



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

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

Tesi di laurea magistrale

A.A. 2023/2024

Sessione di Laurea ottobre 2024

Approccio innovativo per il monitoraggio di colate detritiche

Caso studio nel bacino del Rio Frejus, Bardonecchia (TO)

Relatore:

Prof. Federico Vagnon

Candidata:

Francesca Cantonati

Correlatori:

Ing. Giulio Lissari

Dott. Ric. Geol. Davide Tiranti

RIASSUNTO

Lo scopo di questa tesi è la progettazione e sviluppo di un sistema di monitoraggio utile al rilevamento di colate detritiche, ovvero fenomeni gravitativi rapidi, che possono interessare i centri abitati posizionati in aree montane o collinari, come il caso del comune di Bardonecchia (TO).

Le colate detritiche consistono in flussi di materiale solido e acqua, i quali si innescano a seguito di intensi e improvvisi quantitativi d'acqua e si propagano verso valle ad elevata velocità, rappresentando un pericolo per le popolazioni residenti sui conoidi. Sulla base delle caratteristiche tipiche del fenomeno risulta evidente la necessità di agire per ridurre il rischio sia tramite opere strutturali, ma soprattutto attraverso la realizzazione di sistemi di allerta.

In questo lavoro di tesi il sito scelto per l'installazione ricade nel bacino del Rio Frejus, situato nel Comune di Bardonecchia (TO), il quale è stato interessato annualmente da fenomeni di colate detritiche, anche di modeste magnitudo, come nell'evento del 13 agosto 2023. Inizialmente l'area è stata studiata dal punto di vista degli eventi pregressi e dei fattori predisponenti, per individuare le zone più suscettibili, su cui successivamente concentrare il monitoraggio.

La progettazione e l'installazione del sistema di monitoraggio sono state svolte all'interno del progetto di ricerca e sviluppo SAFE (Sistema Avanzato FranE), vinto da Emisfera Soc. Coop. in partenariato con Corintea Soc. Coop., con la quale si è collaborato per il presente lavoro. Il progetto prevede la realizzazione di un monitoraggio conoscitivo, tramite l'installazione di una rete di sensori lungo l'asta torrentizia e lo svolgimento di rilievi multitemporali nella zona di testata del bacino. I dati raccolti hanno l'obiettivo di approfondire la conoscenza del fenomeno in quest'area, per poter successivamente definire delle soglie d'innescio sito-specifiche, fondamentali per la realizzazione di un sistema di allerta, e poter individuare il tasso di ricarica detritico all'interno del bacino per prevedere futuri inneschi.

Il sistema installato, pur essendo ancora in una fase preliminare e sperimentale di sviluppo, ha dimostrato un'efficienza nel monitoraggio e costi contenuti, grazie alla tecnologia LoRaWAN utilizzata per la comunicazione dei dati. Dai risultati ottenuti si è potuta apprezzare l'efficacia nel rilevamento delle colate detritiche. Tuttavia, i dati registrati non sono ancora

sufficienti per trarre ulteriori conclusioni sul fenomeno, ai fini della definizione di un sistema di allerta efficace, poiché limitati in estensione temporale a causa della breve durata del monitoraggio.

ABSTRACT

The aim of this thesis is the design and experimentation of a monitoring system useful for detecting debris flows, which are rapid gravitational phenomena affecting inhabited areas located in mountainous or hilly regions, such as in the case of the municipality of Bardonecchia (TO).

Debris flows consist of solid material and water flows, triggered by sudden and intense amounts of water, propagating downstream at high speeds, posing a threat to populations living on alluvial fans. Based on the typical characteristics of the phenomenon, it is evident that action must be taken to reduce the risk, both through structural works and, above all, the development of early warning systems.

In this thesis, the selected site for installation fall within the Rio Frejus basin, located in the municipality of Bardonecchia (TO), which has been annually affected by debris flow events, including those of modest magnitude, such as the event of August 13, 2023. Initially, the area was studied with respect to past events and predisposing factors to identify the most susceptible zones, which would later become the focus of monitoring.

The design and installation of the monitoring system were carried out within the SAFE (Advanced FranE System) research and development project, won by Emisfera Soc. Coop., in partnership with Corintea Soc. Coop., with whom collaboration for this thesis was established. The project involves conducting knowledge-based monitoring through the installation of a sensor network along the stream channel and carrying out multi-temporal surveys in the headwater area of the basin. The data collected aims to deepen the understanding of the phenomenon, in order to subsequently define site-specific triggering thresholds, which are fundamental for creating an early warning system, to identify the debris recharge rate within the basin to predict future triggering events.

The installed system, while still in a preliminary and experimental development phase, has demonstrated monitoring efficiency and contained costs, thanks to the LoRaWAN technology used for data communication. The results obtained have shown the system's effectiveness in detecting debris flows. However, the data recorded are not yet sufficient to draw further

conclusions about the phenomenon, as the temporal extent of the data is limited due to the short monitoring period.

SOMMARIO

RIASSUNTO	3
ABSTRACT	5
SOMMARIO	7
ELENCO DELLE TABELLE.....	9
ELENCO DELLE FIGURE	10
1. INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	14
1.1 Stato dell'arte.....	14
1.2 Scopo della tesi	17
1.3 Struttura del lavoro svolto.....	18
2. LE COLATE DETRITICHE: FENOMENOLOGIA	20
2.1 Instabilità dei pendii.....	20
2.2 Classificazione dei fenomeni di colata.....	22
2.3 Colate detritiche	26
2.4 Formazione e meccanismi di propagazione	32
2.4.1 Innesco	33
2.4.2 Propagazione.....	35
2.4.3 Deposito	37
2.5 Monitoraggio.....	40
3. AREA DI STUDIO	48
3.1 Inquadramento geografico	48
3.2 Inquadramento geologico e geomorfologico	50
3.3 Caratteristiche climatiche dell'area.....	56
3.4 Censimento dei principali eventi registrati nel bacino del Rio Frejus	57
3.4.1 6-7 agosto 2004.....	58
3.4.2 7 agosto 2009	60
3.4.3 13 agosto 2023	61
3.5 Studi pregressi sul bacino del Rio Frejus.....	64

3.6 Opere di protezione presenti	67
4. SUSCETTIBILITÀ	73
4.1 Valutazione del rischio	73
4.2 Suscettibilità.....	75
4.3 Metodo RES.....	80
4.4 Applicazione al caso studio.....	85
4.4.1 Fattori predisponenti	85
4.4.2 Matrici di interazione.....	94
4.4.3 Modifiche effettuate.....	97
4.5 Risultati.....	101
5. SISTEMA DI MONITORAGGIO	106
5.1 Obiettivi del monitoraggio.....	106
5.2 Fasi di realizzazione di un sistema di monitoraggio	107
5.3 Progettazione del sistema.....	109
5.4 Installazione dei sensori.....	120
5.5 Risultati ottenuti.....	124
6. RILIEVO MULTITEMPORALE CON DRONE	130
6.1 Fotogrammetria e processo fotogrammetrico	130
6.2 Realizzazione rilievo.....	133
6.2.1 Strumentazione	135
6.2.2 Pianificazione del volo.....	138
6.2.3 Materializzazione GCP e rilievo di punti con ricevitore GPS/GNSS.....	141
6.2.4 Esecuzione del volo	143
6.3 Elaborazione dati	144
6.4 Change detection e Tasso di ricarica.....	148
CONCLUSIONI	154
RINGRAZIAMENTI	156
BIBLIOGRAFIA	157

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2.1: Classificazione dei movimenti secondo Varnes (1978)	22
Tabella 2.2: Classificazione dei fenomeni franosi di tipo colata (Hungt et al., 2001)	24
Tabella 2.3: Principali caratteristiche fisiche delle colate detritiche	28
Tabella 2.4: Classificazione reologica dei flussi sedimento/acqua nei canali (Costa, 1984).....	29
Tabella 2.5: Correlazione tra la pendenza del letto del canale e le fasi della colata detritica.....	35
Tabella 2.6: Parametri misurati e sensori utilizzati per il monitoraggio di colate detritiche (Arattano e Marchi, 2008).....	43
Tabella 2.7: Caratteristiche principali dei sensori più comunemente utilizzati nel monitoraggio di colate detritiche (Hurlimann et al, 2019).....	45
Tabella 2.8: Sensori utilizzati per l'allertamento di colate detritiche (Arattano e Marchi, 2008).....	45
Tabella 3.1: Sintesi delle caratteristiche del bacino del Rio Frejus.....	55
Tabella 3.2: Processi osservati avvenuti tra il 1914 e il 2024	58
Tabella 3.3: Tipologia e stato di ammaloramento delle opere presenti.....	68
Tabella 4.1: Classificazione e punteggi dei fattori predisponenti considerati nelle matrici di interazione A e B per l'applicazione delle RES	93
Tabella 4.2: Matrice di interazione A, codificata per l'affioramento di litologie rocciose	94
Tabella 4.3: Matrice di interazione B, codificata per l'affioramento di depositi quaternari	94
Tabella 4.4: Matrice di interazione B descrittiva	95
Tabella 4.5: Matrice di interazione A descrittiva.....	95
Tabella 4.6: Matrice di interazione A, modificata e codificata	98
Tabella 4.7: Matrice di interazione B, modificata e codificata	99
Tabella 4.8: Matrice di interazione A modificata e descritta	99
Tabella 4.9: Matrice di interazione B modificata e descritta.....	100
Tabella 5.1: Codici dei sensori installati sulle opere di protezione.....	118
Tabella 5.2: Elenco dei sensori installati, con relativi dati tecnici	118
Tabella 6.1: Caratteristiche tecniche dell'APR DJI Mavic 3 Multispectral.....	137
Tabella 6.2: Caratteristiche tecniche dell'antenna GNSS	137
Tabella 6.3: Coordinate dei target.....	143
Tabella 6.4: Dati riassuntivi del rilievo effettuato il 30 luglio 2024	143
Tabella 6.5: Dati riassuntivi del rilievo effettuato il 20 agosto 2024	144

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1: Percentuale di eventi fatali in funzione del tipo di dissesto o di fenomeno torrentizio negli ultimi 150 anni nel Nord Italia (Tropeano e Turconi, 2004)	15
Figura 2.1: Tipologie di movimento secondo la classificazione di Varnes (1978)	21
Figura 2.2: Domini di esistenza delle tre tipologie di colate detritiche (modificato da Takahashi, 2007)	31
Figura 2.3: Schema degli spazi di sviluppo di un debris flow	32
Figura 2.4: Influenza delle precipitazioni in terreni insaturi (Ahmadi-adli et al., 2017).....	33
Figura 2.5: Meccanismi innescanti delle colate detritiche (Statens Vegvesen, 2014).....	34
Figura 2.6: Pendenze e distinzione delle diverse zone secondo VanDine (1996).....	35
Figura 2.7: Sezione longitudinale, trasversale e vista in pianta di un canale e di un deposito di colata (Johnson & Rodine, 1984)	36
Figura 2.8: Rappresentazione schematica di un debris flow (a sx Pierson & Costa, 1987; a dx Bardou et al, 2003).....	36
Figura 2.9: Tipologia di depositi (VanDine, 1996).....	38
Figura 2.10: Rappresentazione granulometrica delle diverse geologie di bacini da colata detritica (Moscariello et al., 2009).....	38
Figura 2.11: Schema e foto di depositi con gradazione inversa	39
Figura 2.12: Esempio di celle temporalesche attive.....	42
Figura 2.13: Schema di monitoraggio Warning System (Arattano e Marchi, 2008).....	43
Figura 2.14: Sensori ad ultrasuoni (Arattano e Marchi, 2008).....	44
Figura 2.15: Individuazione della velocità del fenomeno tramite il riconoscimento dei fronti d'onda in punti diversi del canale (Comiti et al, 2014)	44
Figura 2.16: Schema generale di un sistema di monitoraggio per colate detritiche (Ye et al., 2019)	47
Figura 3.1: Inquadramento geografico del bacino del Rio Frejus	48
Figura 3.2: Bacino idrografico del Rio Frejus e i suoi sottobacini.....	49
Figura 3.3: Rappresentazione schematica della tettonica dell'alta Val Susa e Chisone (modificata dal Servizio Geologico D'Italia, 2002, 2020).....	50
Figura 3.4: Calcescisti affioranti.....	51
Figura 3.5: Estratto dalla Carta Geologia d'Italia, scala 1:50.000, foglio 132-152-153 (Progetto CARG).....	51
Figura 3.6: Settori di cresta del bacino del Rio Merdovine, con visibili accumuli detritici alla base delle pareti di calcescisti filladici	52
Figura 3.7: Evidenti fenomeni erosivi nelle coperture detritiche	53
Figura 3.8: Aree di testata segnate da profonde incisioni	54
Figura 3.9: Distribuzione delle stazioni meteorologiche di Arpa Piemonte prossime al bacino del Rio Frejus	56

Figura 3.10: Torrente Frejus immediatamente a monte della confluenza nella Dora di Valle stretta. Caratteristiche del deposito (in parte mobilizzato antropicamente) e del livello massimo della colata visibile sul rilevato ferroviario.....	59
Figura 3.11: Evoluzione del fenomeno temporalesco verificatosi sul Comune di Bardonecchia nel pomeriggio del 07/08/2009.....	60
Figura 3.12: Ostruzione della luce del ponte di Via Europa da parte dei depositi di colata.....	61
Figura 3.13: Immagini orarie da radar meteorologico, osservate tra le 18:00 UTC e le 21:00 UTC.....	62
Figura 3.14: Cella temporalesca nell'istante in cui interessa il bacino del Torrente Frejus.....	62
Figura 3.15: Perimetrazione speditiva delle aree coinvolte e dei danni registrati (SIFRAP).....	63
Figura 3.16: Vista dell'area interessata dall'accumulo di materiale, il ponte della stazione e il Commissariato di Polizia. A destra da monte, mentre a sinistra da valle.....	64
Figura 3.17: Definizione delle componenti ascendente e discendente dell'indice di connettività (Borselli et al., 2008).....	65
Figura 3.18: Risultato dell'analisi di connettività, considerando il Rio Frejus come target.....	66
Figura 3.19: Aree sorgente risultanti dall'intersezione tra le sorgenti di depositi e un buffer di 50m dalla rete idrografica (Tiranti et al., 2018).....	67
Figura 3.20: Briglia selettiva, successivamente all'evento di luglio 2024.....	68
Figura 3.21: Ubicazione delle opere trasversali realizzate nell'asta del Torrente Frejus (CFAVS).....	69
Figura 3.22: Barriera trasversale 1. a) nel 2002, b) nel 2007 con evidente scalzamento, c) dopo la manutenzione effettuata nel 2020, d) a seguito dell'evento di agosto 2023.....	70
Figura 3.23: Barriera trasversale 2. a) nel 2007 dove era già evidente l'ammaloramento del calcestruzzo e l'assottigliamento dei ferri, b) e c) dopo l'evento del 2023 in cui è stata asportata la maggior parte dell'opera....	70
Figura 3.24: Barriera trasversale 3, in pietrame. a) danneggiamento a seguito dell'evento del 2004, b) briglia completamente distrutta a seguito dell'evento del 2023.....	71
Figura 3.25: Ponte di ferro, posizionato poco a valle della barriera 5.....	71
Figura 3.26: Barriere fenestrate 6, a) dopo l'evento del 2004, b) dopo l'evento del 2009, c) e d) dopo l'evento del 2023.....	72
Figura 3.27: Barriera trasversale 5, posizionata alla confluenza del rio Gautier.....	72
Figura 4.1: Schema per la valutazione del rischio da frana (Corominas, 2014).....	75
Figura 4.2: Percentuale di utilizzo delle variabili per la definizione della suscettibilità da frana (Reichenbach et al., 2018).....	77
Figura 4.3: Metodi per la valutazione della suscettibilità da frana (Corominas, 2014).....	78
Figura 4.4: Principio di funzionamento della matrice di interazione (Hudson, 1992).....	81
Figura 4.5: Schema rappresentativo della matrice di interazione e dei parametri Causa ed Effetto (Bonetto et al., 2021).....	82
Figura 4.6: Esempio di diagramma causa-effetto.....	83
Figura 4.7: Distribuzione spaziale della litologia.....	86
Figura 4.8: Distribuzione spaziale dei depositi quaternari.....	87
Figura 4.9: Carta della pendenza (sx) e suddivisione in classi con i rispettivi valori di P_{ik} (dx).....	88
Figura 4.10: Schema rappresentativo dei possibili andamenti della curvatura.....	88
Figura 4.11: Distribuzione spaziale della curvatura.....	89
Figura 4.12: Rappresentazione della rete idrografica (sx) e dei buffer con i rispettivi valori di P_{ik} (dx).....	90

Figura 4.13: Distribuzione spaziale e classificazione dell'uso del suolo.....	91
Figura 4.14: Distribuzione dei lineamenti selezionati manualmente (sx) e distribuzione della densità di lineamenti (dx).....	92
Figura 4.15: Distribuzione spaziale dei fenomeni franosi, classificati sulla base dell'attività.....	93
Figura 4.16: Diagramma causa-effetto della Matrice B.....	96
Figura 4.17: Diagramma causa-effetto della Matrice A.....	96
Figura 4.18: Risultato applicazione del metodo RES effettuata da Vianello et al. (2023).....	97
Figura 4.19: Risultato applicazione del metodo RES con la connettività e le ulteriori modifiche.....	101
Figura 4.20: Confronto tra la mappa di suscettibilità ottenuta da Vianello et al. (2023) e quella con la connettività e le ulteriori modifiche.....	102
Figura 4.21: Mappa della differenza relativa tra i due risultati del metodo RES.....	103
Figura 4.22: Scarpate secondarie presenti nel bacino del Rio Merdovine.....	103
Figura 4.23: Individuazione area oggetto di rilievo multitemporale da APR e accessibilità.....	105
Figura 5.1: Componenti del pluviometro a benna ribaltante installato.....	110
Figura 5.2: Schema di funzionamento del sensore di livello.....	111
Figura 5.3: Differenti velocità coinvolte nella propagazione di una colata detritica: la velocità della colata stessa V_d e la velocità di propagazione delle vibrazioni indotte V_w (Arattano, 1999).....	112
Figura 5.4: Disposizione degli assi rispetto al sensore.....	113
Figura 5.5: Diagramma di corsa rappresentante il funzionamento del cavo a strappo.....	114
Figura 5.6: Esempio di risultato di area visibile in bianco e spazio nascosto in nero. La posizione dell'osservatore e contrassegnata in rosso.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 5.7: Risultati dell'analisi di visibilità.....	116
Figura 5.8: Località e posizione delle briglie utilizzate come supporto ai sensori.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Figura 5.9: Posizionamento definitivo dei sensori.....	118
Figura 5.10: Esempio di visualizzazione dei dati sulla piattaforma: accelerometro (ACM), sismometro (EQ), sensore di livello (WLM), pluviometro (RM), cavo a strappo (PC).....	119
Figura 5.11: Individuazione della posizione del sensore durante il test di segnale.....	120
Figura 5.12: Fasi dell'installazione di accelerometri e sismometri, tramite tasselli.....	121
Figura 5.13: Gateway GWT1 in località Camini, con dettaglio del pluviometro RM1.....	121
Figura 5.14: Cavo a strappo e accelerometro ACM5 installati in corrispondenza della briglia 02.....	122
Figura 5.15: Sensore di livello WLM1, accelerometro ACM4 e sismometro EQ4 installati sulla soglia03 ..	122
Figura 5.16: Sensore di livello WLM2 installato in corrispondenza del ponte01.....	122
Figura 5.17: Accelerometro ACM2 e sismometro EQ2 successivamente all'installazione dei pannelli solari aggiuntivi e della tettoia.....	123
Figura 5.18: Evento del 30 luglio, ripreso dal cellulare, che transita nel centro abitato.....	124
Figura 5.19: Differenze visualizzabili in uno stesso deposito in seguito all'evento del 30 luglio (sinistra) e del 31 luglio (destra).....	125
Figura 5.20: Registrazione di livello, intensità sismica e precipitazione dell'evento del 30 luglio 2024.....	126
Figura 5.21: Registrazione di livello, intensità sismica e precipitazione dell'evento del 31 luglio 2024.....	127
Figura 5.22: Andamento del livello del pelo libero nel periodo 30 luglio-1° agosto in corrispondenza di WLM1.....	128

Figura 5.23: Differenze nell'altezza dell'alveo successivamente all'evento del 30 luglio (sinistra) e del 31 luglio (destra), in corrispondenza del sensore di livello WLM1	128
Figura 6.1: Schema geometrico della generazione di un fotogramma	131
Figura 6.2: Determinazione della posizione del punto A al suolo a partire dal suo omologo A' fotografato con un solo fotogramma o due distinti (Cannarozzo et al., 2012).....	132
Figura 6.3: Il flusso di lavoro Structure-from-Motion: dalla fotografia alla nuvola di punti (SIFT, CMVS, PMVS2 sono acronimi di algoritmi di feature detection) (Westoby, 2012)	133
Figura 6.4: Modello stereoscopico e i 12 parametri di orientamento esterno (Cannarozzo et al., 2012)	134
Figura 6.5: APR DJI Mavic 3 Multispectral	135
Figura 6.6: Ricevitore GPS/GNSS Geomax Zenith 60	135
Figura 6.7: Esempio di target realizzato nell'area oggetto del rilievo	136
Figura 6.8: Rappresentazione schematica del Ground Simple Distance	138
Figura 6.9: Esempio di schema di volo e zone di sovrapposizione.....	139
Figura 6.10: Schema di presa per il ricoprimento e per la creazione dei modelli stereoscopici (Cannarozzo et al., 2012).....	139
Figura 6.11: Effetto del trascinamento dell'immagine di un generico punto A sul terreno (Cannarozzo et al., 2012).....	140
Figura 6.12: Distribuzione dei target nell'area oggetto del rilievo	143
Figura 6.13: Schermata del workflow di Metashape e passaggi descritti nel seguente paragrafo.....	144
Figura 6.14: Nuvola di punti sparsa (DA CAMBIARE).....	145
Figura 6.15: Rappresentazione schematica del DSM e DTM	146
Figura 6.16: Esempio di porzione di DTM interpolata, non utilizzabile per l'estrazione del DoD	150
Figura 6.17: DoD dell'area rilevata in località colle di Rocce Verdi.....	151
Figura 6.18: Esempi di abbassamento di quota dovuto a fusione nivale.....	151
Figura 6.19: Dettaglio di erosione lungo un canale: a) rilievo 30 luglio, b) rilievo 20 agosto	152
Figura 6.20: Rappresentazione del DoD in relazione alla connettività	152

1. INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

1.1 Stato dell'arte

Le colate di detrito, note a livello internazionale come debris flows, consistono in una miscela contenente principalmente acqua ed elevate concentrazioni di sedimenti di varia dimensione, causate da forti piogge o dalla fusione nivale.

Esse rappresentano un fenomeno complesso e molto pericoloso, a causa dell'estrema velocità con cui possono percorrere grandi distanze e per la forza distruttiva, dovuta all'elevata densità e alla capacità di trasportare e depositare enormi quantità di materiali sciolti.

Si tratta di un problema che da sempre interessa, in tutto il mondo, le popolazioni delle zone collinari o montane, anche se negli ultimi decenni sembra sia aumentata la loro frequenza di accadimento, probabilmente legata al ritiro dei ghiacciai, alla degradazione del permafrost, e all'aumento di frequenza delle precipitazioni più intense, a causa del cambiamento climatico globale. Per questo motivo, lo studio di tale fenomeno è diventato sempre più importante, per migliorare la comprensione dei meccanismi di innesco, di propagazione, e di deposizione, e per applicare tali conoscenze alla riduzione del rischio.

La ricerca è stata condotta principalmente in Stati aventi aree soggette a colate detritiche; tuttavia, anche in Paesi con un certo potenziale naturale di caduta massi, frane e valanghe si sono fatti studi a riguardo. Ad esempio, le formulazioni teoriche degli ultimi anni della dinamica delle valanghe di neve sono abbastanza simili ai modelli proposti per le colate detritiche.

In Italia questo fenomeno è piuttosto ricorrente, specialmente lungo l'arco alpino e gli Appennini, e per questo rappresenta un tema di grande rilevanza (Figura 1.1).

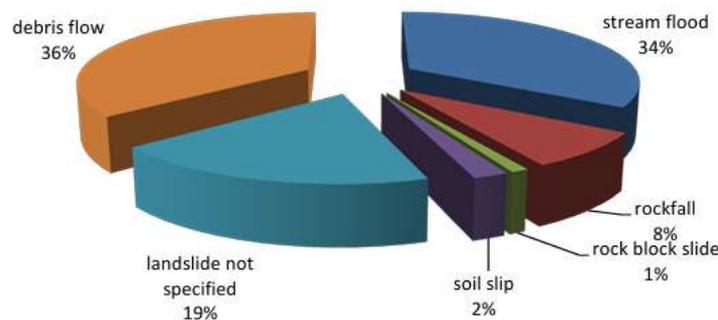


Figura 1.1: Percentuale di eventi fatali in funzione del tipo di dissesto o di fenomeno torrentizio negli ultimi 150 anni nel Nord Italia (Tropeano e Turconi, 2004)

L'attenzione riguardo le colate detritiche è iniziata negli anni Settanta, quando molti ricercatori ne compresero la differenza rispetto ad altri fenomeni franosi ed iniziarono a plasmare una loro definizione, la quale si è evoluta nel tempo. Secondo Varnes (1978), la colata detritica è una tipologia di frana che imita un flusso - traslazione spazialmente continua - di materiale con un'elevata percentuale di frammenti grossolani. Nel 2001, Hungr e co-autori stabilirono che il fenomeno, creatosi dalla saturazione dei detriti, consiste in un rapido movimento del materiale in un canale confinato.

I parametri caratteristici delle colate detritiche sono la concentrazione di solidi, che può variare tra il 30 e il 65 % nella parte anteriore e diminuisce verso la parte posteriore; la velocità, dell'ordine dei 10 km/h; e infine le pendenze del canale, che variano da circa 20°-40° nelle zone di partenza a circa 5°-10° nella zona di deposizione (VanDine, 1996). Questi dati permettono di comprendere che il fenomeno può presentarsi sotto molte forme diverse, anche solo considerando le innumerevoli variazioni della concentrazione del solido; questo implica una ulteriore complicazione per chi si occupa di questo tema.

Nonostante negli ultimi decenni siano aumentate notevolmente le conoscenze in questo campo, tutt'ora non sono completamente chiari i meccanismi fisici coinvolti in questi fenomeni. Ad esempio, anche se sono stati compiuti grandi progressi sui meccanismi di cedimento e liquefazione del suolo, devono ancora essere ulteriormente chiariti i dettagli del processo di trasformazione da frana a colata, così come i fenomeni di erosione e deposizione che caratterizzano il flusso di detriti in un canale (Lenzi, 2006).

La scarsità di dati e misurazioni relative al passato è dovuta alla difficoltà di previsione del fenomeno e alla poca accessibilità dei luoghi in cui avvengono. Negli ultimi anni questo problema è stato arginato, grazie ad attrezzature più sofisticate come sensori di movimento, immagini satellitari e modellazione numerica. Esse però consentono di ottenere informazioni principalmente sul livello della superficie libera e sulla velocità media, lasciando incognite tutte le altre caratteristiche del fenomeno.

La pericolosità data dalle colate detritiche è dovuta alla celerità con cui il fenomeno percorre grandi distanze, e alla forza distruttiva che trasporta con sé. Per questi motivi, e per la scarsa comprensione dei meccanismi che lo regolano, il monitoraggio e l'allerta precoce sono i principali metodi utilizzati attualmente per prevenire e mitigare le catastrofi e allertare la popolazione. Inoltre, la ricerca attuale si concentra sempre più sull'aspetto della mitigazione del rischio e sulla prevenzione dei danni, studiando l'impatto del fronte della colata sulle infrastrutture e sviluppando reti di protezione e briglie frangicolata, per trattenere i blocchi più grandi ed eventualmente creare a monte una "vasca di dissipazione", mitigando gli effetti a valle.

Un ulteriore strumento che ha preso piede negli ultimi decenni consiste nella creazione di mappe della suscettibilità alle colate detritiche (Debris Flow Susceptibility Map - DFSM). Esse consentono di illustrare l'andamento spaziale della probabilità di innesco, considerando unicamente i fattori predisponenti l'instabilità, al fine di sviluppare strategie efficienti di monitoraggio e mitigazione (Li et al., 2021). Kumar e Sarkar (2023) hanno dimostrato una crescita del numero di articoli pubblicati negli ultimi 20 anni riguardanti la suscettibilità delle colate detritiche. Questo aumento potrebbe essere dovuto al progresso delle tecnologie di telerilevamento, la disponibilità di software di modellazione, l'accessibilità dei dati, il GIS e la necessità di ridurre la pericolosità.

Negli anni sono stati sviluppati differenti modelli per lo studio della suscettibilità, arrivando a trovare 96 fattori causali responsabili del verificarsi della colata detritica, tra i quali i più considerati sono la pendenza, l'esposizione, la curvatura e la litologia. I metodi per la determinazione della suscettibilità si possono dividere in approcci quantitativi e qualitativi (Kumar & Sarkar, 2023). I primi si basano su dati e analisi del mondo reale, analizzati con approcci statistici, mentre i secondi utilizzano l'esperienza degli esperti e l'osservazione dell'area di studio per fornire pesi a numerosi fattori di influenza. Negli ultimi anni inoltre sono state sviluppate nuove tecniche di mappatura, attraverso l'uso di diversi metodi di apprendimento automatico come le reti neurali artificiali (Y. Chen et al., 2020).

Per quanto riguarda i sistemi di monitoraggio, essi si sono evoluti, adattandosi alla natura sporadica degli eventi di colate detritiche, differenziando il campionamento tra una modalità continua a bassa frequenza ("non-event mode") e un'altra modalità che registra le misure ad alta frequenza ("event mode") (Hürlimann et al., 2019). L'algoritmo di rilevamento degli eventi, che permette il passaggio alla "modalità evento", si basa tipicamente su una soglia pluviometrica o di vibrazioni del terreno. Inoltre, i sistemi di monitoraggio odierni, sia di tipo conoscitivo che per l'allerta, sono sempre composti da sensori che rilevano sia i meccanismi

di innesco che la dinamica del flusso. Questo è molto importante per i sistemi con scopo di ricerca, per migliorare la conoscenza del fenomeno e dei meccanismi che lo regolano, e allo stesso tempo è fondamentale per implementare sistemi di allarme basati su soglie di diversa natura, per ridurre i falsi allarmi.

Per concludere, le nuove frontiere della ricerca, nell'ambito delle colate detritiche, si stanno sviluppando nello studio dell'evoluzione della mobilità dei sedimenti, dalle testate dei bacini alla rete idrografica. La combinazione di indagini dirette sul campo e modelli digitali del terreno può avvicinare alla comprensione della dinamica di innesco dei sedimenti. Questo tipo di analisi può portare all'identificazione del tasso di ricarica, vale a dire la velocità con la quale i detriti riescono a raggiungere l'alveo del torrente per poter essere interessati da una colata detritica. Tale parametro è caratteristico del bacino e della litologia presente, ed è unicamente funzione del tempo che intercorre fra due eventi di colata. Esso ha lo scopo di valutare il rischio correlato a future colate detritiche in quanto permette una stima del materiale che potrebbe essere coinvolto sulla base del tempo passato dall'ultimo evento.

1.2 Scopo della tesi

La tesi ha come obiettivo principale la progettazione e lo sviluppo di un sistema di monitoraggio per i fenomeni di colata detritica nel Comune di Bardonecchia (TO). Il caso studio è situato nel bacino del Rio Frejus, caratterizzato da una storia di eventi detritici e tutt'ora rappresenta un pericolo per il centro abitato. Questo lavoro di tesi si colloca all'interno del progetto di ricerca e sviluppo SAFE, ed è stato svolto in collaborazione con l'azienda ospitante Corintea Soc. Coop.

Lo scopo finale del lavoro è contribuire alla riduzione del rischio idrogeologico attraverso un sistema di monitoraggio avanzato e sostenibile, in grado di fornire dati utili sia per la comprensione del fenomeno che per l'implementazione di un sistema di allerta.

Per arrivare a tale risultato è stato necessario innanzitutto effettuare un'analisi bibliografica dei fenomeni di colata detritica e successivamente un'analisi storica dei processi caratterizzanti la località di studio. Quest'ultima è stata accompagnata dalla definizione di una mappa di suscettibilità, ottenuta applicando il metodo Rock Engineering System (RES), la quale ha consentito l'individuazione delle aree da monitorare.

Secondariamente è stato progettato il sistema di monitoraggio attraverso la definizione delle variabili da monitorare, dei sensori necessari e il loro posizionamento. Infine, a seguito dell'installazione, i dati raccolti dal sistema sono stati correlati con quanto rilevato tramite APR sulle testate del bacino, in termini di movimento dei sedimenti e tasso di ricarica.

1.3 Struttura del lavoro svolto

La tesi si articola attraverso diverse fasi che ripercorrono cronologicamente le attività svolte per implementare un sistema di monitoraggio per le colate detritiche. Nei primi capitoli viene condotta un'analisi preliminare dell'area per identificare i siti più adatti all'installazione dei sensori destinati al monitoraggio degli eventi e alla realizzazione del rilievo multitemporale. Gli ultimi due capitoli, invece, si concentrano sulle fasi pratiche, descrivendo la progettazione, l'installazione del sistema di monitoraggio e l'esecuzione del rilievo tramite aeromobili a pilotaggio remoto (APR).

Il presente capitolo è dedicato ad una breve introduzione sullo stato dell'arte sul tema della tesi e alla descrizione del flusso di lavoro utilizzato.

Il secondo capitolo è incentrato sull'analisi bibliografica della fenomenologia delle colate detritiche, con particolare attenzione ai meccanismi di innesco e propagazione. L'analisi include una revisione delle metodologie di monitoraggio e degli approcci esistenti per la previsione di questi eventi naturali.

Nel terzo capitolo viene inquadrato il bacino scelto per l'implementazione del sistema di monitoraggio, sia dal punto di vista geomorfologico che climatico. Sono stati esaminati gli eventi storici di colata detritica per comprendere le caratteristiche dei fenomeni in quest'area, anche basandosi su quanto già studiato in passato.

Il quarto capitolo è interamente dedicato all'analisi di suscettibilità, svolta tramite il metodo Rock Engineering System (RES), volta alla definizione di una mappa di suscettibilità all'innesco di colate detritiche nel bacino.

