilizzo dei modelli fisici e matematici per ottenere fattori di sicurezza o valori di probabilità di cedimento. Si utilizzano semplici modelli di equilibrio limite o più complessi come l'analisi cinematica, sempre dipendenti da parametri riguardanti la geometria o il terreno.

Questi metodi non sono applicabili tutti allo stesso modo e alla stessa scala di analisi, perché sono diversi i requisiti di dettaglio richiesti. Infatti, i metodi statistici possono essere adottati più adeguatamente a scale maggiori, come quelle regionali, mentre gli approcci deterministici funzionano meglio per aree minori perché richiedono un dettaglio maggiore. Per il caso studio in esame si è deciso di applicare un metodo euristico, il Rock Engineering System (RES), al fine di ottenere la mappa di suscettibilità del bacino del Rio Fenils, tramite il software QGIS.

5.3 METODO RES

Il metodo Rock Engineering System (o RES) è stato proposto nel 1992 da Hudson, con l'obiettivo di studiare i problemi ingegneristici legati alle rocce, mettendo in relazione diversi parametri scelti e analizzando le loro interazioni col fenomeno considerato. È un metodo semiquantitativo che si fonda sullo sviluppo di una matrice di interazione, la quale rende il metodo adattabile, completo ed efficace. I parametri scelti vengono inseriti all'interno della matrice e valutati per la loro importanza relativa da esperti, che, sulla base delle loro conoscenze, assegnano un punteggio ad ognuno di essi (Rozos et al., 2011). Il metodo RES permette di affrontare i problemi ingegneristici con un approccio schematico e sintetico, distinguendo i parametri che hanno una maggiore influenza sui problemi. Per la risoluzione di problemi legati agli ammassi rocciosi sono spesso necessari molti parametri, i quali permettono di ottenere risultati molto profondi e completi, ma allo stesso più complessi da raggiungere. Nel presente elaborato il metodo è servito per mappare la suscettibilità alle colate detritiche del bacino montano di Fenils e si è scelto di inserire all'interno della matrice i principali fattori geologici, geomorfologici, topografici e idrologici che causano maggiormente l'innescio dei fenomeni.

Il funzionamento della matrice si basa sul posizionamento dei parametri (P_i) lungo la diagonale principale, mentre nelle celle fuori da essa si collocano i valori delle influenze tra le diverse coppie di parametri, seguendo una rotazione in senso orario. Nella matrice 2x2 in Figura 5.1 viene mostrato un esempio semplificato adattabile ad ogni matrice $n \times n$, nella quale troviamo i fattori scelti A e B inseriti lungo la diagonale principale e, rispettivamente in alto a destra e in basso a sinistra, le influenze di A su B e di B su A.

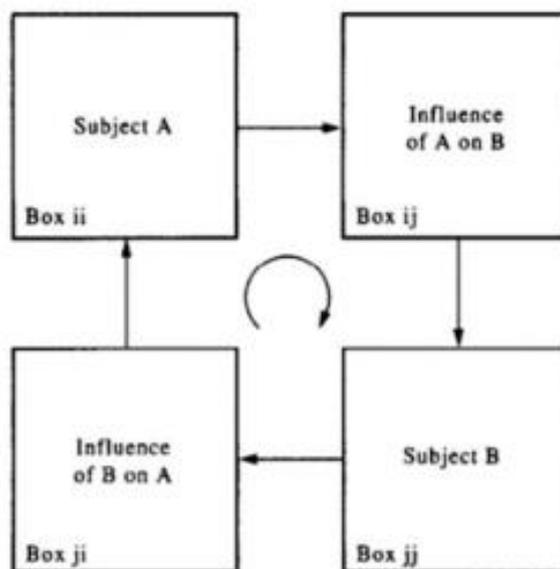


Figura 5.1 Matrice di interazione 2x2 per il metodo RES (Hudson, 1992).

L'assegnazione dei valori di influenza è detta codifica e permette di individuare quali sono i parametri dominanti e i coefficienti di ponderazione. La codifica può avvenire secondo diverse metodologie, come ad esempio: metodo binario, metodo semiquantitativo esperto (ESQ), metodo della pendenza, metodo numerico, metodo esplicito (Harrison JP. & Hudson JA, 2006). Tra questi il metodo più utilizzato è il metodo ESQ, il quale permette a un esperto di stabilire il valore di interazione in maniera semplice con una sufficiente discriminazione. Si utilizza una valutazione da 0 a 4, dove 0 corrisponde a un'interazione nulla e 4 a un'interazione critica (Mazzoccola & Hudson, 1996). Una volta assegnati i valori di influenza ai vari parametri, si eseguono delle somme lungo le righe e le colonne della matrice per comprendere quali sono i parametri più dominanti: infatti, la riga passante per il parametro P_i rappresenta l'influenza di quel parametro sugli altri, mentre la colonna passante per P_i indica il modo in cui esso viene influenzato dagli altri. La somma delle righe, detta "causa", descrive quanto la variabile P_i provochi cambiamenti sul sistema; viceversa, la somma delle colonne, o "effetto", indica quanto il sistema incida su P_i (Figura 5.2).

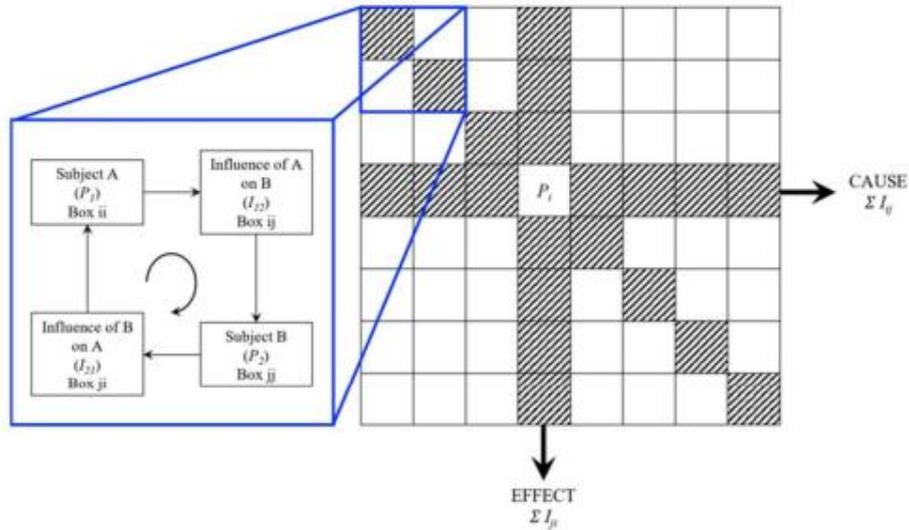


Figura 5.2 Matrice di interazione e parametri causa ed effetto (Bonetto et al., 2021).

Successivamente, ogni parametro viene analizzato in base al suo grado di interattività nel sistema e assume una determinata posizione all'interno del diagramma causa-effetto (Figura 5.3), la quale rappresenta la sua influenza all'interno del sistema.

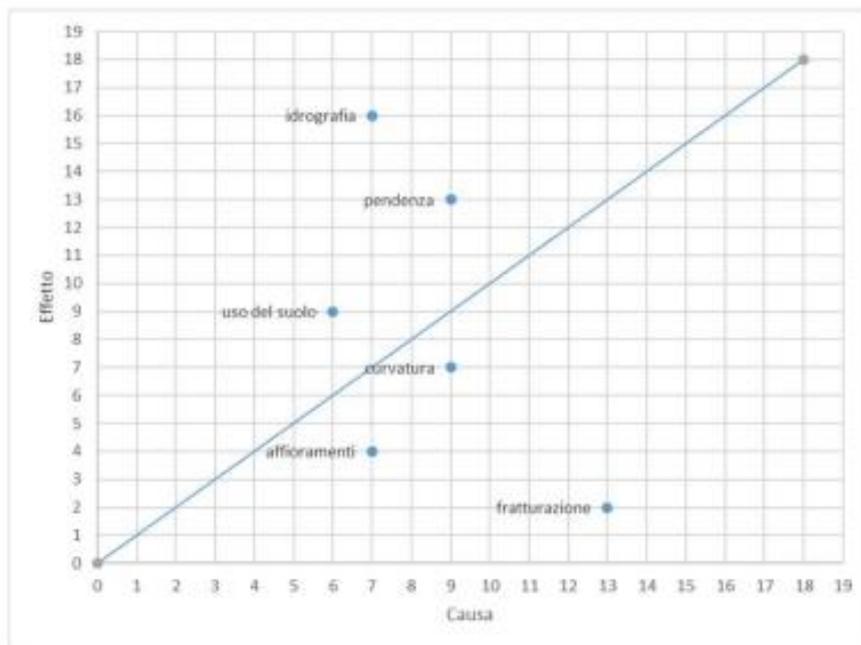


Figura 5.3 Esempio di diagramma causa-effetto.

Nel diagramma in Figura 5.3, seguendo la retta aumenta la somma di causa ed effetto e, di conseguenza, l'interattività dei fattori. I valori in basso a destra sono dominanti nei confronti del sistema, mentre quelli in alto a sinistra sono maggiormente dominati dagli altri. Infine, quelli più vicini alla retta si trovano in una situazione di equilibrio tra causa ed effetto e non subiscono gli effetti del sistema, né dominano altri parametri. Lo studio del diagramma è fondamentale per comprendere se tutti i parametri scelti sono necessari per l'analisi del problema. Più precisamente

se i fattori si posizionano in maniera normale alla retta significa che l'intensità dell'interazione è minima e, quindi, tutti i parametri sono utili all'analisi. Diversamente, in caso di una distribuzione parallela alla retta, l'intervallo di interazione è più ampio e alcuni parametri sono considerabili trascurabili.

Dopo aver eseguito le somme delle righe e delle colonne e aver riconosciuto l'importanza dei vari fattori, si può proseguire al calcolo del coefficiente di ponderazione per ciascun parametro tramite la formula che segue:

$$a_i = \frac{1}{\max(I_{ijth})} \cdot \left(\frac{C + E}{\Sigma C + \Sigma E} \cdot 100 \right)$$

dove $\max(I_{ijth})$ rappresenta il massimo valore assumibile da un termine fuori dalla diagonale principale.

Si calcola, infine, l'indice di propensione alla colata detritica (*DfPI*), seguendo la seguente formula:

$$DfPI = \sum_{i=0}^n (a_i \cdot P_{ik})$$

nella quale i si riferisce ai parametri e P_{ik} indica l'influenza a innescare i fenomeni di colata detritica. *DfPI* rappresenta il punteggio totale, ottenuto dalla somma degli n fattori predisponenti moltiplicati per il relativo coefficiente di ponderazione a_i , che varia da 0 a 100. L'indice di propensione permette di mettere in correlazione i coefficienti di ponderazione con gli strati tematici pertinenti, e, una volta applicato ad ogni unità cartografica, è possibile ottenere la mappa di suscettibilità del sito.

5.4 APPLICAZIONE DEL METODO RES AL CASO STUDIO

Per individuare quali sono le zone più suscettibili agli eventi di colata detritica all'interno del bacino del Rio Fenils, il metodo RES viene adattato al presente caso studio, con l'obiettivo di ricreare una mappa di suscettibilità dell'area. Si è proceduto inizialmente all'identificazione dei fattori predisponenti e al loro inserimento all'interno della matrice di interazione, per poi andare ad analizzare i risultati ottenuti. Per la scelta dei parametri e l'applicazione del metodo si è seguito lo studio effettuato da Vianello et al. (2023), applicato all'intera area dell'Alta Valle di Susa, comprendente anche Cesana Torinese. Sono stati utilizzati dati open source, in maniera quantitativa, a basso costo ed efficace, al fine di ottenere risultati adottabili per progettare opere di mitigazione e per individuare i bacini maggiormente vulnerabili sui quali focalizzare le operazioni di monitoraggio. I dati considerati sono stati scaricati dal Geoportale della Regione Piemonte e dal Geoportale di Arpa Piemonte e sono stati elaborati principalmente tramite il software QGIS.

I fattori predisponenti scelti sono cinque e sono elencati di seguito: litologia, pendenza, connettività, uso del suolo e fratturazione o attività franosa. Come visto nel paragrafo sull'inquadramento geologico la litologia del sito si distingue principalmente in ammassi rocciosi più antichi e in depositi quaternari più recenti, il che ci impone la considerazione di due matrici di interazione separate, in

quanto gli altri parametri si relazionano in maniera differente e indipendente a seconda della litologia presente: diverse litologie, infatti, presentano una diversa suscettibilità a innescare colate detritiche. Inoltre, la suscettibilità degli ammassi rocciosi dipende da un volume disponibile potenzialmente instabile, mentre la tendenza a creare depositi sciolti è strettamente legata alle caratteristiche meccaniche della roccia. Si parla, infine, di tasso di fratturazione per i primi e di stato di attività della frana per i depositi.

Come proposto da Tiranti et al. (2008), le diverse litologie devono essere differenziate in funzione della resistenza meccanica, analizzandone il potenziale di alterazione atmosferica in argilla o frazione fine. Quindi, la litologia degli ammassi rocciosi è classificata, con resistenza decrescente, come segue:

- Quarziti (QLN)
- Calcari, dolomie e marmi (DCB, CBL, CLW, MPB)
- Serpentiniti (TIN)
- Calcescisti e micascisti (CPY, CNR)
- Gessi e breccie carbonatiche (GSE, BCC)

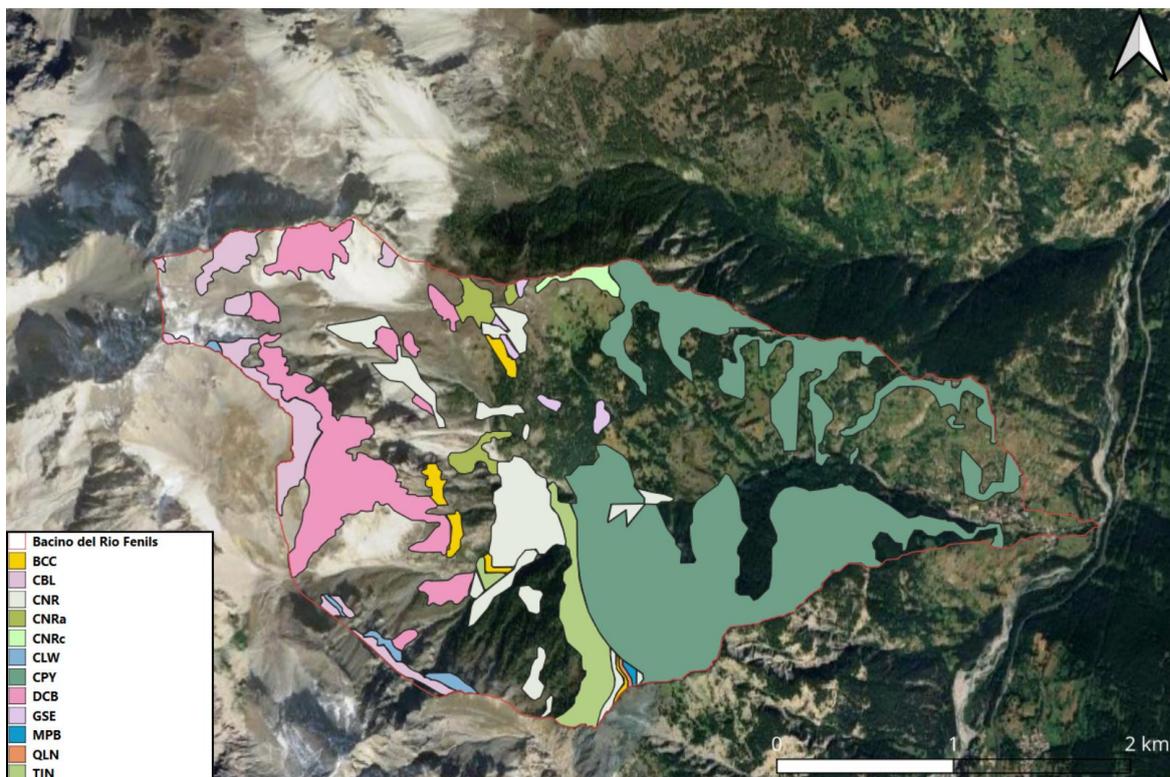


Figura 5.4 Distribuzione degli affioramenti rocciosi nel bacino di Fenils.

La localizzazione dei materiali detritici depositati, tanto quanto quella degli affioramenti rocciosi, deve essere ben identificata, a partire dalla loro zona d'origine fino all'area di deposito, in quanto la

maggior parte dei fenomeni di debris flow si sviluppa a partire da depositi. Inoltre, questi nascono in aree particolarmente pendenti e, in seguito a precipitazioni intense o alla fusione nivale, si saturano e cominciano a muoversi verso valle. A seconda delle diverse caratteristiche tessiturali, come il tipo di matrice o la presenza in sito, anche i depositi sono stati suddivisi in categorie:

- Depositi detritici e detritico-colluviali (UID)
- Depositi di frana siltoso-sabbiosi (UIN)
- Depositi torrentizi e di debris flow ghiaioso-sabbiosi (CSN)
- Diamicton e till indifferenziato (MO)

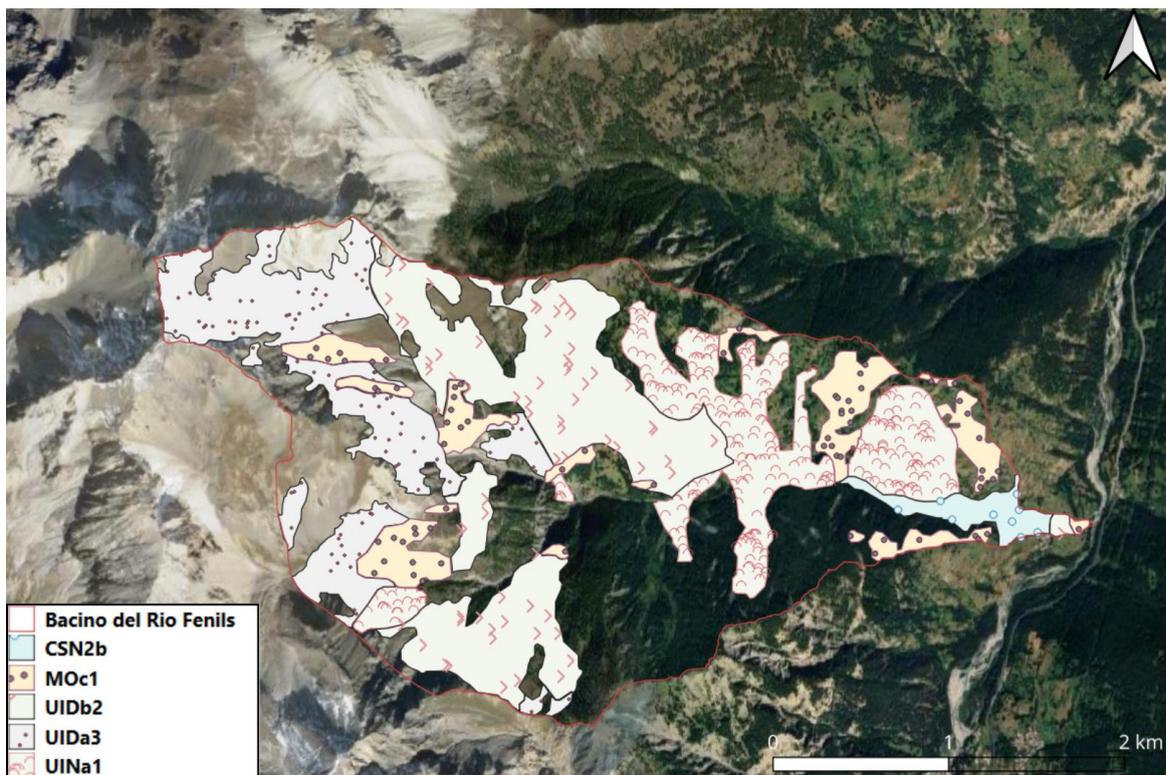


Figura 5.5 Distribuzione dei depositi quaternari nel bacino di Fenils.

Per analizzare al meglio la suscettibilità di un sito non si può trascurare la pendenza del bacino, la quale incrementa gli effetti di altri fattori predisponenti, come ad esempio condizioni climatiche, la degradazione delle unità litologiche e la geometria dei materiali (Rozos et al., 2008). Inoltre, come detto in precedenza, la pendenza aumenta la possibilità dell'innescò di una colata, particolarmente se supera i 20°. Riproponendo la suddivisione già esposta nel paragrafo dell'inquadramento geomorfologico, il bacino di Fenils è stato suddiviso in cinque classi:

- 0°-8°

- 8°-15°
- 15°-25°
- 25°-35°
- >35°

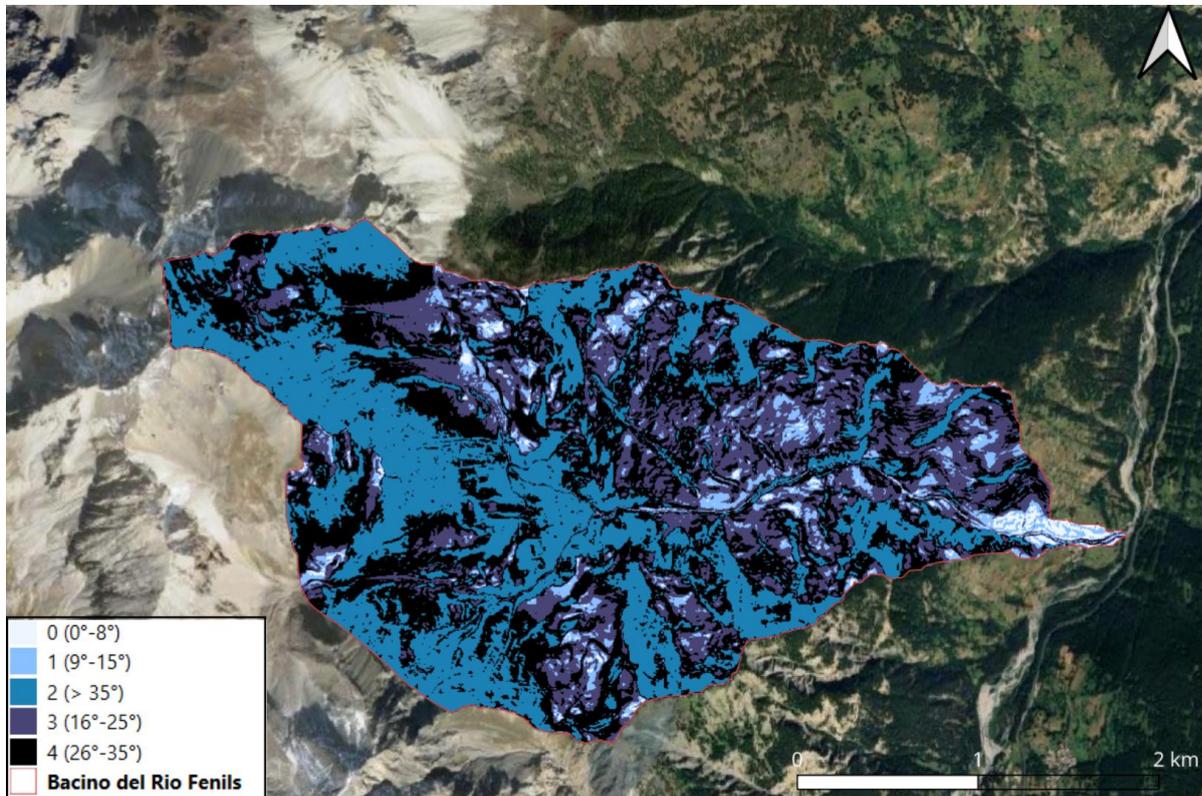


Figura 5.6 Classificazione delle pendenze e relativi punteggi per il metodo RES.

Dalla Figura 5.6 si nota che per ogni classe di pendenza è assegnato un punteggio corrispondente al grado di suscettibilità, che verrà analizzato meglio in seguito per l'applicazione del metodo RES. È evidente, inoltre, che le pendenze più a rischio per una potenziale colata detritica sono quelle che si avvicinano ai 35°, mentre a pendenze più elevate le colate detritiche sono meno probabili a dispetto di crolli e rotolamenti nei pressi delle pareti verticali.

La connettività rappresenta il grado di connessione tra le aree detritiche e il canale principale ed evidenzia l'influenza dei canali secondari sull'intero fenomeno franoso. Attraverso l'applicazione SedInConnect sviluppata da Crema e Cavalli (2014), si è proseguito a creare la mappa di connettività dell'area di studio (Figura 5.7), basata sul valore dell'indice di connettività IC. Questo valore è pari al logaritmo del rapporto tra la componente della pendenza ascendente (D_{up}) e discendente (D_{dn}):

$$IC = \log \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right)$$

La componente ascendente rappresenta il potenziale per l'incanalamento verso il basso dei detriti e dipende dall'area contribuyente sovrastante, dalla pendenza media e dal fattore di ponderazione. Mentre la componente discendente dipende dalla lunghezza del tratto di percorso che i sedimenti

devono attraversare per raggiungere il target scelto, ossia il rio Fenils e dal fattore di ponderazione. Quest'ultimo, secondo Cavalli et al. (2013), è indice delle caratteristiche superficiali che influenzano i fenomeni di deflusso, per cui è stato ottenuto tramite una misura locale della rugosità superficiale topografica. Per l'ottenimento della mappa è stato necessario effettuare delle modifiche (tramite QGIS) al DTM corrispondente al fine di rimuovere le depressioni locali che interferiscono sull'analisi di connettività. Una volta ottenuto il raster, è stato suddiviso in quattro classi, secondo la classificazione Natural Breaks utilizzata da Tiranti et al. (2018), come mostrato in Figura 5.7.

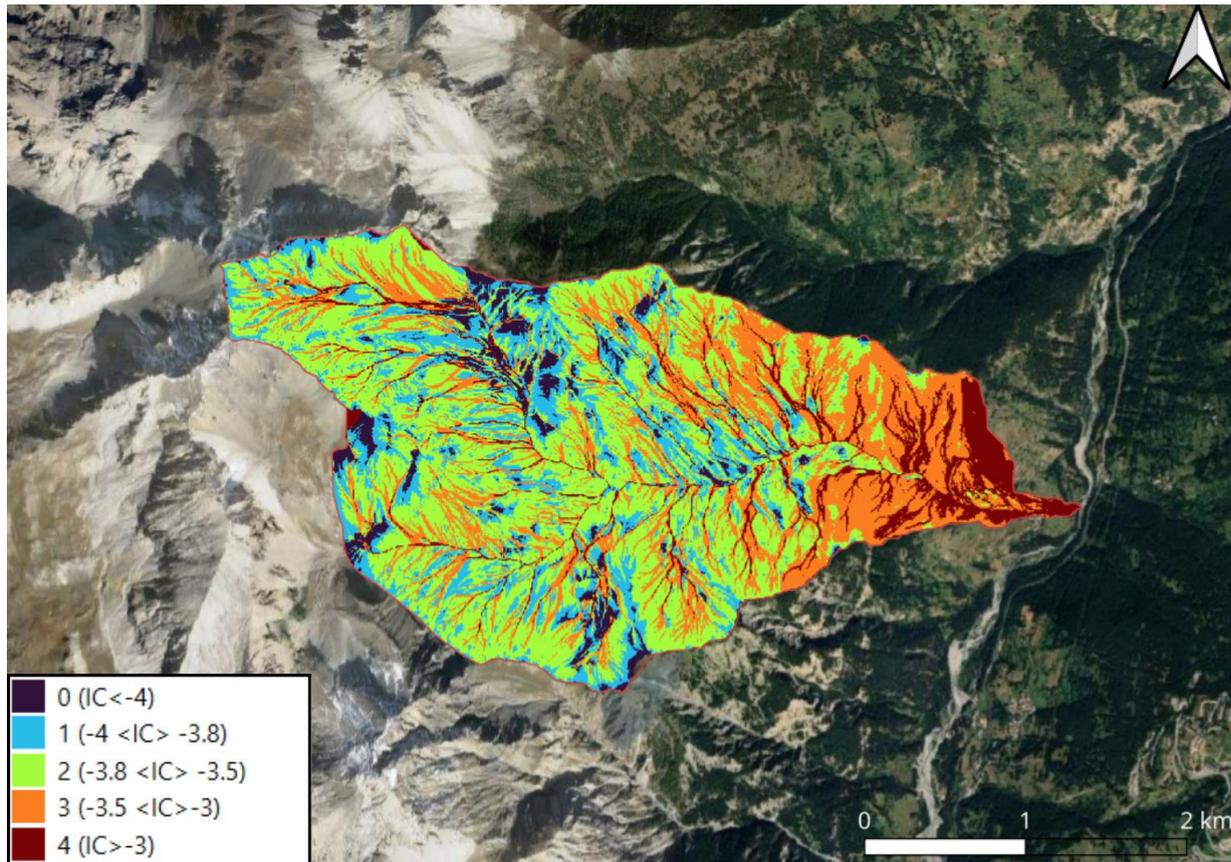


Figura 5.7 Bacino di Fenils suddiviso a seconda dell'indice di connettività, con i relativi punteggi per il metodo RES.

Alle aree che presentano una percentuale maggiore di affioramenti rocciosi corrisponde una maggiore incidenza di colate detritiche, indipendentemente dal tipo di litologia presente, poiché il substrato affiorante facilita la produzione di detriti e la loro mobilizzazione. La presenza di frane e depositi, invece, non influenza le caratteristiche del processo torrentizio e il loro trasporto, in quanto i fenomeni franosi presenti interessano principalmente scisti, già caratterizzati da scarse proprietà meccaniche e, di conseguenza, il loro contributo è principalmente perimetrale. La valutazione della connettività dei sedimenti permette di individuare le aree maggiormente accoppiate col sistema idrografico principale e di escludere quelle che, pur mostrando una certa quantità di detriti mobilizzabili, non apportano materiale all'asta principale e, dunque, non comportano un rischio per l'abitato di Fenils.