Il quinto capitolo è dedicato alla progettazione e installazione del sistema di monitoraggio nel bacino del Rio Frejus. La tecnologia scelta per la raccolta e trasmissione dei dati è la LoRaWAN, che permette di coprire ampie aree con una comunicazione dati a basso costo ed energia ridotta. Il sistema è stato strutturato per rilevare i parametri principali legati all'innesco delle colate, come la pioggia, insieme al livello dell'acqua e le vibrazioni del terreno. Dopo l'installazione, avvenuta in punti strategici del bacino, vengono descritti e analizzati i dati raccolti in questo primo periodo.

Infine, nel sesto capitolo viene descritto il rilievo multitemporale effettuato da APR, in una porzione sommitale del bacino, al fine di correlare l'erosione e la deposizione di materiale con l'intensità di pioggia. La prima parte del capitolo è dedicata alle basi teoriche della fotogrammetria, mentre successivamente viene descritta l'attività di rilievo in campo. L'ultimo paragrafo è dedicato all'analisi del DEM of Difference (DoD), che permette il confronto tra i

DTM dei due rilievi effettuati pre e post-evento, consentendo la valutazione quantitativa dei volumi movimentati.

2. LE COLATE DETRITICHE: FENOMENOLOGIA

Nel presente capitolo sono state analizzate le conoscenze sull'insieme dei processi fisici che danno luogo ai fenomeni di colata detritica. In particolare, sono state analizzate e discusse le principali caratteristiche morfologiche, i meccanismi di innesco e propagazione, e le metodologie esistenti ed utilizzate per il monitoraggio di tali fenomeni.

2.1 Instabilità dei pendii

L'instabilità di un pendio consiste nel movimento di un certo volume di terreno o roccia che si verifica lungo un versante. Le cause di instabilità possono essere naturali, come piogge, eruzioni vulcaniche o terremoti, oppure antropiche, come ad esempio scavi, uso eccessivo del suolo e deforestazione. Queste ultime provocano una riduzione della resistenza al taglio del materiale, e permettono quindi l'innescarsi del movimento lungo superfici di scorrimento, collocate all'interno del pendio.

Nel 1996, la World Landslide Inventory Commission ha definito con il termine "frana" un movimento gravitazionale lungo un pendio di una massa di roccia, detriti o terra che si muove verso il basso. La massa coinvolta nel movimento costituisce il corpo di frana ed è circoscritta dalla superficie topografica del versante e dalla superficie di scivolamento o superficie di distacco.

Le frane sono tra i fenomeni maggiormente responsabili delle trasformazioni morfologiche del paesaggio, provocando allo stesso tempo ingenti danni alla popolazione e al territorio.

I movimenti franosi possono presentare caratteristiche estremamente diverse fra loro, per cui da più di un secolo gli studiosi hanno sentito la necessità di redigere un metodo generale per inquadrare questi fenomeni.

Tra le classificazioni più note vi è quella di Varnes (1978), aggiornata in collaborazione con Cruden nel 1996, la quale individua le tipologie di frane sulla base del materiale coinvolto e del movimento di distacco che si sviluppa, con l'eventuale aggiunta di altre informazioni come la velocità del fenomeno e il contenuto d'acqua nel materiale mobilitato.

La classificazione di Varnes (1978) considera cinque varianti di cinematismo (Figura 2.1), identificando:

- Crolli (fall): distacco improvviso di materiale da un pendio molto ripido, senza che vi sia scivolamento.
- Ribaltamenti (topple): il materiale distaccato subisce, almeno inizialmente, una certa rotazione attorno ad un punto di rotazione.
- Scivolamenti (slide): formazione di una superficie di scorrimento cilindrica o piana, sulla quale lo scivolamento può essere rispettivamente di tipo rotazionale o traslazionale.
- Espansioni (lateral spread): fenomeno generato per cedimento (talvolta liquefazione) del terreno sottostante.
- Flussi (flow): il materiale mobilizzato presenta un comportamento reologico più affine a quello di un liquido che di un solido.

Negli anni, altre tipologie di movimenti sono state aggiunte alle precedenti, come le deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV) e i fenomeni "complessi", dati dalla combinazione di due o più cinematismi elementari nello spazio o nel tempo.

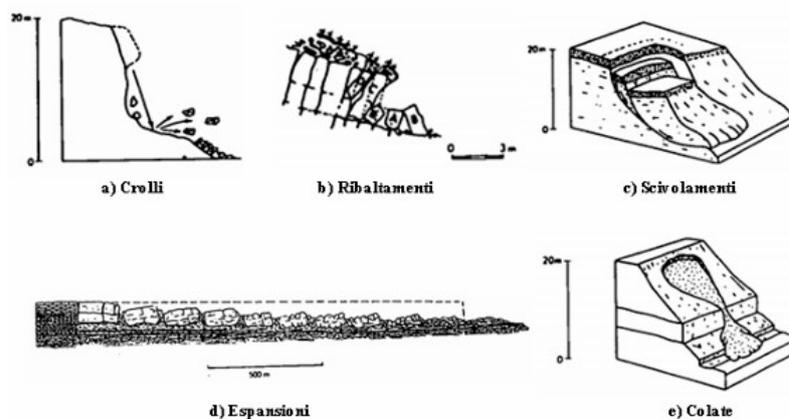


Figura 2.1: Tipologie di movimento secondo la classificazione di Varnes (1978)

Il materiale mobilitato viene distinto in:

- Terra: massa con prevalente granulometria fine, ovvero particelle con diametro minore di 2 mm, e limitata granulometria grossolana, solitamente inferiore al 20%.
- Detriti: massa instabile con elevata percentuale di ghiaia (compresa tra 20 e 80%) e granulometrie grossolane (particelle con diametro maggiore di 2 mm).
- Roccia: massa intatta composta da granuli aggregati, con elevata coesione.

Combinando il cinematismo con il tipo di materiale si ottengono le nomenclature riportate in Tabella 2.1.

Tabella 2.1: Classificazione dei movimenti secondo Varnes (1978)

TIPO DI MOVIMENTO		TIPO DI MATERIALE		
		ROCCE	TERRENI GROSSOLANI	TERRENI FINI
CROLLI		Crolli di roccia	Crolli di detrito	Crolli di terra
RIBALTAMENTI		Ribalt. di roccia	Ribalt. di detrito	Ribalt. di terra
SCORRIMENTI	ROTAZIONALI	Scorr. rot. di roccia	Scorr. rot. di detrito	Scorr. rot. di terra
	TRASALATIVI	Scorr. trasl. di roccia	Scorr. trasl. di detrito	Scorr. trasl. di terra
ESPANDIMENTI LATERALI		Esp. lat. di roccia	Esp. lat. di detrito	Esp. lat. di terra
FLUSSI		Flussi di roccia	Flussi di detrito	Flussi di terra
F. COMPLESSE/ COMPOSITE		Combinazione di 2 o più tipi nello spazio e/o nel tempo		

Nonostante possa sembrare semplice, questo criterio non è sempre facile da applicare, in quanto spesso le frane vengono riconosciute da fotointerpretazione aerea, e anche quando il lavoro viene svolto sul campo non è facilmente stimabile la distribuzione granulometrica. Ciò è particolarmente significativo nel caso delle colate, a causa della disomogeneità laterale e verticale. Per questo motivo, negli anni, sono state sviluppate ulteriori classificazioni, basate su differenti e ulteriori fattori, non sempre però arrivando ad una semplificazione.

2.2 Classificazione dei fenomeni di colata

Tra le tipologie di fenomeni instabili riscontrabili lungo un versante, i fenomeni di tipo flusso sono tra i più pericolosi data la loro rapidità e imprevedibilità. Questo genere di fenomeno può innescarsi sia in terreni sciolti che detriti rocciosi a seguito di fusione nivale o di intense piogge, che saturando il materiale, gli conferiscono un comportamento reologico simile a quello di un fluido viscoso.

Il termine flusso indica il movimento di un materiale fluido su un letto rigido, sottolineando la differenza tra il carattere meccanico della massa che scorre e quello del materiale basale (Hungri et al., 2001). Questa caratteristica non si riscontra negli altri fenomeni gravitazionali in cui lo scorrimento presenta poca differenza tra il materiale deformante e il suo substrato.

Seguendo lo schema di Varnes (1978) presentato nel precedente paragrafo, i fenomeni di flusso possono essere inquadrati all'interno di tre classi:

- Valanghe di roccia
- Colate di detriti
- Colate di terra

Esse sono definite sulla base della tipologia di materiale coinvolto nel flusso; tuttavia, non sempre è semplice ricostruirne la granulometria, e spesso può non essere sufficiente

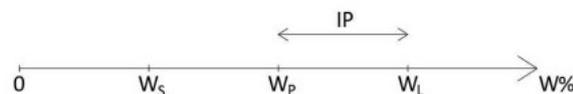
considerare solo questo parametro per descrivere il fenomeno; inoltre, non sempre ad un limite basato sulle dimensioni dei sedimenti corrisponde un cambiamento sostanziale delle proprietà di una colata.

Per questo motivo sono nati negli anni molti termini per poter spiegare tutte le diverse sfaccettature che questi fenomeni possono presentare, portando ad avere innumerevoli distinzioni terminologiche, con conseguente confusione. Nel 2001, Hungr, al fine di ridurre l'ambiguità terminologica per le frane di tipo flusso ha proposto una classificazione, considerando quattro parametri principali: il tipo di materiale, il contenuto d'acqua (attraverso i limiti di Atterberg), il meccanismo di movimento e la velocità (Tabella 2.2). Per fare ciò ha dovuto rivedere le definizioni dei materiali coinvolti, considerando una distinzione non puramente granulometrica:

- Con il termine terra si definisce il colluvium, di natura puramente argillosa con una consistenza più vicina al limite plastico che al limite liquido.
- Per fango si intende materiale argilloso liquido o semiliquido: in particolare deve essere utilizzato per terreni argillosi teneri e rimodellati la cui matrice è significativamente plastica ($PI > 5\%$) e il cui indice di liquidità durante il movimento è superiore a 0.5.
- I detriti sono stati definiti come materiale sciolto non differenziato di bassa plasticità come quello prodotto da agenti atmosferici e processi di degradazione, e possono contenere anche una percentuale significativa di materiale organico, come tronchi e pacciami organico.

I limiti di Atterberg sono dei parametri o valori di contenuto d'acqua corrispondenti a determinati stati di consistenza di un terreno argilloso. In particolare si individuano:

- Limite di liquidità (w_l): è il contenuto d'acqua per il quale si ha il passaggio dallo stato plastico a quello liquido
- Limite di plasticità (w_p): è il contenuto d'acqua al quale si ha il passaggio dallo stato semisolido a quello plastico
- Indice di plasticità (IP): è la differenza tra il limite di liquidità e il limite di plasticità ($IP=w_l-w_p$), mostra l'intervallo di umidità in cui il terreno mostra un comportamento plastico;



- Indice di liquidità (IL): è definito come il rapporto tra la differenza del contenuto d'acqua naturale e il limite plastico, con l'indice di plasticità ($IL = (w_n - w_p)/IP$)
- Limite di ritiro (w_s): è il contenuto d'acqua al quale si ha il passaggio dallo stato semisolido a quello solido, ovvero quanto il terreno smette di ritirarsi con la perdita d'acqua.

Sulla base di queste caratteristiche, le definizioni e le nomenclature riportate in Tabella 2.2 sono state formulate (Hungry et al., 2001).

Tabella 2.2: Classificazione dei fenomeni franosi di tipo colata (Hungry et al., 2001)

Material	Water Content ¹	Special Condition	Velocity	Name
Silt, Sand, Gravel, Debris (talus)	dry, moist or saturated	- no excess pore-pressure, - limited volume	various	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
Silt, Sand, Debris, Weak rock ²	saturated at rupture surface content	- liquefiable material ³ , - constant water	Ex. Rapid	Sand (silt, debris, rock) flow slide
Sensitive clay	at or above liquid limit	- liquefaction <i>in situ</i> , ³ - constant water content ⁴	Ex. Rapid	Clay flow slide
Peat	saturated	- excess pore-pressure	Slow to very rapid	Peat flow
Clay or Earth	near plastic limit	- slow movements, - plug flow (sliding)	< Rapid	Earth flow
Debris	saturated	- established channel ⁵ , - increased water content ⁴	Ex. Rapid	Debris flow
Mud	at or above liquid limit	-fine-grained debris flow	> Very rapid	Mud flow
Debris	free water present	- flood ⁶	Ex. Rapid	Debris flood
Debris	partly or fully saturated	- no established channel ⁵ , - relatively shallow, steep source	Ex. Rapid	Debris avalanche
Fragmented Rock	various, mainly dry	- intact rock at source, - large volume ⁷	Ex. Rapid	Rock avalanche

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.

Con il termine *colata detritica* si identifica un flusso da molto rapido a estremamente rapido di detriti non plastici, completamente saturi che si propagano in un canale ripido. L'indice di plasticità è inferiore al 5%. Questo fenomeno coinvolge materiale detritico di diverse dimensioni, principalmente grossolano, con una percentuale di materiale solido superiore all'80%. Il contenuto d'acqua è sufficiente a saturare il materiale, ma è altamente variabile sia temporalmente che spazialmente lungo la colata, a causa dell'eterogeneità delle sovratensioni interne alla massa (Iverson, 1997).

Un evento di colata detritica può verificarsi come un susseguirsi di ondate consecutive, che variano in numero da una a diverse centinaia, separate da un flusso iperconcentrato simile a

un'inondazione (Pierson, 1980). Questo fenomeno è caratterizzato da lunghe distanze di percorrenza ed elevate velocità, anche superiori a 5-10 m/s.

Le *colate di terra* sono flussi lenti di terreno plastico altamente deformabile. Tale comportamento è riscontrabile in materiali saturi a granulometria fine. Si verificano quando, a causa delle piogge intense, il terreno saturo si muove in un unico blocco, caratterizzato da modeste velocità di propagazione e una conseguente ridotta distanza di propagazione. Questo fenomeno è contraddistinto da un indice di liquidità $IL < 0.5$.

Le *colate di fango* si riferiscono a movimenti da molto rapidi a estremamente rapidi di materiale di natura plastica, completamente saturo con indice di plasticità $>5\%$.

La distinzione tra le colate di terra e di fango è sottile; tuttavia, la frazione argillosa modifica la reologia del materiale ed è quindi da considerare nella modellazione dinamica (Takahashi T., 2007).

L'*alluvione di detriti* è un flusso d'acqua molto rapido e impetuoso, carico di detriti, in un canale ripido, con presenza di acqua libera. Essa può trasportare una quantità di sedimenti paragonabile ad una colata detritica, ma con limitata granulometria e limitato spessore dei depositi. I sedimenti vengono trasportati sotto forma di massicce ondate, lasciando strati di detriti che vanno dalla sabbia ai ciottoli o piccoli massi.

Per distinguerle dalle colate detritiche si considera il picco di portata che è molto inferiore rispetto a quello prodotto dalle colate detritiche, e la morfologia di depositi, più dispersi e sottili, e senza smistamento longitudinale. Questo si traduce in un potenziale distruttivo limitato; solitamente gli oggetti colpiti dalle alluvioni di detriti non sono danneggiati ma sepolti o circondati da detriti.

La *valanga di detriti* è un flusso superficiale da molto rapido a estremamente rapido di detriti parzialmente o completamente saturi su un pendio ripido, senza confinamento in un canale stabilito. Si distinguono dalle normali colate detritiche per le loro maggiori dimensioni (e quindi minor ricorrenza) in questo caso dell'ordine di milioni di metri cubi, e possono raggiungere velocità elevatissime, fino a 100 km/h. Una valanga di detriti inizia come un cedimento interno più o meno superficiale su un pendio e continua a svilupparsi in un flusso in rapido movimento. Ciò rende questi fenomeni difficili da interpretare e da prevedere, a differenza delle colate detritiche di cui si può invece studiare la pericolosità partendo dalla definizione del percorso di propagazione.

La *valanga di roccia* è caratterizzata da detriti rocciosi che si comportano come un fluido ad alta viscosità, e si frantumano durante la propagazione. È un movimento estremamente rapido e massivo, come una massa fluida semi-coerente, differente rispetto alla caduta massi,

in cui si ha rotolamento e rimbalzo di frammenti rigidi discreti (Evans & Hungr, 1993). Solitamente il materiale di partenza è composto da detriti, di qualsiasi tipo di roccia (compresi i depositi piroclastici) e ha bisogno di pendenze considerevoli (maggiori dell'angolo di riposo del materiale) per rimanere in movimento. Il tipo di comportamento sembra fortemente legato al volume mobilizzato, e nonostante sia riconosciuto che le valanghe di roccia più grandi tendono ad essere più mobili, non è possibile stabilire una relazione univoca tra volume e mobilità.

Analizzando queste definizioni, e avendo esperienza di questi fenomeni nella realtà, è facile intuire che spesso, all'interno di un unico evento, si verificano due o più delle tipologie elencate, per cui non è semplice definire un carattere univoco di tali processi. Cruden e Varnes (1996) hanno proposto di limitare l'uso del termine colata detritica al suo significato letterale, ovvero una frana in cui si verifica un flusso. Secondo Hungr (2001) la denominazione di un evento nel suo complesso dovrebbe essere basata sul suo comportamento nella parte centrale della zona di deposizione, o comunque quello mantenuto nella maggior parte della propagazione del fenomeno.

2.3 Colate detritiche

Esaminando più nel dettaglio il fenomeno delle colate detritiche, esso consiste in un flusso molto rapido di detriti saturi, a bassa plasticità (colluvium, suoli, depositi derivanti da fenomeni naturali o da attività umane), in un canale ripido. Si tratta quindi di un movimento di massa gravitazionale di rocce incorporate in una matrice fluida di sedimenti fini sospesi nell'acqua, formando un'unica massa fluida.

Osservando un evento reale si può cogliere la complessità del fenomeno e la reciproca influenza delle componenti solide e fluide, che evidenzia variazioni reologiche ad ogni istante. Gli autori Johnson e Rodine (1984) descrivono in maniera qualitativa il fenomeno, come “un muro di massi e rocce di tutte le dimensioni, che improvvisamente appare nel canale di un torrente, e lascia dietro di sé un flusso di fango carico di detriti”.

Affinché questo fenomeno possa innescarsi è necessario che siano presenti alcuni elementi fondamentali:

- Presenza di una rilevante quantità di detriti in condizioni instabili;
- Presenza di pendenze consistenti e scarsa vegetazione;
- Consistente apporto idrico, il quale può essere dovuto a piogge intense, fusione nivale o rottura arginale.

In particolare, i primi due sono fattori predisponenti, mentre l'ultimo è la causa innescante il fenomeno.

Questi fattori sono di fondamentale importanza per la valutazione del rischio da colata detritica, in quanto l'equilibrio tra essi influisce sul tipo di fenomeno che può avere luogo nel bacino e quindi sul potere distruttivo.

Caratteristica fondamentale del materiale trasportato è l'ampiezza del fuso granulometrico del sedimento trasportato: dall'argilla finissima a massi di dimensioni nell'ordine delle decine di metri cubi, galleggianti sulla superficie, insieme ad una significativa frazione organica (tronchi, ceppaie e pacciamatura). La componente fine costituisce meno del 10% della massa, mentre sabbia, ghiaia e grani più grandi costituiscono la maggior parte della colata (Takahashi T., 2007).

La mobilitazione avviene per mezzo di acqua in seguito ad eventi piovosi molto intensi, che si incanala lungo percorsi confinati, fino al raggiungimento del conoide, in cui si ha la deposizione del materiale.

Sia la frazione solida che quella liquida ha una forte influenza sul processo di trasporto: la quantità di moto è trasferita in modo sinergico, al fine di sostenere il movimento caratteristico della colata detritica e la deformazione pervasiva, simile ad un fluido (Iverson, 1997).

La massa che scorre può raggiungere grandi volumi (anche più di 10^9 m³) e percorrere distanze comprese tra 1 e 10 km (Hutchinson, 1988). Classicamente, l'ambiente in cui si sviluppano le colate di detrito è un torrente con pendenze elevate, con un abbondante apporto di detrito e con piene che, viste le dimensioni del bacino idrografico in cui si trovano tipicamente (0,1 – 100 km²), sono improvvise, di breve durata e violente (Ancey, 2001).

Contestualmente alle alte velocità distintive di questa tipologia di fenomeni, la durata complessiva misurata dall'innescamento fino al definitivo arresto è contenuta, generalmente dell'ordine delle decine di minuti.

I principali parametri fisici caratterizzanti le colate detritiche sono riportati in Tabella 2.3 (Iverson, 1997). Si può notare un elevato intervallo di variazione per il diametro medio, la viscosità e la permeabilità. Questi ultimi due possono trovare spiegazione nei differenti valori di concentrazione volumetrica, ovvero lo spazio occupato dalla frazione solida per unità di volume complessivo.

Tabella 2.3: Principali caratteristiche fisiche delle colate detritiche

PROPRIETÀ	SIMBOLO	VALORI TIPICI
Proprietà delle particelle solide		
Densità	ρ_s [kg/m ³]	2'500÷3'000
Diametro medio	d [m]	10 ⁻⁵ ÷10
Angolo di attrito	φ_s [°]	25÷45
Coefficiente di restituzione	e [-]	0.1÷0.5
Proprietà del fluido interstiziale		
Densità	ρ_f [kg/m ³]	1'000÷1'200
Viscosità	μ [Pa s]	0.001÷0.1
Proprietà della miscela		
Concentrazione volumetrica	c [-]	0.4÷0.8
Permeabilità	k [m ²]	10 ⁻¹³ ÷10 ⁻⁹
Conducibilità idraulica*	K [m/s]	10 ⁻⁷ ÷10 ⁻²
Rigidezza alla compressione	E [Pa]	10 ³ ÷10 ⁵
Angolo di attrito	φ [°]	25÷45

* Vale la relazione $K = \rho_f g k / \mu$, dove g indica l'accelerazione di gravità.

Il comportamento reologico della colata è controllato principalmente dalla densità, ovvero dalla concentrazione di sedimenti e dal contenuto d'acqua. Entrambe sono caratteristiche altamente variabili nello spazio e nel tempo, a causa della transizione da un fronte denso e a grana grossa ad un flusso iperconcentrato più fluido (Hungr et al., 2001) e provocano un cambiamento delle proprietà del fluido, come ad esempio la diminuzione della velocità di sedimentazione delle particelle.

Pierson e Costa (1987) definiscono che, affinché si inneschi una colata detritica, la frazione di massa solida deve ricoprire una concentrazione (C_v) compresa tra il 20% e il 70%. Infatti, per concentrazioni inferiori può essere trasportato in sospensione solo il materiale fine, e al massimo si ha movimento di quello grossolano sul fondo.

Sulla base di queste quantità è possibile riconoscere diverse tipologie di flusso (Pierson & Costa, 1987):

- Flusso d'acqua (water flow) ($C_v < 20\%$): ha un comportamento newtoniano, con densità prossime a quelle dell'acqua.
- Flusso iper-concentrato ($20\% < C_v < 47\%$): si tratta di una colata lenta se il materiale è principalmente fine oppure rapido se grossolano.
- Colata di detrito (debris flow) ($47\% < C_v < 80\%$): il comportamento è quello di un fluido viscoso e con densità doppia rispetto all'acqua.

La classificazione di Pierson & Costa (1987) considera, oltre alla concentrazione dei sedimenti, anche la reologia del fenomeno, che dipende dalle forze di tipo viscoso o inerziale che si sviluppano e dalla velocità media (Tabella 2.4).

Tabella 2.4: Classificazione reologica dei flussi sedimento/acqua nei canali (Costa, 1984)

Flusso	Frazione solida [% in peso]	Densità [t/m ³]	Resistenza [Pa]	Tipo di fluido	Tipo di depositi
Flusso d'acqua	1-40	1.01-1.3	<10	newtoniano	classati, stratificati
Flusso iperconcentrato	40-70	1.3-1.8	10-20	appross. Newtoniano	poco classati, debolmente stratificati
Debris flow	70-90	1.8-2.6	>20	visco-plastico	argini e lobi di detrito poco classati

La possibilità di avere una tipologia piuttosto che di un'altra è dovuto alle caratteristiche morfometriche del bacino, le quali possono essere riassunte nell'indice di Melton (Melton, 1957) e correlate ai differenti processi da Wilford et al. (2004). Successivamente Tiranti et al. (2016), analizzando i fenomeni verificatisi negli ultimi secoli nelle Alpi occidentali, hanno riscontrato una forte correlazione delle differenti tipologie con la percentuale di substrato roccioso affiorante.

La classificazione presentata precedentemente, per i flussi e le colate detritiche, considera quasi esclusivamente il materiale che li compone. Tuttavia, è possibile considerare anche altri parametri, come la velocità di propagazione (Lorenzini & Mazza, 2004), le caratteristiche del materiale (coesivo o granulare), la frazione solido/liquido (Coussot & Meunier, 1996) o il comportamento meccanico della massa (Ancy, 2002).

Lo studioso giapponese Takahashi (2007) stabilisce una classificazione sulla base della dimensione dei sedimenti trasportati e sulla loro concentrazione volumetrica, considerando tre parametri adimensionali:

- Numero di Reynolds: permette la distinzione tra flusso laminare e turbolento;

$$Re = \frac{\rho_f \cdot \mu_f \cdot h}{\eta}$$

dove η è la viscosità dinamica del fluido, ρ_f la densità del flusso, μ_f la velocità media e h l'altezza totale.

- Numero di Bagnold: descrive i cambiamenti della reologia del fluido con l'aggiunta di particelle granulari;

$Ba = \frac{d_p \cdot \rho^2 \cdot \lambda_p^{1/2} \cdot \dot{\gamma}}{\eta}$, dove d_p è il diametro delle particelle, $\dot{\gamma}$ è la velocità di deformazione e λ_p è funzione della frazione solida Φ .

- Rapporto di sommergenza (o profondità relativa): $\frac{h}{d_p}$.

Sulla base di questi parametri è possibile definire una colata detritica immatura, ovvero un tipo di flusso con concentrazione compresa tra 10% e 20%, in cui si è al limite del trasporto solido intenso. Per concentrazioni maggiori si hanno le vere e proprie colate detritiche, classificabili in (Figura 2.2):

- Colata detritica di tipo pietroso (stony-type debris flow)

Si tratta di colate detritiche granulari, con grande quantità di materiale grossolano, il quale conferisce un comportamento attritivo al flusso attraverso le collisioni. Essendoci una dissipazione di energia maggiore rispetto alle tipologie successive, questa necessita di bacini con pendenza media più elevata.

In questa tipologia è particolarmente evidente il meccanismo della "gradazione inversa", (spiegato nel dettaglio nella sezione successiva), grazie a cui si identifica la distribuzione delle particelle più grossolane nella parte alta, e quelle con diametri inferiori nella parte bassa. Inoltre, si può notare un gradiente granulometrico trasversale: infatti durante la propagazione i detriti maggiori che finiscono ai bordi si depositano, creando degli argini, mentre durante la deposizione si ha la formazione di lobi "di tipo gonfio" composti principalmente da ciottoli e grossi sassi che, per via della minore pendenza, non riescono ad essere trasportati dal flusso e creano un arresto improvviso della colata.

- Colata detritica turbolenta-fangosa (Turbulent-muddy-type debris flow)

Questa tipologia è caratterizzata da un'elevata percentuale di materiali argillosi, fini, i quali sono mantenuti in sospensione dal moto turbolento.

- Flusso detritico viscoso (Viscous debris flow)

Quest'ultima si distingue dalla colata detritica di tipo pietroso, in quanto non presenta accumuli di grossi massi, e la dissipazione dell'energia avviene attraverso la viscosità del fluido, conferendo un moto regolare alla colata. Inoltre, il deposito non è caratterizzato da gradazione inversa ma, si hanno lobi di deposizione di tipo piatto, in quanto composti da particelle con diametro medio minore e che arrivano più distanti.

In generale, la colata detritica viscosa è composta da un flusso in cui le particelle grossolane sono disperse in un fluido molto denso.

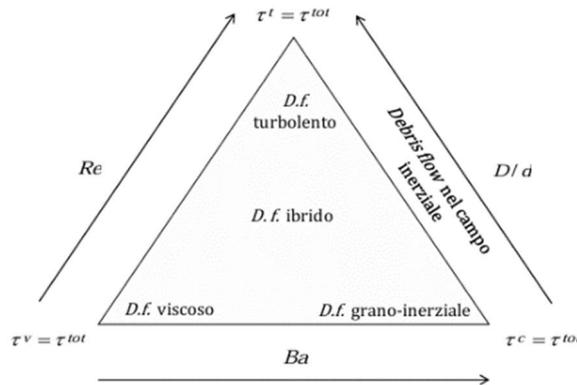


Figura 2.2: Domini di esistenza delle tre tipologie di colate detritiche (modificato da Takahashi, 2007)

Il sistema di classificazione di Takahashi, così come i precedenti, presenta dei limiti, in quanto spesso le colate detritiche sono composte da un fronte in cui prevale la componente attritiva e le collisioni, e da una coda in cui si hanno concentrazioni inferiori e il moto appare viscoso o turbolento. Per questo motivo e per la difficoltà nel misurare i parametri necessari alla classificazione, essa viene utilizzata principalmente a livello teorico.

Un ulteriore sistema di classificazione è stato sviluppato da Tiranti et al. (2014), il quale non si basa sulle caratteristiche reologiche o granulometriche del fenomeno, ma bensì sulle caratteristiche litologiche del bacino in cui ha origine. In tale classificazione si valuta l'indice CWI, il quale rappresenta la propensione di un bacino a produrre materiale della granulometria delle argille dall'alterazione del substrato. Sulla base di questo parametro sono state identificate tre tipologie di bacini alpini, partendo dalla litologia prevalente:

- ECM (Eccellente Clay Maker): si tratta di bacini contraddistinti da flussi detritici coesivi (con comportamento viscoplastico), e conoidi alluvionali di forma irregolare, ridotte dimensioni rispetto all'area alimentante e pendenze moderate. La frequenza d'innescio di questi bacini è molto elevata in quanto sono sensibili a piogge di moderata intensità ($\geq 20 \text{ mm/h}$), con maggior frequenza d'innescio in estate.
- GCM (Good Clay Maker): sono bacini caratterizzati da flussi detritici coesivi (con comportamento viscoplastico), e conoidi alluvionali a forma di ventaglio regolare, molto ampi rispetto all'area alimentante e debolmente pendenti. Essi sono sensibili a piogge di forte intensità ($\geq 30 \text{ mm/h}$), per cui hanno frequenza d'innescio moderatamente elevata e la stagione di innescio risulta essere la primavera.

- BCM (Bad Clay Maker): sono bacini caratterizzati da flussi detritici non coesivi (con comportamento collisionale- frizionale), e conoidi di forma lobata, di dimensione contenuta e pendenze elevate. La frequenza d'innescò è bassa per via della forte intensità di pioggia a cui sono sensibili ($\geq 50 \text{ mm/h}$), con prevalenza di innescò nel periodo autunnale.

2.4 Formazione e meccanismi di propagazione

Le colate detritiche sono caratterizzate da un collasso esteso e molto rapido di una massa granulare, durante il quale il sovraccarico viene trasferito al fluido interstiziale, generando sovrappressioni. Pertanto, il materiale acquisisce mobilità in seguito alla perdita di resistenza, portando all'innescò della colata che si propaga verso valle.

In tale fenomeno è possibile individuare tre fasi distinte (Figura 2.3):

- fase di innescò: si verifica nella zona di distacco, formata dall'area che attiva l'evento a seguito del raggiungimento di una condizione di superamento della resistenza interna;
- fase di propagazione: avviene lungo l'alveo del torrente, con il quale la massa in movimento interagisce, con la genesi di nuove aree contribuenti lungo le sponde e la deposizione di argini laterali;
- fase di arresto: solitamente avviene in conoide, in genere subito dopo la strozzatura in roccia che caratterizza la forma "a clessidra" dei bacini montani e che caratterizza la parte apicale dell'area di deposito dei detriti prodotti dal bacino.



Figura 2.3: Schema degli spazi di sviluppo di un debris flow

Secondo Statens Vegvesen (2014) ci sono principalmente due meccanismi di innesco delle colate detritiche. Uno di questi è quando la sollecitazione di taglio supera la resistenza al taglio dello strato sottostante, con conseguente cedimento e trasporto di sedimenti. Se la velocità di erosione e le capacità di trasporto dell'acqua sono sufficientemente elevate, il contenuto di sedimenti nell'acqua aumenterà gradualmente e si svilupperà in una colata detritica. L'altro meccanismo di innesco è quando una frana o una valanga di neve si innescano e riescono a rilasciare l'acqua in modo che la miscela di acqua e sedimenti raggiunga una mobilità sufficiente. La Figura 2.5 illustra i due fattori scatenanti e due esempi specifici di ciascuno.

A differenza delle altre tipologie di instabilità, per le colate detritiche è difficile identificare delle nicchie di distacco, in quanto il materiale coinvolto può provenire da aree molto estese, ed inoltre, durante la propagazione si ha un processo di erosione che ingloba nuovo materiale, incrementando il volume, e che causa una continua variazione della superficie di scorrimento durante la propagazione. Infatti, nell'analisi di tali fenomeni, è particolarmente importante considerare l'effetto dato dall'erosione, in quanto frequentemente si osserva un volume di innesco piccolo e localizzato, che aumenta propagandosi lungo il corso d'acqua.

Tuttavia, è identificabile come zona di innesco l'area caratterizzata da pendenze elevate, assenza o scarsità di vegetazione, e con prevalenza di fenomeni erosivi.

Triggering mechanism of debris flow

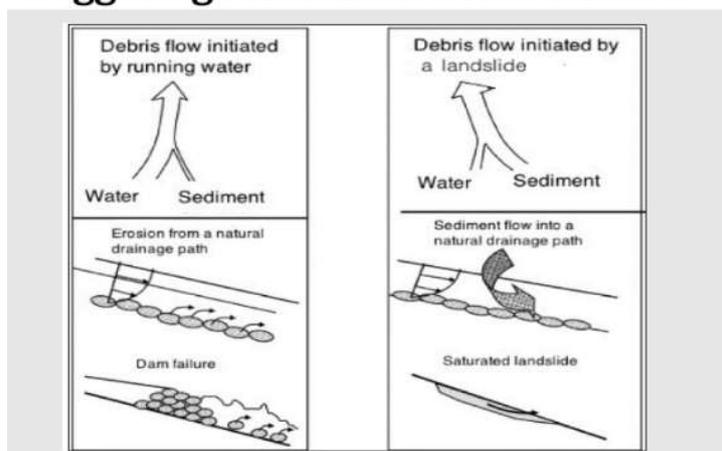


Figura 2.5: Meccanismi innescanti delle colate detritiche (Statens Vegvesen, 2014)

L'angolo di pendenza misurato nelle aree di origine varia spesso tra 20° e 45° (Iverson, 1997; VanDine, 1996). Esso rappresenta l'angolo di attrito statico del sedimento, ovvero l'angolo di inclinazione limite affinché il versante rimanga in equilibrio, e che deve essere superato dallo sforzo di taglio per innescare lo scorrimento.