L'uso del suolo e, in generale, la presenza di una certa vegetazione influenza in maniera importante il movimento del materiale franoso. In particolare, una determinata copertura del suolo può comportare un'accelerazione o un rallentamento dei fenomeni erosivi. Per questo, usufruendo delle mappe fornite dall'amministrazione regionale, si è suddiviso il sito in esame in cinque classi (Figura 5.8), a seconda della loro incidenza sull'erodibilità:

- Urbano
- Foreste ad alto fusto
- Foreste a basso fusto
- Praterie
- Affioramenti rocciosi e depositi

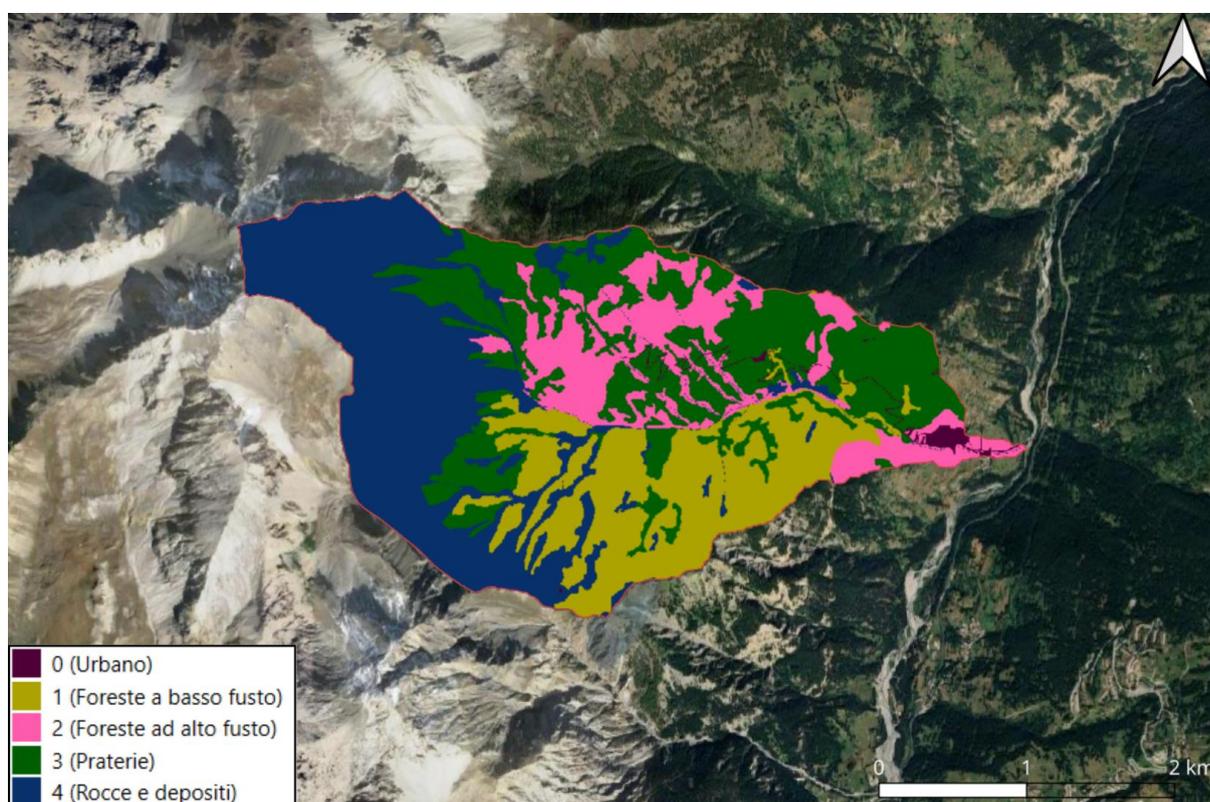


Figura 5.8 Classificazione dell'uso del suolo e relativi punteggi per il metodo RES.

Come per gli altri parametri predisponenti, sono stati assegnati dei punteggi (da 0 a 4) in funzione della capacità del tipo di suolo a innescare eventi franosi. Le aree con una minore copertura vegetativa (ad esempio le aree in prossimità delle rocce nude) saranno maggiormente favorevoli all'insacco rispetto a quelle in cui il territorio presenta una più estesa copertura fino alle aree urbane, nelle quali il punteggio sarà minimo.

La suscettibilità degli affioramenti rocciosi a generare fenomeni di colate detritiche si valuta individuando la disposizione spaziale delle fratture sulla roccia. Infatti, il suo tasso di degradazione è strettamente legato alla quantità di materiale sciolto, potenziale fattore di innesco. A causa della

complessità che si avrebbe nell'individuare ogni singola frattura, la disposizione spaziale delle stesse sulla roccia è stata approssimata alla densità di lineamenti presenti, che permettono comunque di ottenere un quadro generale sulle condizioni degli ammassi rocciosi. Perciò, seguendo un approccio manuale e servendosi del DTM a disposizione, si è proceduto a tracciare, tramite QGIS, le varie faglie, fratture e frane visibili dalle immagini satellitari (Figura 5.9). In seguito, attraverso lo strumento "line density" di QGIS, è stata generata una mappa delle densità dei lineamenti, riportata in Figura 5.10.

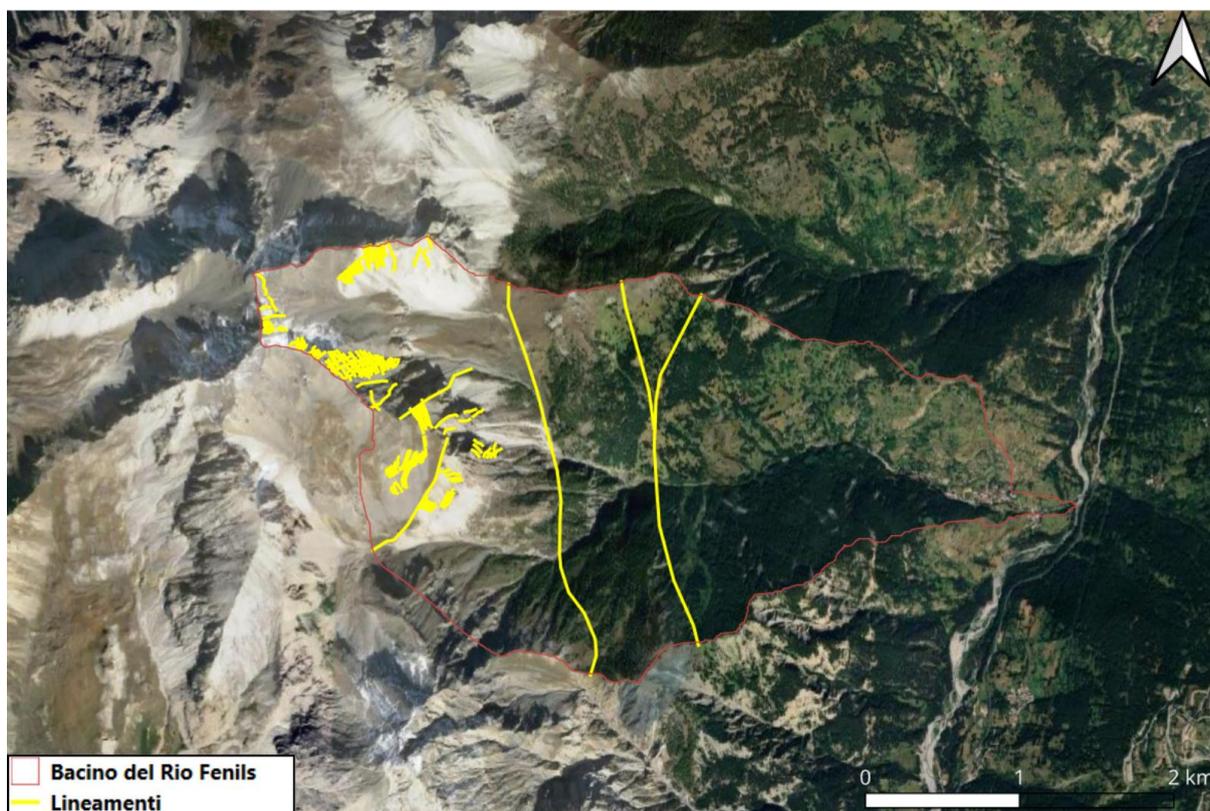


Figura 5.9 Faglie, fratture e contatti tettonici presenti sul bacino di Fenils.

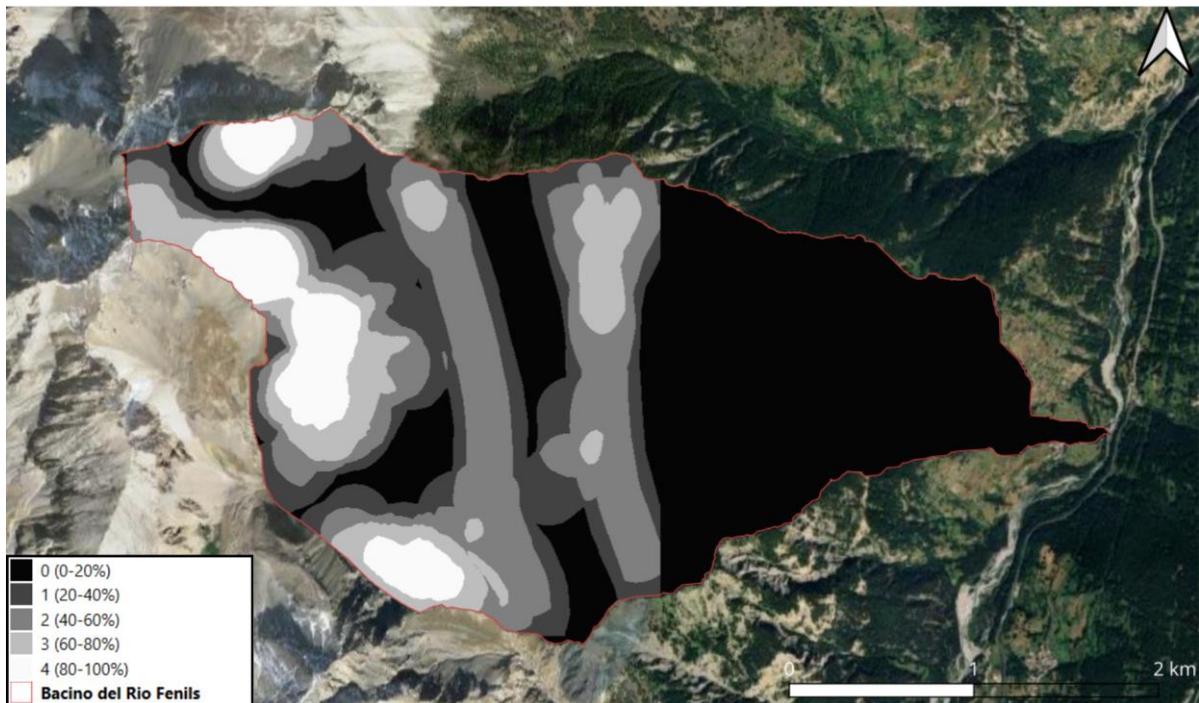


Figura 5.10 Densità delle faglie, fratture e contatti tettonici presenti sul bacino di Fenils e relativi punteggi per il metodo RES.

I depositi di frane passate costituiscono essi stessi un fattore predisponente per l'innesco di nuovi fenomeni, fungendo da potenziali nuove sorgenti di colate detritiche. Per questo motivo è importante definire lo stato di attività delle frane in sito, la quale può essere interpretata come la coesione presente tra i depositi. A quest'ultima, in particolare, viene assegnato un basso valore nel caso di una frana di tipo attiva o riattivata e un valore più alto in caso di frana quiescente o relitta. Tramite la mappa di attività delle frane, redatta dal SIFraP (Sistema Informativo fenomeni franosi in Piemonte), sono stati classificati i fenomeni franosi presenti all'interno del bacino del Rio Fenils, in funzione del loro stato di attività. Più precisamente sono stati individuate frane quiescenti e frane attive/riattivate o sospese, come mostrato in Figura 5.11.

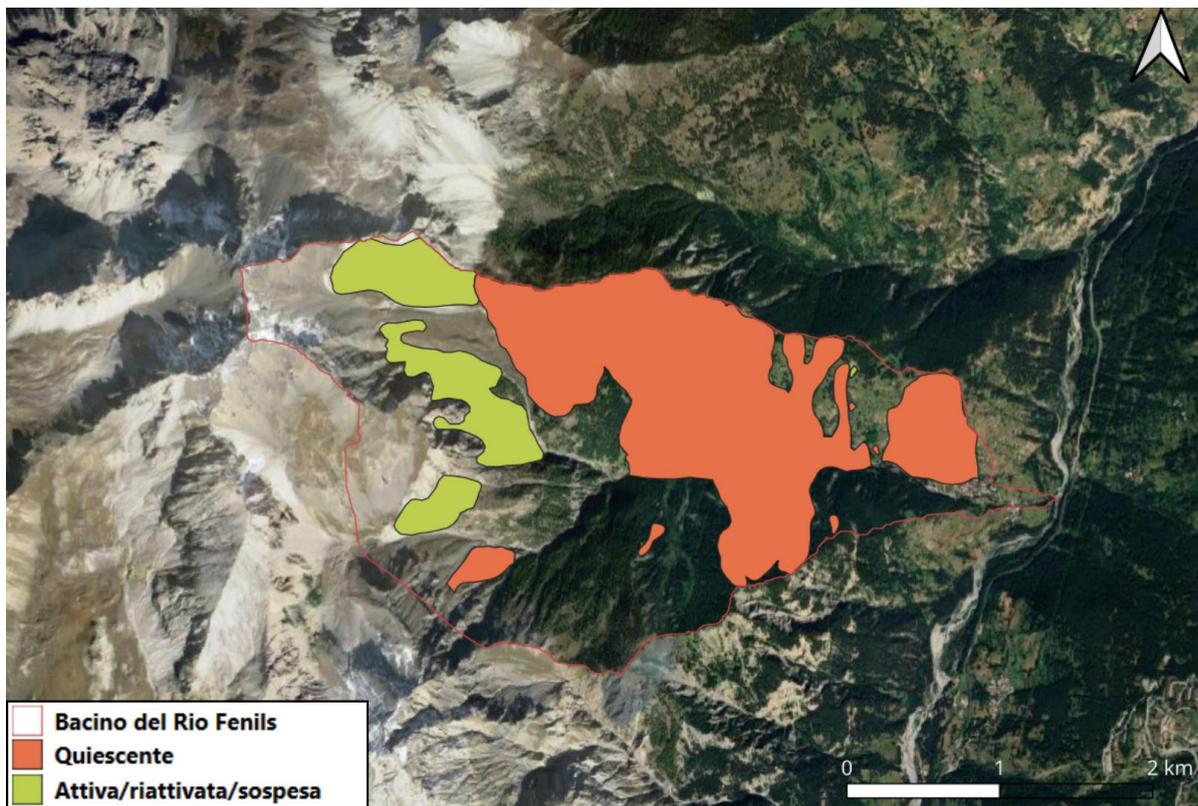


Figura 5.11 Distribuzione dei fenomeni franosi nel bacino di Fenils, in funzione del loro stato di attività.

Come descritto precedentemente, il metodo RES prevede prima l'assegnazione di un punteggio da 0 a 4 (basata sul metodo ESQ) alle classi dei vari parametri e poi l'inserimento di questi ultimi all'interno delle due matrici d'interazione al fine di analizzare l'influenza degli uni sugli altri e comprendere lo stato di suscettibilità generale del sito alle colate detritiche. Per ogni parametro verrà assegnato, poi, un altro punteggio che valuta la sua influenza sugli altri e uno che valuta quanto gli altri parametri influenzano esso stesso. Si riportano in seguito le due matrici di interazione con i relativi punteggi assegnati a ogni classe.

Tabella 5.3 Matrice d'interazione relativa agli affioramenti rocciosi.

MATRICE 1 - AFFIORAMENTI		
PARAMETRO	CLASSE	PUNTEGGIO
AFFIORAMENTI ROCCIOSI	QUARZITI	0
	CALCARI, DOLOMIE, MARMI	1
	SERPENTINITI	2
	CALCESCISTI E MICASCISTI	3
	GESSI E BRECCE CARBONATICHE	4
PENDENZA	0°-8°	0
	8°-15°	1
	15°-25°	3
	25°-35°	4
	>35°	2
CONNETTIVITA'	BASSA	1
	MEDIA	2
	ALTA	3
	MOLTO ALTA	4
USO DEL SUOLO	URBANO	0
	FORESTE AD ALTO FUSTO	1
	FORESTE AD BASSO FUSTO	2
	PRATERIE	3
	AFFIORAMENTI ROCCIOSI E DEPOSITI	4
DENSITA' DI FRATTURAZIONE	MOLTO BASSA	0
	BASSA	1
	MEDIA	2
	ALTA	3
	MOLTO ALTA	4

Tabella 5.4 Matrice d'interazione relativa ai depositi quaternari.

MATRICE 2 - DEPOSITI		
PARAMETRO	CLASSE	PUNTEGGIO
DEPOSITI QUATERNARI	DEPOSITI DETRITICI E DETRITICO-COLLUVIALI	1
	DEPOSITI DI FRANA	2
	DEPOSITI TORRENTIZI E DI DEBRIS FLOW	3
	DIAMICTON E TILL INDIFFERENZIATO	4
PENDENZA	0°-8°	0
	8°-15°	1
	15°-25°	3
	25°-35°	4
	>35°	2
CONNETTIVITA'	BASSA	1
	MEDIA	2
	ALTA	3
	MOLTO ALTA	4
USO DEL SUOLO	URBANO	0
	FORESTE AD ALTO FUSTO	1
	FORESTE AD BASSO FUSTO	2
	PRATERIE	3
	AFFIORAMENTI ROCCIOSI E DEPOSITI	4
ATTIVITA' FRANOSA	ASSENTE	0
	QUIESCENTE	3
	ATTIVA/RIATTIVATA/SOSPESA	4

Si riportano nelle Tabelle 5.3 e 5.4 le due matrici di interazione caratteristiche degli affioramenti rocciosi e dei depositi quaternari, con i relativi punteggi d'influenza. In particolare, come già descritto nel paragrafo 5.3, si descrivono le influenze di ogni fattore sul sistema, attraverso la somma delle righe (Cause C), e quanto ogni fattore è influenzato dal sistema, attraverso la somma delle colonne (Effetti E). Si calcolano, inoltre, i coefficienti di ponderazione a_i necessari per l'ottenimento dell'indice di propensione alla colata detritica $DfPI$.

Tabella 5.3 Matrice di interazione degli affioramenti rocciosi, con relativi coefficienti di ponderazione.

MATRICE 1 - AFFIORAMENTI								
a/a	1	2	3	4	5	CAUSA	CAUSA+EFFETTO	a_i
1	AFFIORAMENTI	2	2	1	1	6	10	3.571
2	0	PENDENZA	4	3	0	7	17	6.071
3	0	3	CONNETTIVITÀ	2	1	6	18	6.429
4	1	2	2	USO DEL SUOLO	0	5	12	4.286
5	3	3	4	1	FRATTURAZIONE	11	13	4.643
EFFETTO	4	10	12	7	2	/	70	25

Tabella 5.4 Matrice di interazione dei depositi quaternari, con relativi coefficienti di ponderazione.

MATRICE 2 - DEPOSITI								
a/a	1	2	3	4	5	CAUSA	CAUSA+EFFETTO	a_i
1	DEPOSITI	2	2	2	2	8	19	4.847
2	4	PENDENZA	4	3	3	14	23	5.867
3	3	3	CONNETTIVITÀ	2	3	11	21	5.357
4	1	2	2	USO DEL SUOLO	1	6	16	4.082
5	3	2	2	3	ATTIVITA' FRANOSA	10	19	4.847
EFFETTO	11	9	10	10	9	/	98	25

L'assegnazione dei punteggi d'influenza è stata valutata tramite un'analisi descrittiva delle interazioni meglio spiegata nelle successive Tabelle 5.5 e 5.6.

Tabella 5.5 Matrice d'interazione descrittiva degli affioramenti.

MATRICE 1 - AFFIORAMENTI					
a/a	1	2	3	4	5
1	AFFIORAMENTI	Il pendio è l'espressione morfologica dell'erosione delle rocce. La resistenza, il tessuto e la struttura della roccia influenzano la morfologia dei pendii (2)	Le caratteristiche della roccia influenzano la rugosità e quindi la facilità di trasporto dei sedimenti (2)	Le caratteristiche di resistenza del substrato influenzano il tipo di copertura del suolo (1)	Il tipo di substrato in relazione alla sua composizione mineralo-petrografica e alle condizioni di resistenza, a parità di stato tensionale, influirà sul grado di fratturazione (1)
2	Nessuna influenza (0)	PENDENZA	Il grado di pendenza rappresenta per la connettività la presenza di ostacoli o connessioni (4)	La pendenza influenza la distribuzione e il tipo di vegetazione che cresce su di esso, che a sua volta può favorire o meno la pedogenesi e il deflusso superficiale (3)	Nessuna influenza (0)
3	Nessuna influenza (0)	Il grado di connettività influisce sui processi di erosione e deposizione, modificando la pendenza dei versanti (3)	CONNETTIVITÀ	L'azione erosiva e deposizionale, in funzione della connessione, influisce sulla copertura del suolo (2)	La connettività può influenzare il tasso di erosione differenziale delle rocce (1)
4	La copertura protegge la litologia dall'erosione (1)	La copertura del suolo influenza la stabilità dei pendii e quindi la loro pendenza (2)	Il tipo di copertura del suolo può agire sulla rugosità come ostacolo o come agevolazione al trasporto solido (2)	USO DEL SUOLO	Nessuna influenza (0)
5	La presenza di fratture può influenzare il comportamento meccanico delle rocce (3)	I substrati altamente fratturati sono soggetti ad alterazione, erosione e diminuzione delle proprietà meccaniche (attrito e coesione) con conseguente influenza sulla pendenza (3)	Le faglie e i lineamenti rappresentano una via preferenziale per il trasporto dei sedimenti, influenzando la connettività (4)	La presenza di fratture influenza l'erodibilità e la circolazione dell'acqua (1)	FRATTURAZIONE

Tabella 5.6 Matrice d'interazione descrittiva dei depositi.

MATRICE 2 - DEPOSITI					
a/a	1	2	3	4	5
1	DEPOSITI	I versanti costituiti da depositi hanno acclività diversa a seconda delle tipologie, dello spessore e delle caratteristiche tessiture dei depositi sciolti che li caratterizzano (2)	La tipologia di depositi presenti può influire sulla rugosità dei versanti (2)	La granulometria dei depositi e il loro spessore influenzano il tipo di copertura del suolo (2)	La tipologia di deposito e il suo spessore possono influenzare il tipo di fenomeno franoso presente e la sua attivazione (2)
2	La pendenza influisce sulla presenza, la stabilità e lo spessore di eventuali depositi (4)	PENDENZA	Il grado di pendenza rappresenta per la connettività la presenza di ostacoli o connessioni (4)	La pendenza influenza la distribuzione e il tipo di vegetazione che cresce su di esso, che a sua volta può favorire o meno la pedogenesi e il deflusso superficiale (3)	La pendenza può accentuare la frequenza di attivazione dei fenomeni franosi, perché diminuisce la componente attritiva (3)
3	Il grado di connettività influenza il trasporto solido e quindi la deposizione dei depositi (3)	Il grado di connettività influisce sui processi di erosione e deposizione, modificando la pendenza dei versanti (3)	CONNETTIVITÀ	L'azione erosiva e deposizionale, in funzione della connessione, influisce sulla copertura del suolo (2)	Il grado di connettività influenza la ridistribuzione di sedimenti e l'erosione, fattori che possono provocare l'attivazione di frane (3)
4	La copertura del suolo, tramite l'azione protettiva data dalla vegetazione, può inibire l'erosione (1)	La copertura del suolo influenza la stabilità dei pendii e quindi la loro pendenza (2)	Il tipo di copertura del suolo può agire sulla rugosità come ostacolo o come agevolazione al trasporto solido (2)	USO DEL SUOLO	La copertura del suolo può influenzare l'entità dell'infiltrazione e di conseguenza la probabilità di attivazione dei fenomeni franosi, oppure contribuire alla stabilità del terreno (1)
5	L'attivazione delle frane può provocare una variazione della distribuzione e delle caratteristiche dei depositi (3)	L'attivazione delle frane influenza la morfologia del terreno alterando la pendenza originaria del pendio (2)	L'attivazione delle frane implica una modifica della morfologia (2)	L'attivazione delle frane può modificare la tipologia di copertura del suolo per rimozione della vegetazione o per alterazione della struttura del suolo (3)	ATTIVITÀ FRANOSA

Inoltre, come mostrato nelle Figure 5.12 e 5.13, le due matrici vengono rappresentate nei diagrammi causa-effetto, che ne evidenziano ulteriormente l'influenza sul sistema.

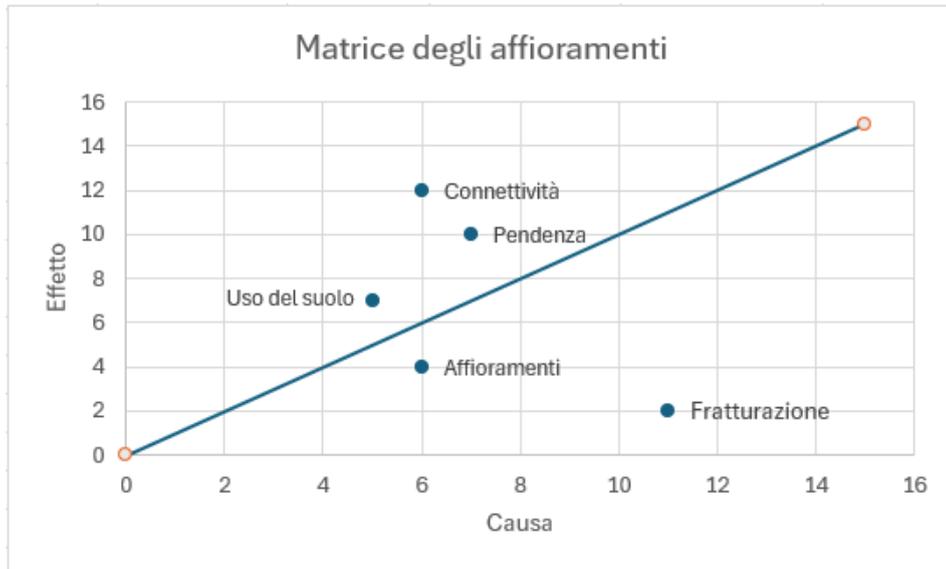


Figura 5.12 Digramma causa-effetto degli affioramenti.

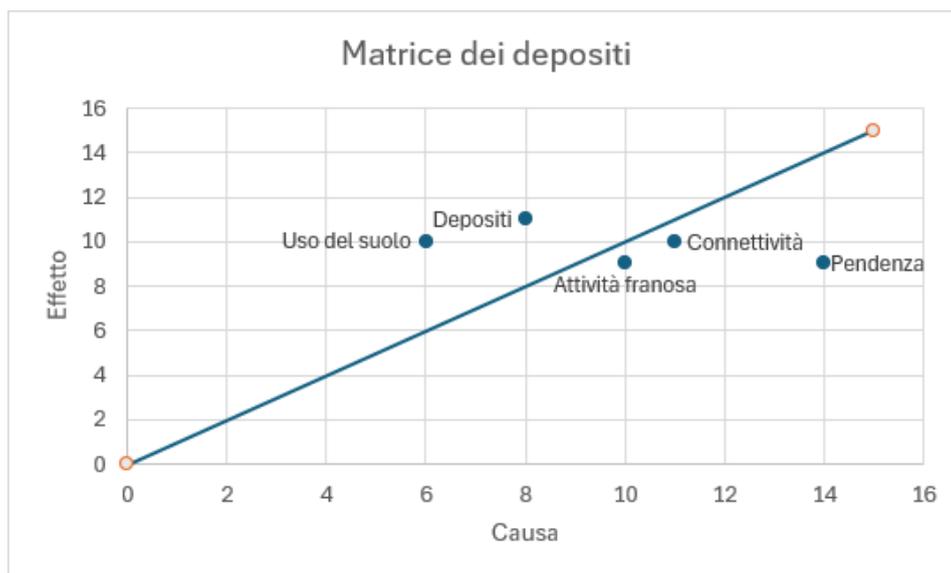


Figura 5.13 Digramma causa-effetto dei depositi.

Dai diagrammi si nota che nelle due matrici i parametri più interattivi, ossia quelli con la somma C+E maggiore, sono connettività e pendenza, rispettivamente per gli affioramenti rocciosi e per i depositi quaternari. Invece, i parametri maggiormente dominanti si individuano nella fratturazione per gli affioramenti e nella pendenza per i depositi.

5.5 RISULTATI

Una volta elaborati i fattori predisponenti e i loro coefficienti di ponderazione, questi sono stati correlati linearmente con i livelli tematici pertinenti al fine di realizzare la mappa di suscettibilità alle frane dell'intero bacino di Fenils. Per fare questo si è utilizzata l'equazione vista in precedenza per il calcolo del DfPI, applicandola a ogni cella della griglia 5x5 creata sul bacino. Come per la generazione di tutte le mappe viste finora, anche per quest'ultima si è utilizzato il software QGIS, convertendo gli shapefile in raster e usufruendo dello strumento "Calcolatore raster". I calcoli effettuati hanno prodotto valori di DfPI (variabili da 0 a 100 a seconda delle celle) che permettono di identificare l'andamento spaziale della suscettibilità ai fenomeni di debris flow nell'area d'interesse. Infatti, la mappa ottenuta (Figura 5.14) è stata suddivisa in classi, basandosi sulla scala di Brabb (1987): bassa (0 – 20), media (20 – 50), alta (50 – 70), molto alta (70 – 80) ed estrema (80 – 100).

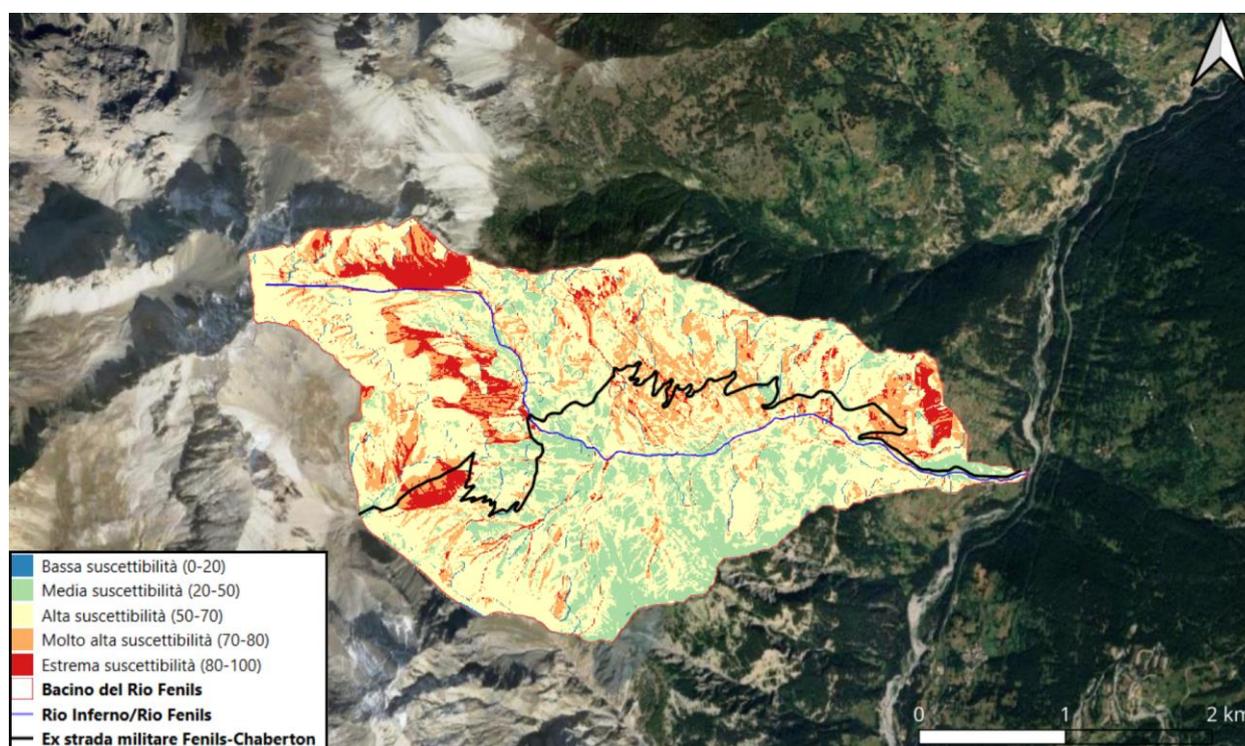


Figura 5.14 Mappa di suscettibilità ottenuta in seguito all'applicazione del metodo RES.

La mappa evidenzia un andamento medio-alto della suscettibilità crescente da valle verso monte, con picchi di livelli molto alti ed estremi nei pressi del sottobacino del Rio Inferno. In particolare, nel tratto in cui il Rio Inferno attraversa la strada militare (corrispondente al tratto franato), le aree di deposito raggiungono i valori di suscettibilità massimi, mentre nei pressi degli affioramenti la suscettibilità si ferma a valori inferiori, ma comunque alti (Figura 5.15).