2.4.2 Propagazione

La zona di propagazione è la zona in cui avviene il trasporto e l'erosione; essa è individuabile nel canale di drenaggio o percorso confinato che contiene la colata, e rappresenta una caratteristica distintiva di questa tipologia di fenomeno.

Il canale può essere percorso in maniera ricorrente da questi fenomeni, e ciò viene evidenziato da segni di scorrimento lungo il percorso, da una forma trapezoidale della sezione e dalla presenza di un cono deposizionale, costituito dai depositi di eventi separati dallo stesso percorso.

La presenza di un canale confinato influisce sul mantenimento di una profondità di flusso abbastanza elevata e facilita lo smistamento longitudinale; inoltre è un elemento importante per la valutazione del rischio, in quanto deve essere considerata come evidenza di un pericolo.

La zona di propagazione può subire un'azione erosiva se le pendenze sono superiori ai 10°-15°, con un accrescimento del volume del flusso (Figura 2.6). Nei tratti con pendenze inferiori si verifica una graduale deposizione dei detriti (VanDine, 1996).

Tabella 2.5: Correlazione tra la pendenza del letto del canale e le fasi della colata detritica

Channel Bed Slope (S)	Debris flow phase
>20°	Initiation
15° - 20°	Transportation and erosion
10° - 15°	Run-out
3° - 10°	Partial deposition
<3°	Deposition (debris fan)

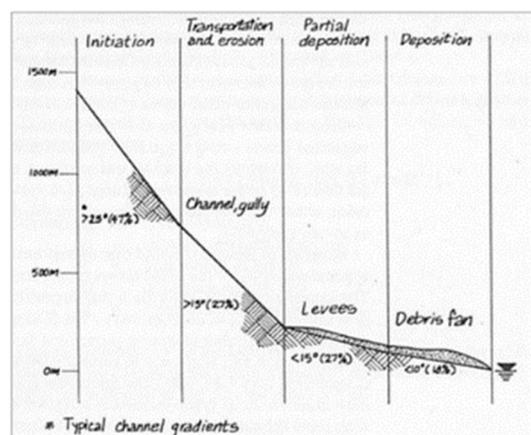


Figura 2.6: Pendenze e distinzione delle diverse zone secondo VanDine (1996)

Le colate detritiche si verificano solitamente attraverso ondate successive (pulsazioni), caratterizzate dall'apparizione improvvisa di un fronte ben delineato e ripido (Figura 2.7). La frequenza di queste pulsazioni può indicare le specifiche idrauliche del fenomeno oppure può derivare dall'apporto di materiale solido dovuto a frane di notevoli dimensioni. Le ondate sono

dovute al temporaneo sbarramento del corso d'acqua e successivo sfondamento dei detriti e il periodo di tempo che le divide può variare da pochi secondi a decine di minuti.

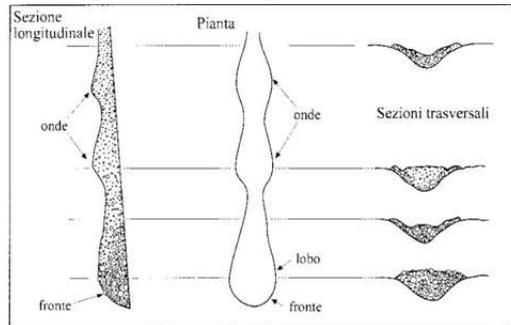


Figura 2.7: Sezione longitudinale, trasversale e vista in pianta di un canale e di un deposito di colata (Johnson & Rodine, 1984)

Il fronte d'onda è solitamente composto dai detriti più grossolani e scarsamente selezionati (Figura 2.8), i quali provocano la maggior parte dell'erosione del materiale che compone il piano di scorrimento. Questa parte solitamente ha lo spessore maggiore e un basso contenuto di acqua, assimilabile a valanghe di roccia (Takahashi T., 2007).

Spostandosi verso la coda del flusso, il corpo principale è caratterizzato da turbolenza e velocità superiori rispetto al settore del fronte. I materiali che lo compongono hanno una dimensione che tende a ridursi rispetto a quelli della parte iniziale. In questo elemento inizia la fase di deposito, ed è possibile osservare la formazione di argini laterali quando il confinamento lo permette.

Il corpo centrale fornisce l'energia necessaria al fronte d'onda per mobilitare i detriti di dimensioni maggiori. Infine, la coda della colata è composta dalle particelle più fini, con un tirante idrico progressivamente più basso, fino all'esaurimento della colata.

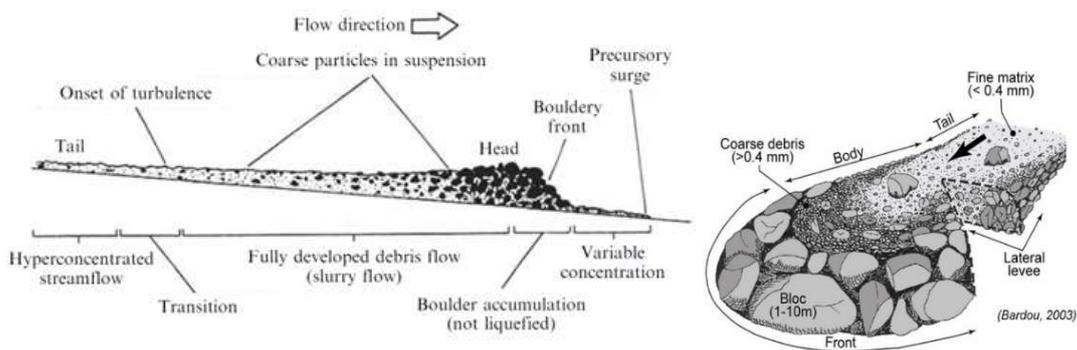


Figura 2.8: Rappresentazione schematica di un debris flow (a sx Pierson & Costa, 1987; a dx Bardou et al, 2003)

Durante il fenomeno, l'energia potenziale della massa di detriti viene convertita in energia cinetica e viene dissipata a causa delle forze d'attrito tra il flusso e il letto del corso d'acqua, e delle deformazioni di taglio interne. Mentre la massa si muove lungo il canale, aumenta

gradualmente la velocità, acquisendo così una maggiore capacità erosiva e, di conseguenza, maggiore energia cinetica. Questo processo continua fino a quando la pendenza diminuisce e l'attrito prevale sulla quantità di moto.

2.4.3 Deposito

Successivamente, una valle o un canale alluvionale più ampio rappresentano le aree di deposizione di colate detritiche, tipicamente sotto forma di conoidi derivanti da inondazioni cicliche e/o episodiche da un canale attivo. Essi hanno una tipica forma a ventaglio, più o meno ampia a seconda del fenomeno caratteristico del bacino che li genera e sono costituiti da massi immersi in una matrice a grana fine (matrix-supported), oppure possono essere clast-supported se la matrice viene dilavata (Costa, 1984).

La zona di deposizione è caratterizzata da pendenze minori e dalla mancanza di confinamento del flusso, che riducono la spinta idraulica dietro al fronte. Questo fa sì che la resistenza all'attrito del fronte superi la tensione interna di taglio, causando l'arresto del flusso (Iverson, 1997).

I depositi sono composti da detriti con granulometria eterogenea e differente in funzione della distanza dall'apice del conoide: nella parte prossimale i depositi grossolani formano depositi con spessori notevoli, mentre nella parte distale i depositi hanno spessori inferiori.

Nella zona di accumulo i depositi possono assumere forme diverse a seconda della litologia del bacino e della tipologia di detriti (VanDine, 1996). In particolare, si possono avere (Figura 2.9):

- Depositi con forma lobata, sulla superficie del conoide, con spessori variabili tra 1 e 2 m;
- Depositi che ostruiscono in parte o completamente il letto del canale;
- Depositi laterali (argini detritici) con altezze di diversi metri, dovuti alle velocità maggiori presenti sul fronte, che spingono i ciottoli più leggeri trasversalmente.

La presenza di queste tipiche forme morfologiche rappresenta un indizio di attività dovuta a colate detritiche.

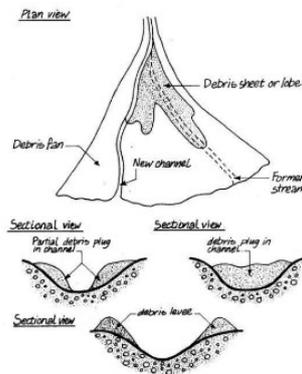


Figura 2.9: Tipologia di depositi (VanDine, 1996)

Inoltre, (Moscariello et al., 2002) hanno analizzato le curve granulometriche dei depositi in siti differenti, osservando come queste siano influenzate dalla litologia e dal materiale originario (Figura 2.10). Rocce ignee e metamorfiche generalmente generano colate detritiche di tipo granulare, mentre quelle che derivano da rocce scistose, sedimentarie e carbonatiche sono a matrice fangosa.

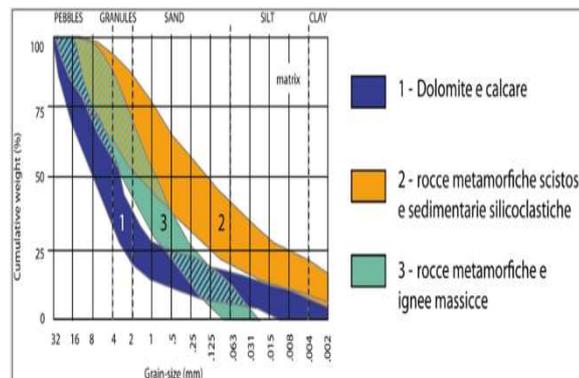


Figura 2.10: Rappresentazione granulometrica delle diverse geologie di bacini da colata detritica (Moscariello et al., 2002)

Una caratteristica distintiva delle colate detritiche è la presenza di una grossolana selezione granulometrica (Figura 2.11), che tende ad avvicinare i clasti più grandi alla superficie del flusso producendo una gradazione inversa (Costa, 1984). Lo stesso processo, combinato con un forte gradiente di velocità verticale, porta spesso anche a una cernita longitudinale e alla formazione di un accumulo di massi e detriti di natura organica (legno) vicino al fronte dell'ondata (Pierson, 1980).

La gradazione inversa e la cernita longitudinale sono causate da forze dissipative che si generano durante il fenomeno, dovute alle collisioni tra le differenti parti di materia che compongono la massa: la componente detritica genera sforzi dissipativi entrando in contatto con la topografia, mentre una parte dell'energia viene dispersa anche attraverso gli urti tra le particelle costituenti la massa (Iverson, 1997). Queste collisioni permettono ai blocchi di dimensioni più grandi di andare verso la superficie, grazie ad un meccanismo di dispersione (sperimentalmente dimostrato da Bagnold) allontanandoli dal fondo del canale che risulta essere la zona di massimo taglio. I grani minori vengono invece tenuti in sospensione dalla spinta di galleggiamento derivante dalla matrice fluida, la quale ha una differente densità rispetto al solido immerso. La frazione fine ($<60\ \mu\text{m}$), inoltre, aumenta la viscosità effettiva dei detriti facilitando la mobilità e riducendo la dissipazione di energia che si verifica come conseguenza del contatto con grani più grandi.

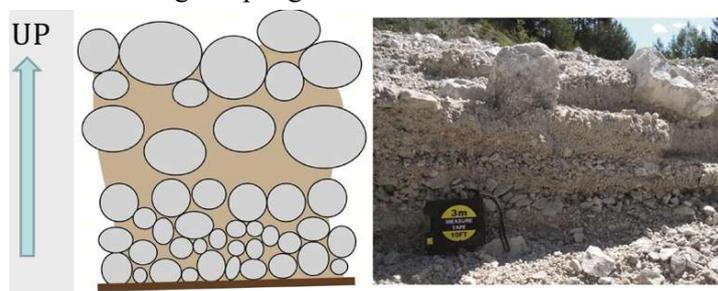


Figura 2.11: Schema e foto di depositi con gradazione inversa

L'origine di tale disposizione risiede nella formazione di una chiara separazione tra una porzione superiore, chiamata "rigid plug" che, a causa dell'attrito tra i clasti, si muove come un corpo unico, e una porzione inferiore in cui l'attrito è superato e i clasti si muovono uno contro l'altro. Una volta superato il valore di sforzo necessario per il movimento della colata, il rigid plug scivola sul livello basale e i clasti contenuti nel plug si muovono ad una velocità maggiore rispetto a quelli basali.

Con l'aumento della velocità del flusso, l'effetto combinato di liquefazione e fluidificazione provoca un inspessimento del livello basale, con conseguente migrazione verso l'alto del rigid plug, e un aumento delle collisioni tra i clasti. A questo punto, il flusso sarà caratterizzato da una porzione superiore contenente i clasti più grossolani, localmente arricchita in matrice, e da una porzione basale clast-supported. La presenza del rigid plug spiega, inoltre, la caratteristica forma a U dei depositi da colata detritica.

Tali meccanismi sono i responsabili delle forme morfologiche deposizionali accennate precedentemente, le quali costituiscono un tratto distintivo del passaggio di una colata, e del rischio correlato.

2.5 Monitoraggio

Le colate detritiche costituiscono una grave minaccia per gli insediamenti urbani situati sui conoidi dei bacini montani e per infrastrutture viarie che interagiscono con questi conoidi. Spesso le misure strutturali, come la costruzione e la manutenzione di rilevati di protezione, bacini di deposizione, briglie frangicolata, sono troppo costose e non sono in grado di garantire completamente la sicurezza degli abitanti dei villaggi e degli utenti delle infrastrutture interessate dalle colate detritiche. Pertanto, la ricerca di sistemi di allerta funzionali, affidabili e possibilmente non costosi è stata negli anni incrementata per aumentare gli strumenti disponibili per fronteggiare questo tipo di fenomeno, spesso devastante (Arattano, 1999).

In linea generale, il monitoraggio strumentale dei fenomeni franosi, i cui spostamenti interessano centri abitati o infrastrutture lineari, è fondamentale sia per ottenere un quadro conoscitivo del fenomeno (monitoraggio conoscitivo) che per attivare procedure di emergenza per la salvaguardia delle vite umane (monitoraggio per l'allertamento). Per entrambi gli scopi, gli attuali sistemi sono composti da sensori disposti lungo le rive dei fiumi e sui pendii delle montagne per rilevarne il passaggio e alcune caratteristiche, e trasmettere i dati.

Il monitoraggio e l'osservazione sul campo delle colate detritiche, finalizzati alla valutazione dei loro parametri fisici e dinamici, sono molto importanti sia per scopi teorici che pratici, come la determinazione del loro comportamento reologico e la calibrazione di modelli matematici, nonché per la pianificazione di contromisure e la progettazione di sistemi di allertamento (Tecca et al., 2003). L'obiettivo del monitoraggio è una conoscenza approfondita del fenomeno e dei tempi di propagazione, per poter intraprendere azioni pratiche come la chiusura delle strade e le evacuazioni prima che il fenomeno colpisca le aree a rischio.

Sebbene tali processi fisici siano ben descritti da osservazioni sul campo ed esperimenti di laboratorio, che hanno portato ad ampliare le conoscenze sui flussi non newtoniani, le misure dirette durante le colate detritiche naturali sono ancora scarse perché questi processi sono imprevedibili, rapidi e altamente pericolosi. Per questo sono necessari sistemi di monitoraggio automatizzati, che raccolgano dati, ma a causa dell'accesso solitamente difficile ai siti e degli elevati costi di installazione, solo pochi sistemi vengono installati in tutto il mondo.

In un sistema di monitoraggio i dati possono essere raccolti a intervalli o in modo continuo, a seconda dello scopo con il quale vengono progettati. Ad esempio, un sistema di allerta acquisisce i dati continuamente, e inoltre essi vengono analizzati continuamente, in maniera tale che, se vengono superate delle soglie si attivino alcune procedure di protezione civile predefinite.

I fenomeni di colate detritiche, essendo caratterizzati da grandi velocità di innesco e di propagazione, non consentono l'impiego di tradizionali sistemi basati sul monitoraggio del fenomeno in corso, perché ciò non permetterebbe a chi gestisce l'emergenza di mettere in pratica le procedure opportune alla riduzione del rischio. Per questo è necessario che il sistema includa previsioni meteo, misuratori di pioggia con una gestione in tempo reale del dato, e analisi delle caratteristiche del territorio, con annessa definizione di soglie pluviometriche.

I sistemi di allerta colate detritiche possono essere suddivisi in due classi principali: sistemi di allerta anticipata (Advance Warning) e sistemi di allerta dell'evento (Event Warning) (Hungar et al., 1987). Essi si differenziano poiché monitorano fasi diverse del fenomeno, con conseguente impiego di diversi tipi di sensori (Arattano & Marchi, 2008).

I sistemi Advance Warning monitorano i processi idrometeorologiche innescenti, principalmente le precipitazioni al fine di, emettere un avviso nel caso ci siano le condizioni affinché una colata detritica possa verificarsi, ad esempio il superamento di una certa intensità pluviometrica. Questa tipologia di monitoraggio utilizza i sensori e i metodi dell'idrologia e della meteorologia, ovvero la misurazione delle precipitazioni tramite pluviometri e radar meteorologici, o lisimetri per lo scioglimento della neve. Attraverso questi dati e le serie storiche degli eventi, è possibile stabilire delle soglie pluviometriche, in funzione dell'intensità e della durata dell'evento di pioggia, oltre le quali si ha molta probabilità di innesco di colata.

Ad esempio, il Centro Funzionale Regionale di Arpa Piemonte ha sviluppato un sistema di allerta chiamato DEFENSE (DEbris Flows triggERed by storms - Nowcasting SystEm), appositamente concepito per questa tipologia di fenomeni gravitativi. Esso è composto da un modello geologico in cui i bacini alpini vengono classificati secondo tre tipologie considerando la litologia prevalente del substrato, la quale governa i processi che in questi avvengono, attraverso l'indice CWI (Clay Weathering Index) proposto da Tiranti et al., 2014. Questo indice misura la tendenza degli ammassi rocciosi a generare argilla o minerali simili come frazione fine del materiale disgregato a seguito di processi di disgregazione o alterazione, perché la quantità di argilla influisce sullo stile e lo schema deposizionale delle colate detritiche, sulla loro stagionalità e frequenza, e sulla reologia del flusso e architettura dei conoidi (Tiranti & Deangeli, 2015). Inoltre, il sistema considera un radar storm tracking, ovvero un algoritmo che individua e traccia le celle temporalesche potenzialmente pericolose tramite radar meteorologico. Il sistema produce un'allerta quando una o più celle temporalesche di intensità nota interessano uno o più bacini sensibili a quel tipo di precipitazione (Tiranti et al., 2014).

In Figura 2.12 è rappresentato un esempio di tracciamento delle celle temporalesche, rappresentate da ellissi in cui i colori rappresentano l'indice di severità.

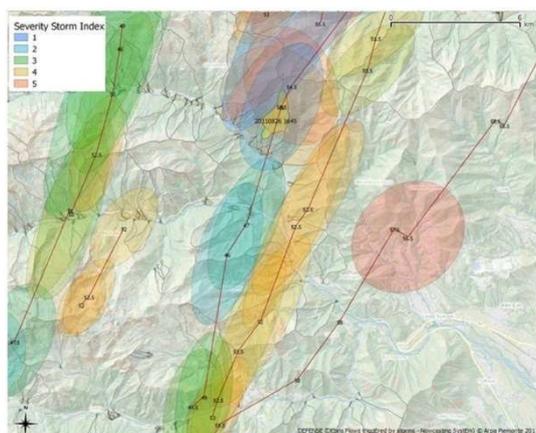


Figura 2.12: Esempio di celle temporalesche attive (Tiranti et al., 2014)

I sistemi Event Warning monitorano la propagazione delle colate detritiche, per cui sono meno soggetti a falsi allarmi, ma consentono minor preavviso rispetto al sistema precedente (Davies, 1997). Per quest'ultimo motivo, sarà quindi necessario che i dispositivi di allarme siano semafori o sirene, che informino la popolazione in maniera efficace e nel minor tempo possibile. A causa della rapidità della rapidità dell'evento e l'alta velocità di propagazione, i sistemi di allarme risultano più affidabili per la protezione delle vie di trasporto rispetto alle zone abitate, in quanto è necessario più tempo per evacuare gli abitanti piuttosto che per impedire l'uso di un'infrastruttura (Arattano, 1999). Inoltre, per massimizzare il tempo di allarme, ovvero tra il segnale di allarme e l'arrivo della colata, i sensori devono essere posizionati il più possibile a monte della zona da proteggere (Figura 2.13).

Per registrare il passaggio di una colata di detrito si possono utilizzare diversi tipi di sensori, tra cui misuratori a ultrasuoni o radar, sensori di vibrazione del terreno, videocamere, pendoli, sismometri, cavi a strappo, ecc. Questi vengono disposti lungo il canale percorso dalla colata, alcuni in corrispondenza di opere di protezione o ponti, per evitare che possano essere rimossi dal flusso in zone erodibili, mentre altri devono essere sospesi al di sopra.

Solitamente, per via della dimensione dei bacini in cui avvengono questi fenomeni, e per l'instabilità del terreno, si preferisce realizzare i sistemi di monitoraggio con connessione wireless tra i diversi dispositivi, ed evitare invece collegamenti via cavo (Liu et al., 2003).

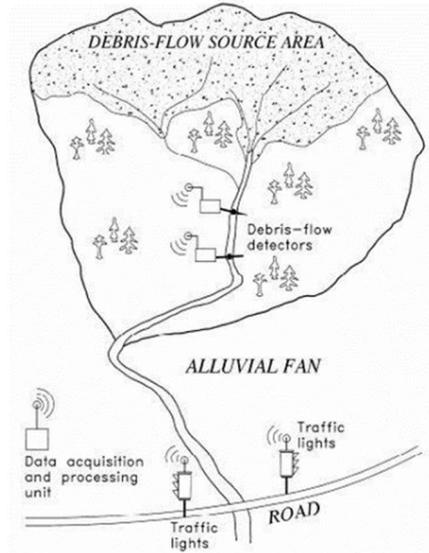


Figura 2.13: Schema di monitoraggio Warning System (Arattano e Marchi, 2008)

A titolo esemplificativo, nella Tabella 2.6 sono riportati una serie di parametri rilevanti per le indagini e gli studi sulle colate detritiche e i corrispondenti sensori comunemente utilizzati per misurarli.

Tabella 2.6: Parametri misurati e sensori utilizzati per il monitoraggio di colate detritiche (Arattano e Marchi, 2008)

Parameter	Sensor employed for the measurement
Peak flow depth	Direct post-event observation through theodolite or GPS, wire sensors, photocells, ultrasonic sensors
Flow depth as function of time	Ultrasonic sensors, radar sensors
Ground vibration	Seismometer or geophones (velocimeters, accelerometers)
Underground sound	Microphones
Mean flow velocity	Ultrasonic sensors, geophones
Surface velocity	Electromagnetic doppler speedometers, video recordings, speed sensors based on spatial filtering velocimetry
Basal forces (normal and shear stress)	Load cells
Fluid pore pressure	Pressure sensors
Impact force	Pressure mark gauges, piezoelectric sensors

Le grandezze relative alle colate detritiche più comunemente monitorate sono: la velocità media del fronte, la velocità superficiale del flusso, la profondità del flusso, la portata media, le precipitazioni di innesco, la pressione dei pori nella zona di innesco, il volume totale, il peso unitario del flusso (densità di flusso) e la forza d'impatto (Tecca et al., 2003). Per ognuna di queste quantità da monitorare devono essere impiegati sensori diversi; ad esempio, il valore di altezza del picco può essere misurato tramite dei fili tesi sopra il canale a vari livelli, valutando qual è il filo più alto che viene rotto, oppure dalle osservazioni delle tracce lasciate sulla

vegetazione presente. Queste due possibilità sono le uniche che permettono di ottenere un valore di altezza misurato per contatto, perché altri metodi, come le aste graduate, potrebbero essere rimosse dalla capacità erosiva della colata e trasportate via dal flusso.

Oltre all'altezza massima può essere molto interessante conoscere le variazioni del livello nel tempo, e ciò è possibile tramite sensori non a contatto, come i dispositivi a ultrasuoni (idrometri), sospesi al di sopra del canale, che permettono di misurare il grado di erosione o di accumulo di detriti nel canale (Figura 2.14).

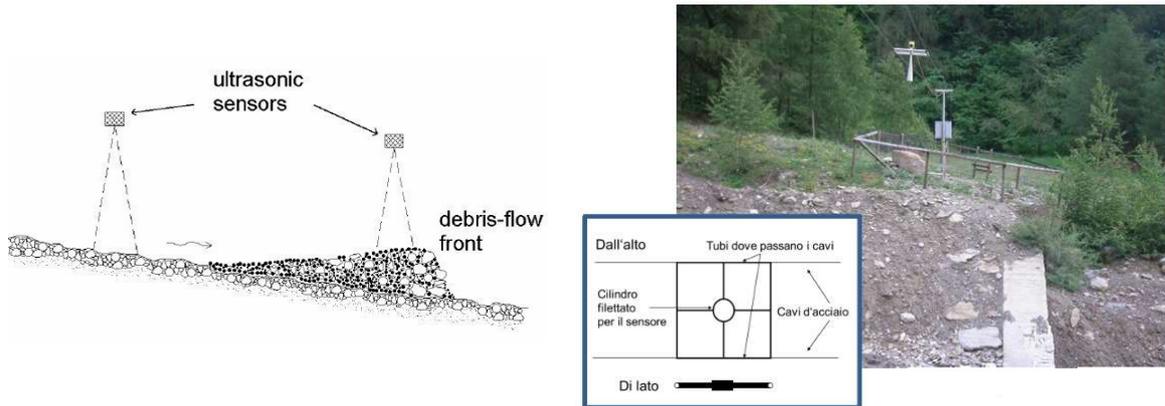


Figura 2.14: Sensori ad ultrasuoni (Arattano e Marchi, 2008)

Per quanto riguarda la velocità, se il fronte della colata è ben definito, può essere determinata come rapporto tra la distanza di due sensori successivi e l'intervallo di tempo che intercorre tra le registrazioni del passaggio dell'onda dei medesimi sensori (Figura 2.15). Questo metodo può essere applicato se vengono installati più dispositivi della stessa tipologia lungo il canale. Se invece non è possibile un riconoscimento univoco del fronte principale è utile confrontare i grafici registrati da sensori ultrasonici o sismici, utilizzando la tecnica della correlazione incrociata, per determinare l'intervallo di tempo intercorso tra la comparsa di un certo segnale caratteristico in due posizioni diverse, conoscendo la distanza tra esse per ricavare la velocità media della colata (Arattano & Marchi, 2008).

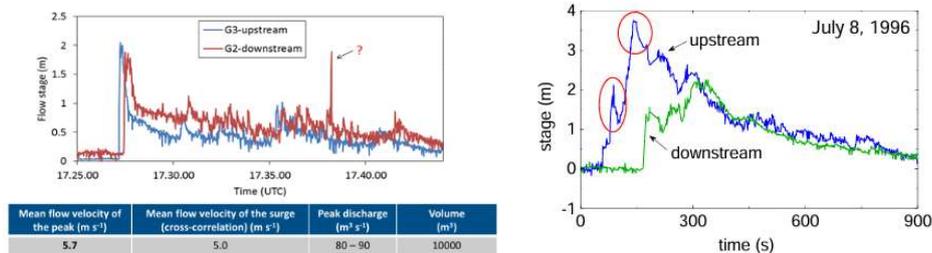


Figura 2.15: Individuazione della velocità del fenomeno tramite il riconoscimento dei fronti d'onda in punti diversi del canale (Comiti et al, 2014)

Inoltre, è possibile stimare la velocità superficiale della colata tramite fotografie a intervalli regolari, valutando la distanza percorsa, in immagini successive, dai massi più grandi presenti sul fronte dell'onda (metodo limitato dalla visibilità), oppure attraverso l'uso radar doppler, come quelli utilizzati per l'applicazione del codice della strada, emettendo microonde ad una frequenza fissa verso un flusso in movimento e valutandone la riflessione (LaHusen, 2005).

Il volume di materiale depositato può essere facilmente misurato tramite rilievi topografici alla fine dell'evento, considerando però che i fluidi interstiziali saranno defluiti, per cui il volume misurato sarà inferiore rispetto al flusso che ha percorso il canale.

Infine, è possibile utilizzare dei sensori sismici o accelerometri e dei sensori di pressione (celle di carico) rispettivamente per rilevare il passaggio di una colata detritica, tramite le vibrazioni del suolo generate, e per quantificare la forza d'impatto che essa esercita sulle strutture che incontra, al fine di dimensionare opportunamente le strutture di protezione.

Di seguito (Tabella 2.7 e Tabella 2.8) sono riportati i vantaggi e le limitazioni dei sensori principalmente utilizzati per il monitoraggio di colate detritiche, con il relativo ordine di grandezza del costo e la fase del fenomeno in cui si rendono utili.

Tabella 2.7: Caratteristiche principali dei sensori più comunemente utilizzati nel monitoraggio di colate detritiche (Hurlimann et al, 2019)

Sensor	Parameter	Process	Spatial extent	Distance (m)	Cost (€)
Rain gauge	Rainfall, precipitation	Initiation	Channel reach - catchment	1-100	10 ²
Time / Frequency Domain Reflectometry (TDR / FDR)	Soil water content	Initiation	Cross section	0-100	10 ²
Tensiometer	Negative pore water pressure	Initiation	Cross section	0-100	10 ²
Pressure sensor	Positive pore water pressure	Initiation/ flow dynamics	Cross section	0-100	10 ²
Video camera	Flow regime, flow magnitude, surface velocity etc.	Initiation/ flow dynamics	Channel-reach	1-100	10 ³
Stage sensor	Flow depth	Flow dynamics	Cross section	0	10 ²
Geophone	Ground vibration	Flow dynamics	Channel section - channel reach	1-100	10 ²
Seismometer	Ground vibration	Flow dynamics	Channel section - catchment	1-1000	10 ²
Infrasound sensor	Air pressure fluctuation	Flow dynamics	Channel reach - catchment	1-1000	10 ²
Doppler radar	Surface velocity	Flow dynamics	Channel reach	1-100	10 ⁴
Entrainment sensor	Erosion	Flow dynamics	Cross section	0	10 ³
Load cell	Basal, lateral and impact stress	Flow dynamics	Cross section	0	10 ³

Tabella 2.8: Sensori utilizzati per l'allertamento di colate detritiche (Arattano e Marchi, 2008)

Sensors	Operation	Advantages	Limitations
Ultrasonic, radar and laser sensors.	Measurement of the flow stage.	Easy to set warning thresholds.	Ultrasonic sensors have to be hung over the channel; installation can prove difficult if the channel banks are unstable.
Geophones and seismometers.	Measurement of ground vibrations caused by debris flow.	Easy and safe installation (the sensors are buried in safe places on stream banks).	Setting warning thresholds can be quite complicated. Risk of false alarms due to other sources of ground vibration (passage of trains or trucks, rockfalls, etc.). The need to filter the signal may increase system complexity.
Pendulums.	Detection of the debris-flow from the tilting of the pendulum.	Simple and robust device.	The pendulum must be hung over the channel; installation can prove difficult if the channel banks are unstable.
Wire sensors.	Detection of the debris-flow from wire breaking.	Simple and robust device.	Need for restoration after activation. Risk of false alarms due to accidental circumstances (passage of animals, falling trees, etc.).
Photocells (infrared photobeams, etc.).	Detection of debris-flow passage.	Non-contact detectors: do not need restoration after activation.	A careful installation is needed to avoid having the sensors come into contact with the flow.
CCD camera for machine-vision detection.	Recognition of debris flows.	Safe installation (the camera can be placed beside the channel).	The presence of fog or the occurrence of debris flow at night may complicate the use of the system and its workability.

Se si vuole implementare un sistema di allarme per le colate detritiche in maniera che sia robusto e affidabile, è necessario rilevare i parametri dei fenomeni che possono interagire e/o causare le colate. Ad esempio, nelle zone vulcaniche serve attenzionare le eruzioni e le piogge seguenti, perché potrebbero causare i lahar (LaHusen, 2005); in zone montane occorre monitorare i movimenti franosi, ad esempio tramite estensimetri, perché una loro attivazione potrebbe generare una colata detritica.

Il sistema di monitoraggio deve comprendere (Figura 2.16), oltre ai sensori, anche dei dispositivi di acquisizione dei dati, trasmissione ed elaborazione di essi, che deve essere progettato e dimensionato con la stessa attenzione con la quale vengono identificati i parametri da misurare e selezionati i sensori corrispondenti. Il sistema di acquisizione dati (DAS) è composto da diversi data logger, uno per ogni sensore, i quali registrano le misurazioni ad intervalli regolari, eventualmente gestiscono l'alimentazione dello strumento, e permettono di inviare i dati tramite un segnale, senza dover essere collegati fisicamente al dispositivo finale.

I sensori sono dei trasduttori, ovvero dei dispositivi che trasformano una grandezza fisica, o una sua variazione, in una grandezza elettrica (tensione, frequenza o resistenza). Il segnale elettrico in uscita dal sensore contiene in genere componenti indesiderate, rumore o segnali deboli, per cui deve essere opportunamente trattato, attraverso un blocco di condizionamento, per prepararlo ad essere campionato digitalmente e renderlo compatibile con il sistema di acquisizione.

I data logger sono quindi sistemi hardware, che devono essere programmati per campionare il segnale e registrarlo con un certo intervallo di tempo. L'alimentazione può avvenire tramite corrente elettrica, attraverso l'uso di batterie o con fonti di energia locale, ad esempio con pannelli solari.

Infine, dove si desidera la telemetria in tempo reale, è possibile selezionare un'unità terminale remota (RTU-Remote Terminal Unit), ovvero un dispositivo elettronico di controllo a microprocessore, progettato per il controllo di supervisione e l'acquisizione dei dati (SCADA-Supervisory Control And Data Acquisition system) per controllare, misurare e trasmettere i dati acquisiti dalla strumentazione collegata (LaHusen, 2005).

La telemetria consiste nella rilevazione a distanza di dati e misure, senza essere fisicamente in prossimità dell'oggetto in misurazione. Il dato viene poi trasmesso tramite una rete a radiofrequenza, per essere raccolto e analizzato, insieme alle altre misurazioni effettuate, per poi emettere un segnale ai dispositivi di allarme.

Quello che infatti rende i sistemi di allerta più efficienti (riducendo il numero di falsi allarmi), ma anche complessi, è il controllo incrociato tra i dati rilevati dai diversi sensori dislocati lungo il canale o nel bacino monitorato (Liu et al., 2003).

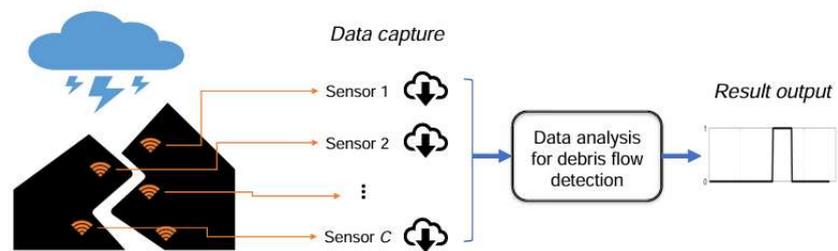


Figura 2.16: Schema generale di un sistema di monitoraggio per colate detritiche (Ye et al., 2019)

3. AREA DI STUDIO

Nel seguente capitolo verrà presentata l'area di studio oggetto della presente tesi tramite un inquadramento geografico, geologico, geomorfologico e idrologico. L'area di studio selezionata è il bacino del Rio Frejus, presso il comune di Bardonecchia (TO), che negli anni è stato interessato da numerosi eventi di notevole intensità che hanno richiesto interventi di riprogettazione del nodo idraulico del comune e hanno evidenziato la necessità di realizzazione di un sistema di monitoraggio ad hoc.

3.1 Inquadramento geografico

L'area è situata nelle Alpi occidentali italiane (Figura 3.1), precisamente in Piemonte, nella città metropolitana di Torino, in Alta Val di Susa, al confine con la Francia. Il bacino idrografico studiato è quello comprendente il Rio Frejus, fino alla confluenza nel torrente Dora di Valle Stretta, situato nel comune di Bardonecchia (TO).

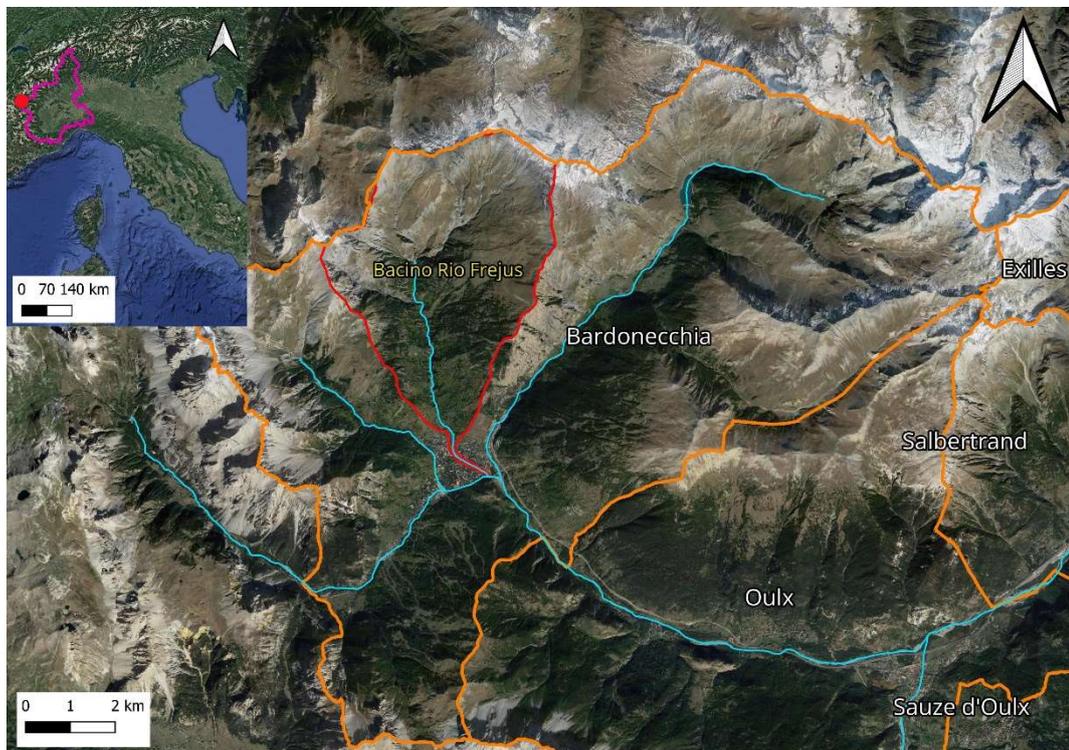


Figura 3.1: Inquadramento geografico del bacino del Rio Frejus

La sezione di chiusura, situata nel centro abitato si trova a quota 1260 m s.l.m., mentre la vetta più alta presente è la Cime du Grand Vallon (Punta Bagnà), situata a quota 3129 m s.l.m., al confine con i comuni francesi di Modane e Avrieux.

Il territorio è stato in passato zona di transito grazie alla presenza del valico alpino del Frejus (2541 m s.l.m.), mentre attualmente è percorso nel sottosuolo dai due omonimi trafori, sia quello autostradale che quello ferroviario.

Il bacino, allungato lungo la direzione Nord-Sud, ha una superficie di 22 km² ed è composto da diversi sottobacini (Figura 3.2), i quali convogliano l'acqua all'asta principale. Tra i sottobacini, da attenzionare vi sono il bacino del Rio Merdovine (a nord-est) e quello del Rio Gautier (a ovest) in quanto sono sede della maggior parte degli eventi di colate detritiche registrate e, come si vedrà successivamente, sono caratterizzati da elevata suscettibilità a questi fenomeni.

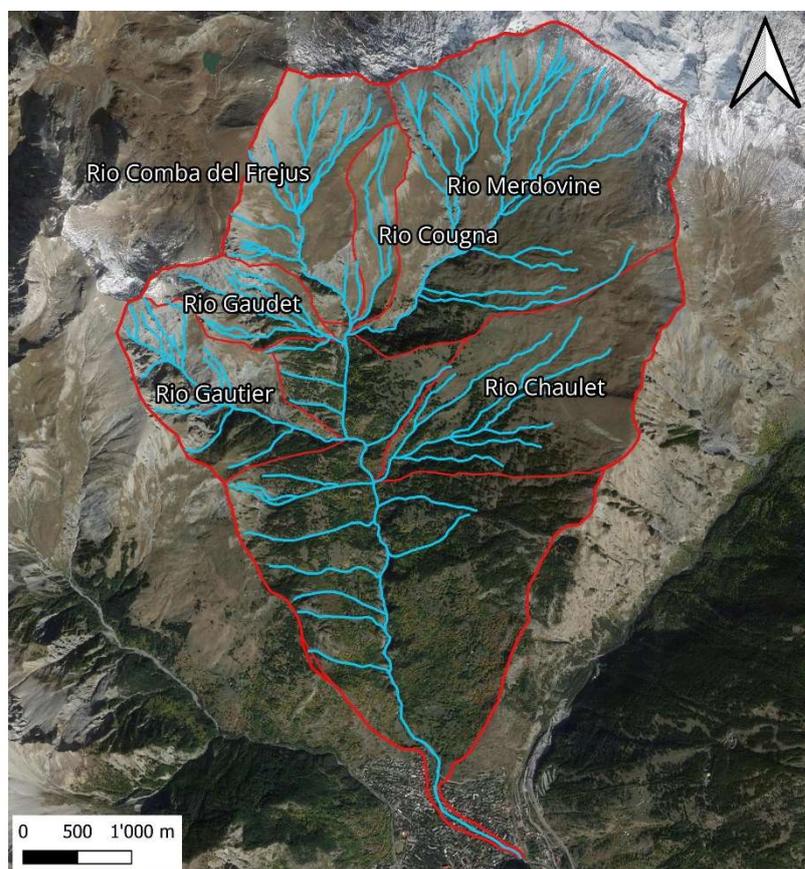


Figura 3.2: Bacino idrografico del Rio Frejus e i suoi sottobacini

3.2 Inquadramento geologico e geomorfologico

Il bacino del Rio Frejus è caratterizzato da un assetto geologico con una notevole complessità strutturale, tipica della catena alpina occidentale che si è formata per orogenesi tra la placca europea e quella di Adria. In particolare, il Complesso dei Calcescisti, a cui appartiene l'area in esame, costituisce una potente falda che durante l'orogenesi alpina è stata dislocata verso Ovest (Dominio Pennidico), sovrascorrendo la più profonda Falda del Gran S. Bernardo (Dominio Brianzonese).

I litotipi che caratterizzano il substrato pre-Quaternario nel bacino del Rio Frejus appartengono principalmente all'Unità tettonostratigrafica del Lago Nero (Figura 3.3), costituita da un basamento oceanico formato da calcescisti più o meno carbonatici (Figura 3.4), localmente ricchi di alternanze filladiche. Gli affioramenti di serpentiniti (cava abbandonata) e di quarziti sono decisamente subordinati.

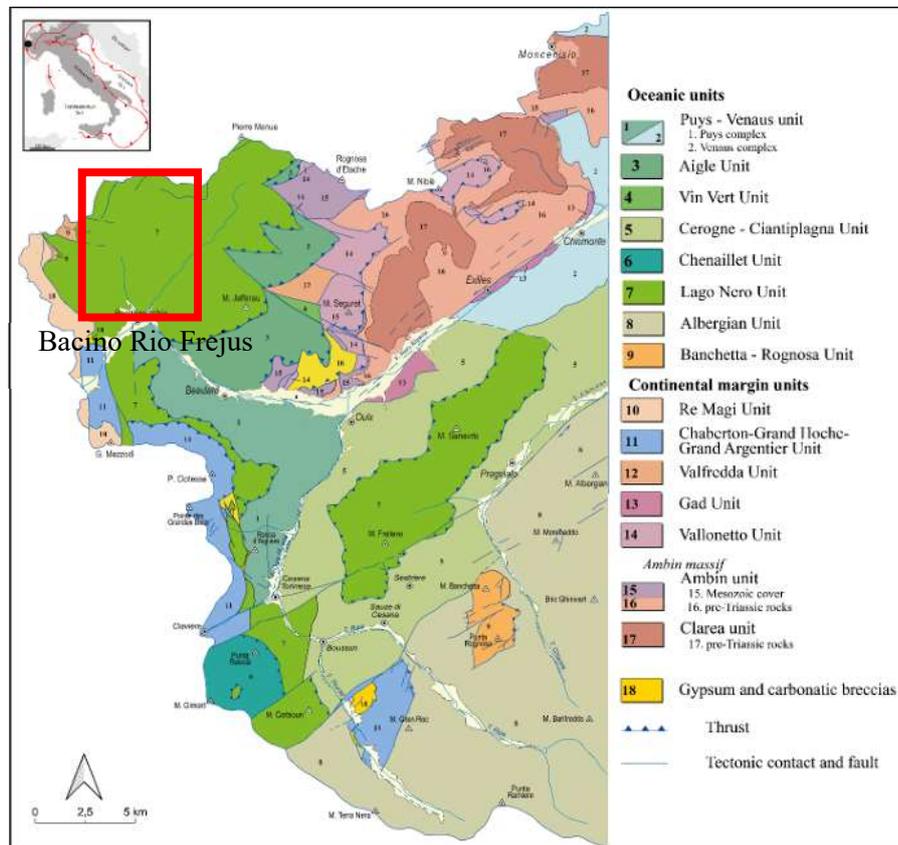


Figura 3.3: Rappresentazione schematica della tettonica dell'alta Val Susa e Chisone (modificata dal Servizio Geologico D'Italia, 2002, 2020)



Figura 3.4: Calcescisti affioranti

I principali elementi strutturali del substrato sono evidenziati dalla Carta Geologica d'Italia (scala 1:50.000) e sono rappresentati da contatti tettonici a debole inclinazione e da faglie sub-verticali (Figura 3.5).

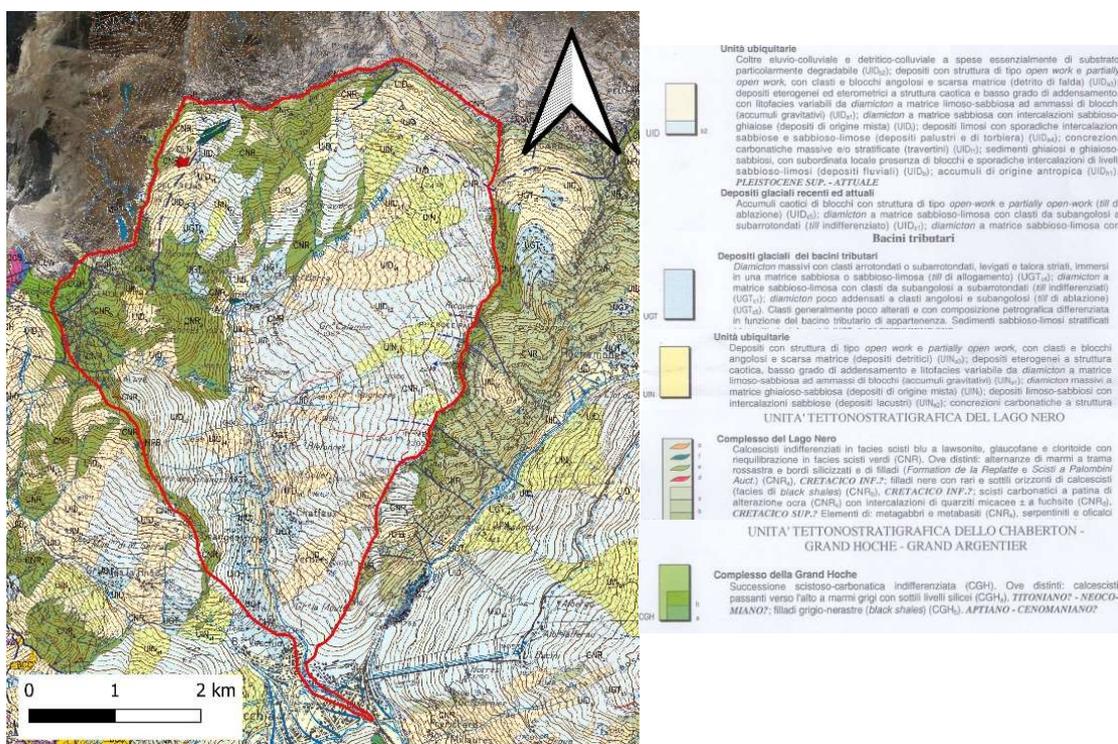


Figura 3.5: Estratto dalla Carta Geologica d'Italia, scala 1:50.000, foglio 132-152-153 (Progetto CARG)

Gli ammassi rocciosi presentano scadenti caratteristiche geomeccaniche in quanto interessati da una intensa deformazione fragile, che si manifesta attraverso una serie di

discontinuità presenti a tutte le scale. Laddove le condizioni strutturali e di pendenza dei versanti risultano predisponenti per l'instabilità gravitativa, tali ammassi assumono un grado di allentamento via via crescente fino alla completa disarticolazione (Bosco et al., 2004).

Tali caratteristiche determinano condizioni particolarmente favorevoli all'innesco di fenomeni di colata detritica, in seguito a rovesci a carattere temporalesco.



Figura 3.6: Settori di cresta del bacino del Rio Merdovine, con visibili accumuli detritici alla base delle pareti di calcescisti filladici

Le coperture Quaternarie presenti nel bacino possono essere distinte, sulla base del processo che li ha generati, in:

- Depositi glaciali: si tratta di depositi sviluppatasi nel corso di diversi cicli glaciali-interglaciali. Essi sono costituiti principalmente da frammenti e blocchi angolari caotici e non ordinati, in una matrice sabbioso-limosa.
- Depositi eluvio-colluviali: si tratta di prodotti dell'alterazione in situ del substrato roccioso e delle coperture superficiali. è composta da materiale fine (sabbia e limo, con frammenti rocciosi) e ricopre ampiamente i versanti del bacino, al di sotto del limite della roccia nuda, dove le pendenze ne consentono il deposito.
- Depositi gravitativi: sono il risultato di diversi processi indotti dalla gravità, che coinvolgono il substrato roccioso e/o i depositi quaternari. Possono essere la rielaborazione di originari detriti di falda, per cui i detriti risultano successivamente a supporto di matrice. Questa risulta una caratteristica che

contraddistingue gli accumuli legati a fenomeni di colata detritica oppure di fluidificazione della coltre detritico-colluviale e dei depositi glaciali.

- Detrito di falda: si tratta di un sedimento con struttura aperta o parzialmente aperta, ovvero in cui i clasti sono in contatto tra loro e la matrice sabbioso - limosa è assente o riempie solo alcuni interstizi. Il detrito è organizzato in forma di conoidi o prismi di sedimenti, disposti alla base delle pareti scoscese e delle testate del bacino, per cui la litologia dei clasti dipende dalla litologia dell'ammasso roccioso dell'area di origine.

Nelle coperture detritiche si evidenziano estesi fenomeni sia gravitativi sia erosivi (ruscellamento diffuso). I primi comprendono meccanismi di colamento lento e di scivolamento, in cui la superficie di scivolamento è impostata prevalentemente in corrispondenza del contatto copertura/substrato.



Figura 3.7: Evidenti fenomeni erosivi nelle coperture detritiche

Le estese aree di testata e gli accumuli detritici alla base sono identificati come aree sorgente, in quanto è da esse che hanno origine i fenomeni di colata. Gli accumuli risultano profondamente incisi da numerosi corsi d'acqua e rappresentano importanti fonti di materiale facilmente erodibile (Figura 3.8).

Ulteriori sorgenti di materiale si individuano all'interno degli alvei del reticolo idrografico, dove ingenti quantitativi di detriti eterometrici incoerenti sono stati depositati e possono essere rimobilizzati.

Conseguentemente, la morfologia del bacino risulta complessa ed articolata in quanto è dovuta alla sovrapposizione di diverse fasi di modellamento legate a processi con origine differente. In particolare, i segni del modellamento glaciale (del Pleistocene) sono piuttosto rari e spesso cancellati o alterati dall'azione erosiva dei corsi d'acqua e dai fenomeni gravitativi (Bosco et al., 2004). Questi processi sono interconnessi, poiché l'azione causata dall'approfondimento dei corsi d'acqua contribuisce in modo significativo all'instabilità dei versanti. L'evoluzione postglaciale, che caratterizza bacini minori come quello del Rio Frejus ma anche l'intera Valle di Susa, è in gran parte dovuta alla dinamica fluviale e torrentizia, e a fenomeni franosi, principalmente deformazioni gravitative profonde di versante.

L'impatto dell'azione erosiva delle acque incanalate è evidente soprattutto nei settori di cresta (Figura 3.8), dove il bacino si espande a scapito di quelli adiacenti, e nel tratto a monte di Bardonecchia, dove il corso d'acqua ha eroso una profonda gola con pareti rocciose verticali che raggiungono i 200 m di altezza. A valle della gola, prima della confluenza con la Dora di Valle Stretta, si trova l'ampio conoide alluvionale (integrato a quello del Torrente Rho) su cui sorge l'abitato di Bardonecchia. In questo tratto il canale risulta poco inciso e regolato da opere di difesa.

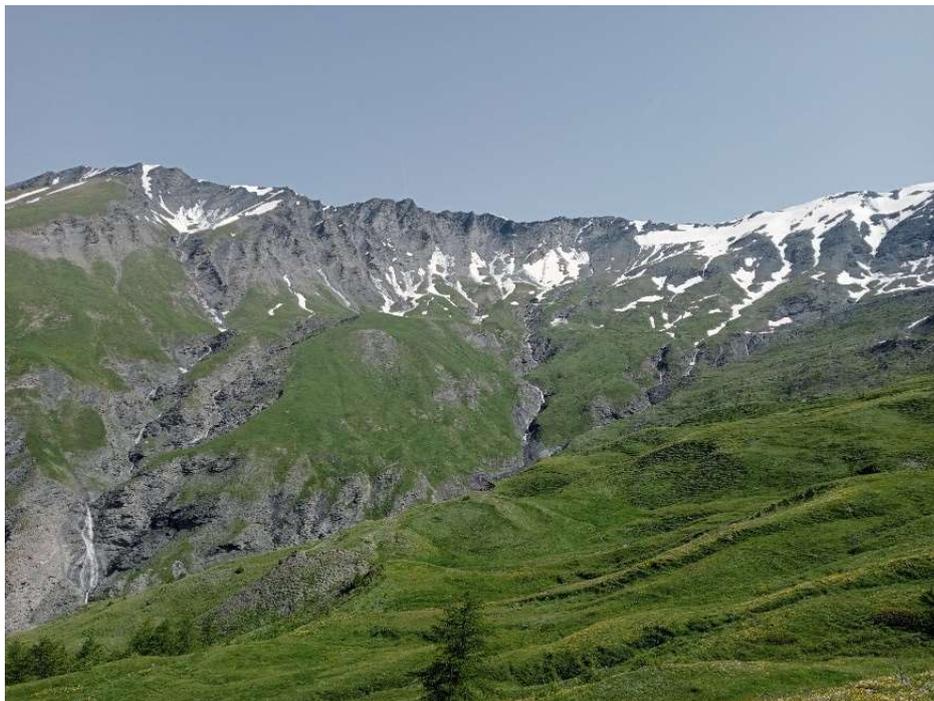


Figura 3.8: Aree di testata segnate da profonde incisioni

Il centro abitato di Bardonecchia risulta infatti soggetto principalmente all'azione dei corsi d'acqua a regime torrentizio da cui hanno avuto origine i conoidi, ovvero il Torrente Rho e Frejus, lungo i quali possono verificarsi trasporti in massa, per via dell'elevata quantità di

materiali mobilizzabili presenti. Inoltre, la mancanza di tratti di alveo sufficientemente ampi, ove il corso d'acqua possa depositare parte del carico solido, comporta che i fenomeni ad alta energia trovino sfogo unicamente lungo il conoide.

L'origine principale delle colate che interessano il bacino in esame risulta quindi essere all'interno degli alvei, spesso intasati da abbondanti materiali sciolti, derivanti da processi di disgregazione e alterazione dei calcescisti ricchi in livelli filladici. In particolare, l'innescò è localizzato in quelle aree dove si hanno contemporaneamente elevati volumi di materiale detritico, elevate pendenze delle aste torrentizie e elevate aree sottese contribuenti al deflusso (Bosco et al., 2004). Meno significativo pare, invece, l'innescò di colate detritiche a partire dal corpo frana dei fenomeni gravitativi superficiali.

A seguito di differenti eventi è stato constatato, tramite osservazioni in campo, che solitamente la reologia degli eventi che interessano questo bacino si modifica lungo l'asta torrentizia, passando da una colata detritica matura (nelle parti alte del bacino) ad una colata detritica inerziale pietroso-fangosa o flusso iperconcentrato (in conoide). Il fenomeno generalmente si evolve passando da un processo più ricco in componente solida ad un processo in moto turbolento a componente liquida prevalente. Tale evoluzione è legata alle dimensioni del bacino e all'asta percorsa dalla colata (circa 8 km, di cui gli ultimi 2 km a monte del conoide con inclinazione inferiore a 10°), che favoriscono la deposizione del materiale trasportato.

Sulla base di quanto esposto, si può dedurre che la probabilità temporale di questi eventi sia di difficile valutazione e quantificazione, poiché è funzione di numerose variabili, tra cui le precipitazioni e le caratteristiche del bacino. Questo implica una conoscenza approfondita del bacino, degli eventi storici e delle cause innescanti, la quale si inserisce come punto di partenza fondamentale per la progettazione di un sistema di monitoraggio e di allerta, al fine di ottenere dati corretti, da interpretare e successivamente per comunicare l'evento.

In Tabella 3.1 sono riportate le caratteristiche morfologiche più importanti del bacino del Rio Frejus.

Tabella 3.1: Sintesi delle caratteristiche del bacino del Rio Frejus

PARAMETRI	VALORE
Superficie [km ²]	22.32
Quota massima [m s.l.m.]	3129
Quota alla sezione di chiusura [m s.l.m.]	1260
Quota media [m s.l.m.]	2169
Inclinazione media del bacino [°]	28.1

Area del conoide alluvionale [km ²]	0.63
Rapporto area conoide/area bacino [%]	2.83
Area in affioramento (rocce) [km ²]	3.28
Densità di affioramento (rocce) [%]	14.69

3.3 Caratteristiche climatiche dell'area

Il clima dell'area di studio è fortemente influenzato dalla sua posizione rispetto alla catena alpina e spesso è controllato dalle correnti provenienti dall'Atlantico. La media delle precipitazioni annue nell'area è di circa 770 mm, con eventi piovosi più frequenti e intensi tra giugno e settembre.

Le precipitazioni estive, caratterizzate da fenomeni intensi e localizzati, sono il principale fattore di innesco delle colate detritiche nel bacino del Rio Frejus. Per questo motivo, la disponibilità di pluviometri e la registrazione dell'intensità di pioggia nell'area è fondamentale per lo studio di tale fenomeno.

Sul territorio comunale di Bardonecchia sono disposti quattro pluviometri attualmente funzionanti (Figura 3.9), tuttavia essi non sono sufficientemente vicini alla zona di innesco, il che può comportare una sottostima o sovrastima delle precipitazioni locali.



Figura 3.9: Distribuzione delle stazioni meteorologiche di Arpa Piemonte prossime al bacino del Rio Frejus

Per tale ragione, sarebbe auspicabile l'installazione di pluviometri direttamente nel bacino di studio o, in alternativa, l'utilizzo di dati radar per ottenere una copertura spaziale più accurata delle precipitazioni. Infatti, nonostante sia nota la correlazione diretta tra intensità di pioggia e attivazione dei flussi detritici, i dati disponibili provenienti dalle stazioni meteorologiche limitrofe non la mostrano, in quanto non riescono a rilevare le celle temporalesche particolarmente localizzate.

3.4 Censimento dei principali eventi registrati nel bacino del Rio Frejus

Di seguito viene riportato uno storico degli eventi che hanno interessato l'area nell'ultimo secolo, in quanto sede ricorrente di eventi di tipo colata, principalmente nella stagione estiva, quando i fenomeni temporaleschi brevi ed intensi costituiscono la tipologia di precipitazione dominante. Essi interessano il bacino del Rio Frejus, ma anche dei Torrenti Rho, Valle Stretta e Rochemolles, e sono responsabili di danni e disagi all'abitato di Bardonecchia.

Le prime testimonianze di eventi che hanno interessato Bardonecchia risalgono al 1728, quando una colata detritica danneggiò diversi edifici e strade, e causò la morte di alcune persone. Da questa data, gli eventi si sono verificati con una certa regolarità, fino allo scorso anno (agosto 2023) in cui è avvenuto un fenomeno di notevole magnitudo innescato da un temporale intenso e localizzato sul versante meridionale del Monte Frejus.

In Tabella 3.2 sono riportati i fenomeni di colata detritica che sono stati registrati a partire dal 1914.

Tabella 3.2: Processi osservati avvenuti tra il 1914 e il 2024

	SOTTOBACINO	PROCESSO
x luglio 1914		
x settembre 1920		
3 agosto 1934		Mud-debris flow
12 giugno 1947		
5 settembre 1948		
2 maggio 1949	Merdivine	Mud-debris flow
27 maggio 1951	Merdivine	Mud-debris flow
21 giugno 1954		Mud-debris flow
21 agosto 1954		Mud-debris flow
8 giugno 1955		Mud-flow
14 giugno 1957		
19 ottobre 1966		
4 novembre 1968		Mud-debris flow
7 agosto 1997	Gautier	Mud-debris flow
21 giugno 2002	Gautier	Mud-debris flow
6 agosto 2004	Gautier	Mud-debris flow
25 luglio 2006	Gautier	Mud-debris flow
	Gautier, Merdivine, Gaudet	
x agosto 2006		Mud-flow
7 agosto 2009	Merdivine	Mud-debris flow
16 luglio 2013	Gautier	Mud-flow
9 agosto 2015		Mud-flow
8 agosto 2017		Mud-debris flow
13 agosto 2023	Merdivine	Mud-debris flow
30 luglio 2024	Merdivine	Mud-debris flow

I principali danni hanno riguardato la viabilità, con tracimazione in prossimità di alcuni ponti con conseguente deposizione di materiale a granulometria fine.

Di seguito vengono descritti i fenomeni più rilevanti e recenti, relativi agli anni 2004, 2009 e 2023, ovvero quelli di cui si hanno più dati e notizie. Le seguenti descrizioni provengono dai rapporti di evento redatti da Arpa Piemonte e da documenti del Consorzio Forestale Alta Valle Susa (CFAVS). Si può notare come la precipitazione innescante e i meccanismi di propagazione e deposizione siano molto simili tra gli eventi, così come la tipologia di danni riportati, mentre si differenzia l'entità di questi ultimi.

3.4.1 6-7 agosto 2004

Tra il 6 e il 7 agosto 2004 eventi meteorologici a carattere temporalesco verificatisi in Alta Valle di Susa hanno determinato fenomeni di trasporto in massa, tra cui uno lungo l'asta torrentizia del Rio Frejus. Quest'ultimo è stato interessato in serata da un processo di tipo colata detritica fangosa. La colata ha avuto origine nel bacino del Rio Merdivine, con il contributo minore del Rio Comba del Frejus e del Rio Gautier.

In corrispondenza dell'abitato di Bardonecchia, la colata ha evidenziato in più punti la tendenza a tracimare, ed in corrispondenza dell'attraversamento di via Torino, ovvero pochi metri prima della confluenza nella Dora di Valle Stretta, si è verificato un sormonto dell'opera stessa.



Figura 3.10: Torrente Frejus immediatamente a monte della confluenza nella Dora di Valle stretta. Caratteristiche del deposito (in parte mobilizzato antropicamente) e del livello massimo della colata visibile sul rilevato ferroviario.

L'attività torrentizia è stata causata da fenomeni temporaleschi di moderata intensità e durata inferiore all'ora. Per l'analisi pluviometrica è stata considerata la stazione posizionata in località Camini, la quale ha registrato precipitazioni deboli in corrispondenza del giorno dell'innescò (8,6 mm/h), valori comparabili con la stima del radar meteorologico. Tuttavia, è importante sottolineare che questo dato potrebbe non essere identificativo della cella temporalesca che ha colpito l'area, in quanto spesso questi eventi sono causati da celle di piccole dimensioni e localizzate nelle testate del bacino. Infatti, come si vedrà anche negli eventi successivi, le precipitazioni registrate dai pluviometri appaiono poco significative; questo per via della dimensione estremamente contenuta delle celle temporalesche che innescano tali fenomeni, e che quindi non interessano le stazioni meteorologiche presenti sul territorio.

3.4.2 7 agosto 2009

Una debole onda depressionaria atlantica, in transito tra le Alpi Cozie e Marittime ha causato l'innescò di una serie di celle temporalesche prefrontali sulla catena alpina, con fenomeni precipitativi molto forti. Uno di questi ha interessato le aree di testata del bacino del Rio Frejus, determinando un fenomeno di colata che ha colpito l'abitato di Bardonecchia (Figura 3.11). Questo evento si è verificato con dinamiche molto simili a quello descritto precedentemente, da cui si è dedotto che il centro di scroscio di un fenomeno convettivo debba necessariamente interessare le testate del bacino per innescare una colata detritica. Ulteriori conferme si hanno dai fenomeni che hanno colpito bacini limitrofi.

Anche in questo caso, nessuno dei pluviometri della rete regionale ARPA ha registrato il centro di scroscio, facendo registrare quantità di pioggia al suolo decisamente inferiori a quelle relative alle zone interessate dal temporale.

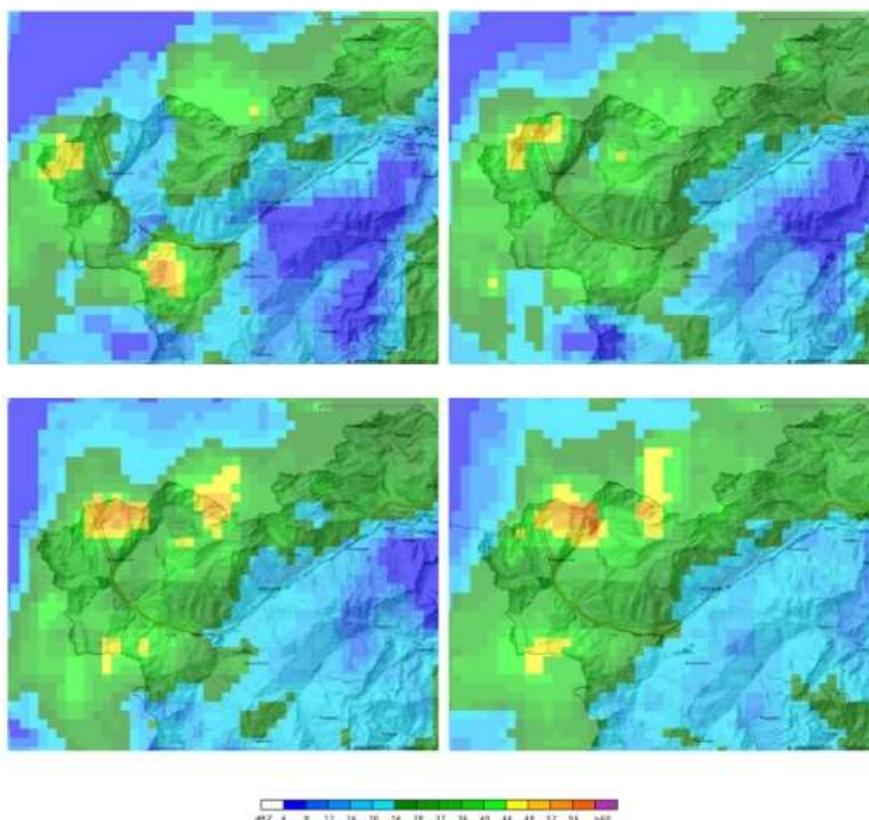


Figura 3.11: Evoluzione del fenomeno temporalesco verificatosi sul Comune di Bardonecchia nel pomeriggio del 07/08/2009

La colata detritica ha interessato l'abitato di Bardonecchia verso le ore 19, colmando in più punti la sezione libera del canale, ed è trascinata nel tratto terminale, in corrispondenza degli ultimi due ponti a monte della confluenza con la Dora di Valle Stretta (Figura 3.12). Tutta l'area adiacente è stata coperta da depositi ghiaioso-sabbiosi in abbondante matrice argillosa, per uno spessore massimo superiore a 50 cm.