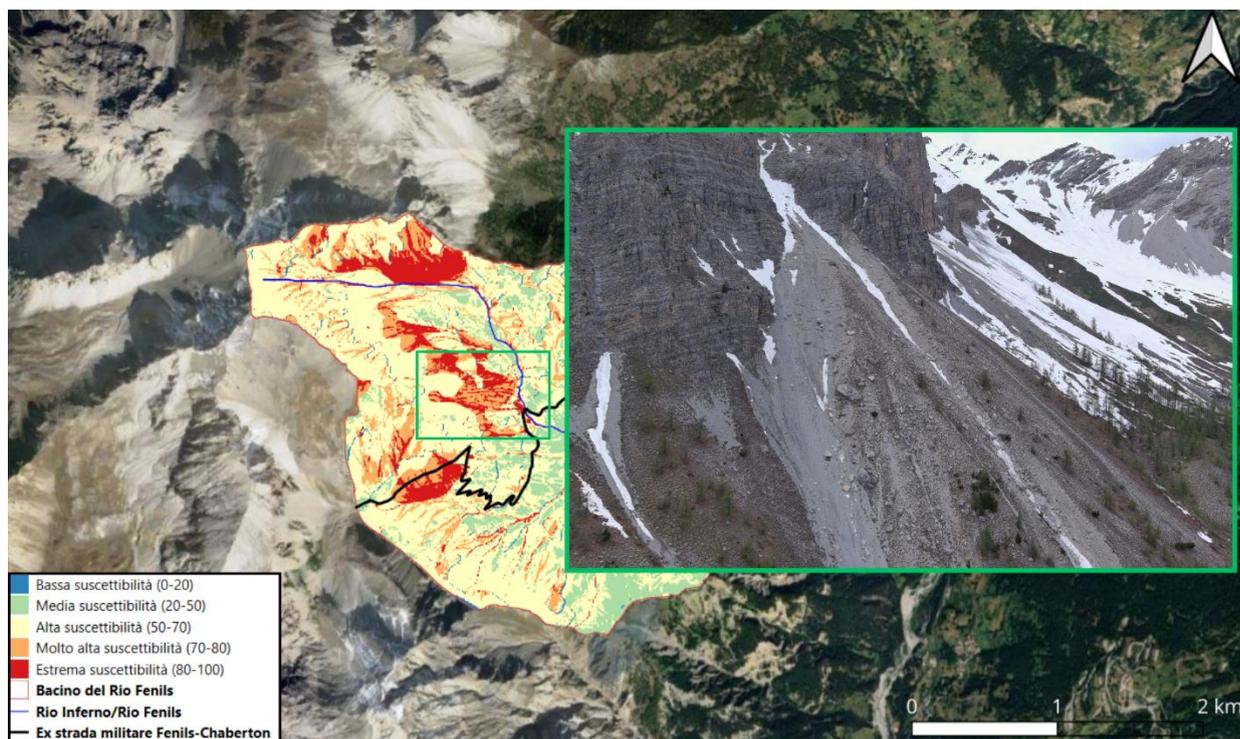


Figura 5.15 Dettaglio dei depositi estremamente suscettibili poco a monte della strada militare. Nella parte superiore gli affioramenti rocciosi con una suscettibilità alta. (Foto del 30/05/2024 scattata dal drone CFVAS)

Si riscontrano livelli estremi di suscettibilità anche più a monte, sia in sinistra che in destra idrografica, dove prosegue la strada in seguito ai tornanti che portano alla vetta dello Chaberton (Figura 5.16). Anche in questo caso le aree depositate sono maggiormente suscettibili rispetto agli affioramenti rocciosi. L'aumento di suscettibilità nei pressi del centro abitato di Fenils, invece, è presumibilmente frutto di alcuni errori nell'elaborazione dei dati. Quell'area, infatti, storicamente non è mai stata interessata da fenomeni di colata detritica ma i parametri potrebbero comunque essere stati influenzati dalla presenza di altre tipologie di frane, come le DGPV, le quali potrebbero aver aumentato erroneamente la suscettibilità alle colate detritiche. Difatti, dalle immagini satellitari si intravedono segni di rottura che permettono di mantenere valida questa ipotesi non confermata (Figura 5.17).

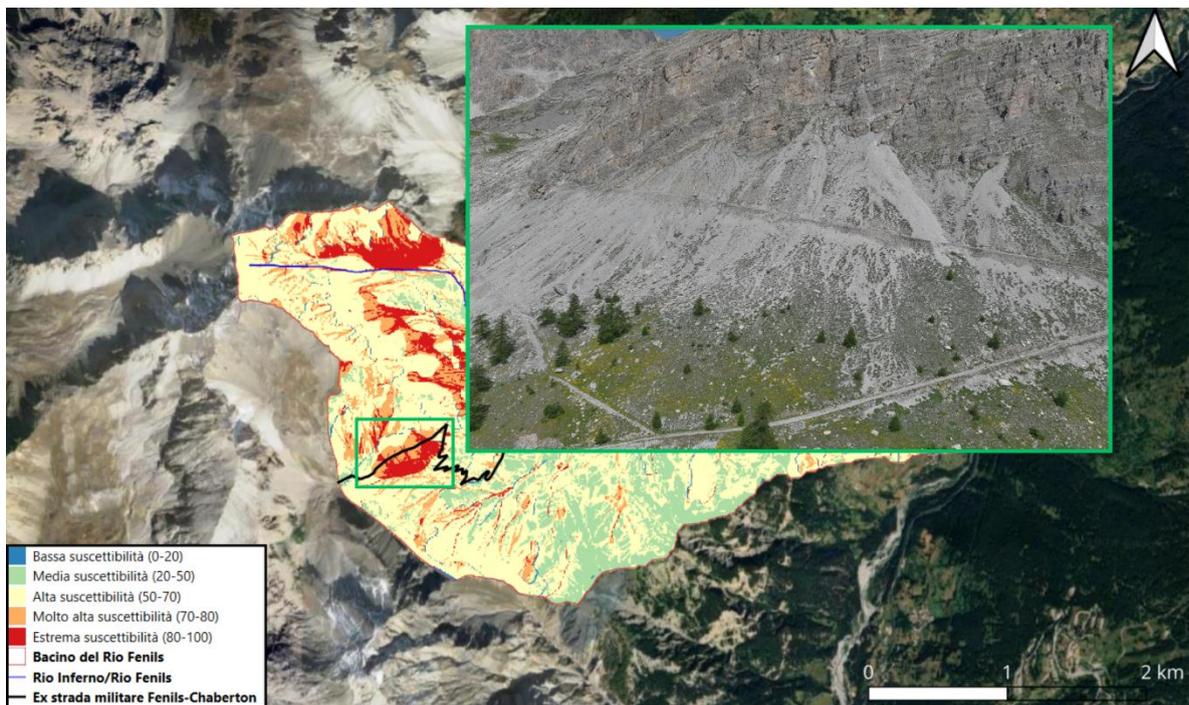


Figura 5.16 Dettaglio dei depositi franati sui tornanti della strada militare. In questo caso molto alta suscettibilità per gli affioramenti ed estrema per i depositi. (Foto del 13/07/2023 scattata dal drone CFVAS)

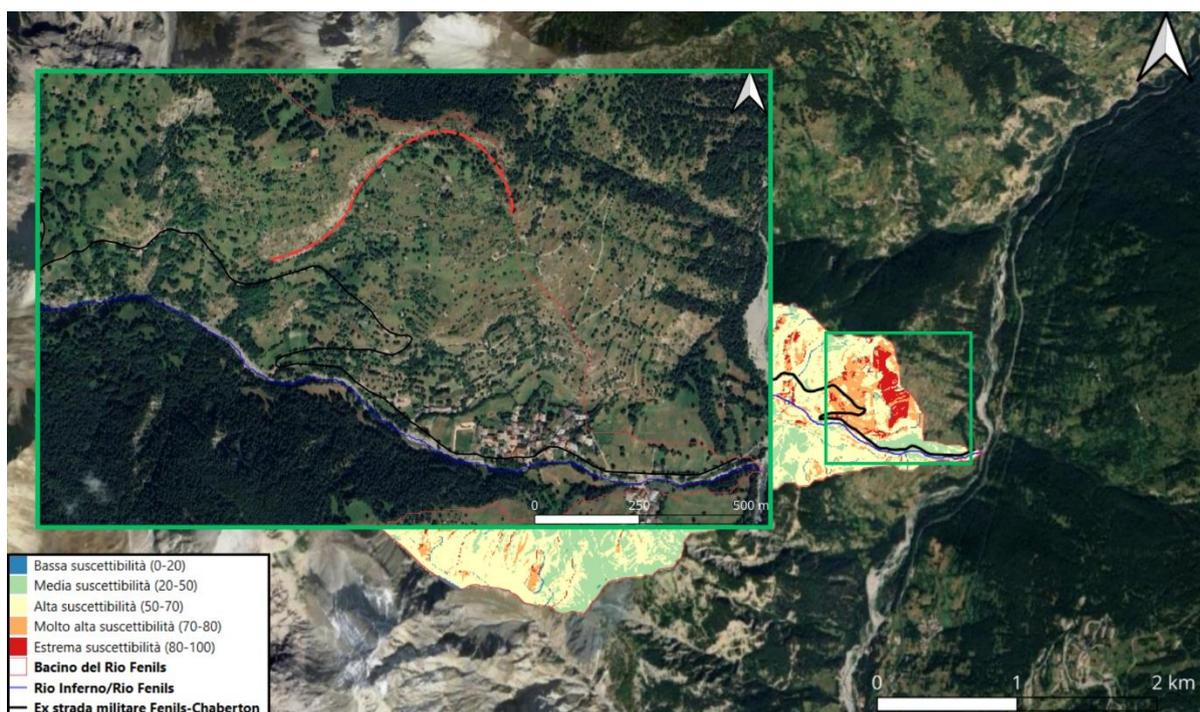


Figura 5.17 Dettaglio dell'area a nord di Fenils alla quale è assegnata estrema suscettibilità evidentemente per errore. Si nota un segno di una potenziale rottura superficiale (tratteggiata in rosso) attribuibile a una frana non di tipo colata.

6. ANALISI DI STABILITÀ E PROPOSTE

6.1 ANALISI DI STABILITÀ E SENSITIVITÀ

Dopo aver constatato, attraverso la mappa di suscettibilità, le criticità dell'intero bacino del Rio Fenils, lo step finale dell'elaborato si concentra sull'analisi di stabilità dell'area soggetta, ormai annualmente, a fenomeni di frana. Più precisamente, ci si riferisce al tratto di strada attraversato dal Rio Inferno, nel quale si incanalano tutte le colate detritiche che si originano poco più a monte (Figure 6.1 e 6.2).



Figura 6.1 Ex strada militare di Fenils interrotta da debris flow lungo il Rio Inferno (vista frontale). (Foto scattata da drone CFVAS – 13/07/23)

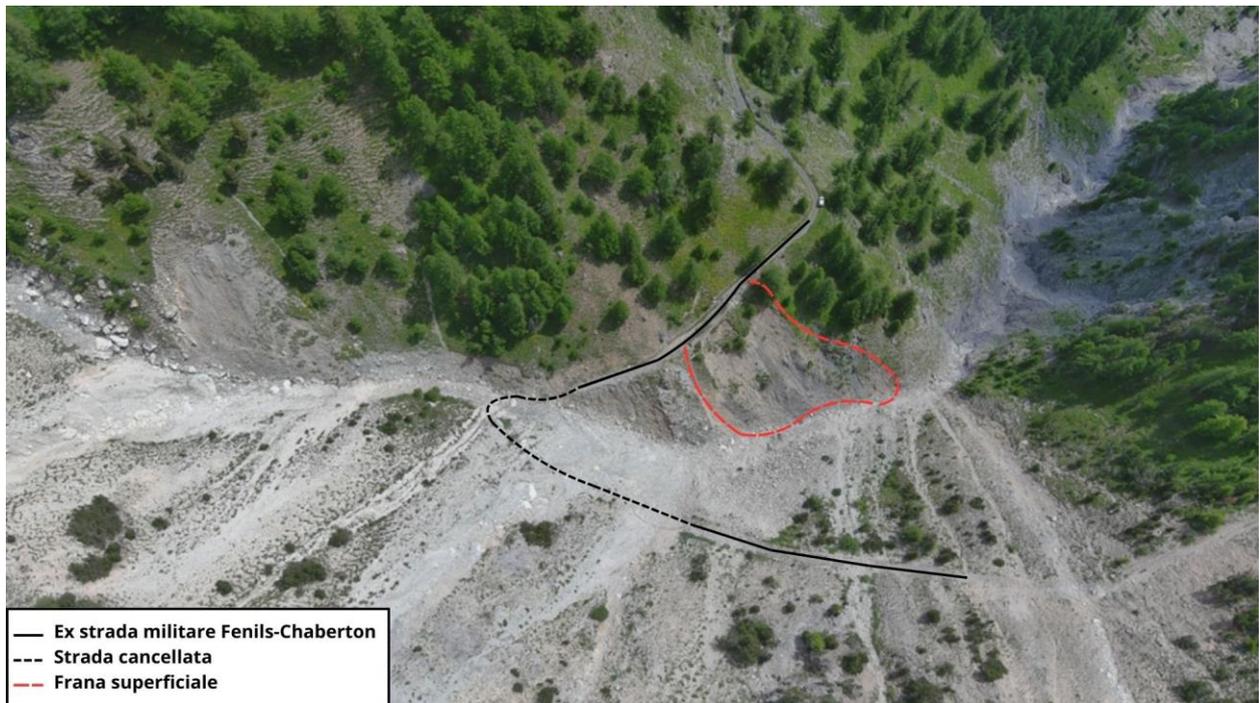


Figura 6.2 Ex strada militare di Fenils interrotta da debris flow lungo il Rio Inferno (vista dall'alto). (Foto scattata da drone CFVAS – 13/07/23)

La continua ripetizione negli anni di questi eventi ha causato la quasi completa cancellazione del sedime stradale e, inevitabilmente, la chiusura al traffico (anche pedonale) della strada. Inoltre, i frequenti fenomeni di colata si possono considerare la causa principale dell'innesco di frane superficiali che hanno coinvolto quel tratto della ex strada militare, in seguito ad erosione al piede (Figure 6.3 e 6.4).



Figura 6.3 Frana superficiale creatasi a partire dalla tension crack presente sopra la strada



Figura 6.4 Frane superficiali sottostanti la ex strada militare di Fenils ricadenti sul Rio Inferno. Nella parte superiore della foto la tension crack. (Foto scattata da drone CFVAS)

Sulla sezione A-A' evidenziata nelle Figure 6.3 e 6.4 si è scelto di procedere per effettuare una back analysis al fine di ricavare i parametri geomeccanici del terreno, analizzare la configurazione attuale

e valutare la stabilità globale del sito in esame. Per fare ciò è stato utilizzato il software Slide2 sviluppato da ©RocScience, capace di stimare la sicurezza e le probabilità di cedimento delle superfici di scivolamento, sia in terra che in roccia. Il profilo di frana è stato quindi estratto da QGIS ed esportato su Slide2 (Figura 6.5) e, basandosi sulle conoscenze geologiche del sito, sono stati identificati i due materiali principali che lo costituiscono: calcescisti (bedrock) e depositi detritici normalconsolidati (superficie). In realtà questa ricostruzione si è basata solamente dall'analisi delle immagini di dettaglio fornite dai voli effettuati con drone dalla Consorzio Forestale Alta Valle Susa e dall'analisi del foglio Foglio 171 - Cesana Torinese della Carta Geologica d'Italia al 50000, in cui si evidenzia la presenza di calcescisti con scistosità che immerge circa parallela alla sezione tracciata e inclinazione di circa 35°, ricoperti da depositi quaternari.

Per completare la descrizione del profilo, sono stati definiti su Slide2 anche i muri in pietrame sottostanti e sovrastanti la strada e la superficie di rottura che si origina dalla tension crack sopra la strada, visibile nella parte superiore della Figura 6.4. La superficie di scorrimento è stata definita a partire dall'analisi delle immagini aeree dell'area, in relazione al profilo originale del versante fornito dal DEM con risoluzione 5x5 della ripresa aerea 2009-2011 della Regione Piemonte.

L'analisi è stata condotta seguendo l'approccio suggerito dalle NTC2018 per la valutazione della stabilità dei pendii naturali sia in condizioni statiche (cap. 6.3 – Stabilità dei pendii naturali) che per azioni sismiche (cap. 7 – Progettazione per azioni sismiche).

Per le azioni sismiche si è fatto riferimento ad un'accelerazione di picco al suolo a_{max} (o PGA) compresa tra 0.05g e 0.15g. Più precisamente, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) assegna un valore di 0.125g, che è stato utilizzato per i calcoli del coefficiente sismico orizzontale k_h e verticale k_v , attraverso le seguenti formule:

$$k_h = \beta_s \frac{a_{max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0,5 k_h$$

dove g è l'accelerazione di gravità, mentre β_s rappresenta il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito, pari a 0.24 per un sottosuolo costituito da depositi. Si ottengono, dunque, valori di k_h e k_v pari rispettivamente a 0.003 e ± 0.0015 .

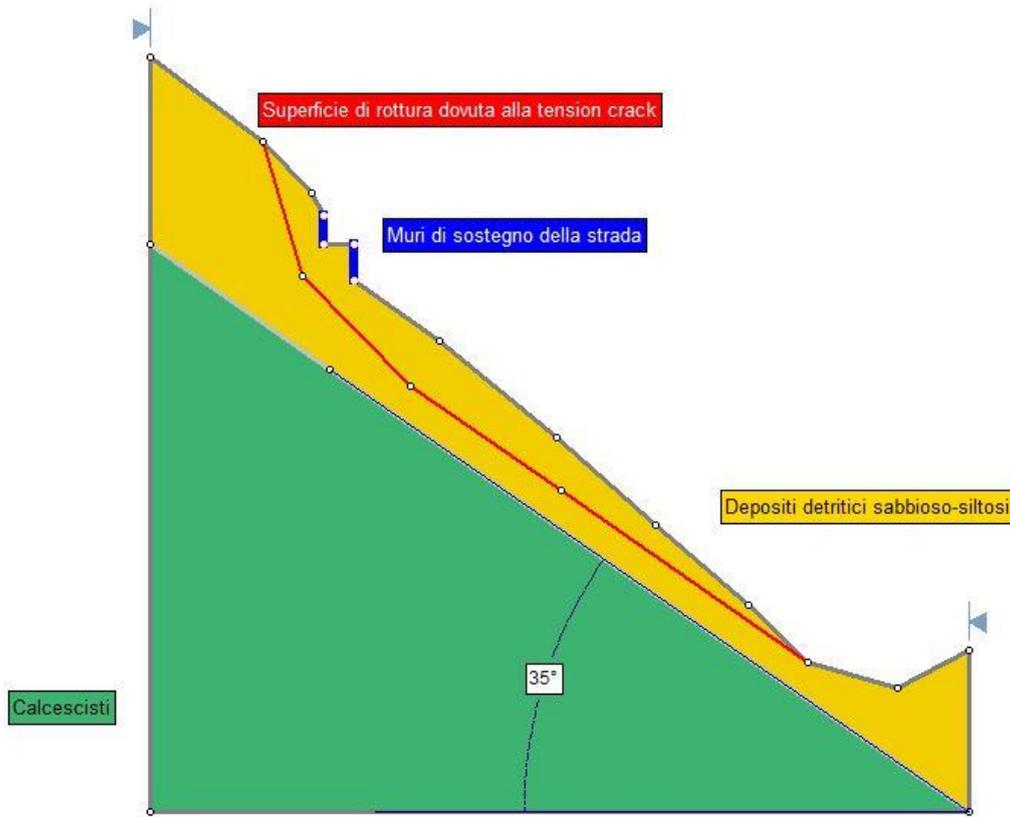


Figura 6.5 Rappresentazione del profilo di frana effettuata su Slide2.

Una volta individuati i materiali presenti, si è proseguito con la definizione delle loro proprietà, utili per il calcolo della resistenza al taglio τ attraverso la formula di Mohr-Coulomb:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan (\Phi')$$

dove c' è la coesione del materiale, σ'_n la pressione normale sul piano di rottura dipendente dal peso unitario e Φ' l'angolo di attrito interno del materiale.

La resistenza al taglio sarà, poi, fondamentale per l'ottenimento dei fattori di sicurezza FS, calcolati nel caso in esame secondo i metodi: Bishop semplificato, Janbu semplificato, Janbu corretto e GLE/Morgenstern-Price. Sia i fattori di sicurezza che la resistenza al taglio sono calcolati automaticamente dal software, dopo aver reso noti i parametri di peso unitario γ , coesione c' e angolo di attrito interno Φ' propri dei materiali. In prima analisi, sono stati assegnati dei valori medi rappresentativi dei litotipi presenti (Tabella 6.1), facendo una ricerca bibliografica, per i quali si è calcolato il fattore di sicurezza attraverso i metodi anticipati in precedenza, ottenendo, come ci si aspettava, dei valori inferiori a 1 sia in condizioni sismiche statiche (Figura 6.6) che dinamiche (Figura 6.7), testimoniando la criticità dell'area.

Tabella 6.5 Valori dei parametri geotecnici dei materiali del profilo di frana

MATERIALE	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ' (°)
CALCESCISTI	25	395	42
DEPOSITI DETRITICI SABBIOSO SILTOSI	18	5	30

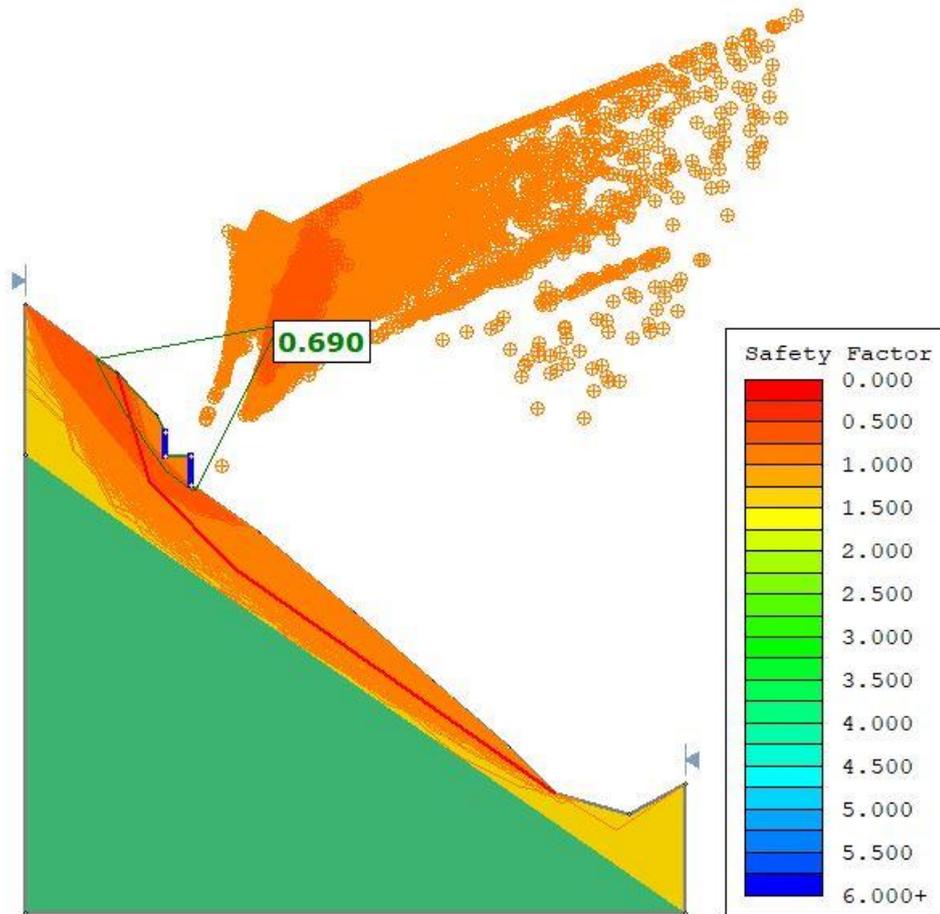


Figura 6.6 Rappresentazione di tutte le superfici di rottura con il FS<1 in condizioni statiche. In evidenza il FS maggiormente critico pari a 0.690

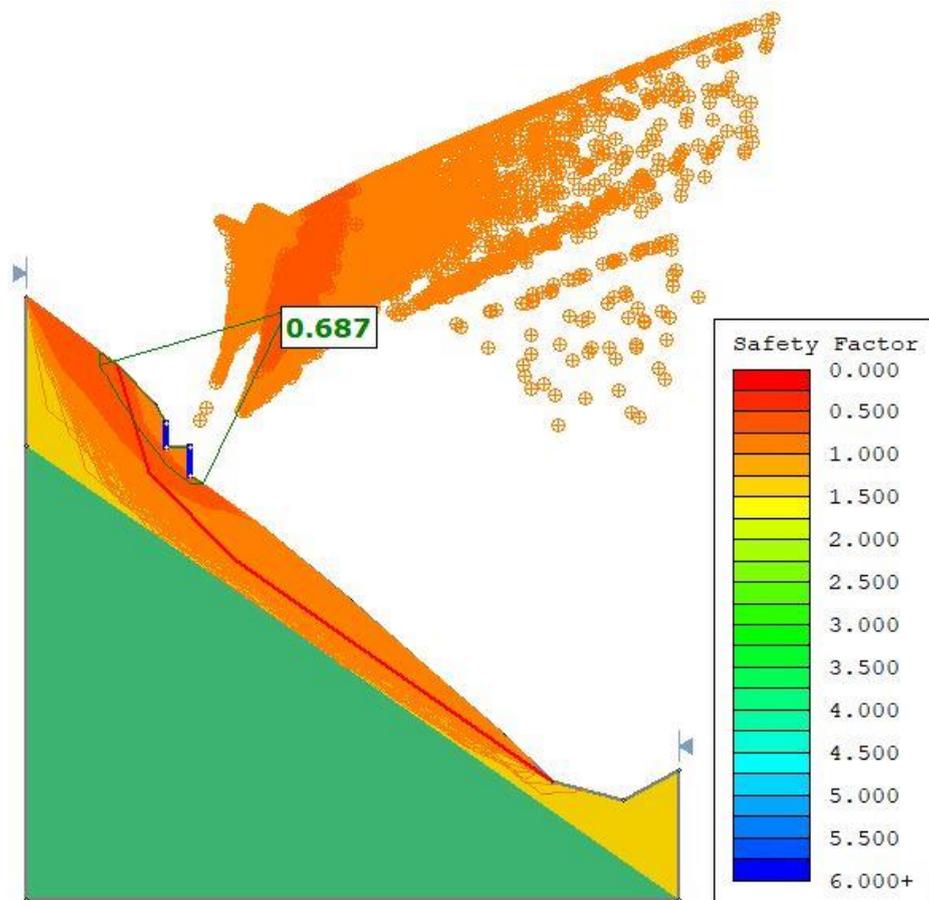


Figura 6.7 Rappresentazione di tutte le superfici di rottura con il $FS < 1$ in condizioni dinamiche. In evidenza il FS maggiormente critico pari a 0.687

Nella Figure 6.6 e 6.7 è rappresentata la situazione attuale considerando l'applicazione del solo metodo Bishop semplificato, ma la situazione rimane pressoché invariata con gli altri metodi. Sono mostrate tutte le superfici più critiche (con il $FS < 1$) comprese quelle con i fattori di sicurezza inferiori, entrambe nei pressi della superficie di rottura causata dalla tension crack, poco al di sopra della strada.

Considerato rappresentativo il valore di angolo di attrito dei depositi e pari a 30° , è stata condotta un'analisi di stabilità per determinare il valore di coesione corrispondente ad un fattore di sicurezza pari a 1. L'analisi suggerisce una coesione minima di circa 13 kPa (Figura 6.8), utile per il raggiungimento della soglia minima. Al contrario, fissando la precedente coesione di 5 kPa, l'angolo di attrito interno ottenuto sarebbe non fisicamente rappresentativo di tali depositi quaternari (Figura 6.9).

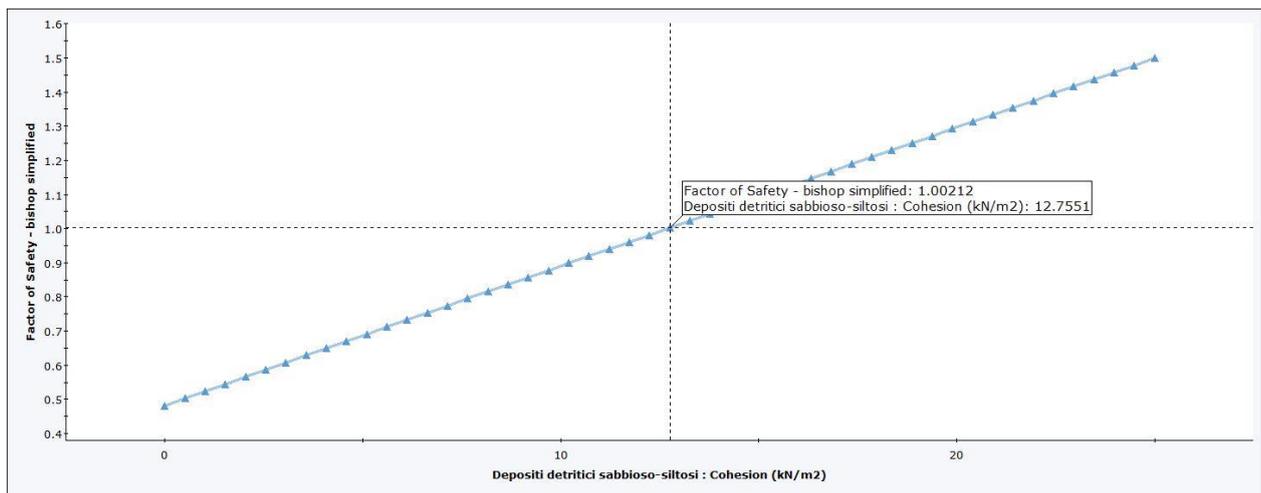


Figura 6.8 Plot dell'analisi di sensitività FS-c' effettuata su Slide2. Per un FS=1 è necessaria una coesione circa 13 kPa

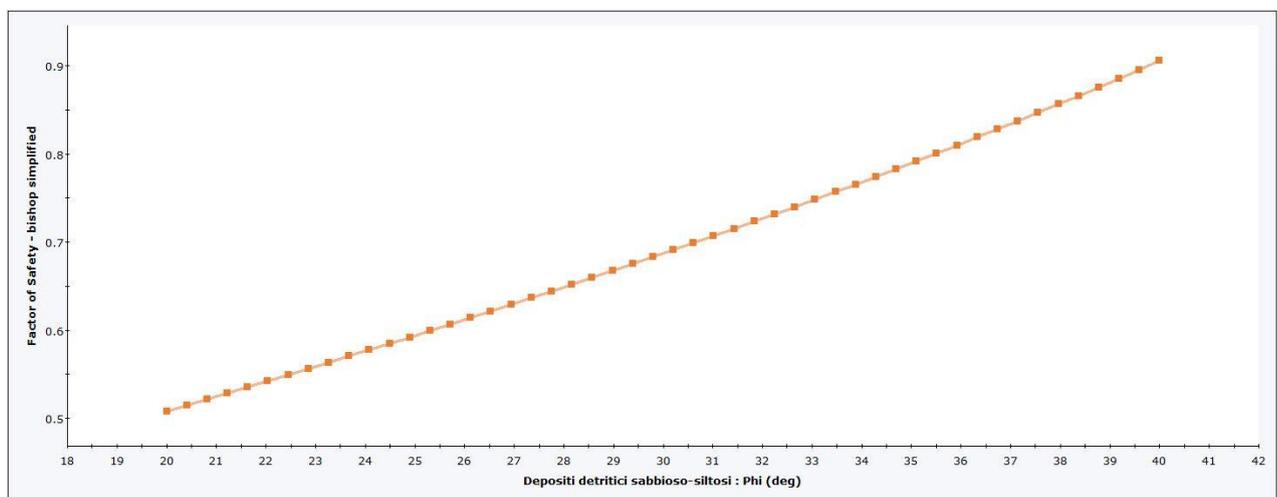


Figura 6.9 Plot dell'analisi di sensitività FS- Φ' effettuata su Slide2. Si nota come nemmeno un valore di oltre 40° (già troppo elevato per un terreno NC) è sufficiente per raggiungere un FS=1

6.2 BACK ANALYSIS E PROPOSTA DI GABBIONATURE

La nuova coppia di valori per i parametri geotecnici dei depositi detritici ($c'=13$ kPa; $\Phi'=30^\circ$) può essere adesso utilizzata per una nuova simulazione, nella quale viene rappresentata la tension crack, senza la superficie di rottura da essa generata (Figura 6.10). Questa configurazione restituisce un fattore di sicurezza minimo di 0.902. Alcune delle superfici di scorrimento ottenute risultano più profonde di quella osservata in sito. Questo probabilmente è dovuto alle ipotesi cautelative adottate in tale analisi in assenza di indagini stratigrafiche di dettaglio e analisi di caratterizzazione del materiale. Sicuramente, data la presenza di una fitta vegetazione nel tratto sovrastante la strada, la coesione apparente di quei depositi potrebbe considerarsi maggiore di quella suggerita dall'analisi

di sensibilità. Infatti, i depositi boscati possono raggiungere valori fino ai 50 kPa, che sicuramente permetterebbero di raggiungere valori di FS maggiori o uguali a 1.