Figura 3.12: Ostruzione della luce del ponte di Via Europa da parte dei depositi di colata

Rispetto all'evento dell'agosto 2004, le superfici ricoperte dai detriti sono di entità superiore sia in destra che in sinistra idrografica. Nella zona a monte dell'apice del conoide, in corrispondenza delle briglie, è stata osservata un'altezza media delle tracce del passaggio della colata superiore di 0.8-1.0 m rispetto all'evento precedente.

3.4.3 13 agosto 2023

Nella serata una cella temporalesca ha interessato la porzione più settentrionale del bacino del Rio Frejus, innescando una colata detritica che ha causato ingenti danni nell'abitato di Bardonecchia. L'evento temporalesco si è generato come cella a struttura singola, per via delle infiltrazioni di aria fresca in quota, dalla Francia verso l'arco alpino. Essa ha assunto caratteristiche semi-stazionarie per via dei flussi deboli che interessavano gli strati bassi dell'atmosfera, ciò ha dato luogo ad una pioggia concentrata, alimentata in quota da avvezione di aria umida sudoccidentale (Figura 3.13).

La cella ha interessato una porzione molto contenuta del bacino, non facendo registrare alcun dato significativo nei pluviometri disposti sul territorio comunale (Figura 3.14).

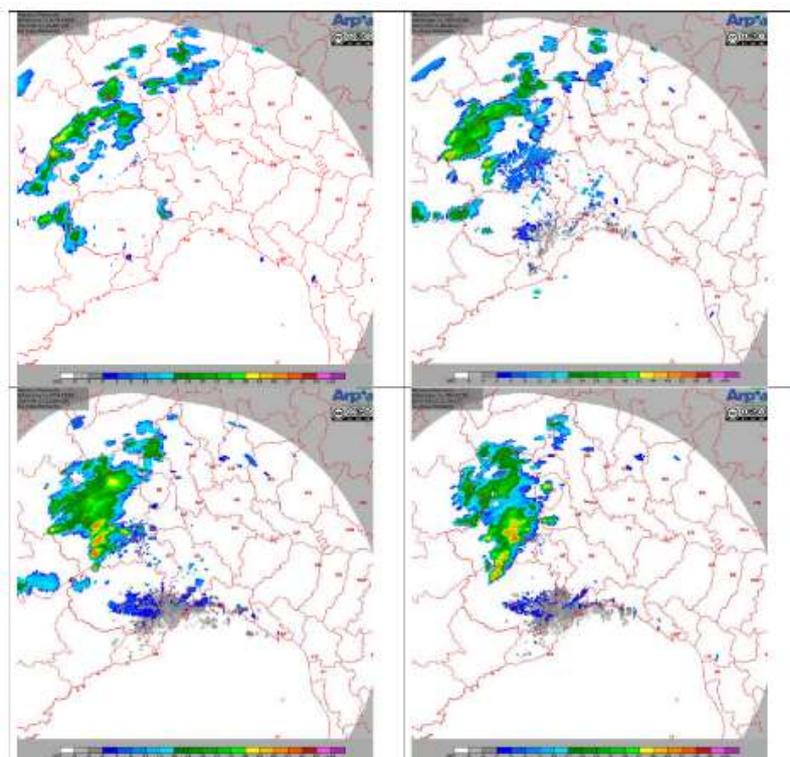


Figura 3.13: Immagini orarie da radar meteorologico, osservate tra le 18:00 UTC e le 21:00 UTC

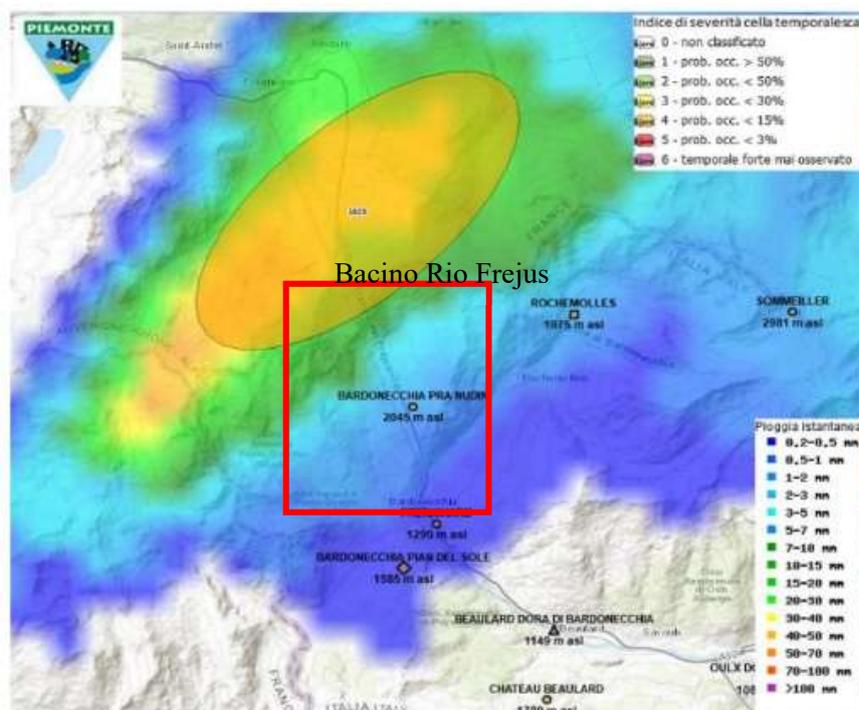


Figura 3.14: Cella temporalesca nell'istante in cui interessa il bacino del Torrente Frejus

La cella temporalesca è stata osservata tramite il radar meteorologico di Bric della Croce (TO), il quale ha individuato un'intensità di precipitazione di circa 40 mm/h, che ha insistito per circa un'ora.

Il fenomeno si è attivato nelle zone di testa del sottobacino Merdovine, a causa della posizione della cella temporalesca.

Il passaggio della colata detritica ha colmato la sezione di deflusso del torrente causando esondazioni e danni nella zona più a valle, dove la pendenza dell'alveo diminuisce e i detriti hanno danneggiato diversi edifici privati e il Commissariato di Polizia (Figura 3.15). Gli attraversamenti sono stati coinvolti, riportando danni più contenuti nella zona a monte, e progressivamente maggiori verso valle (Figura 3.16). Inoltre, numerose autovetture sono state travolte e trasportate dalla colata, senza comportare alcun ferito, e sono stati segnalati problemi di erogazione di acqua potabile e gas.

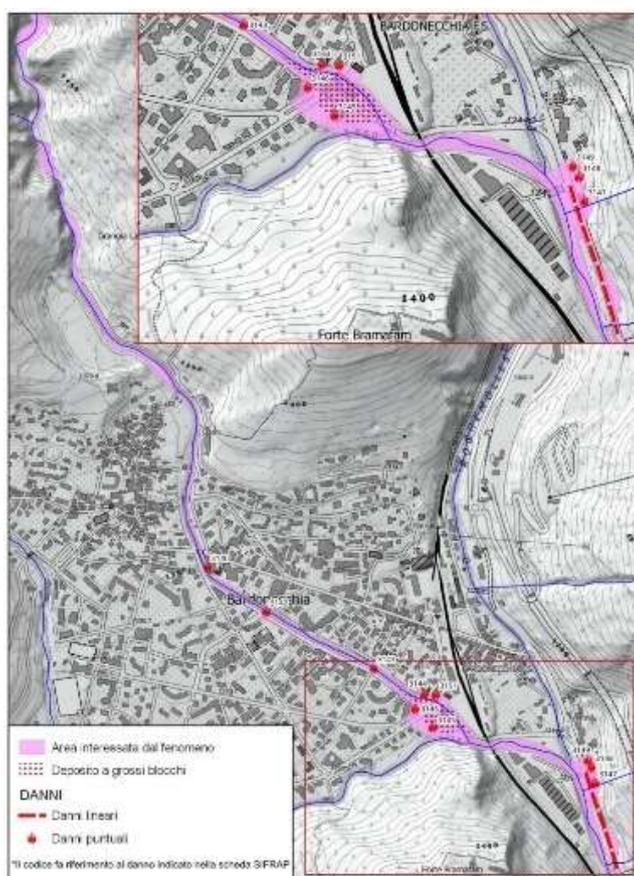


Figura 3.15: Perimetrazione speditiva delle aree coinvolte e dei danni registrati (SIFRAP)



Figura 3.16: Vista dell'area interessata dall'accumulo di materiale, il ponte della stazione e il Commissariato di Polizia. A destra da monte, mentre a sinistra da valle

3.5 Studi pregressi sul bacino del Rio Frejus

Sulla base della classificazione proposta da Tiranti et al. (2014), il bacino del Rio Frejus ricade nella tipologia ECM (Excellent Clay Maker) per via della scadente qualità meccanica dell'ammasso roccioso presente dovuta alla scistosità dei calcescisti ricchi in fillosilicati e facilmente soggetti ad alterazione, con una conseguente alta produzione di materiale sciolto e sedimenti fini.

Un'analisi effettuata da (Tiranti, 2024) ha evidenziato in quest'area una correlazione tra percentuale di substrato affiorante e la natura reologica delle colate. In particolare, il substrato roccioso affiorante è maggiore del 20% iniziano a verificarsi i flussi iperconcentrati, mentre se questo valore sale al 55% si hanno colate detritiche.

Nel bacino del Rio Frejus gli affioramenti di calcescisti, serpentiniti, ofioliti e di quarziti raggiungono circa il 30%, confermando le evidenze storiche che il bacino in esame provochi principalmente fenomeni di flusso iperconcentrato con reologia viscoplastica.

Durante questi eventi in media il 45% del materiale si deposita comunemente a monte lungo i canali, mentre il 55% dei sedimenti raggiunge il conoide alluvionale come colata di fango o colata di fango/detriti (Tiranti & Deangeli, 2015). Generalmente, infatti, il flusso che raggiunge l'abitato risulta impoverito della frazione detritica più grossolana, mentre prevale la propagazione della frazione fangosa. Per questo, il conoide presenta un'area piuttosto contenuta rispetto al bacino alimentante, in accordo con la classificazione CWI.

Per quanto riguarda le aree sorgenti, per il detrito mobilizzabile, esse sono state caratterizzate considerando il loro grado di connessione con il canale principale utilizzando l'indice di connettività dei sedimenti proposto da Cavalli et al. (2013). L'indice IC (Sediment Connectivity Index) è stato inizialmente proposto da Borselli et al. (2008) e successivamente Cavalli ed altri autori hanno adattato il concetto all'ambiente montano, sfruttando i vantaggi

dei modelli digitali del terreno (DTM) ad alta risoluzione. Esso è un indice morfometrico distribuito, in cui viene considerata l'influenza della topografia sulla connettività dei sedimenti, al fine di rappresentare il grado di accoppiamento tra diverse porzioni del bacino rispetto ad un certo target, come ad esempio l'asta principale.

Matematicamente l'indice è espresso come il logaritmo del rapporto tra la componente della pendenza ascendente (D_{up}) e quella discendente (D_{dn}):

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

La componente ascendente rappresenta il potenziale per l'instradamento verso il basso dei sedimenti, e per ogni punto del bacino è funzione dell'area contribuyente sovrastante, della pendenza media e di un fattore di ponderazione. La componente discendente considera invece la lunghezza del percorso del flusso che una particella deve percorrere per arrivare al bersaglio, e anche in essa viene tenuto in considerazione un fattore di ponderazione. Quest'ultimo, introdotto da Borselli et al. (2008) per modellare l'impedenza al deflusso, era inizialmente valutato sulla base della copertura vegetale, e quindi dell'uso del suolo; successivamente Cavalli et al. (2013) hanno sottolineato l'importanza di rendere questo fattore una rappresentazione delle caratteristiche superficiali che influenzano i processi di deflusso, per cui è stato scelto di utilizzare una misura locale della rugosità superficiale topografica per ricavarlo.

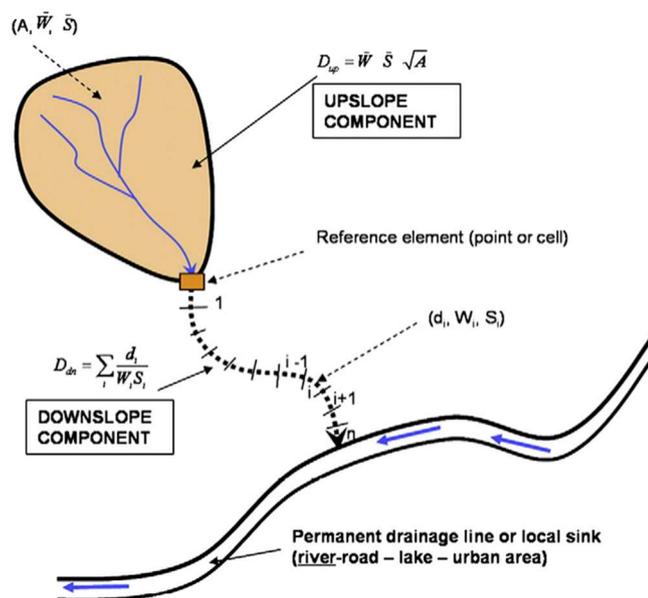


Figura 3.17: Definizione delle componenti ascendente e discendente dell'indice di connettività (Borselli et al., 2008)

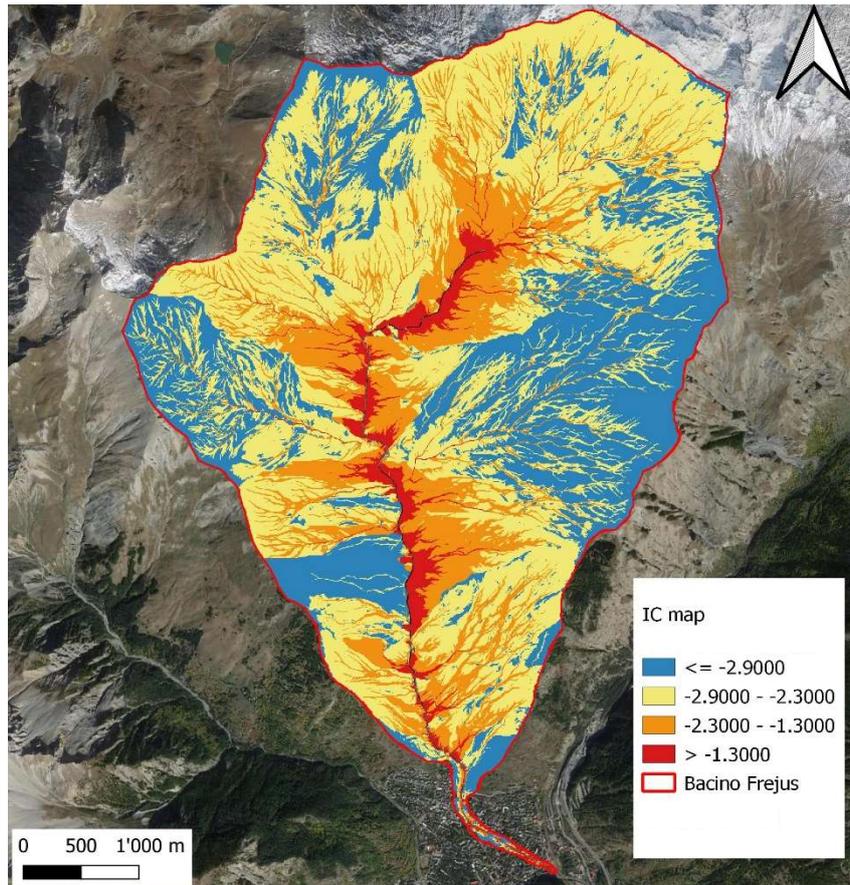


Figura 3.18: Risultato dell'analisi di connettività, considerando il Rio Frejus come target

La valutazione della connettività dei sedimenti ha permesso di valutare e selezionare le aree effettivamente accoppiate al sistema principale di canali, escludendo così le porzioni di bacino che, pur avendo detriti mobilizzabili e una rete di drenaggio, non sono in grado di apportare materiale all'asta principale, per cui non comportano un rischio per il centro abitato a valle.

Ovviamente la sola rappresentazione della connettività non è sufficiente a dare un'indicazione della suscettibilità al fenomeno, in quanto occorre considerare anche l'intersezione con le aree sorgenti di detrito. Secondo Tiranti et al. (2018), la quantità più probabile di sedimenti che effettivamente possono contribuire ad una colata detritica è data dalla selezione di un buffer di 50 m dagli assi dei canali in corrispondenza delle aree sorgenti (Figura 3.19).

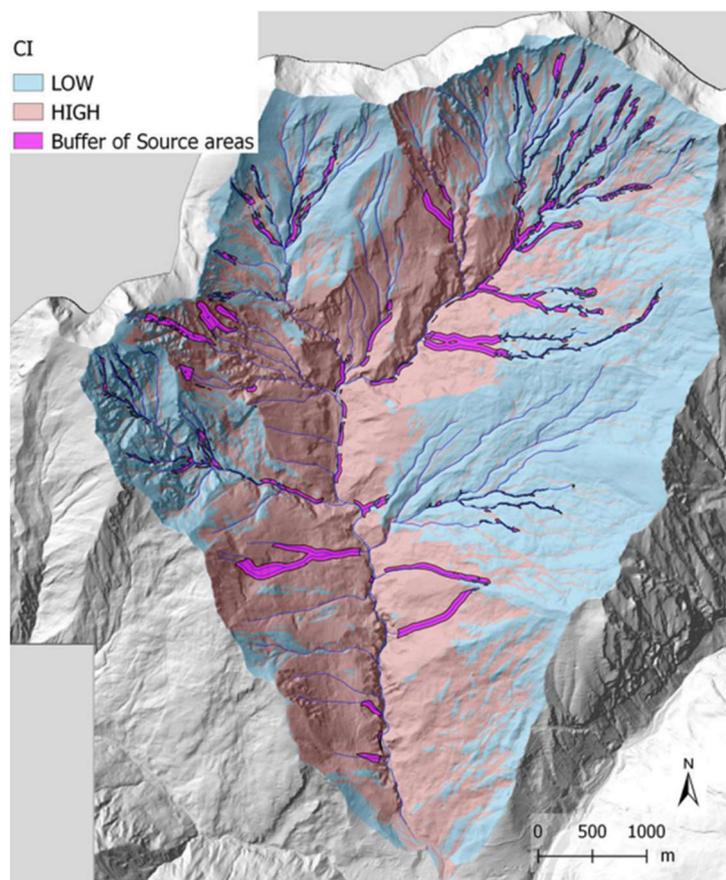


Figura 3.19: Aree sorgente risultanti dall'intersezione tra le sorgenti di depositi e un buffer di 50m dalla rete idrografica (Tiranti et al., 2018)

3.6 Opere di protezione presenti

A seguito degli eventi di colata detritica avvenuti negli ultimi secoli, l'Amministrazione comunale ha commissionato diversi lavori di regimazione e sistemazione del Rio Frejus, con lo scopo di mitigare gli eventi di piena, specialmente nell'abitato di Bardonecchia. A partire dai primi decenni del '900 iniziò la regimazione dell'alveo nel centro abitato, e successivamente vennero costruite delle briglie a monte del conoide alluvionale, contestualmente al rifacimento della strada che percorre la valle del Frejus, necessaria per la realizzazione dei camini di aerazione per il tunnel autostradale sottostante.

In base alle informazioni disponibili, a partire dagli anni '60 diminuirono notevolmente i danni registrati.

Essendo comunque presente una situazione di rischio elevato, nel tempo è proseguita la realizzazione di interventi idraulici finalizzati alla messa in sicurezza dell'abitato, comportando una forte riduzione della vulnerabilità per le aree prossime al corso d'acqua.

Attualmente, in corrispondenza dell'abitato di Bardonecchia, il torrente scorre completamente incanalato artificialmente, mentre a monte, dall'apice del conoide fino alla confluenza con il Rio Merdovine, sono state costruite opere di difesa spondale, briglie selettive e soglie (Figura 3.21). L'ultima opera costruita si trova in corrispondenza dell'apice del conoide, a quota 1390 m; si tratta di una briglia selettiva dotata di un'ampia spiaggia di deposito, la cui realizzazione è stata ultimata nel luglio 2023 (Figura 3.20).



Figura 3.20: Briglia selettiva, successivamente all'evento di luglio 2024

Essendo presente una profonda gola subito a monte di tale briglia, le altre opere trasversali sono state realizzate a monte, nel tratto che va dalla confluenza del Rio Gautier alla confluenza del Rio Merdovine. Qui si dislocano 6 opere (check dams), la cui realizzazione è avvenuta tra gli anni '80 e '90 e nei decenni seguenti sono stati effettuati diversi interventi di manutenzione. Tuttavia, a causa dell'intensa azione erosiva svolta dai sedimenti sul calcestruzzo e sui ferri che le costituiscono, esse mostrano scalzamento, denudamento dei micropali o intere porzioni distrutte (Tabella 3.3).

Tabella 3.3: Tipologia e stato di ammaloramento delle opere presenti

Codifica	Tipologia	Stato
1	Barriera di contenimento trasversale	Esistente, con fondazione a vista
2	Barriera trasversale	Distrutta
3	Barriera di contenimento trasversale	Distrutta
4	Barriera di contenimento trasversale	Integra
5	Barriera di contenimento trasversale	Integra
6	Barriera trasversale fenestrata	Riempita

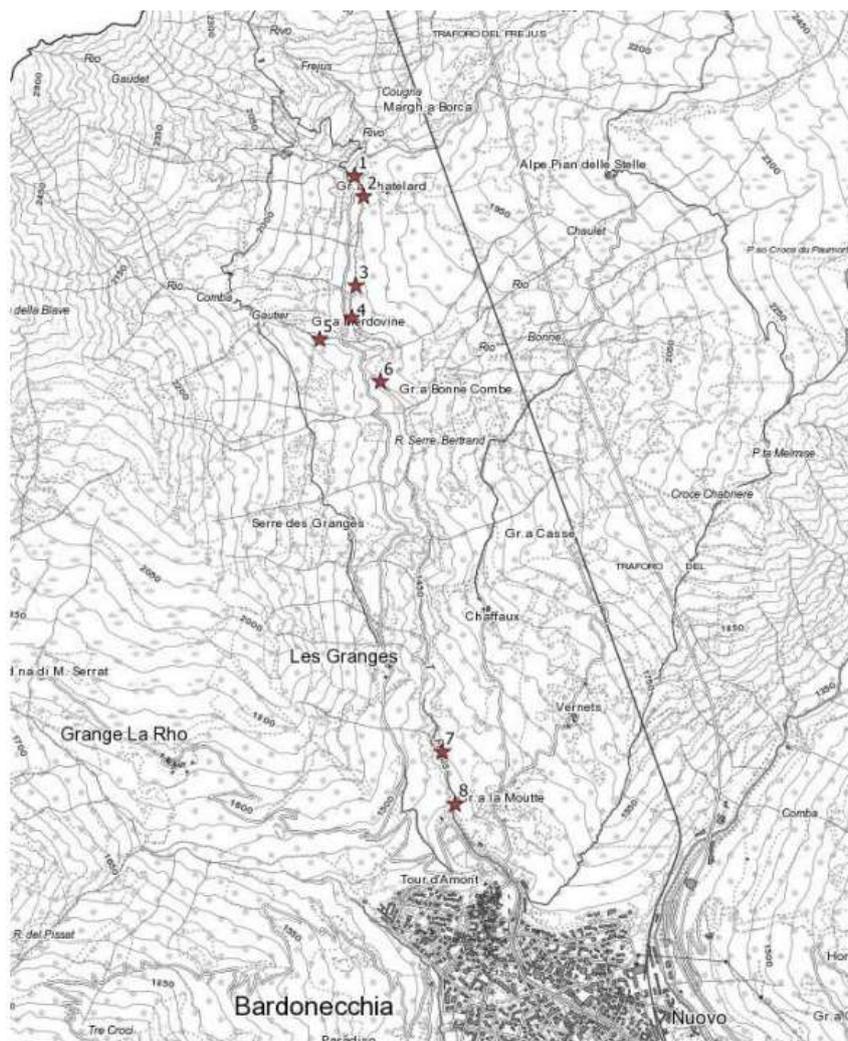


Figura 3.21: Ubicazione delle opere trasversali realizzate nell'asta del Torrente Frejus (CFAVS)

La prima traversa a monte si trova a quota 1732 m, in località denominata “Camini” per la presenza dei camini di aerazione del traforo autostradale (Figura 3.22). La barriera trasversale si trova in corrispondenza della confluenza del Rio Merdovine e Gaudet ed è stata progettata secondo una tipologia ibrida, infatti non è dotata di ali, per cui non è in grado di indirizzare il flusso verso una specifica direzione, ma permette di fissare la quota dell'alveo. Nel 2007 è stata aggirata in sinistra orografica, e nonostante la manutenzione avvenuta nel 2020 in cui è stata rifatta la platea a valle, sono di nuovo visibili fenomeni di scalzamento in corrispondenza dell'asse mediano.

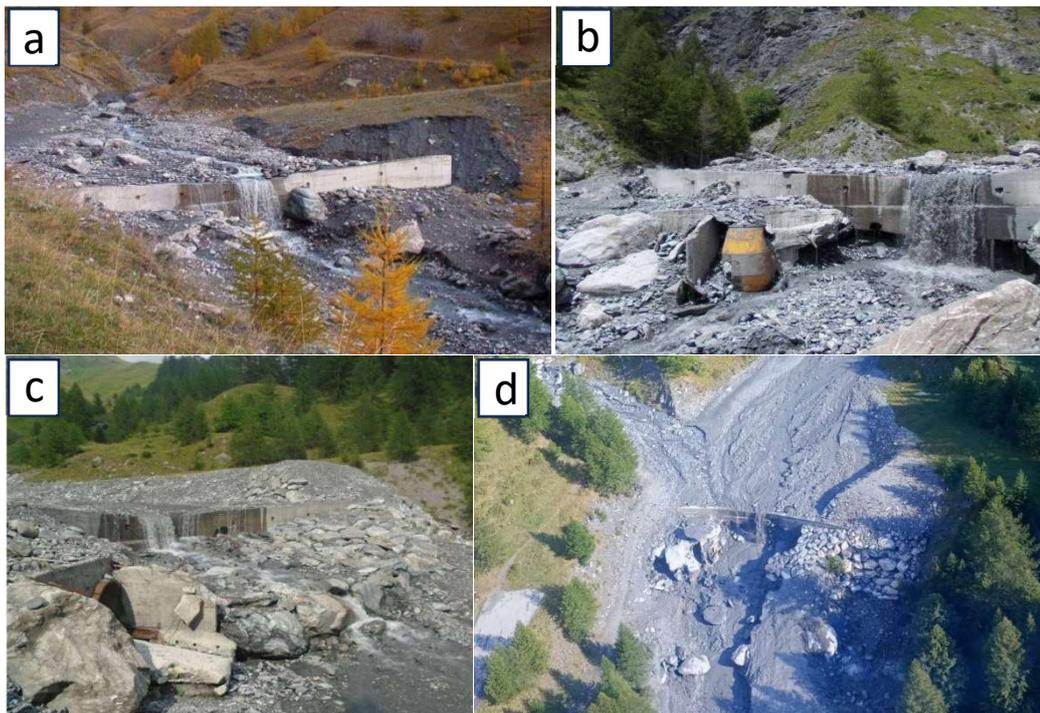


Figura 3.22: Barriera trasversale 1. a) nel 2002, b) nel 2007 con evidente scalzamento, c) dopo la manutenzione effettuata nel 2020, d) a seguito dell'evento di agosto 2023

A quota 1714 m si trova una barriera trasversale in cemento armato, di cui non è stata terminata la costruzione nel 1999, e che l'evento del 2023 ha in gran parte asportato (Figura 3.23).

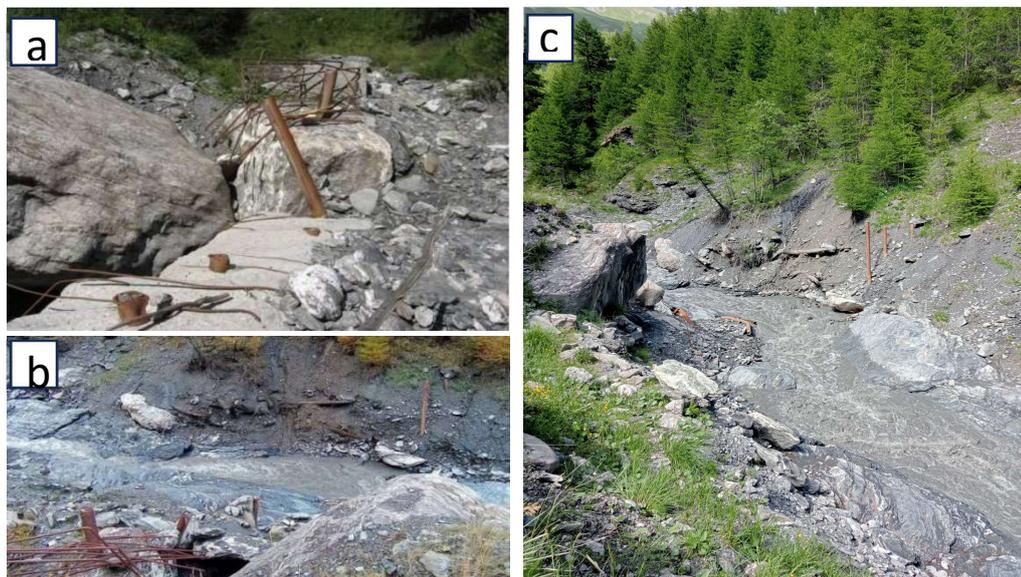


Figura 3.23: Barriera trasversale 2. a) nel 2007 dove era già evidente l'ammaloramento del calcestruzzo e l'assottigliamento dei ferri, b) e c) dopo l'evento del 2023 in cui è stata asportata la maggior parte dell'opera

A quota 1670 m si ergeva una barriera trasversale in pietrame cementato, probabilmente risalente alla prima metà del secolo scorso. Essa è stata completamente distrutta durante l'evento del 2009, e ad oggi rimangono solo i relitti delle ali, i quali però hanno resistito agli eventi degli ultimi anni (Figura 3.24).



Figura 3.24: Barriera trasversale 3, in pietrame. a) danneggiamento a seguito dell'evento del 2004, b) briglia completamente distrutta a seguito dell'evento del 2023

A quota 1640 m si ha la confluenza da destra del Rio Gautier nel Torrente Frejus, anch'esso sede di diversi fenomeni di colata avvenuti negli scorsi decenni. Lungo l'ultimo tratto del Rio Gautier si trova una barriera trasversale (Figura 3.27) e un ponte, al quale si interrompe la strada carrabile per via degli ingenti danni che esso riporta (Figura 3.25).



Figura 3.25: Ponte di ferro, posizionato poco a valle della barriera 5



Figura 3.27: Barriera trasversale 5, posizionata alla confluenza del rio Gautier

Infine, a quota 1605 m, poco a valle della confluenza, sono presenti due barriere trasversali fenestrate, le cui spiagge di deposito hanno colmato l'intero alveo, portandone il livello a quello delle briglie (Figura 3.26).



Figura 3.26: Barriere fenestrate 6, a) dopo l'evento del 2004, b) dopo l'evento del 2009, c) e d) dopo l'evento del 2023

4. SUSCETTIBILITÀ

Il seguente capitolo presenta l'applicazione del metodo Rock Engineering System per la valutazione della suscettibilità all'innescio di colate detritiche nel bacino del Rio Frejus, tramite la definizione di una mappa di suscettibilità. Questa valutazione si posiziona come primo passaggio fondamentale, oltre all'analisi delle caratteristiche del bacino svolta nel capitolo precedente, per la progettazione di un sistema di monitoraggio per tale fenomeno.

4.1 Valutazione del rischio

Le colate detritiche, come già visto in precedenza, sono uno dei disastri più comuni e distruttivi delle aree montuose, per via delle caratteristiche del flusso che trasferiscono elevata energia d'impatto a questi fenomeni. Questi fattori, uniti all'elevato grado di imprevedibilità, conferiscono un'elevata pericolosità alle colate, ovvero la probabilità di accadimento di un evento, di determinata intensità, che si verifichi in un determinato luogo e in un determinato intervallo temporale (Varnes, 1984).

Considerando che questi eventi possono interessare le zone urbanizzate dislocate sui conoidi alluvionali, è necessario introdurre il concetto di rischio, il quale è il risultato della combinazione di tre elementi: pericolosità, esposizione e vulnerabilità, e rappresenta il numero atteso di vittime e di danni che si attendono in seguito ad un fenomeno di una certa intensità.

L'esposizione si riferisce agli elementi soggetti all'evento, come edifici, attività e persone; mentre la vulnerabilità indica il grado di danno che tali elementi possono subire a seguito del verificarsi del fenomeno. Quest'ultima è quindi strettamente correlata alla tipologia e intensità del fenomeno, oltre che della posizione dell'elemento rispetto al fenomeno.

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 , $P(X_j|M_i)$ è la probabilità che la frana raggiunga un punto situato a una distanza X dalla sorgente della frana con un'intensità j, $P(T|X_j)$ 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).

L'analisi quantitativa del rischio (QRA) di colate detritiche è il processo di valutazione e stima della probabilità di avvenimento di colate detritiche e della conseguente possibile perdita di vite umane, proprietà e attività economiche.

Un'efficace valutazione scientifica del rischio è necessaria per poter pianificare la mitigazione del rischio, tramite interventi strutturali e non strutturali, e per guidare l'attuazione delle azioni di soccorso in caso di calamità (Zhou et al., 2022). Inoltre, si tratta di una valutazione oggettiva e riproducibile, per cui i risultati sono spazialmente indipendenti e possono essere confrontati da una sede all'altra.

L'analisi dei rischi comprende generalmente le seguenti fasi:

- identificazione dei pericoli,
- valutazione dei pericoli,
- inventario degli elementi a rischio e di esposizione,
- valutazione delle vulnerabilità,
- stima dei rischi.

Poiché queste fasi hanno un'importante componente spaziale, l'analisi del rischio richiede spesso la gestione di un insieme di dati territoriali e l'uso di sistemi informativi geografici. Le autorità e i decisori hanno infatti bisogno di mappe che raffigurino le aree che possono essere colpite da frane in modo che siano prese in considerazione nei piani di sviluppo e/o che siano implementate adeguate misure di mitigazione del rischio (Corominas et al., 2014).

La valutazione del rischio da frana consiste nella determinazione della probabilità che un dato evento possa colpire una determinata area e dei danni che esso può provare, in funzione della sua intensità. Questo necessita la valutazione di tutti gli elementi che concorrono al rischio, di cui la pericolosità è il più difficile da stimare in quanto dipende da:

- Suscettibilità, ovvero la probabilità di occorrenza spaziale;
- Magnitudo, ovvero l'intensità, la quale solitamente si valuta rispetto alla velocità del flusso o al volume depositato, per i quali si rivela molto utile la modellazione numerica;
- Frequenza, ovvero la probabilità temporale, la quale si può ricavare tramite i tempi di ritorno relativi ai fattori innescanti, quindi le precipitazioni e la produzione di detriti.