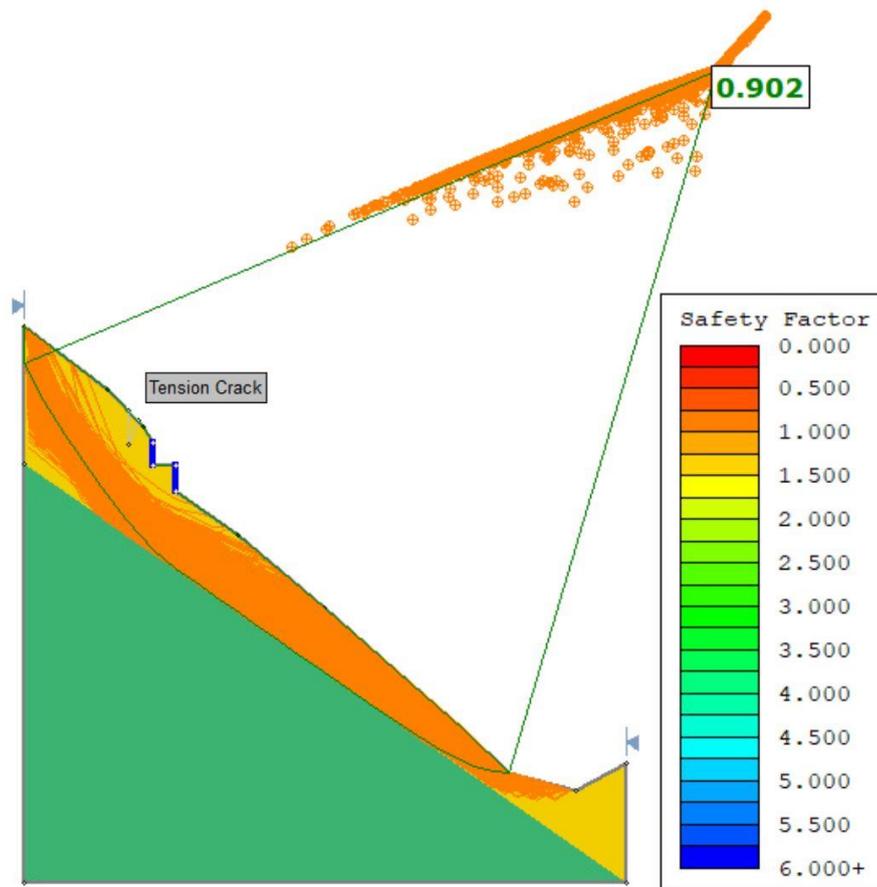


Figura 6.10 Rappresentazione delle superfici di rottura con i nuovi valori di c' e ϕ'

Per ovviare all'instabilità ancora vigente il software Slide2, attraverso una back analysis, suggerisce che per raggiungere il livello di sicurezza minimo dovrebbe essere imposta una forza pari circa 335 kN a una determinata quota (1937 m s.l.m.) alla base del versante (Figura 6.10). Nella pratica questa forza potrebbe essere rappresentata da una serie di gabbionature di contenimento, riempite da rocce e materiale locale (Figura 6.11) e dall'installazione di materiali geosintetici al piede del versante e nei pressi della tension crack.

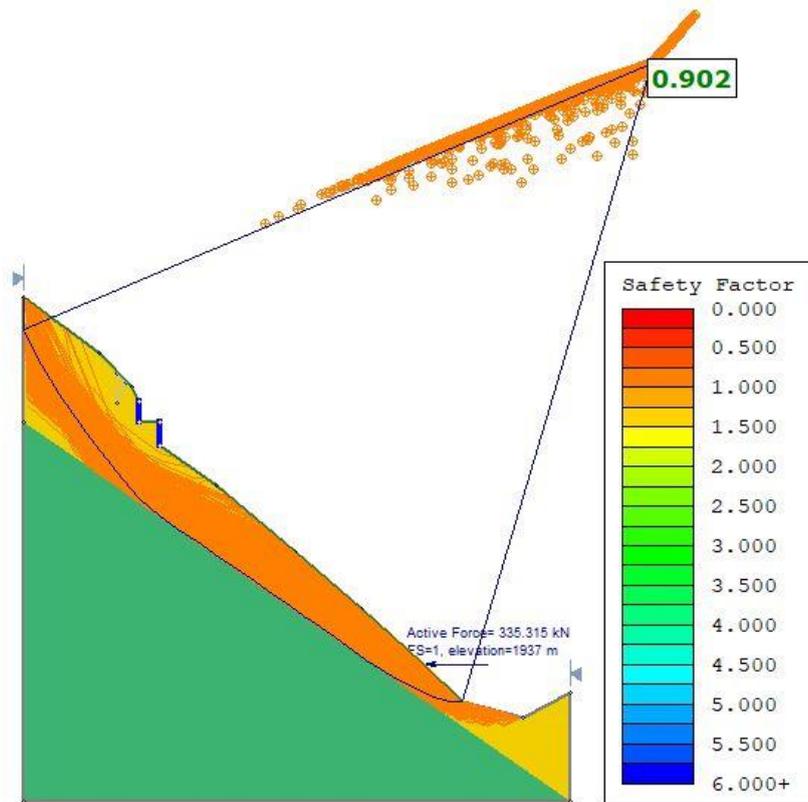


Figura 6.10 Rappresentazione del profilo dopo la back analysis, con richiesta della forza necessaria alla stabilizzazione a una quota di 1937 m



Figura 6.11 Esempio di gabbionature di contenimento (Fonte: www.cordioli.biz)

Inoltre, è previsto l'inserimento di un tirante con una capacità a trazione di 1250 kN e una profondità di 15 m, posto a supporto della gabbionatura alla base del pendio. Infine, i due muri in pietrame a sostegno della strada, ormai degradati, vengono sostituiti da altre due gabbionature.

Per la precisione si è pensato a quattro gabbionature di 6, 4, 4 e 3 m di altezza rispettivamente poste dal fondo del versante verso la strada. Ogni elemento trasferisce, attraverso un profilo triangolare, una pressione equivalente verso il pendio di 27 kN/m^3 . Anche le nuove gabbionature di sostegno alla strada mantengono queste caratteristiche, per un'altezza di 4 e 2 m circa. Per le griglie geosintetiche, presenti su file da cinque dopo l'ultima gabbionatura e in cima al versante (al di sopra della strada), si è stimata una forza a trazione pari a circa 600 kN/m . Queste possono anche essere sostituite da palificate costituite da legname presente in loco, mantenendo la stessa funzione di protezione e rinforzo. In seguito a questi interventi il versante raggiungerebbe una maggiore stabilità, garantendo un fattore di sicurezza di 1.209 (Figura 6.12).

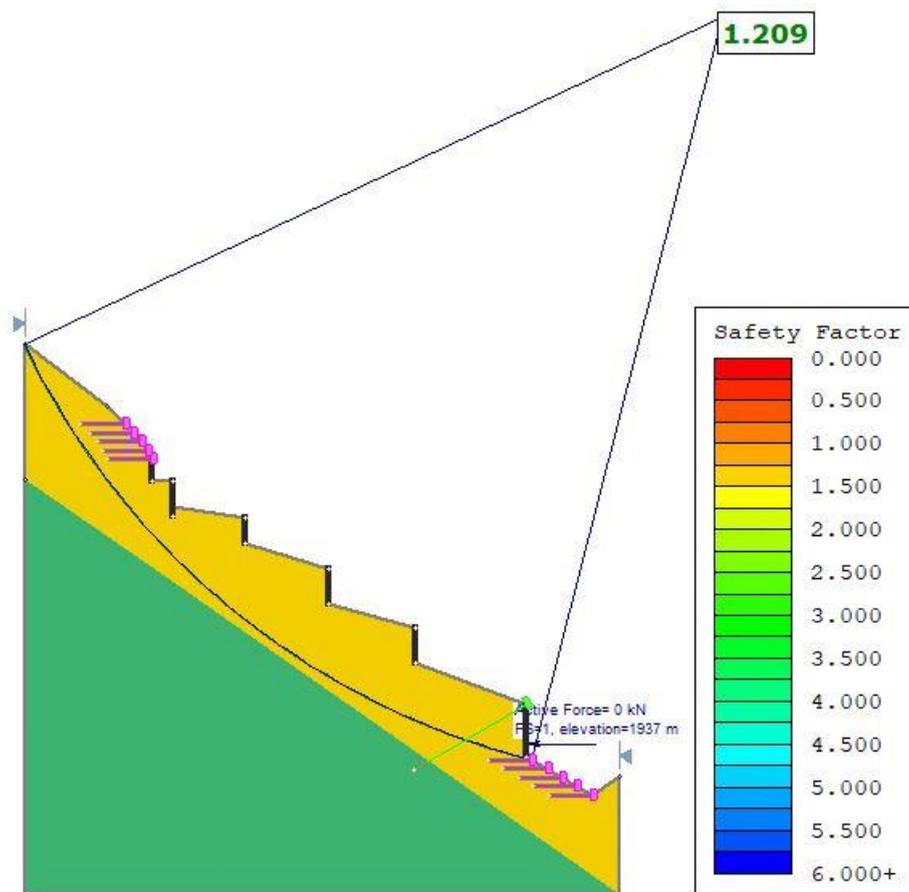


Figura 6.12 Nuovo profilo con l'inserimento delle gabbionature e spianamento dell'alveo del Rio Inferno. FS>1

6.3 PROPOSTA DI UN PONTE TIBETANO COME SUPERAMENTO DELL'AREA FRANATA

Come visto finora, l'area raggiunge livelli di criticità non indifferenti dovuti, oltre che dai continui fenomeni di colata detritica, anche dai diversi scivolamenti superficiali causati dalle erosioni al piede dei versanti. Inoltre, le idee dei supporti esposte nel paragrafo precedente permettono di raggiungere una condizione di stabilità, senza però dare una vera e propria certezza sulla durata di quest'ultima. Si è pensato, dunque, di proporre un'ulteriore soluzione per arginare il problema, ipotizzando la costruzione di un ponte tibetano che permetta il passaggio da una parte all'altra della valle, superando l'area franata.

Il ponte comincerebbe qualche metro più indietro rispetto alla zona interessata da scivolamenti superficiali, dove il terreno risulta maggiormente stabile e proseguirebbe per circa 160 m fino al versante opposto, dove si ricongiungerebbe con la strada militare (Figura 6.13).

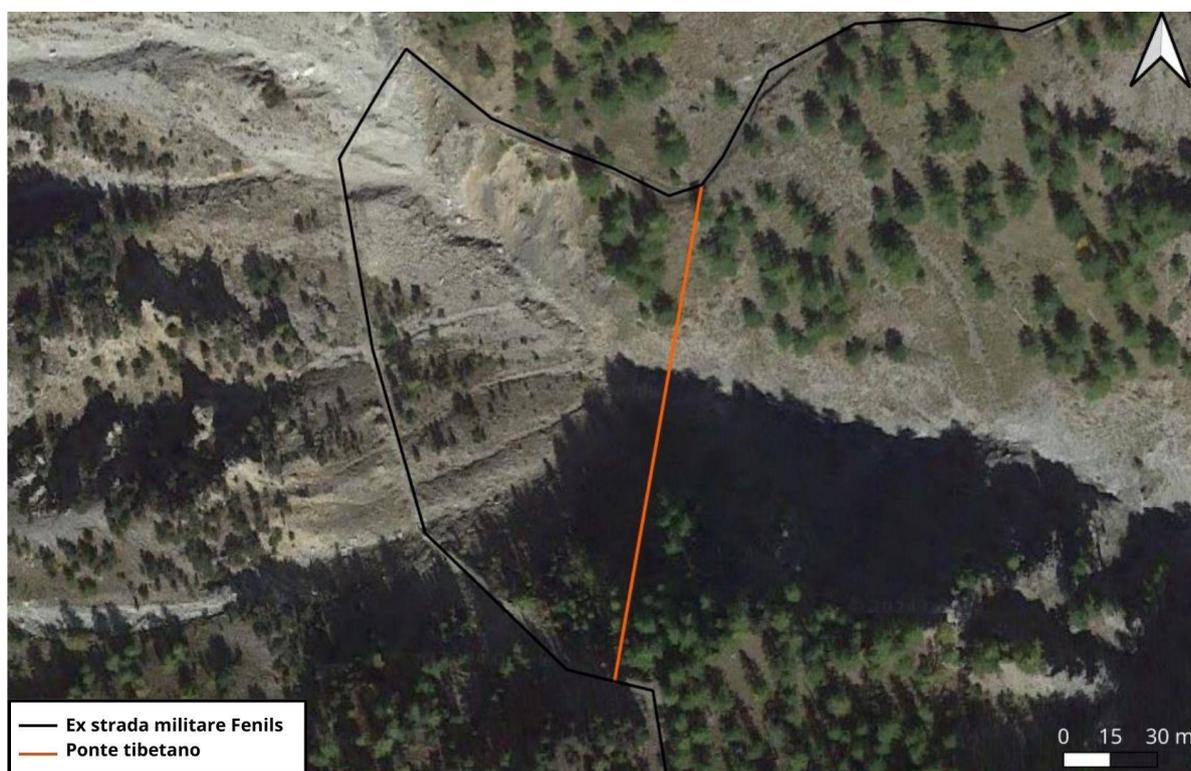


Figura 6.13 Visualizzazione del ponte tibetano tra le due vallate.

La progettazione del ponte è stata effettuata seguendo il modello del vicino ponte tibetano Claviere-Cesana, situato circa 5 km a sud-ovest del sito d'interesse. La struttura del ponte comprende:

- 4 cavi principali in acciaio (2 per lato)
- traversine in legno
- supporti verticali lungo i lati del ponte
- plinti in calcestruzzo sui quali concentrare i carichi dovuti al peso dell'intera struttura.