Nella Figura 4.1 viene riportato lo schema generale, individuato da Van Westen et al. (2008), per effettuare la valutazione del rischio da frana. In particolare, in questo capitolo ci si concentrerà sulla prima parte di questa figura, identificata dai punti A e B, rispettivamente la raccolta dei dati e la valutazione della suscettibilità.

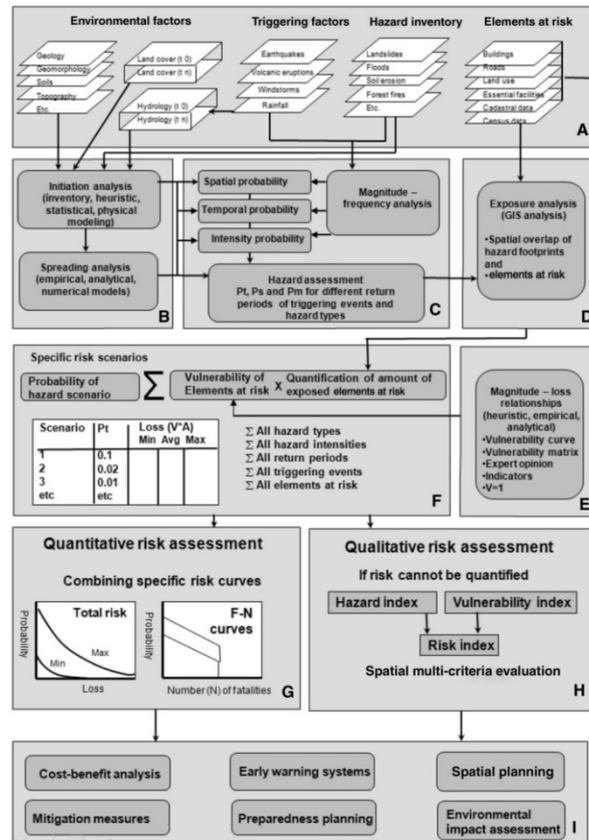


Figura 4.1: Schema per la valutazione del rischio da frana (Corominas, 2014)

4.2 Suscettibilità

Per lo sviluppo di piani e/o l'attuazione di adeguate misure di mitigazione del rischio da colate detritiche è essenziale identificare le aree potenzialmente soggette a questo fenomeno. Le zone vulnerabili a colate detritiche vengono individuate e suddivise in apposite regioni di suscettibilità, sulla base della probabilità di innesco. Come si vedrà nel capitolo successivo (Paragrafo 5.2), questo corrisponde all'analisi preliminare del bacino, ovvero il passaggio fondamentale per individuare le zone migliori per l'installazione di un sistema di monitoraggio.

Rispetto a quanto presentato nel paragrafo precedente, l'analisi di suscettibilità costituisce la fase preliminare dell'Analisi spaziale, mentre la pericolosità e il rischio costituiscono le fasi successive - più dettagliate - in cui si considera la frequenza, la magnitudo e la presenza umana

o di infrastrutture importanti. In altre parole, la valutazione della suscettibilità può essere considerata come il passo iniziale verso una valutazione della pericolosità e del rischio da frana; ma può anche essere un prodotto finale, il quale può essere utilizzato nella pianificazione dell'uso del suolo e nella riduzione dell'esposizione del territorio (Corominas et al., 2014).

I fattori che determinano la pericolosità da frana in un'area possono essere suddivisi in variabili quasi-statiche e variabili dinamiche. Le prime includono la geologia, la morfologia, la pendenza del pendio e la rete di drenaggio; sono anche detti fattori predisponenti, e sono quelli su cui si basa l'analisi di suscettibilità. Le seconde includono i fenomeni naturali che tendono ad innescare le frane, come ad esempio le piogge intense, le azioni sismiche e il rapido scioglimento della neve. Queste ultime sono molto più difficili da stimare per via del rapido cambiamento che possono subire nel tempo, e per questo vengono considerate solo in una seconda analisi, ovvero quella di pericolosità.

La suscettibilità da frana si riferisce alla possibilità che una frana possa verificarsi in una determinata area, per via delle condizioni locali presenti. La valutazione può essere fatta in maniera quantitativa o qualitativa, e non tiene conto del momento in cui potrebbe verificarsi (Fell et al., 2008).

In termini matematici, se si definisce L una data regione affetta da frane, la suscettibilità S è definita come $S = P[L|v_1, v_2, \dots, v_m]$, ovvero la 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).

L'andamento spaziale della probabilità di debris flow è illustrato nelle mappe di suscettibilità alle colate detritiche (DFSM), le quali vengono utilizzate per prevedere la propagazione degli eventi e mitigarne le conseguenze (Chen et al., 2016). La zonizzazione della suscettibilità implica la valutazione delle unità di terreno, in base alla loro propensione a produrre colate, individuando le aree di innesco più probabili. Le unità cartografiche più comuni sono unità di terreno con differenze geomorfologiche (es: bacini o versanti), unità amministrative o quadrati regolari in cui viene suddivisa l'area tramite un reticolo. Le mappe di suscettibilità dovrebbero includere, in termini di visualizzazione, un numero limitato di classi di suscettibilità, con cui suddividere il territorio (Corominas et al., 2014).

Le mappe, inoltre, devono considerare il tipo di fenomeno franoso per il quale si vuole valutare la suscettibilità, e sulla base di questo individuare i fattori predisponenti che è necessario prendere in considerazione. Infatti, fattori come le caratteristiche geologiche, la

geomorfologia, la topografia, ecc. svolgono ruoli diversi nei meccanismi di cedimento e quindi devono avere pesi diversi a seconda del fenomeno di instabilità che si considera.

Per quanto riguarda le colate detritiche, secondo lo studio di Kumar e Sarkar (2022), nei modelli di suscettibilità utilizzati fino ad ora sono stati utilizzati un totale di 96 input distinti, di cui ogni applicazione ne considerava da un minimo di 5 ad un massimo di 18. Gli autori hanno raggruppato questi fattori in 17 categorie e a loro volta in 5 macro-temi (Figura 4.2). Si può notare come i fattori responsabili del verificarsi di colate detritiche più considerati siano la pendenza, la litologia, l'esposizione, l'idrografia e l'uso del suolo. Sulla base di questo studio e di altri, effettuati nell'area di studio, sono stati individuati i fattori predisponenti utilizzati nel metodo RES, spiegato al Paragrafo 4.3 e applicato al Paragrafo 4.4.

La scelta dei parametri è stata fatta anche attenendosi ai cinque criteri elencati da Ayalew et al. (2005):

- I parametri devono essere rappresentativi dell'intero bacino;
- Devono avere una variazione spaziale;
- Devono essere facilmente misurabili;
- Non ci devono essere due o più fattori duplicati;
- Devono essere noti o associati alle colate detritiche attraverso anni di ricerca.

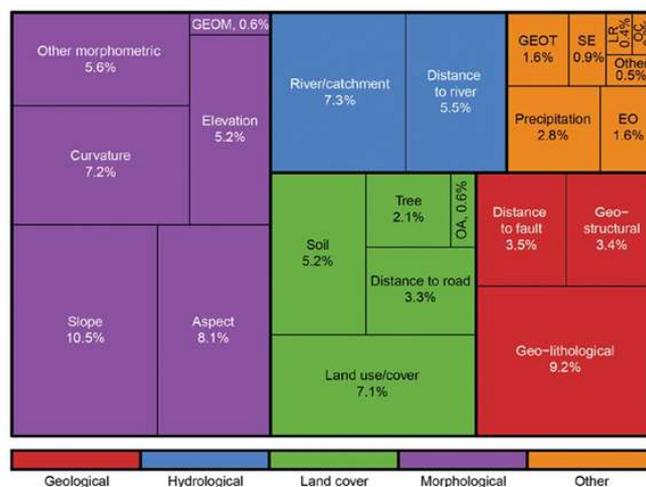


Figura 4.2: Percentuale di utilizzo delle variabili per la definizione della suscettibilità da frana (Reichenbach et al., 2018)

Per quanto riguarda le colate detritiche sarà necessario considerare la topografia, la geologia, l'uso del suolo e l'idrografia (Fell et al., 2008). Inoltre, sarà particolarmente importante far riferimento alle tipologie e alla distribuzione dei depositi non consolidati in quanto sono fattori geologici predisponenti da cui si originano le colate, e questi saranno da considerare in maniera indipendente rispetto alla litologia del substrato roccioso.

L'analisi della suscettibilità può essere fatta attraverso metodi sia qualitativi, come i metodi basati sull'inventario e quelli basati sulla conoscenza, che quantitativi, ovvero i metodi basati sui dati e i metodi basati sulla fisica (Figura 4.3). La scelta del metodo da utilizzare dovrebbe essere guidata dalla disponibilità dei parametri in input necessari per le analisi.

Tali metodi hanno in comune delle assunzioni di base (Guzzetti et al., 1999):

- ogni evento lascia sul terreno delle tracce caratteristiche
- i meccanismi di innesco 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.

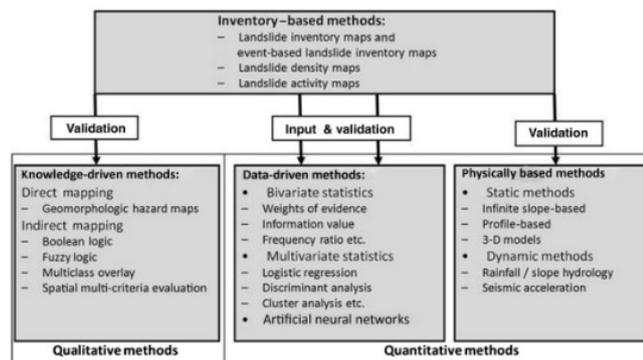


Figura 4.3: Metodi per la valutazione della suscettibilità da frana (Corominas, 2014)

Nelle tecniche qualitative, i professionisti utilizzano l'esperienza sul campo e l'osservazione dell'area di studio per fornire dei pesi ai fattori predisponenti, mentre i metodi quantitativi ricavano dei valori numerici per stimare la probabilità di accadimento di frane per ciascuna zona.

Di seguito vengono riportate le principali categorie nelle quali è possibile suddividere i metodi presenti in letteratura per la valutazione della suscettibilità da frana (Fell et al., 2008):

1. La mappatura dell'inventario delle frane è l'approccio iniziale più semplice per qualsiasi studio della pericolosità da frana. Tali mappe forniscono una distribuzione spaziale multitemporale delle frane, basata su registrazioni storiche, e possono essere utilizzate come forma elementare di mappa di suscettibilità, in quanto mostrano la posizione di quelle registrate.

2. I metodi basati sulla conoscenza, o metodi euristici, utilizzano le opinioni degli esperti per stimare il potenziale di frana a partire dai dati delle variabili quasi-statiche. I ricercatori selezionano una serie di fattori predisponenti l'instabilità, i quali vengono classificati e ponderati in base alla loro importanza assunta o attesa nel causare il movimento, e infine combinano insieme le loro variazioni spaziali per determinare la mappa di suscettibilità. Questo approccio comporta un certo grado di soggettività in quanto a ciascun fattore viene assegnata una certa importanza a priori.
3. I metodi basati sui dati, o metodi statistici, analizzano le relazioni funzionali tra i fattori di instabilità e la distribuzione degli eventi franosi, applicando diversi approcci di analisi statistica (bivariata, multivariata, di apprendimento attivo). Sulla base di questi vengono effettuate delle previsioni quantitative per le aree non colpite da frane ma con condizioni geologiche, topografiche e di uso del suolo simili. Il limite di questo metodo è che i risultati sono fortemente influenzati dalla qualità e dalla completezza dell'inventario delle frane.
4. I metodi basati sulla fisica, o approcci deterministici, si basano sull'analisi della stabilità dei pendii tramite modellazione fisica e matematica, consentendo il calcolo di valori quantitativi di stabilità (fattori di sicurezza o probabilità di cedimento). La modellazione richiede una serie di parametri numerici che descrivono la geometria e il terreno, e può essere effettuata utilizzando semplici modelli di equilibrio limite o approcci più complessi come l'analisi cinematica. Questi metodi sono applicabili su grandi aree solo quando le condizioni geologiche e geomorfologiche sono abbastanza omogenee e i tipi di frana sono noti e relativamente semplici da analizzare. Inoltre, possono incorporare le precipitazioni e altri fattori scatenanti come input dinamico del modello, il che consente di preparare mappe con scenari futuri di cambiamento climatico.

I metodi sopra descritti non possono essere ugualmente applicati alle diverse scale di analisi, in quanto sono diversi i gradi di dettaglio che essi richiedono. Ad esempio, le tecniche deterministiche richiedono dati molto dettagliati, ricavabili solo per piccole aree, mentre le tecniche statistiche sono generalmente considerate come l'approccio più appropriato per la mappatura a scala regionale.

Recentemente, i sistemi informativi geografici (GIS) sono diventati uno strumento importante per la mappatura della suscettibilità, in quanto facilitano la gestione e l'elaborazione dei dati geospaziali, grazie anche ai molti dati spaziali accessibili gratuitamente

nelle geobanche dati nazionali e regionali. Inoltre, i parametri utilizzati nella valutazione della suscettibilità possono essere facilmente estratti da strumenti in ambienti GIS, in grado di calcolare questi fattori morfologici e idrologici.

In questo progetto di tesi, l'interazione tra i fattori geo-ambientali predisponenti l'insacco di colate detritiche nell'area di studio viene analizzata utilizzando il Rock Engineering System (RES), un metodo euristico, rapido e universale, con cui è stata ottenuta una mappa di suscettibilità del bacino del Rio Frejus tramite QGIS. Nei paragrafi seguenti verranno descritte le basi teoriche del metodo, la scelta dei parametri e la quantificazione delle loro interazioni reciproche, l'applicazione del metodo e l'analisi dei risultati.

4.3 Metodo RES

Il metodo RES (Rock Engineering System) è stato proposto da Hudson nel 1992 per analizzare i problemi dell'ingegneria delle rocce considerando la relazione tra i diversi fattori selezionati. Questo approccio è stato applicato ad un'ampia varietà di problemi ingegneristici, come lo scavo di gallerie, il brillamento e l'analisi di stabilità dei pendii.

Si tratta di un metodo semi-quantitativo, in grado di descrivere e valutare la relazione e le interazioni tra i fattori influenti sul fenomeno che si sta considerando. Ciò è possibile grazie alla definizione di una matrice di interazione, ovvero l'elemento su cui si basa questo metodo, la quale conferisce adattabilità, completezza ed efficacia al metodo. Essa, infatti, contiene al suo interno tutti i parametri coinvolti e valuta, tramite un punteggio, le interazioni tra essi sulla base delle conoscenze e dell'esperienza dell'esperto, dando così un'importanza relativa ad ogni fattore identificato (Rozos et al., 2011). L'approccio matriciale conferisce al metodo sinteticità e consente l'analisi dei problemi ingegneristici da una prospettiva schematica, permettendo di classificare gerarchicamente i parametri più interattivi e dominanti su cui concentrare ulteriormente l'analisi.

Quando si analizzano problemi relativi agli ammassi rocciosi sono spesso necessari molti parametri per poter descrivere completamente il sistema. Questo porta ad un aumento dei termini lungo la diagonale della matrice, che conduce ad una comprensione più profonda del meccanismo e una migliore risoluzione del problema, ma implica anche un aumento della complessità del sistema.

In questa tesi, il metodo RES è stato utilizzato per valutare e mappare la suscettibilità alle colate detritiche in un bacino montano, per cui nella matrice di interazione sono stati inseriti i

principali fattori geologici, geomorfologici, topografici e idrologici che ne influenzano l'innescò.

Il principio alla base della matrice di interazione è quello di localizzare i parametri (P_i) lungo la diagonale, mentre nelle celle della matrice fuori dalla diagonale vengono successivamente definiti i valori delle influenze tra ciascuna coppia di fattori.

Per spiegare il funzionamento della matrice viene utilizzata una matrice 2×2 (Figura 4.4), ovvero il procedimento base che deve essere poi ripetuto per una qualsiasi matrice $n \times n$.

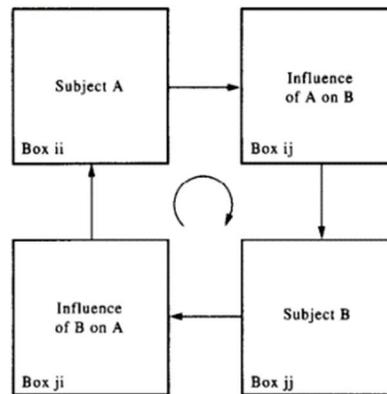


Figura 4.4: Principio di funzionamento della matrice di interazione (Hudson, 1992)

Per prima cosa occorre individuare i fattori predisponenti, nominati A e B, e disporli lungo la diagonale principale.

Successivamente, nelle celle al di fuori della diagonale occorre inserire i valori che rappresentano l'influenza di un fattore sull'altro, sempre seguendo una rotazione in senso orario, posizionandosi all'intersezione corrispondente tra la coppia di termini selezionata. Per cui in alto a destra verrà valutata l'influenza di A su B (I_{ij}) e in basso a sinistra l'influenza di B su A (I_{ji}).

L'assegnazione di tali valori è detta 'codifica' e trasforma la matrice di interazione in una matrice di calcolo, tramite la quale si possono ricavare i parametri dominanti e i coefficienti di ponderazione.

Esistono diversi metodi per la codifica proposti in letteratura (Harrison JP. & Hudson JA., 2006):

- Binario: i valori nelle celle possono essere 0 o 1 a seconda che l'influenza ci sia o meno;

- Metodo semiquantitativo esperto (ESQ): utilizza una valutazione da 0 a 4, corrispondente a 0-nessuna interazione, 1-interazione debole, 2-interazione media, 3-forte interazione, 4-interazione critica (Mazzoccola & Hudson, 1996);
- Secondo la pendenza di una relazione lineare assunta;
- Più numericamente attraverso una relazione differenziale parziale;
- In modo esplicito attraverso l'analisi numerica completa del meccanismo.

Il metodo Expert Semi-Quantitative è il più utilizzato perché il valore di interazione può essere stabilito dall'operatore in maniera semplice e fornisce una discriminazione sufficiente, con una maggiore sensibilità rispetto al metodo binario.

Nella codifica della matrice non si inserisce alcun valore nelle celle disposte lungo la diagonale, in quanto si ipotizza che il parametro non influisca su sé stesso.

Dopo aver completato la matrice con le interazioni è possibile fare dei ragionamenti sulla dominanza relativa dei parametri, semplicemente svolgendo delle somme lungo le righe e lungo le colonne. Analizzando infatti il significato fisico della matrice, la riga passante per il parametro P_i può essere interpretata come l'influenza di P_i su tutti gli altri parametri del sistema e, viceversa, la colonna passante per P_i rappresenta il modo in cui le altre variabili lo influenzano.

L'effetto di ciascun fattore sul sistema, così come l'effetto del sistema su ciascun fattore, può essere calcolato rispettivamente come la somma dei valori nella riga e nella colonna del fattore. La prima somma produce un valore chiamato 'Causa', il quale descrive il modo in cui la variabile provoca cambiamenti sul sistema; viceversa, il termine 'Effetto' si usa per la somma dei valori lungo una colonna e descrive l'effetto che il sistema dato dalle altre variabili ha sulla variabile P_i considerata (Figura 4.5). Per ogni fattore predisponente, questi valori vengono

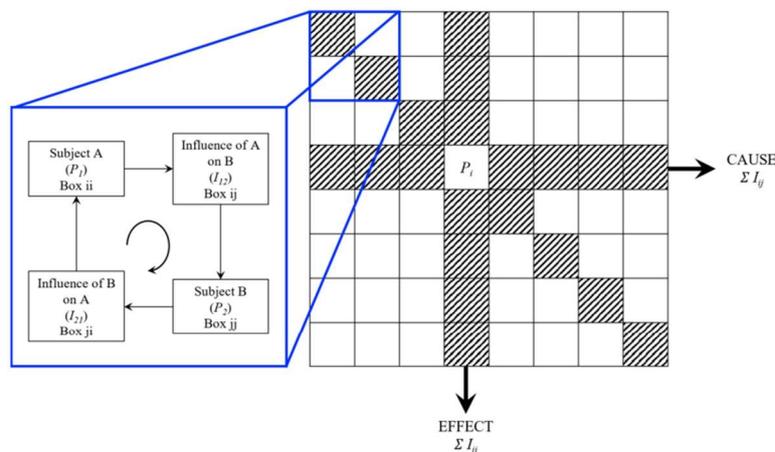


Figura 4.5: Schema rappresentativo della matrice di interazione e dei parametri Causa ed Effetto (Bonetto et al., 2021)

analizzati e utilizzati per ponderare ciascun parametro in base al suo grado di interattività nel sistema.

Nel metodo RES, il ruolo di ciascun fattore è mostrato nel diagramma causa/effetto (C-E) in cui la posizione di ciascun punto indica la modalità di interazione all'interno del sistema (Figura 4.6).

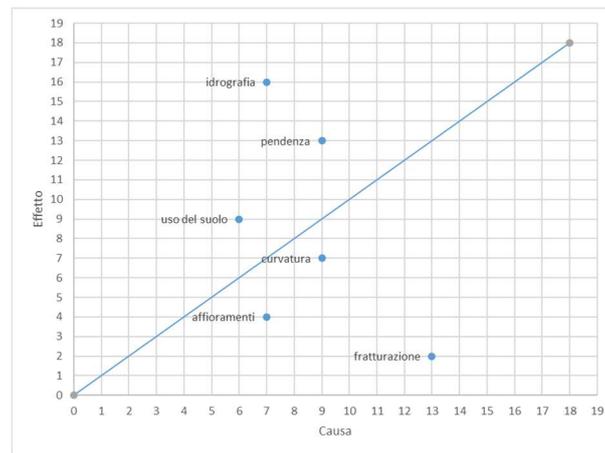


Figura 4.6: Esempio di diagramma causa-effetto

Spostandosi dall'origine all'angolo in alto a destra, la somma di causa ed effetto (C+E) aumenta e questo rappresenta la maggiore interattività dei parametri. Il valore di C-E rappresenta invece il grado di dominanza della variabile all'interno del sistema, per cui i fattori situati nella parte in basso a destra del grafico sono dominanti mentre quelli che si trovano nell'angolo in alto a sinistra sono subordinati, ovvero dominati dal sistema. Infine, se il parametro si trova sulla retta C=E vuol dire che non è né dominante né subordinato e il suo effetto sul sistema è lo stesso dell'effetto del sistema su di esso.

Questa analisi permette di verificare se i fattori considerati sia tutti necessari per la comprensione del meccanismo, o se potrebbero essere necessari solo alcuni. In particolare, se la distribuzione dei punti è normale alla retta C=E vuol dire che l'intensità dell'interazione dei parametri è minima e quindi tutti i parametri sono necessari, mentre se la distribuzione è parallela alla retta c'è un ampio intervallo di interazione e solo alcuni possono essere sufficienti.

Una volta definiti i valori di C ed E per ogni fattore predisponente, il passo successivo consiste nel calcolare il coefficiente di ponderazione per ciascun parametro:

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

dove I_{ijth} è il valore massimo che il termine fuori diagonale può assumere (in questo caso è uguale a 4).

Infine, è possibile calcolare l'indice di propensione alla colata detritica (DfPI) utilizzando l'equazione:

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

dove i si riferisce ai fattori predisponenti e P_{ik} è l'indice che descrive l'influenza, delle differenti classi che compongono i fattori predisponenti, a generare eventi di colata detritica.

$DfPI$ è il punteggio complessivo, dato dalla sommatoria degli n fattori predisponenti moltiplicati per il rispettivo coefficiente di ponderazione, e il cui valore può variare da 0 a 100. Esso correla linearmente i coefficienti ponderati con gli strati tematici pertinenti, per produrre una mappa di suscettibilità, applicando la precedente equazione ad ogni unità cartografica.

P_{ik} è un indice che descrive l'influenza di ciascun fattore predisponente, in questo caso, alla generazione di eventi di colate detritiche; in particolare, ogni fattore predisponente è stato analizzato in termini di distribuzione spaziale e suddiviso in classi al fine di descriverne numericamente l'influenza nella predisposizione degli eventi di colata. Ad ogni classe è stato assegnato un valore rappresentativo da 0 a 4, sempre sulla base di quanto quella componente del fattore fosse predisponente all'insorgere di debris flow, per quantificare il contributo ponderato di ciascuna classe all'interno del bacino.

Per cui, in ogni unità cartografica, viene sommato il contributo dato dai diversi fattori predisponenti, ognuno dei quali è ottenuto come prodotto tra il valore della classe presente e il coefficiente di ponderazione di quel fattore.

Il risultato finale è una mappa raster, la quale contiene valori da 0 a 100 rappresentanti la predisposizione all'insorgere di colate detritiche. Essa può essere utilizzata come stima preliminare della pericolosità, individuando le aree da attenzionare, e i risultati possono essere verificati da un'analisi degli eventi storici e da immagini aeree o satellitari.

L'approccio è facilmente applicabile a scala regionale, in quanto i dati necessari per una prima analisi possono essere reperiti su geodatabase con accesso libero. Inoltre, la matrice di interazione è uno strumento standardizzato, universalmente applicabile, poiché indipendente dal tipo e dalle caratteristiche del bacino (Taboni et al., 2023). Quest'ultima affermazione deve essere tenuta in considerazione sia durante la definizione della matrice, in maniera tale che non risulti eccessivamente sito-specifica, sia durante l'applicazione in un altro sito, per non incorrere in valutazioni errate.

4.4 Applicazione al caso studio

Il presente paragrafo descrive l'applicazione del metodo RES al bacino del Rio Frejus, al fine di definire una mappa di suscettibilità e quindi identificare le aree maggiormente suscettibili all'innescio di colate detritiche. Questo lavoro è la continuazione di quanto sviluppato in Vianello et al. (2023) e nella relativa tesi di dottorato, a partire dal quale sono stati fatti ulteriori ragionamenti e modifiche sulla base delle caratteristiche del bacino e delle ricerche precedentemente svolte da altri autori sulla medesima area. Per questo motivo, nella prima parte verranno descritti i fattori predisponenti considerati nella versione iniziale (Vianello et al., 2023) e come questi sono stati considerati nella matrice di interazione del metodo RES; successivamente verranno illustrate le modifiche applicate, e infine, nel paragrafo successivo verranno analizzati i risultati.

L'applicazione del metodo mantiene lo stesso scopo intrapreso dalla tesi di dottorato di Davide Vianello, ovvero utilizzare unicamente dati open source, in maniera quantitativa, a basso costo e efficace, con l'obiettivo di ottenere risultati utilizzabili per la progettazione di opere di mitigazione, come base per futuri studi di dettaglio oppure, come in questo caso, per individuare i bacini più suscettibili su cui concentrare il monitoraggio tramite sensori, a valle, e con l'uso di APR, sulle testate.

4.4.1 Fattori predisponenti

I dati riportati e descritti di seguito sono stati scaricati dal Geoportale regionale del Piemonte oppure sono stati elaborati a partire da dataset disponibili, utilizzando specifici strumenti disponibili nel software QGIS. Ad esempio, i dati geomorfologici sono stati ottenuti dall'analisi del DEM (modello digitale del terreno) dell'area di studio con risoluzione a 5 m.

Litologia

L'assetto geologico (litologia del substrato roccioso e depositi quaternari) è stato ricavato dal Foglio Bardonecchia alla scala 1:50.000 (Servizio Geologico d'Italia, 2002). La tradizionale legenda della carta geologica, che si concentra sulla suddivisione lito-stratigrafica delle formazioni, è stata convertita per considerare e valutare separatamente le caratteristiche dell'ammasso roccioso e dei depositi quaternari. Per questo verranno descritti di seguito separatamente e verranno implementate due matrici di interazione differenti, in quanto parametri indipendenti che si relazionano in maniera differente con i fattori predisponenti e si escludono spazialmente.

Diverse litologie hanno una diversa suscettibilità a innescare colate detritiche, per cui occorre differenziarle sulla base della resistenza meccanica, considerando quanto proposto da Tiranti et al. (2008) in cui si valutava il potenziale di alterazione atmosferica in argilla o frazione fine.

La litologia è quindi stata classificata, con resistenza decrescente, in:

- Quarzite
- Quarzo micascisto e gneiss
- Marmo e dolomia
- Calcescisti e micascisti (Figura 4.7)
- Gesso e breccie carbonatiche

A queste, così come alle prossime classi, è stato assegnato un punteggio da 0 a 4, sulla base della predisposizione a innescare fenomeni di colata.

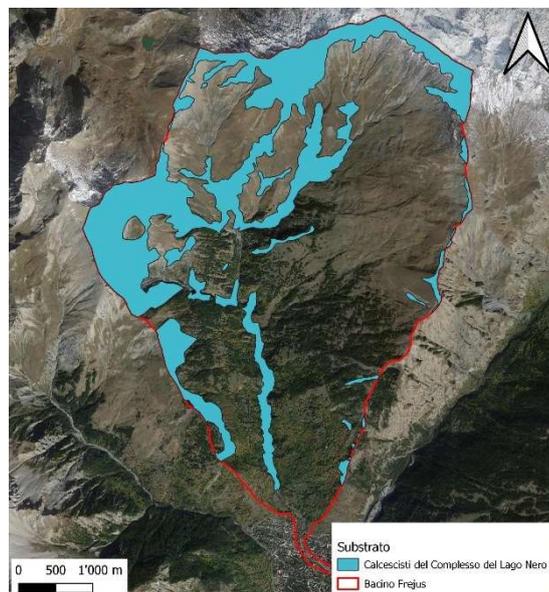


Figura 4.7: Distribuzione spaziale della litologia

Depositi

La maggior parte delle colate detritiche sono originate da depositi discreti o distribuiti, caratterizzati da una struttura metastabile, sciolta o ad alta porosità (Hutchinson, 1988). Le aree di origine sono caratterizzate da forti pendii lungo i quali, a seguito di intense precipitazioni o fusione nivale, questi depositi diventano parzialmente o completamente saturi e iniziano a muoversi quando le forze motrici sono maggiori delle forze d'attrito. Pertanto, diventa cruciale definire la disponibilità di detriti sciolti, sia nell'area di origine che lungo il percorso di deflusso, per valutare la suscettibilità alle colate detritiche.

Sulla base delle caratteristiche tessiturel distintive riportate nella carta geologica, tra cui la presenza e il tipo di matrice, i depositi sono stati classificati in quattro categorie, con punteggi da 1 a 4 (Figura 4.8):

- Giacimenti di talus
- Depositi eluvio-colluviali
- Depositi glaciali
- Depositi di frana

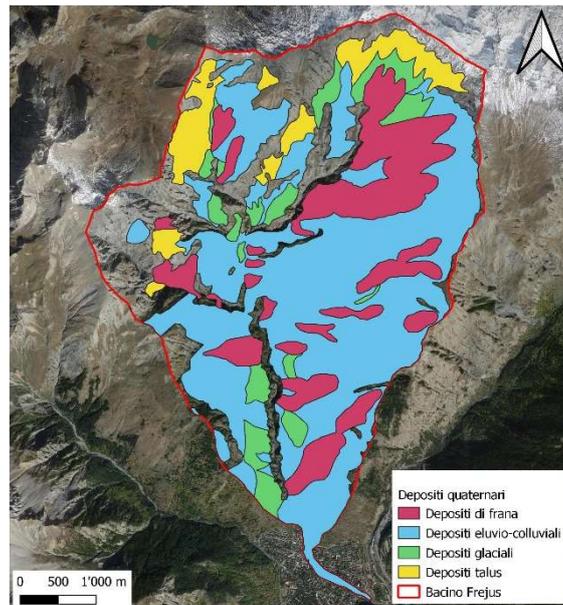


Figura 4.8: Distribuzione spaziale dei depositi quaternari

Pendenza

La pendenza del bacino, e in particolare la pendenza del letto del canale, è uno dei primi parametri da analizzare nello studio degli eventi di colata detritica, poiché amplifica gli effetti combinati di molti fattori come l'intensità delle condizioni climatiche, i processi di alterazione e la geometria interna delle formazioni geologiche (Rozos et al. 2008). Questo parametro è facile da ottenere e può rivelare immediatamente informazioni su possibili instabilità detritiche e formazione di flussi in quanto, generalmente, le colate si innescano dove le pendenze oscillano tra i 20° e i 45° (Hungur et al., 2014), mentre per inclinazioni superiori i detriti non sono presenti o hanno uno spessore trascurabile.

La variazione spaziale della pendenza è stata ottenuta dall'analisi del DEM utilizzando l'apposito codice QGIS, e successivamente, il raster ottenuto è stato suddiviso in cinque diverse classi (Figura 4.9):

- 0°-8°
- 8°-15°

- 15°-25°
- 25°-35°
- >35°

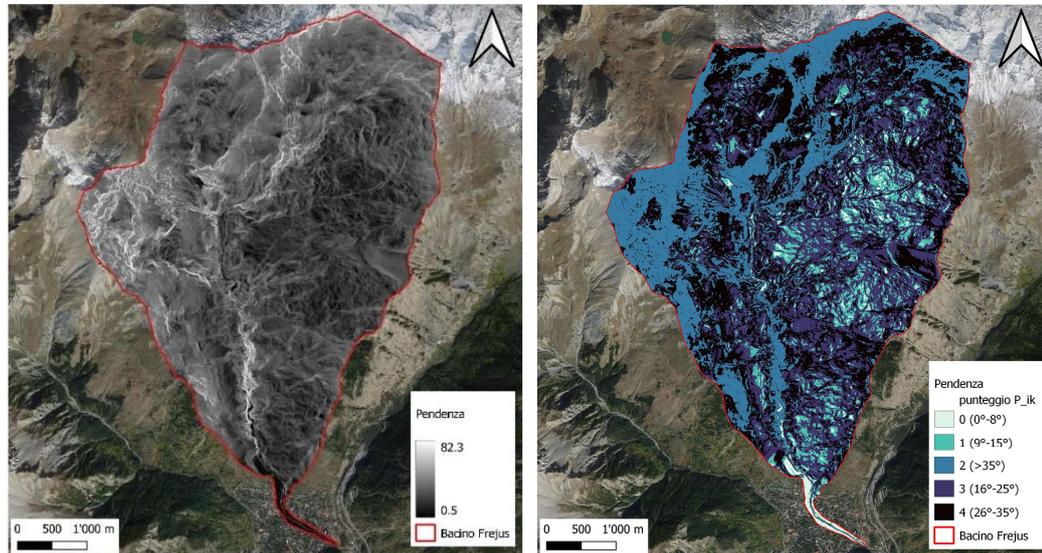


Figura 4.9: Carta della pendenza (sx) e suddivisione in classi con i rispettivi valori di P_{ik} (dx)

Curvatura

La curvatura del terreno è rappresentata dalla curvatura di una linea formata dall'intersezione di un piano con la superficie del terreno, e numericamente il valore si ottiene come il reciproco del raggio di questa linea. Si può intuire che, a seconda di come si disponga il piano sezionatore, si possono ottenere curvature differenti, con significati diversi. In questo contesto, la curvatura da considerare è quella denominata "profile", ovvero ottenuta intersecando il terreno con un piano verticale, indicando la direzione di massima pendenza di un versante (Figura 4.10). Essa è stata ottenuta tramite un codice QGIS, sempre a partire dal DEM a 5m.

Il segno della curvatura permette di determinare la concavità o la convessità della superficie in un dato punto, per cui le mappe di curvatura forniscono importanti informazioni sul riconoscimento delle frane; infatti, le modifiche topografiche indotte indicano la formazione di concavità nella zona di distacco e convessità nella parte medio-inferiore.

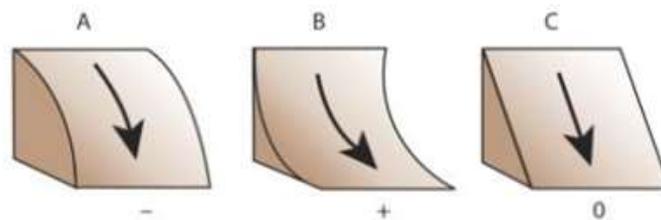


Figura 4.10: Schema rappresentativo dei possibili andamenti della curvatura

Le colate detritiche iniziano generalmente dove la curvatura è concava e il flusso può essere incanalato, per cui la distinzione è stata fatta classificando la mappa della curvatura tra superficie concava (valori negativi), convessa (valori positivi) e piana (valori prossimi allo zero) (Figura 4.11).

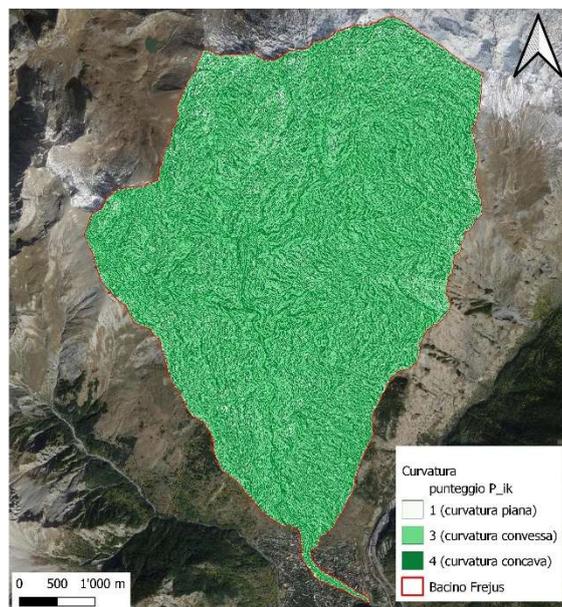


Figura 4.11: Distribuzione spaziale della curvatura

Idrografia

Escludendo la quantità di acqua derivante direttamente dagli eventi atmosferici (tra cui lo scioglimento della neve), la rete idrografica è un fattore predisponente cruciale nell'innescare delle colate detritiche; infatti, è grazie alla rete di canali secondari che i detriti riescono ad arrivare in alveo e contribuire alla colata.

La rete idrografica è ricostruibile dal DEM grazie ad uno strumento di QGIS, ma per questo lavoro si è scelto di utilizzare il censimento effettuato dalla Regione Piemonte e presente nella base dati geografica BDTRE (Base Dati Territoriale di Riferimento degli Enti).

Solitamente, le aree soggette a rifornimento di materiale si trovano a distanze inferiori ai 200 m, mentre oltre questi valori la probabilità diminuisce (Rozos et al. 2008). Per questo motivo, sono state create cinque diverse zone cuscinetto per identificare la distanza lungo i canali in cui il materiale può essere mobilitato durante il flusso: i) 0m-50m, ii) 50m-90m, iii) 90m-120m, iv) 120m-150m, v) >150m (Figura 4.12).

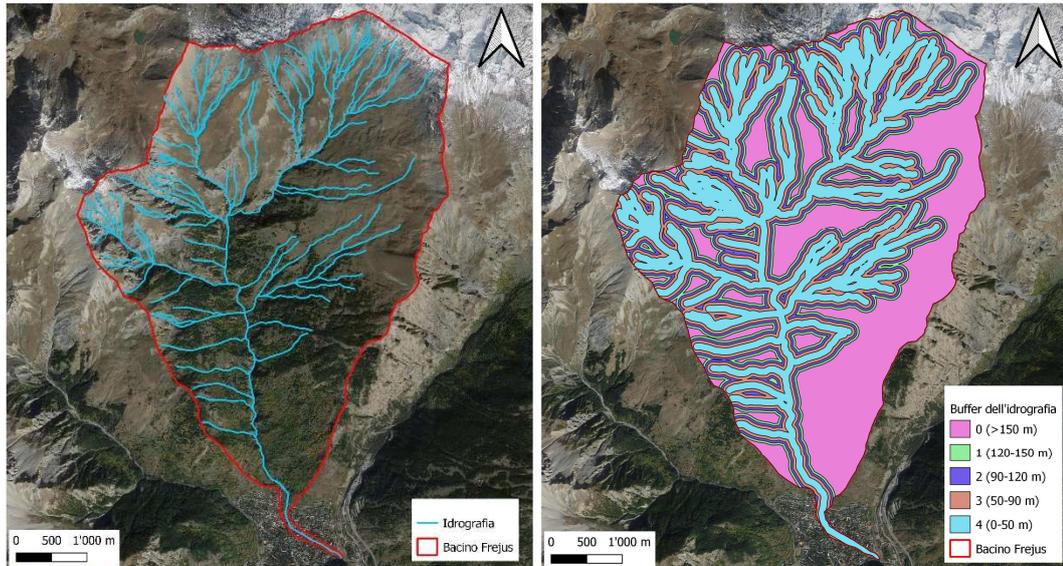


Figura 4.12: Rappresentazione della rete idrografica (sx) e dei buffer con i rispettivi valori di P_{ik} (dx)

Uso del suolo

L'uso del suolo, inteso come presenza e tipo di vegetazione, influenza il comportamento meccanico dei depositi di copertura e gioca quindi un ruolo rilevante nel controllo dell'erosione.

Il dataset fornito dall'amministrazione regionale è stato suddiviso in cinque classi, sulla base delle diverse condizioni del suolo legate all'erodibilità (Figura 4.13):

- Villaggi, urbano
- Foreste ad alto fusto
- Foreste a basso fusto
- Praterie
- Roccia nuda e depositi

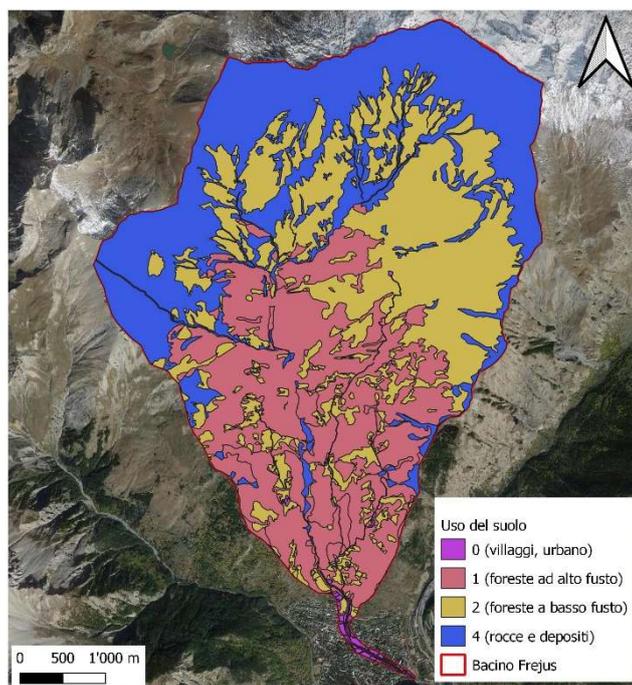


Figura 4.13: Distribuzione spaziale e classificazione dell'uso del suolo

Fratturazione

Il grado di fratturazione degli ammassi rocciosi, definito dalla disposizione spaziale delle fratture, può portare a condizioni favorevoli per la generazione di colate detritiche in quanto aumenta la quantità di detriti sciolti che derivano dal degrado della roccia. Per via della difficoltà e complessità che si avrebbero nell'effettuare un rilievo per identificare la rete di fratture presenti nel bacino, il grado di fratturazione è stato associato alla densità di lineamenti, che permette una descrizione delle condizioni generali degli ammassi presenti.

I lineamenti, in geomorfologia, sono definiti come caratteristiche lineari o curvilinee e vengono considerate come un'espressione superficiale delle strutture geologiche sottostanti, come faglie, fratture o frane. Queste caratteristiche vengono spesso identificate attraverso metodi di telerilevamento, come immagini satellitari o fotografie aeree, e l'estrazione può essere di tipo manuale o automatica. Nell'approccio automatico le tracce lineari vengono rilevate su un DTM da algoritmi basati sui valori di curvatura principale, mentre nell'approccio manuale l'utente rileva e traccia manualmente i lineamenti.

In questo contesto è stato scelto di applicare un'estrazione manuale, tramite interpretazione visiva, da immagini satellitari, concentrandosi principalmente sulle aree di affioramento roccioso.

La mappa delle densità dei lineamenti è stata derivata utilizzando lo strumento "densità linea" su QGIS, il quale permette di misurare, all'interno di una data area circolare, la densità di linee presenti per ogni cella raster (Figura 4.14).

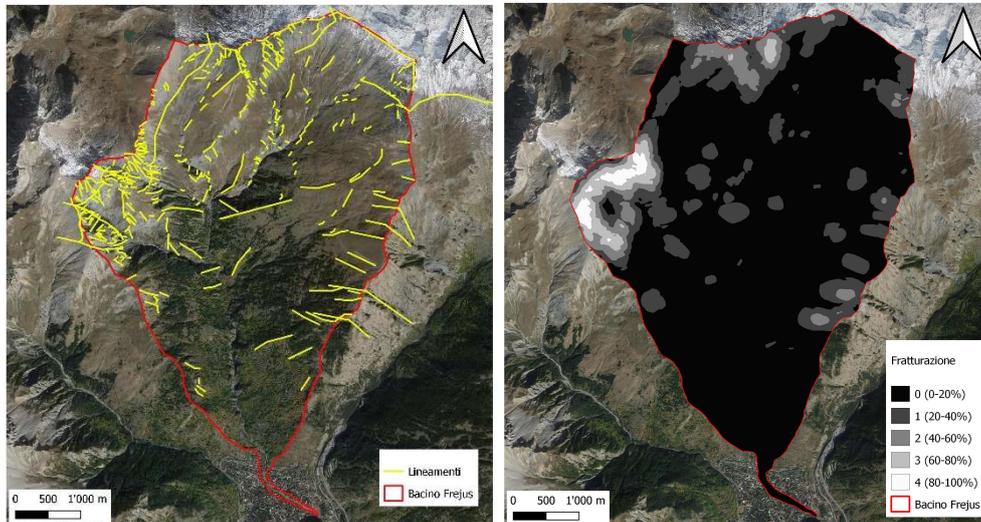


Figura 4.14: Distribuzione dei lineamenti selezionati manualmente (sx) e distribuzione della densità di lineamenti (dx)

Frane

La presenza di frane sul territorio rappresenta un fattore predisponente all'innescio di colate detritiche in quanto esse fungono da sorgente di deposito facilmente mobilizzabile e erodibile. In particolare, quello che occorre tenere in considerazione di un fenomeno franoso non è la tipologia quanto l'attività; infatti, essa può essere interpretata come la coesione presente tra i depositi: molto bassa per una frana attiva, molto alta per una frana quiescente o relitta.

La mappa dell'attività delle frane utilizzata proviene dal SIFraP (Sistema Informativo fenomeni franosi in Piemonte), il quale permette di classificare i fenomeni franosi, secondo il loro stato di attività, in (Figura 4.15):

- Attivi
- Quiescenti
- Stabilizzati
- Non definito

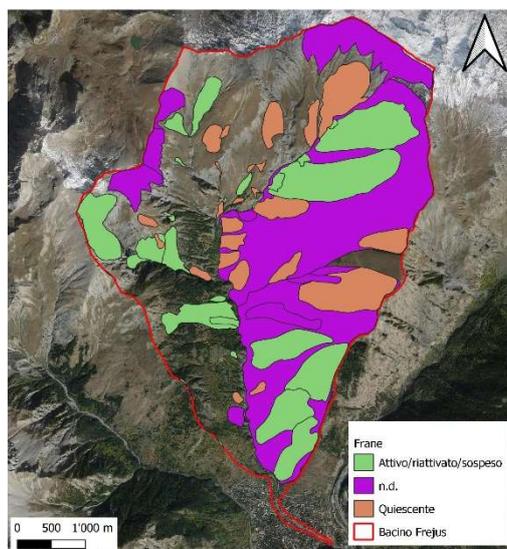


Figura 4.15: Distribuzione spaziale dei fenomeni franosi, classificati sulla base dell'attività

Di seguito è riportata la tabella riassuntiva con i fattori predisponenti presentati e la divisione in classi.

Tabella 4.1: Classificazione e punteggi dei fattori predisponenti considerati nelle matrici di interazione A e B per l'applicazione delle RES

MATRICE A - AFFIORAMENTI			MATRICE B - DEPOSITI		
parametro	classe	P _i	parametro	classe	P _i
litologia affiorante	quarziti	0	deposito	nessun deposito	0
	gneiss, quarzo micascisto	1		depositi talus	1
	marmi e dolomie	2		depositi glaciali	2
	calcescisti e micascisti	3		depositi di frana	3
	brecce di gesso e carbonato	4		depositi eluvio-colluvial	4
pendenza	0°-8°	0	pendenza	0°-8°	0
	9°-15°	1		9°-15°	1
	16°-25°	3		16°-25°	3
	26°-35°	4		26°-35°	4
	>35°	2		>35°	2
idrografia	0-50 m	4	idrografia	0-50 m	4
	50-90 m	3		50-90 m	3
	90-120 m	2		90-120 m	2
	120-150 m	1		120-150 m	1
	>150 m	0		>150 m	0
curvatura	concava	4	curvatura	concava	4
	piana	1		piana	1
	convessa	3		convessa	3
uso del suolo	villaggi, urbano	0	uso del suolo	villaggi, urbano	0
	foreste ad alto fusto	1		foreste ad alto fusto	1
	foreste a basso fusto	2		foreste a basso fusto	2
	praterie	2		praterie	2
	rocce e depositi	4		rocce e depositi	4
fratturazione	debole	0	attività frane	--	0
	moderata	1		Nd	1
	forte	2		stabilizzata	2
	molto forte	3		quiescente	3
	intensa	4		attiva	4

4.4.2 Matrici di interazione

Come descritto nel capitolo precedente, l'interazione tra i parametri predisponenti è stata analizzata ed espressa attraverso la matrice di interazione, come previsto dal metodo RES. Essa è composta dai fattori predisponenti scelti, disposti lungo la diagonale principale, e l'influenza tra essi è stata codificata utilizzando il metodo ESQ (metodo Expert Semi-Quantitative) con valori che vanno da 0 (nessuna interazione) a 4 (interazione critica).

Sulla base delle considerazioni sopra esposte, nell'analisi di suscettibilità alle colate detritiche, i depositi quaternari e la litologia del substrato roccioso devono essere considerati come parametri indipendenti, in quanto i primi sono legati ad un volume disponibile potenzialmente instabile e i secondi possono creare depositi sciolti a seconda delle caratteristiche meccaniche della roccia. Pertanto, sono state create due matrici di interazione per analizzare separatamente l'interazione reciproca tra la litologia del substrato roccioso (Matrice A) o i depositi (Matrice B) e gli altri parametri (Tabella 4.2 e Tabella 4.3).

Tabella 4.2: Matrice di interazione A, codificata per l'affioramento di litologie rocciose

MATRICE A - LITOLOGIA									
a/a	1	2	3	4	5	6	C	C+E	a_i
1	affioramenti	2	3	0	1	1	7	11	2.696
2	0	pendenza	4	2	3	0	9	22	5.392
3	0	3	idrografia	2	2	0	7	23	5.637
4	0	2	4	curvatura	2	1	9	16	3.922
5	1	2	1	2	uso del suolo	0	6	15	3.676
6	3	4	4	1	1	fratturazione	13	15	3.676
E	4	13	16	7	9	2		102	25.000

Tabella 4.3: Matrice di interazione B, codificata per l'affioramento di depositi quaternari

MATRICE B - DEPOSITI									
a/a	1	2	3	4	5	6	C	C+E	a_i
1	depositi	2	2	2	1	2	9	23	4.107
2	4	pendenza	4	2	3	3	16	29	5.179
3	3	3	idrografia	2	2	3	13	25	4.464
4	2	2	4	curvatura	2	1	11	21	3.750
5	1	2	1	2	uso del suolo	1	7	18	3.214
6	4	4	1	2	3	frane	14	24	4.286
E	14	13	12	10	11	10		140	25.000

I valori presenti nelle matrici sopra riportate sono stati valutati procedendo tramite un'analisi descrittiva delle interazioni (Tabella 4.5 e Tabella 4.4), a cui sono stati successivamente assegnati i valori da 0 a 4.

Tabella 4.5: Matrice di interazione A descrittiva

MATRICE A - LITOLOGIA						
a/a	1	2	3	4	5	6
1	litologia	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 di resistenza e degrado delle rocce influenzano la morfologia dei corsi d'acqua (3)	La litologia influenza la forma del terreno tramite la sua coesione e la resistenza all'erosione o a movimenti gravitazionali (1)	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	La pendenza favorisce il deflusso superficiale dell'acqua influenzando la velocità di erosione e il trasporto dei sedimenti (4)	La pendenza influisce sull'erosione e deposizione di sedimenti, per cui influisce sulla modellazione della curvatura del terreno (2)	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)	L'azione erosiva e deposizionale dei corsi d'acqua può rimodellare il versante modificandone la pendenza, per seguire il percorso con minore resistenza (3)	idrografia	L'azione erosiva e deposizionale dei corsi d'acqua può rimodellare il versante, accentuando la curvatura (2)	La rete idrografica influisce sulla copertura del suolo attraverso la deposizione e l'erosione (2)	Nessuna influenza (0)
4	Nessuna influenza (0)	La curvatura del terreno può influenzare la distribuzione e l'intensità dell'erosione (2)	La curvatura influenza la direzione del deflusso delle acque superficiali, accentuando l'erosione o la deposizione (4)	curvatura	La curvatura influenza la distribuzione delle zone di erosione e di accumulo dei sedimenti, attraverso il deflusso superficiale (2)	La curvatura può influenzare il tasso di erosione differenziale delle rocce (1)
5	La copertura protegge la litologia dall'erosione (1)	La copertura del suolo influenza la stabilità dei pendii e quindi la loro pendenza (2)	La copertura del suolo influisce sulle velocità del deflusso superficiale e quindi sulla morfologia dei corsi d'acqua (1)	La copertura del suolo influisce sulle velocità del deflusso superficiale e quindi sull'entità dell'erosione del terreno (2)	uso del suolo	Nessuna influenza (0)
6	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 (4)	La presenza di fratture influisce sull'erodibilità e sull'alterabilità del substrato, aumentando il potere erosivo del flusso ed eventualmente consentire la formazione di nuovi corsi d'acqua (4)	Il substrato fratturato è più suscettibile all'erosione e al collasso, contribuendo alla formazione di curvature pronunciate (1)	La presenza di fratture influenza l'erodibilità e la circolazione dell'acqua (1)	fratturazione

Tabella 4.4: Matrice di interazione B descrittiva

MATRICE B - DEPOSITI						
a/a	1	2	3	4	5	6
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)	Il tipo, lo spessore e le caratteristiche tessiture dei depositi influenzano la morfologia dei corsi d'acqua (2)	Il tipo, lo spessore e le caratteristiche tessiture dei depositi influenzano il grado di curvatura del terreno (2)	La granulometria dei depositi e il loro spessore influenzano il tipo di copertura del suolo (1)	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	La pendenza favorisce il deflusso superficiale dell'acqua influenzando la velocità di erosione e il trasporto dei sedimenti (4)	La pendenza influisce sull'erosione e deposizione di sedimenti, per cui influisce sulla modellazione della curvatura del terreno (2)	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	I corsi d'acqua possono determinare l'accumulo o il movimento dei depositi modificandone la distribuzione e le caratteristiche tessiture (3)	L'azione erosiva e deposizionale dei corsi d'acqua può rimodellare il versante modificandone la pendenza, per seguire il percorso con minore resistenza (3)	idrografia	L'azione erosiva e deposizionale dei corsi d'acqua può rimodellare il versante, accentuando la curvatura (2)	La rete idrografica influisce sulla copertura del suolo attraverso la deposizione e l'erosione (2)	L'idrografia influenza l'attivazione delle frane attraverso l'erosione alla base dei versanti e laterale, favorendone l'instabilità (3)
4	La curvatura influisce sullo spessore dei depositi attraverso i processi di erosione e deposizione del deflusso superficiale (2)	La curvatura del terreno può influenzare la distribuzione e l'intensità dell'erosione (2)	La curvatura influenza la direzione del deflusso delle acque superficiali, accentuando l'erosione o la deposizione (4)	curvatura	La curvatura influenza la distribuzione delle zone di erosione e di accumulo dei sedimenti, attraverso il deflusso superficiale (2)	La curvatura può facilitare l'attivazione delle frane attraverso processi di accumulo di materiale, oppure ridurla grazie al drenaggio delle acque (1)
5	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)	La copertura del suolo influisce sulle velocità del deflusso superficiale e quindi sulla morfologia dei corsi d'acqua (1)	La copertura del suolo influisce sulle velocità del deflusso superficiale e quindi sull'entità dell'erosione del terreno (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)
6	L'attivazione delle frane può provocare una variazione della distribuzione e delle caratteristiche dei depositi (4)	L'attivazione delle frane influenza la morfologia del terreno alterando la pendenza originaria del pendio (4)	L'attivazione delle frane può modificare la morfologia dei corsi d'acqua, alterare la morfologia delle sponde o creare nuovi canali (1)	L'attivazione delle frane influenza la curvatura del terreno tramite la deposizione di materiale lungo il pendio (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)	frane

Un altro modo di visualizzare le matrici 4.2 e 4.3 è la rappresentazione nel diagramma causa-effetto.

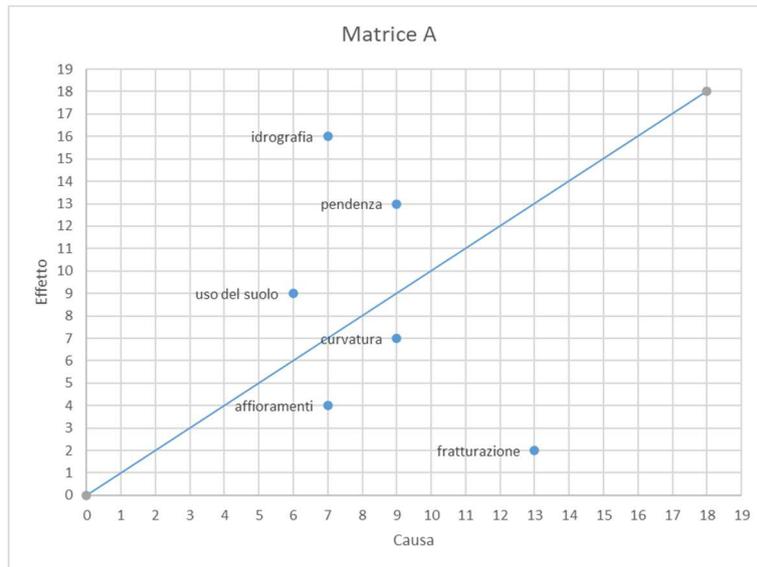


Figura 4.17: Diagramma causa-effetto della Matrice A

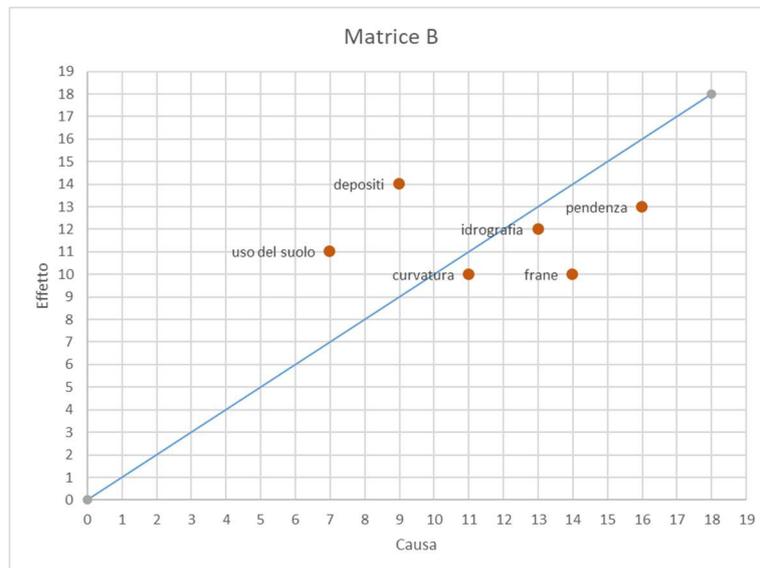


Figura 4.16: Diagramma causa-effetto della Matrice B

Analizzando la Figura 4.17 e la Figura 4.16, si può notare che: nella matrice A il parametro più interattivo (C+E) è l'idrografia, mentre nella matrice B questo passa al secondo posto dopo la pendenza. Invece, per quanto riguarda la dominanza (C-E), la fratturazione e le frane risultano i fattori più dominanti nelle rispettive matrici.

Poiché il posizionamento dei parametri rispetto alla linea $C=E$ non segue un andamento parallelo ma piuttosto perpendicolare, per entrambe le matrici, si può dedurre che tutti i parametri siano moderatamente interattivi e per questo siano necessari per il calcolo della suscettibilità.

Dopo aver codificato le interazioni dei fattori principali e calcolato i loro coefficienti ponderati (Tabella 4.2 e Tabella 4.3), questi sono stati correlati linearmente con i livelli tematici pertinenti per produrre una mappa di suscettibilità alle frane utilizzando l'equazione vista precedentemente per il calcolo del DfPI, applicandola ad ogni cella della griglia 5x5 creata sul bacino.

La gestione e l'analisi dei dati sono state condotte utilizzando il software QGIS, attraverso il quale sono stati convertiti a raster quelli che originariamente erano shapefile, e dove è stata implementata l'equazione attraverso lo strumento "Calcolatore raster".

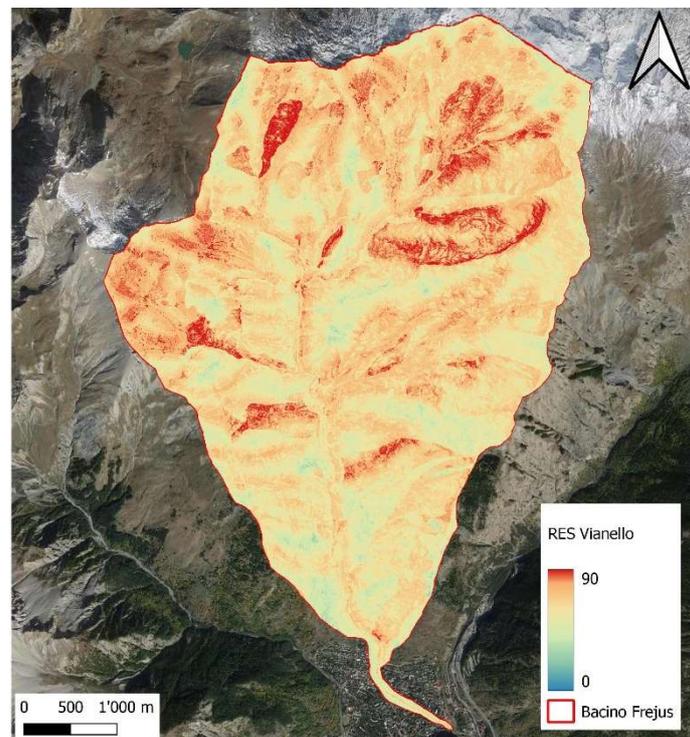


Figura 4.18: Risultato applicazione del metodo RES effettuata da Vianello et al. (2023)

4.4.3 Modifiche effettuate

Sulla base delle caratteristiche del bacino e degli studi pregressi effettuati in quest'area, è stato scelto di apportare delle modifiche ai fattori predisponenti considerati, alla valutazione delle interazioni e alla divisione interna in classi dei fattori, in maniera da ottenere risultati più precisi riguardo alle aree suscettibili e scegliere correttamente quelle da monitorare.

Per prima cosa, tra i parametri predisponenti, si è scelto di considerare l'indice di connettività (già presentato al Paragrafo 3.3) e sostituirlo all'idrografia e alla curvatura. Infatti, la connettività, rappresentando il grado di connessione delle aree detritiche con il canale principale, considera sia la rete idrografica secondaria e terziaria sia la morfologia del territorio. Sostituendo un fattore predisponente è stato necessario ridefinire i valori delle influenze reciproche, per cui di seguito verranno presentate le nuove matrici di interazione.

La mappa dell'indice di connettività IC è stata ricavata tramite l'applicazione SedInConnect sviluppata da Cavalli et al. (2014). L'input necessario è il DTM dell'area, precedentemente modificato con un software GIS per rimuovere le depressioni locali che potrebbero interferire con l'analisi di connettività. Inoltre, è stato necessario indicare la dimensione delle celle del DTM, il tratto di torrente selezionato come target e l'uso della rugosità per il calcolo del fattore di ponderazione. Infine, il raster ottenuto è stato suddiviso in quattro classi seguendo la classificazione Natural Breaks, già utilizzata da Tiranti et al. (2018).

Questa è stata inoltre l'opportunità per poter riflettere sui punteggi presenti nelle matrici di interazione, anche alla luce di quanto studiato da altri autori nella medesima area, come presentato nel Paragrafo 3.3. In particolare, Tiranti et al. (2016) hanno dimostrato che i bacini idrografici caratterizzati da una percentuale significativa di rocce affioranti mostrano una maggiore incidenza di colate detritiche, indipendentemente dalla litologia presente, in quanto una percentuale elevata di substrato affiorante aumenta la produzione di detriti, ovvero la principale fonte di materiale mobilizzabile. Al contrario, la presenza di frane non influenza le caratteristiche del processo torrentizio, ovvero la concentrazione di detriti trasportati. Questo risultato può essere spiegato considerando che i fenomeni franosi e le deformazioni gravitative profonde di versante interessano principalmente i versanti formati da scisti, i quali sono già caratterizzati da proprietà meccaniche scarse e contribuiscono solo perimetralmente all'alimentazione dei fenomeni torrentizi.

Per questi motivi, nelle matrici seguenti si potrà notare, oltre all'introduzione della connettività, anche una diminuzione dell'influenza delle frane (Tabella 4.6 e Tabella 4.7).

Tabella 4.6: Matrice di interazione A, modificata e codificata

MATRICE A - LITOLOGIA								
a/a	1	2	3	4	5	C	C+E	a_i
1	litologia	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
E	4	10	12	7	2		70	25.000

Tabella 4.7: Matrice di interazione B, modificata e codificata

MATRICE B - DEPOSITI									
a/a	1	2	3	4	5	C	C+E	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	frane	10	19	4.847	
E	11	9	10	10	9		98	25	

Tabella 4.8: Matrice di interazione A modificata e descritta

MATRICE A - LITOLOGIA					
a/a	1	2	3	4	5
1	litologia	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 4.9: Matrice di interazione B modificata e descritta

MATRICE B - 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 tessiturali 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 disposizione 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 redistribuzione 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)	frane

Ulteriori modifiche sono state effettuate all'interno dei layer dei fattori predisponenti, ad esempio ai fenomeni franosi indicati come attivi o quiescenti presenti nel bosco, è stato diminuito il valore dell'indice Pik, portandolo ad 1 come le frane con attività non determinata. Questo perché, da immagini satellitari, non erano evidenti tracce morfologiche di recenti attivazioni, per cui tenerne conto avrebbe erroneamente aumentato la suscettibilità in un'area nel bosco e a bassa quota.

Inoltre, sono state eseguite delle modifiche nella suddivisione in classi di:

- Litologia: è stato aumentato il valore dei calcescisti da 3 a 4.
- Depositi quaternari: le iniziali quattro classi sono state aggregate in tre, dando maggiore importanza alla coesione presente.
- Uso del suolo: il valore dato alle praterie è stato diminuito da 3 a 2.

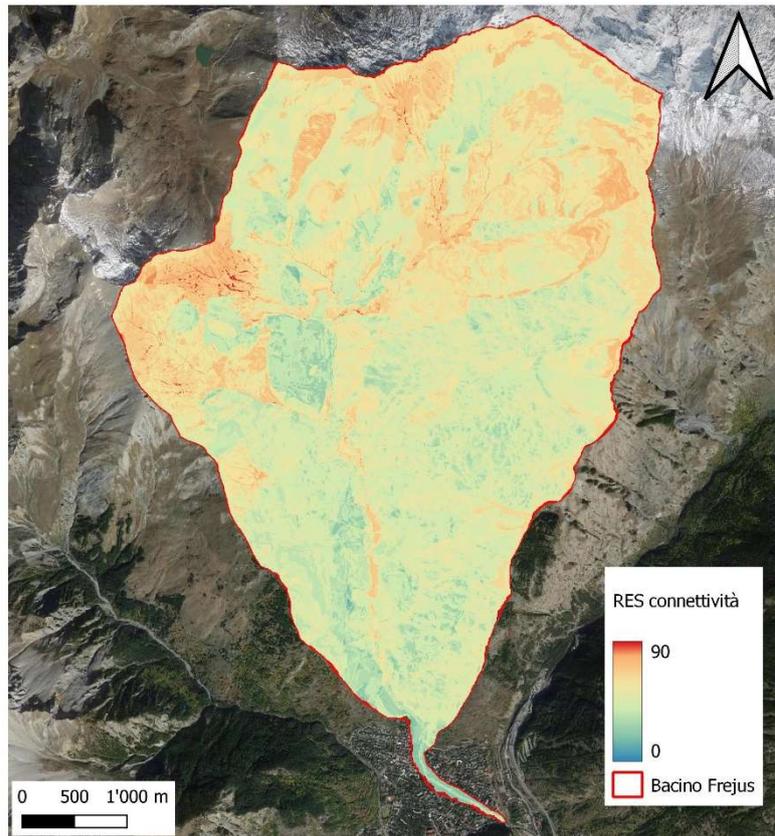


Figura 4.19: Risultato applicazione del metodo RES con la connettività e le ulteriori modifiche

4.5 Risultati

L'approccio presentato in questo studio è facilmente applicabile e richiede dati di input che possono essere trovati su geodatabase ad accesso aperto. Per il caso di studio considerato, il metodo RES ha prodotto un valore numerico dell'indice DfPI, il quale rappresenta quantitativamente l'andamento spaziale della suscettibilità alle colate detritiche nel bacino.