Considerando dei cavi principali con un diametro di 20 mm, il peso totale per 4 cavi in acciaio risulta pari a circa 1600 kg; ipotizzando una larghezza del ponte di 80 cm per consentire il passaggio di una persona per volta e uno spessore di 5 cm delle traversine, il peso totale di queste ultime raggiunge circa i 4500 kg; i supporti verticali sono cavi simili a quelli principali, disposti lungo entrambi i lati del ponte (circa uno ogni metro) e pesano complessivamente poco più di 1000 kg; i due plinti in calcestruzzo hanno una base di $2 \times 2 \text{ m}^2$ e penetrano per altri 2 m sotto il suolo, raggiungendo un peso totale di circa 20000 kg.

Il peso complessivo distribuito lungo il ponte (cavi principali, traversine e supporti) viene approssimato a circa 10000 kg. Esso si distribuisce equamente sui due plinti presenti agli estremi del ponte e si somma al peso puntuale dei plinti stessi, per un totale di circa 25 tonnellate per parte. Ottimizzando i calcoli si può considerare un carico distribuito sui plinti di 2 m^2 di circa 63 kN/m^2 .

Anche per questa proposta si è valutata l'influenza della struttura sul sito attraverso Slide2, andando ad analizzare i fattori di sicurezza sui due versanti in seguito all'installazione del ponte. Come già anticipato, a differenza del profilo della frana, il ponte si ergerebbe su depositi detritici boscati e maggiormente stabili, con una coesione media di 50 kPa. Il carico del ponte su entrambi i versanti non inficerebbe eccessivamente sulla stabilità, come dimostrano i fattori di sicurezza superiori al valore 1.20 (Figura 6.14 e 6.15).

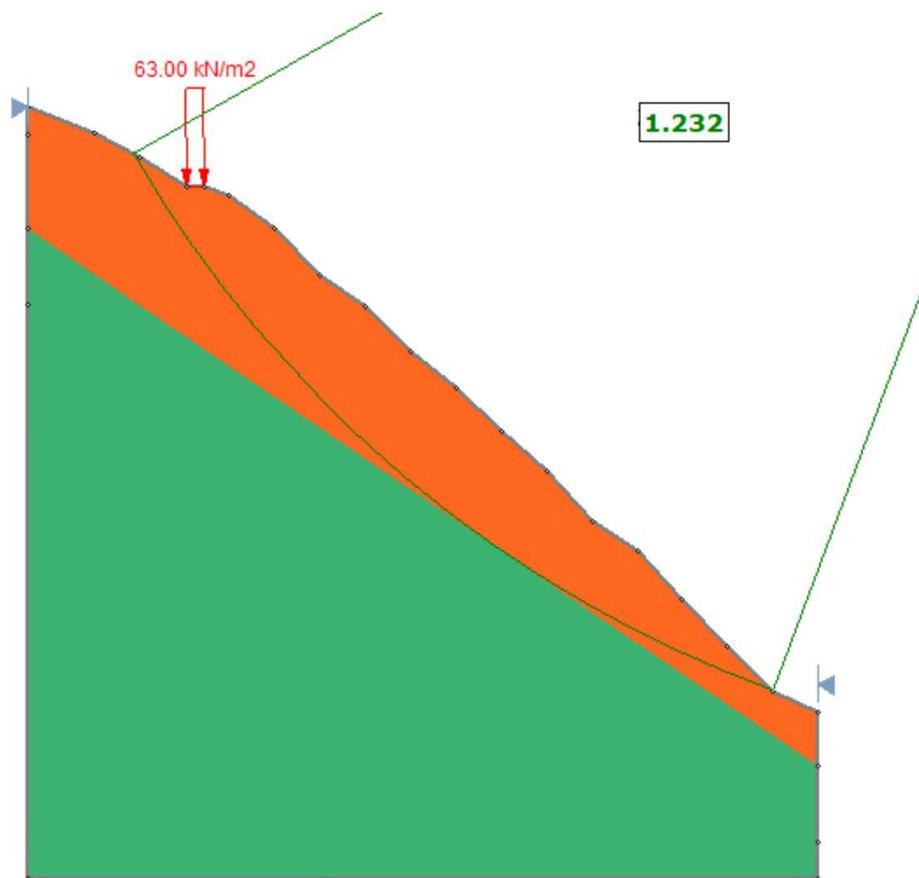


Figura 6.14 Versante di sinistra con l'applicazione del carico distribuito del ponte tibetano.

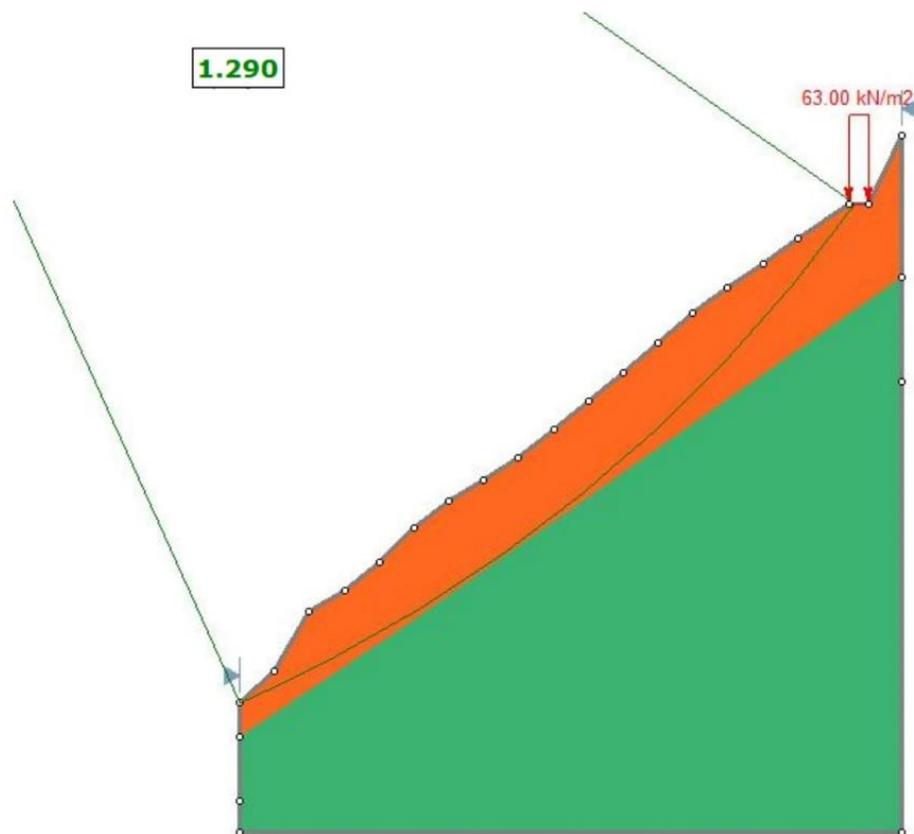


Figura 6.15 Versante di destra con l'applicazione del carico distribuito del ponte tibetano.

6.4 LIMITAZIONI ALLE SOLUZIONI PROPOSTE

Tutti gli interventi proposti, sia sul profilo di frane che per il ponte tibetano, rimangono ad oggi delle idee che prima di essere applicate nella realtà hanno bisogno di diverse verifiche e studi più approfonditi. Infatti, la maggior parte dei calcoli effettuati si basano su ipotesi ragionevoli ma non confermate da nessuna prova in sito, né di laboratorio. Per verificare tutto ciò risulterebbero fondamentali delle indagini locali, a partire da degli stendimenti geometrici e geofisici per conoscere l'effettiva posizione e profondità del bedrock composto da calcescisti. Inoltre, i valori dei parametri geomeccanici dei materiali presenti in sito sono stati proposti sulla base di valori medi, in seguito a ricerche bibliografiche, ma avrebbero bisogno di ulteriori indagini sul campo per essere confermati. In assenza di dati certi anche le verifiche a ribaltamento, scorrimento e capacità portante (come richiesto dalle NTC) sono venute meno, limitando lo studio alla sola verifica a stabilità globale. In conclusione, il sito d'interesse è situato in una posizione geografica e morfologica complessa, la quale renderebbe difficile un'eventuale cantierizzazione dell'area e il transito dei mezzi di cantiere.

CONCLUSIONI

Il presente elaborato di tesi si è concentrato principalmente sullo studio generale dei fenomeni di colata detritica e, più approfonditamente, sull'analisi geomorfologica del sito di Fenils, a Cesana Torinese (TO), frequentemente soggetto a questo genere di fenomeni. Dopo aver introdotto l'argomento generale e aver descritto tutte le sue caratteristiche principali, è stata esaminata l'area del bacino del Rio Fenils dal punto di vista geografico, geomorfologico, geologico e storico. L'inquadramento del sito è fondamentale per comprendere le dinamiche di innesco e propagazione del fenomeno e per individuare i fattori predisponenti nel contesto studiato. Questi ultimi, in particolare, sono stati analizzati più accuratamente nella fase successiva dell'elaborato, incentrata sul metodo RES. Il metodo Rock Engineering System ha permesso di generare una mappa di suscettibilità alle colate detritiche, consentendo di individuare le zone all'interno dell'area di studio maggiormente critiche e a rischio. Per la creazione della mappa è stato necessario analizzare nel dettaglio la variazione di alcuni parametri: litologia, pendenza, connettività, uso del suolo, densità di fratturazione e attività franosa. Ad ognuno di essi è stato assegnato un punteggio che ha portato alla definizione cella per cella del livello di suscettibilità ai fenomeni. Il risultato ha evidenziato un andamento medio-alto della suscettibilità con picchi di livello estremo nelle aree di deposito, dove già diversi eventi si sono verificati negli anni. Proprio su una di queste aree, in corrispondenza della ex strada militare di Fenils, è stata condotta un'analisi di stabilità con l'obiettivo di trovare alcune soluzioni ingegneristiche per la messa in sicurezza. La strada attraversava il Rio Inferno (tratto iniziale del Rio Fenils) e conduceva alla vetta dello Chaberton, ma i continui fenomeni di debris flow hanno cancellato un tratto del sedime stradale, causando anche fenomeni di erosione al piede del versante e, di conseguenza, alcune frane superficiali. Attraverso il software Slide2 (©RocScience) sono state effettuate delle back analyses per verificare la stabilità globale, proponendo l'installazione di elementi di contenimento e rinforzo, quali gabbionature, geosintetici e tiranti. Per questo motivo è stata suggerita come soluzione alternativa la progettazione di un ponte tibetano in un settore di versante maggiormente stabile (alcuni metri prima della frana superficiale presente), che permetterebbe di superare l'area franata raggiungendo direttamente il versante opposto e in sicurezza. Tuttavia, per la realizzazione degli interventi proposti sono necessarie ulteriori verifiche e indagini più approfondite, data l'assenza di analisi sul campo che confermino i dati di base. Questi sono stati ricavati principalmente da ricerca bibliografica e, dunque, seppur ragionevoli, necessitano di altre verifiche sia sulla composizione del sito sia sulle sue condizioni di stabilità, in seguito alle nuove installazioni.

BIBLIOGRAFIA

- Ancey, C. (2002). *Dry granular flows down an inclined channel: Experimental investigations on the frictional-collisional regime*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.011304>
- Bogge A. (1975). L'alluvione del 1728 in Val di Susa.
- Bonetto, S., Mosca, P., Vagnon, F., & Vianello, D. (2021). *New application of open source data and Rock Engineering System for debris flow susceptibility analysis*. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6814-3>
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). *Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Castellano E. (1984). *Distruggete lo Chaberton!*
- Chen, H. X., Zhang, S., Peng, M., & Zhang, L. (2016). *A physically-based multi-hazard risk assessment platform for regional rainfall-induced slope failures and debris flows*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.009>
- Consorzio Forestale Alta Valle Susa – CFVAS. (2002). *Verbale di sopralluogo N° 12/2002*.
- Consorzio Forestale Alta Valle Susa – CFVAS. (2013). *Verbale di sopralluogo N°48/2013*.
- Consorzio Forestale Alta Valle Susa – CFVAS. (2015). *Verbale di sopralluogo N° 27/2015*.
- Consorzio Forestale Alta Valle Susa – CFVAS. (2017). *Verbale di sopralluogo N° 2065/2017*.
- Consorzio Forestale Alta Valle Susa – CFVAS. (2019). *Verbale di sopralluogo N° 97/2019*.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). *Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk*. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). *Recognition, classification, and mechanical description of debris flows*. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8)
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning*. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>
- Giardino, M., Fioraso, G. (1998). *Cartografia geologica delle formazioni superficiali in aree di catena montuosa: il rilevamento del Foglio "Bardonecchia" nell'ambito del Progetto CARG*.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). *Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>
- Harrison JP., & Hudson JA. (2006). *Comprehensive hazard identification in rock engineering using interaction matrix mechanism pathways*.
- Hudson, J. A. (1992). *Rock Engineering System: Theory and Practice*.

- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). *The Varnes classification of landslide types, an update*. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hutchinson, J. N. (1988). *General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127121468>
- INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. (2019). Modello di pericolosità sismica MPS04-S1. <https://esse1-gis.mi.ingv.it/>
- ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2014). *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000 - Foglio 171 Cesana Torinese*. <https://doi.org/10.15161/oar.it/143173>
- ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. (2014). *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000 – Foglio 171 Cesana Torinese*.
- Ivy-Ochs, S., Lucchesi, S., Baggio, P., Fioraso, G., Gianotti, F., Monegato, G., ... & Schlüchter, C. (2018). *New geomorphological and chronological constraints for glacial deposits in the Rivoli-Avigliana end-moraine system and the lower Susa Valley (Western Alps, NW Italy)*.
- Jakob M., Hungr O. (2005). *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*.
- Klose M., (2015). *Landslide Databases as Tools for Integrated Assessment of Landslide Risk*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20403-1>
- Lorenzini, G., & Mazza, N. (2004). *Debris Flow – Phenomenology and Rheological Modelling*.
- Luino F., Turconi L. (2018). *Eventi di piena e frana in Italia Settentrionale nel periodo 2005-2016 - Anno 2006*.
- Mazzoccola, D. F., & Hudson, J. A. (1996). *A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability*. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.03>
- Nirta A. (2018). *Che cosa è un debris flow*. <https://www.intrageo.it/geologia/geomorfologia/che-cosa-e-un-debris-flow/>
- Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). *A rhéologie classification of subaerial sediment-water flows*. <https://doi.org/10.1130/REG7-p1>
- Polino, R., Monticelli, F., Vaccaro, D. (1983). *L'unità piemontese Chaberton-GrandHoche (Val Susa-Alpi Occidentali): Evoluzione lito-stratigrafica, assetto strutturale e rapporti con i complessi circostanti*.
- Rozos D., Pyrgiotis L., Skias S., Tsagaratos P. (2008). *An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory. An application in Karditsa County*. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0117-4>
- Rozos D., Bathrellos GD., Skillodimou HD. (2011). *Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece*. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0687-z>
- Staub R. (1934). *Grundzuge and Probleme alpiner Morphologie*.
- Takahashi T. (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*.
- Tiranti, D., Crema, S., Cavalli, M., & Deangeli, C. (2018). *An integrated study to evaluate debris flow hazard in alpine environment*. *Frontiers in Earth Science*, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00060>

Tropeano D., Turconi L. (1998). *Colate detritiche del 12, 15 e 16 agosto 1998 in Alta Valle di Susa (Piemonte)*.

Tropeano D., Turconi L. (2002). *L'evento del 13 giugno 2000 nelle Alpi Occidentali: effetti sui versanti e nella rete idrografica*.

Tropeano D., Luino F., Turconi L. (2006). *Eventi di piena e frana in Italia settentrionale nel periodo 2002-2004*.

Varnes, D. J. (1984). *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*.

Vianello, D. (2024). *Defining debris flow susceptibility: from databases to site investigation*.
Università degli studi di Torino.

Zhou, Y., Yue, D., Liang, G., Li, S., Zhao, Y., Chao, Z., & Meng, X. (2022). *Risk Assessment of Debris Flow in a Mountain-Basin Area, Western China*. <https://doi.org/10.3390/rs14122942>