Per classificare la mappa raster continua della suscettibilità in due o più categorie, possono essere utilizzati vari classificatori. In questo caso sono state definite cinque classi, utilizzando una versione modificata della scala di suscettibilità di Brabb (1987): Bassa (0 – 20), Media (20 – 40), Alta (40 – 60), Molto Alta (60 – 80) ed Estrema (80 – 100) (Figura 4.20).

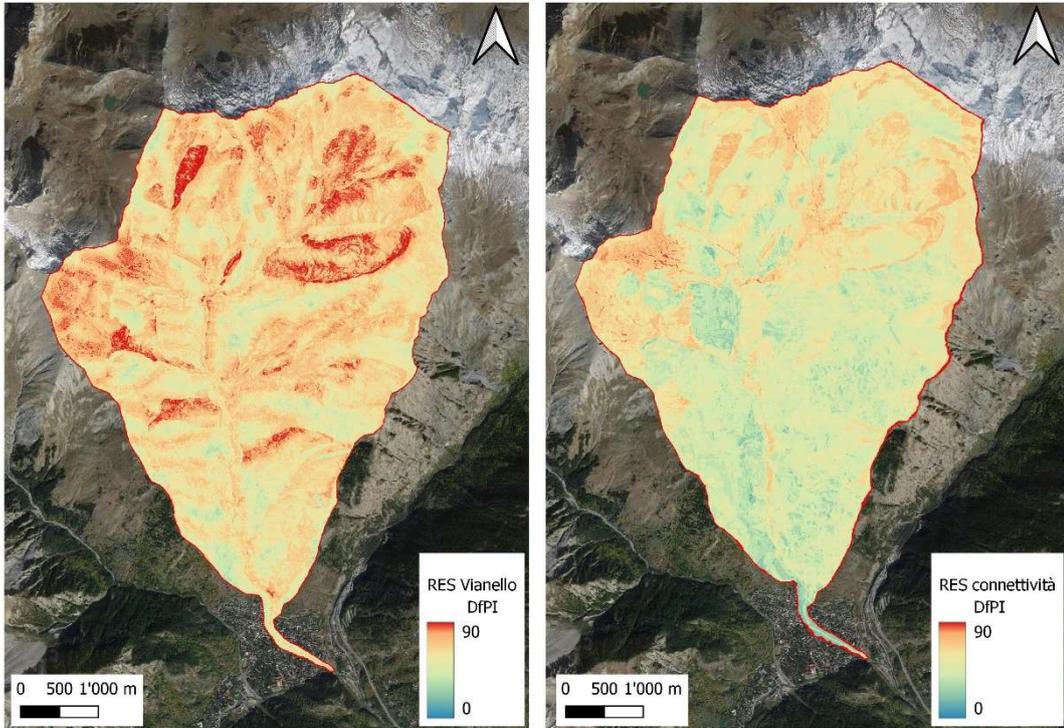


Figura 4.20: Confronto tra la mappa di suscettibilità ottenuta da Vianello et al. (2023) e quella con la connettività e le ulteriori modifiche

Il risultato ottenuto da Vianello et al. (2023) (Figura 4.18) mostra una suscettibilità Alta e Molto alta, distribuita su tutto il bacino, passando ad Estrema in corrispondenza dei corpi di frana classificati come attivi, rimarcandone la presenza. Inoltre, è possibile notare la presenza dei contorni dei buffer definiti per la rete idrografica. Questo è stato uno dei motivi che ha portato alla ricerca di un nuovo fattore predisponente, che potesse rappresentare l'idrografia e la morfologia del bacino, in maniera più continua sul territorio. Tali caratteristiche sono state ritrovate nell'indice di connettività, definito da Bonetto et al. (2008) e sviluppato da Cavalli et al. (2014).

Considerando la connettività come nuovo parametro, subentrato all'idrografia e alla curvatura, è stato necessario ridefinire le matrici di interazione. In questa occasione sono state apportate delle modifiche anche ad alcuni layer e ai valori di influenza assegnati alle frane.

Il risultato ottenuto (Figura 4.19) mostra un livello medio di suscettibilità minore rispetto all'esito precedente e con una distribuzione decrescente dalle testate del bacino verso le quote

inferiori. Rimangono comunque marcati i limiti dei corpi di frana, ma risaltano soprattutto le zone di coronamento e le scarpate secondarie, per via della maggiore pendenza.



Figura 4.22: Scarpate secondarie presenti nel bacino del Rio Merdovine

Per un confronto quantitativo è possibile calcolare la differenza relativa, in percentuale, delle due mappe tramite l'equazione: $\frac{RES_{\text{connettività}} - RES_{\text{vianello}}}{RES_{\text{connettività}}} * 100$.

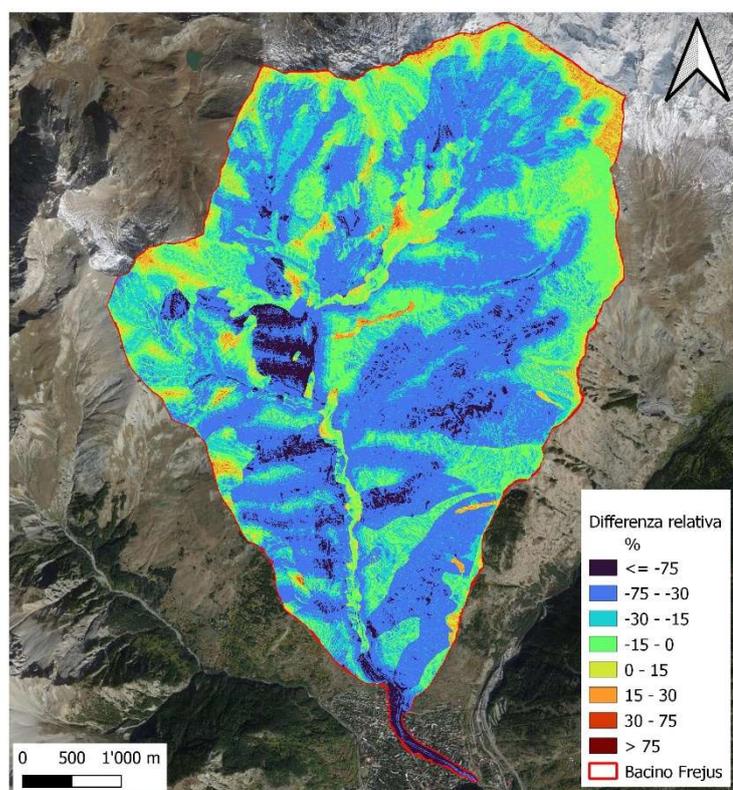


Figura 4.21: Mappa della differenza relativa tra i due risultati del metodo RES

Dalla Figura 4.21 si può notare l'evidenza delle aree con presenza di litologia affiorante, localizzate sulle testate del bacino e lungo l'alveo del torrente. Questo risulta dall'aumento del punteggio attribuito ai calcescisti, che attribuisce un aumento di suscettibilità all'area. Inoltre, sono visibili i buffer creati attorno alla rete idrografica, in quanto essi sono stati sostituiti con l'indice di connettività. Tale fattore permette una rappresentazione più continua sul territorio, eliminando i confini netti e rendendo la distribuzione delle aree più omogenea e coerente.

Tali risultati andrebbero verificati e confrontati con gli eventi pregressi per poterne verificare l'affidabilità. In generale, i bacini del Rio Merdovine e del Rio Gautier, ovvero quelli maggiormente interessati da fenomeni di colate detritiche nell'ultimo secolo, risultano quelli con suscettibilità più elevata e distribuita in modo più omogeneo.

Tuttavia, al fine di valutare l'attendibilità di questa applicazione del metodo RES, andrebbe effettuato un confronto con altri metodi utilizzati per la valutazione della suscettibilità. In questo lavoro di tesi non verrà svolto un raffronto bensì si riportano i risultati ottenuti da Vianello et al. (2023), i quali hanno confrontato la mappa ottenuta dal metodo RES con il metodo RQHSM (Mappatura Qualitativa della Suscettibilità Regionale) e con il Rapporto di Verosimilianza (LR). La valutazione è stata effettuata in maniera quantitativa tramite la Prediction Rate Curve (Chang et al., 2003), confrontando una parte delle aree sorgente presenti nell'inventario delle frane con quanto stimato nella mappa di suscettibilità. I risultati mostrano che la metodologia RES è quella che prevede la maggior parte delle aree sorgente (96%) rispetto agli altri metodi, e caratterizzate da valori di suscettibilità maggiori.

In conclusione, la metodologia proposta può essere applicata a diverse scale, da quella regionale a quella locale, a seconda del dettaglio dei set di dati disponibili e dallo scopo degli studi. In questo caso lo scopo era verificare la necessità di monitorare i bacini del Rio Merdovine e del Rio Gautier, come già confermato dagli eventi storici, e individuare la porzione di testata che sarebbe stata oggetto del rilievo multitemporale da APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) (Capitolo 6). In particolare, è stato scelto di concentrare l'analisi in corrispondenza del colle di Rocce Verdi, evidenziato in Figura 4.23, considerando sia l'alta suscettibilità dell'area che l'accessibilità in sicurezza. La scelta di tale zona ha infatti tenuto in considerazione la presenza di un sentiero, che ne garantisce l'accesso, ed è stata confermata da immagini satellitari, per verificare la presenza di tracce morfologiche lasciate dai recenti eventi di colata detritica.

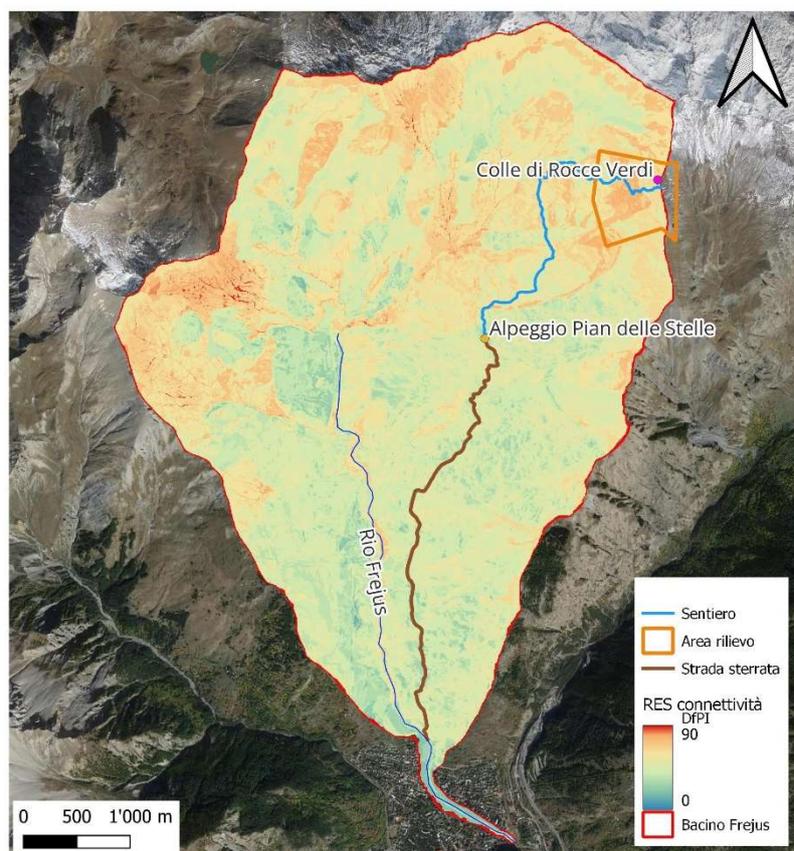


Figura 4.23: Individuazione area oggetto di rilievo multitemporale da APR e accessibilità

Questo approccio ha dei limiti percepibili, come l'elevata soggettività che ricade nella definizione delle influenze e delle classi in cui suddividere i fattori predisponenti. Allo stesso tempo, il metodo gode di notevole universalità, per cui una volta definiti i fattori predisponenti, la matrice di interazione proposta può essere globalmente utilizzata, in quanto indipendente dalle caratteristiche locali. Inoltre, la quantificazione dei parametri relativi alle caratteristiche geologiche e morfologiche potrebbe beneficiare di mappe più dettagliate e di modelli digitali del terreno con maggiore risoluzione.

5. SISTEMA DI MONITORAGGIO

Il seguente capitolo contiene la descrizione del sistema di monitoraggio installato nel Rio Frejus, dalla fase di progettazione a quella di installazione. Esso ricade all'interno del progetto SAFE (Sistema Avanzato FranE), vinto dall'azienda Emisfera Società Cooperativa¹, in partenariato con Corintea Società Cooperativa, con la quale la sottoscritta ha collaborato per il presente lavoro di tesi, e finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito degli investimenti previsti dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).

Il presente lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con Corintea, sia per quanto riguarda la progettazione e installazione del sistema di monitoraggio, che per la realizzazione del rilievo multitemporale da APR. L'azienda Emisfera ha invece fornito supporto tecnico per l'implementazione della sensoristica LoRa e per la realizzazione della piattaforma di visualizzazione dei dati.

5.1 Obiettivi del monitoraggio

Il progetto SAFE nasce con l'obiettivo di sviluppare una metodologia innovativa per il monitoraggio dei fenomeni franosi in ambiente montano. Questo progetto si propone di creare soluzioni efficaci per la gestione del rischio legato a questi eventi, concentrandosi su tecnologie e strategie avanzate che possano migliorare la previsione e la mitigazione dei rischi connessi alle frane.

In particolare, lo scopo è quello di ottenere uno strumento economico ed efficiente costituito da una nuvola di sensori low-cost i quali trasmettono i dati tramite il modulo LoRa. Tale sistema viene inoltre integrato dal monitoraggio tramite APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto), basato sulla realizzazione di rilievi multitemporali.

Rispetto a quanto visto nel Paragrafo 2.5, il sistema di monitoraggio realizzato ha come obiettivi principali lo studio del fenomeno, la raccolta di dati per interpretare il processo e per sviluppare un sistema di allarme, e l'individuazione della strumentazione più adatta per farlo.

¹ Azienda specializzata in soluzioni tecnologiche e informatica.

Esso ha infatti come fine ultimo la registrazione del passaggio dell'evento, a cui potrebbe essere collegata, in un secondo momento, l'attivazione di segnalazioni nel centro abitato. Sulla base di ciò il sistema potrebbe essere classificato come Event Warning, anche se ancora in fase di sviluppo.

Per questo primo prototipo il sistema è stato testato per i fenomeni di colamento rapido, utilizzando come area di studio il bacino del Torrente Frejus, nel Comune di Bardonecchia (TO). Tale area si presta particolarmente a collaudare questa tecnologia, in quanto i fenomeni di colate detritiche che frequentemente interessano il bacino, si propagano per diversi chilometri nei quali la connessione internet è assente. Questo avrebbe reso l'installazione di sensori connessi con rete cellulare molto complessa o impossibile. Inoltre, essendo l'area non facilmente accessibile e con difficoltà di collegamento alla corrente elettrica, la frequente manutenzione e l'alimentazione sarebbero fattori da attenzionare durante la progettazione del sistema di monitoraggio.

Utilizzando il modulo LoRa (Long Range) come tecnologia di comunicazione wireless, questi problemi sono stati facilmente superati in quanto permette di coprire ampie aree con un basso consumo energetico, il che lo rende ideale per dispositivi a batteria che devono operare per lunghi periodi senza intervento umano.

Oltre a ciò, una caratteristica fondamentale da rispettare se si vuole realizzare un sistema di monitoraggio per l'allerta è la necessità di trasmettere e ricevere dati in tempo reale, in maniera tale da avere un certo periodo di tempo per l'attivazione di misure di protezione a valle. Questo è possibile grazie all'infrastruttura di comunicazione con la quale i dati arrivano alla piattaforma di visualizzazione in tempo reale. In questo caso il modulo LoRa è stato utilizzato in combinazione con LoRaWAN (LoRa Wide Area Network), un protocollo di comunicazione che consente la gestione di più dispositivi LoRa a livello di rete, permettendo la costruzione di una rete di sensori; essi comunicano con un unico gateway, il quale funge da "ponte di collegamento" e trasmette i dati ricevuti dai sensori alla piattaforma di visualizzazione tramite la connessione internet.

5.2 Fasi di realizzazione di un sistema di monitoraggio

La progettazione, l'installazione e la gestione di un sistema di monitoraggio in un bacino alpino richiedono un approccio strutturato, che comprenda diverse fasi, dall'analisi preliminare alla manutenzione continua del sistema. Di seguito vengono riportate le fasi necessarie per garantire un sistema efficace ed affidabile:

1. Analisi preliminare: prevede lo studio delle caratteristiche del bacino (topografia, contesto geologico e caratteristiche idrologiche), degli eventi passati di colate detritiche e l'identificazione delle aree più suscettibili al fenomeno e delle aree a rischio.
2. Definizione degli obiettivi e dei requisiti del sistema: stabilire se lo scopo del sistema sarà l'allerta, la raccolta di dati o la ricerca scientifica, e di conseguenza definire quali parametri devono essere monitorati e con quale frequenza di campionamento e precisione.
3. Progettazione del sistema: si tratta di selezionare i sensori appropriati, definire la disposizione spaziale considerando l'accessibilità e la copertura del segnale, e prevedere le infrastrutture necessarie al sistema, ovvero il sistema di alimentazione (es: solare, batterie), il sistema per la raccolta, archiviazione e analisi dei dati, e la rete di comunicazione (es: wireless, satellitare).
4. Installazione del sistema: prevede diversi sopralluoghi dettagliati per verificare la fattibilità tecnica dell'installazione, la collocazione dei sensori e delle antenne per la trasmissione secondo progetto, e i test sulla rete di comunicazione per garantire che i sensori siano calibrati e che la trasmissione sia stabile e affidabile.
5. Gestione e manutenzione del sistema: occorre stabilire la raccolta e l'analisi dei dati in tempo reale o a intervalli regolari, e pianificare operazioni di manutenzione preventiva e l'aggiornamento del sistema in base ai nuovi dati acquisiti.
6. Coinvolgimento delle comunità locali e formazione: questa fase ha lo scopo di rendere partecipi e comunicare con le autorità locali e la popolazione per garantire la consapevolezza e la collaborazione. Inoltre, può essere utile formare il personale locale su come utilizzare e mantenere il sistema di monitoraggio, e ricevere feedback dagli utenti e dalle autorità competenti.

Per il sistema di monitoraggio sul Torrente Frejus, la fase di analisi preliminare è stata svolta nell'ambito dei Capitoli 3 e 4 ovvero attraverso l'analisi dei rapporti d'evento redatti negli ultimi decenni da parte dell'ARPA e attraverso la definizione di una mappa di suscettibilità all'innesco di colate detritiche del bacino. Questo ha permesso di individuare come bacini maggiormente da attenzionare quelli del Rio Merdovine e del Rio Gautier, e inoltre ha fornito coscienza sulla necessità di installare i sensori nella parte più a monte dell'asta torrentizia, in maniera da avere qualche minuto per comunicare l'eventuale l'allerta.

Nei paragrafi successivi verranno invece trattate la progettazione del sistema e l'installazione dei sensori, concentrandosi sul posizionamento e sul funzionamento, tralasciando la componente informatica ed elettronica, sia dei sensori che del sistema di trasmissione dati.

5.3 Progettazione del sistema

Sulla base degli obiettivi del sistema definiti precedentemente, sono state scelte le variabili di interesse, ovvero l'altezza del livello, le vibrazioni indotte dalla colata, da correlare con l'intensità e la quantità di pioggia caduta.

Il monitoraggio delle precipitazioni è cruciale poiché la pioggia intensa è uno dei fattori scatenanti delle colate detritiche; tuttavia, un sistema di allarme basato unicamente su essa darebbe luogo a molti falsi allarmi perché non tutte le tempeste che superano le soglie critiche innescano effettivamente delle colate. Per questo si ritiene importante il rilevamento delle vibrazioni indotte dal passaggio di masse detritiche, in maniera tale da poter distinguere una piena da un fenomeno di colata. Infine, la misura dell'altezza del livello permette di identificare, oltre al passaggio del fenomeno, anche il fronte della colata e quindi indirettamente si può ricostruire la velocità di propagazione tramite l'uso di più sensori disposti lungo il torrente.

Per misurare queste variabili, i sensori scelti per il sistema di monitoraggio includono misuratori di livello, accelerometri, sismometri, cavi a strappo e pluviometri. Questi sensori corrispondono alla minima combinazione per la quale si può avere un monitoraggio completo ed integrato del fenomeno; sulla base delle caratteristiche del bacino occorre poi individuare la quantità necessaria per ogni tipologia e la loro disposizione.

La pioggia, essendo il principale fattore d'innescamento delle colate detritiche, deve essere misurata nei pressi delle zone di innescamento del fenomeno. Date le grandi dimensioni delle maglie delle reti pluviometriche regionali, i dati sulle precipitazioni comunemente disponibili spesso non riescono a caratterizzare i nubifragi spazialmente limitati che possono innescare colate detritiche in piccoli bacini. Per cui, al fine di analizzare le relazioni tra la forzante pluviometrica e la presenza di colate detritiche, è necessario installare dei pluviometri nel bacino di interesse. Inoltre, vista la limitata estensione delle celle temporalesche che generalmente generano l'evento, è necessario installare più pluviometri, anche per individuare possibili forti gradienti spaziali di precipitazione e validare eventuali dati provenienti dai radar meteorologici.

Il dispositivo installato in questo sistema è un pluviometro a benna ribaltabile, con una risoluzione di 0.25 mm. Il pluviometro misura le precipitazioni per mezzo di un imbuto che conduce l'acqua verso la benna ribaltante autosvuotante, tenuto in posizione da un magnete (Figura 5.1). Il magnete esercita una tensione sufficiente per consentire al secchio di svuotarsi con un movimento rapido e poi tornare alla sua posizione normale, per raccogliere nuovamente le precipitazioni. Poiché il sistema è progettato per funzionare nei soli mesi estivi, nei quali avvengono le colate detritiche, i pluviometri non sono provvisti di sistemi di riscaldamento per la fusione della neve.

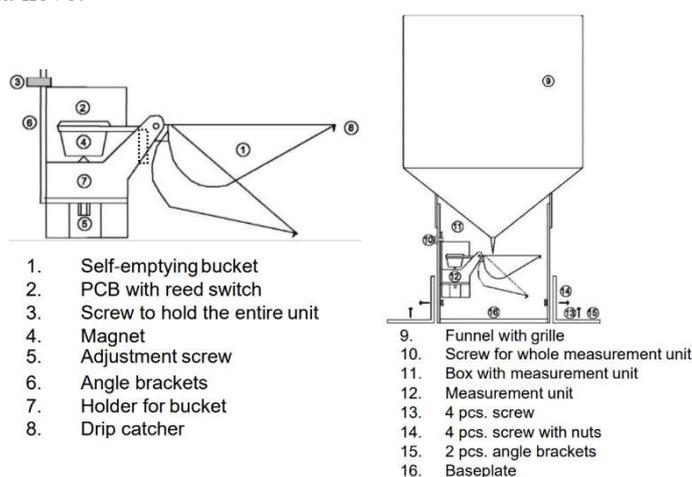


Figura 5.1: Componenti del pluviometro a benna ribaltante installato

Per il posizionamento di un pluviometro occorre porre molta attenzione ad alcuni fattori che potrebbero influenzare la misura, come la topografia, l'altezza rispetto al suolo e il vento. Per quest'ultimo si consiglia l'installazione di un anemometro in corrispondenza del pluviometro, per individuare fattori correttivi da applicare alla misura di pioggia; tuttavia, ciò non è stato possibile nel presente sistema di monitoraggio.

I dati risultanti dal monitoraggio delle precipitazioni si rappresentano su un grafico dell'intensità in funzione del tempo, e sono fondamentali per provare a ricostruire una soglia critica, ovvero una relazione pioggia-durata superata la quale si ha una certa probabilità di innesco del fenomeno. Tale attività necessita di molti dati di evento, per poter ricavare una statistica robusta. Per questo motivo potrebbe essere utile inizialmente affidarsi a studi precedenti nel medesimo bacino, come ad esempio quanto riportato nel Paragrafo 3.3, in cui si cita un'intensità critica di 20 mm/h per il bacino del Rio Frejus.

I sensori di livello permettono la misura in continuo dell'altezza della superficie libera, consentendo la rappresentazione di un idrogramma della colata. Le tipologie più usualmente utilizzate sono ad ultrasuoni o radar, dove la differenza ricade nel tipo di onda utilizzata per la misura. Per questo sistema è stata utilizzata la prima, che consente la misura della distanza

rispetto al flusso tramite l'utilizzo di impulsi sonori ad alta frequenza (dell'ordine dei MHz). L'onda sonora viaggia attraverso l'aria fino a raggiungere la superficie dell'acqua, dove una parte dell'energia dell'onda viene riflessa e tramite il tempo impiegato per tornare al sensore si ricava la distanza: $d = \frac{c \cdot t}{2}$, dove c è la velocità del suono e t è il tempo che impiega il segnale sonoro dall'emissione al ricevitore (Figura 5.2).

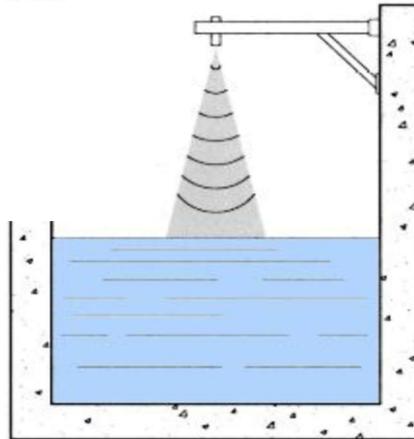


Figura 5.2: Schema di funzionamento del sensore di livello

Le repentine variazioni di livello, caratteristiche di questo fenomeno, richiedono di una frequenza di campionamento dei dati più elevata rispetto ai sensori utilizzati per il normale livello idrometrico, arrivando anche a 1 dato/secondo. Inoltre, il posizionamento di questo sensore necessita di una sezione impostata su una soglia o su substrato roccioso, con una leggera pendenza, in maniera tale che si limiti l'erosione e la deposizione di materiale, per avere così misure confrontabili tra diversi eventi.

La misura del livello, insieme ad un rilievo topografico della sezione, consentono inoltre di stimare la portata di picco ed il volume totale della colata (Arattano et al., 1997) tramite:

$$Vol = \int_{t_0}^{t_f} v \cdot A(t) dt = v \int_{t_0}^{t_f} A(t) dt$$

dove Vol è il volume della massa che scorre (acqua e particelle solide); v è la velocità media del flusso, che è stata assunta uguale alla velocità media del fronte; $A(t)$ è l'area della sezione trasversale occupata dal flusso al tempo t , nota dai rilievi topografici e dai dati ultrasonici; t_0 è l'ora di arrivo del fronte al sito di misurazione; e t_f è il tempo alla fine dell'onda di colata detritica.

Le vibrazioni indotte nel terreno dal passaggio di una colata possono essere misurate utilizzando diversi sensori sismici, come geofoni, sismometri e accelerometri.

I sismometri misurano la velocità delle vibrazioni del terreno, convertendo i movimenti meccanici in segnali elettrici. L'ampiezza sismica misurata è correlata all'energia della colata, e quindi alla massa e alla velocità del fenomeno; ciò evidenzia le potenzialità dei metodi sismici indiretti per la caratterizzazione delle colate detritiche, anche se l'analisi delle vibrazioni indotte nel terreno è un compito molto complesso in quanto dipendono da molti fattori come la distanza dal canale, i materiali geologici attraversati e l'installazione del sensore (Coviello et al., 2019).

Uno degli obiettivi dei sismometri è quello di individuare i segnali premonitori del movimento della massa di detriti, tramite il rilevamento delle onde generate dalla colata e che si propagano nel terreno (Arattano, 1999) (Figura 5.3). Questo li porta ad avere un ruolo cruciale nei sistemi di allerta, ma occorre effettuare approfonditi studi sulla velocità di propagazione delle vibrazioni rispetto alla velocità della miscela in movimento. Tuttavia, nel sistema di monitoraggio attuale, i sismometri non sono stati installati con questo scopo specifico. L'intenzione è di utilizzarli per ottenere una verifica aggiuntiva dopo piogge intense rilevate dai pluviometri, al fine di distinguere tra il passaggio di una piena e quello di una colata detritica.

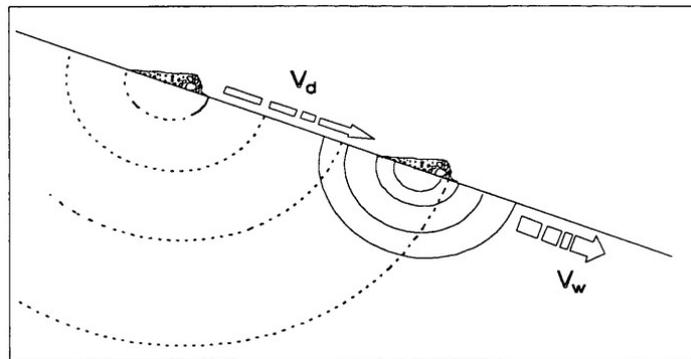


Figura 5.3: Differenti velocità coinvolte nella propagazione di una colata detritica: la velocità della colata stessa V_d e la velocità di propagazione delle vibrazioni indotte V_w (Arattano, 1999)

I sismometri utilizzati nel presente sistema di monitoraggio, misurano il valore di SI (intensità spettrale o intensità di Housner) ovvero il valore medio dell'integrale dello spettro di risposta della velocità Sv rispetto al periodo T , mentre h è lo smorzamento strutturale.

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv(T, h) dT$$

Esso è un indice che esprime la forza distruttiva del moto sismico, in questo caso della colata detritica, ed è altamente correlato con il danno alle strutture. Il fatto che l'integrale sia effettuato in un periodo di tempo consente al sensore di individuare solo gli eventi che si manifestano per una certa durata, filtrando così gli eventuali rumori dovuti a piccole vibrazioni.

Inoltre, i sismometri contengono un algoritmo di analisi dei dati, il quale individua, in seguito a determinate vibrazioni, l'avverarsi di un "fenomeno" ovvero in questo caso di una colata. Questo consente di avere un'informazione più generale sul fatto che stia avvenendo o meno una colata, mentre gli accelerometri, come vedremo, permettono di identificare molte singole vibrazioni ma non di avere una visione d'insieme del fenomeno. Questo suggerisce che l'uso combinato di entrambe le tipologie di sensori possa essere vantaggioso, fornendo un quadro più completo e dettagliato del fenomeno monitorato.

Così come i sismometri, anche i geofoni convertono la vibrazione del terreno provocata dal passaggio della colata in un segnale elettrico, il quale viene campionato e registrato da un apposito sistema di acquisizione. Anche essi sono generalmente più sensibili alle basse frequenze, per cui sono più utili per rilevare eventi sismici o movimenti del terreno più lenti. Per questo sistema di monitoraggio la scelta di usare i sismometri invece dei geofoni si è basata sulla maggiore semplicità dei dati prodotti e sulla maggiore versatilità.

Gli accelerometri misurano l'accelerazione che subisce il terreno rilevando la forza che agisce su una massa. Questa forza viene convertita in un segnale elettrico che è proporzionale all'accelerazione stessa. Essi misurano l'accelerazione delle vibrazioni lungo i tre assi (x , y , z) (Figura 5.4) e sono in grado di rilevare una gamma molto più ampia di frequenze rispetto ai sismometri, il che li rende adatti al monitoraggio di movimenti ad alta frequenza e più sensibili a piccoli movimenti. Inoltre, grazie alle misurazioni lungo i tre assi, essi forniscono informazioni più dettagliate sulla direzione e sull'intensità delle forze che agiscono sul terreno, e quindi sulla magnitudo del fenomeno e sulla sua evoluzione temporale.



Figura 5.4: Disposizione degli assi rispetto al sensore

I cavi a strappo sono dei dispositivi molto semplici per via del meccanismo sul quale si basano. Essi sono formati da un cavo d'acciaio, solitamente di 4 o 5 mm di diametro, posizionato trasversalmente rispetto al canale e ad un'altezza dal fondo tale da intercettare la colata. Il cavo viene tensionato e collegato ad un interruttore on/off; il segnale viene emesso ogni qual volta la tensione superi l'intervallo impostato o risulti inferiore ad esso (Figura 5.5). In questo modo, al transito della colata, potrà avvenire lo strappo o un sovratensionamento del materiale detritico e si avrà l'attivazione dell'interruttore.

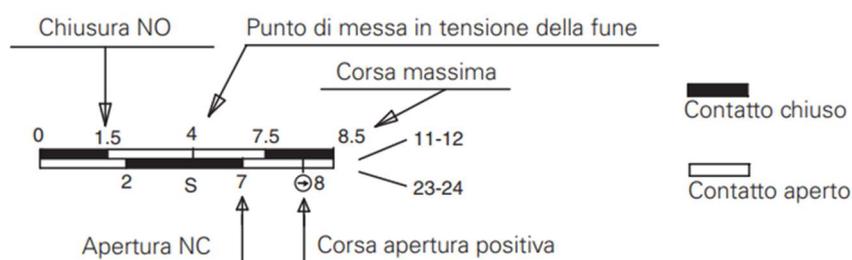


Figura 5.5: Diagramma di corsa rappresentante il funzionamento del cavo a strappo

Nel presente sistema di monitoraggio, questo dispositivo non verrà utilizzato per rilevare l'altezza massima raggiunta dalla colata, in quanto ne è stato installato un solo elemento e non molteplici a differenti altezze, come sarebbe necessario. Si tratta di un sensore utile per i sistemi di allarme e meno per finalità di studio in quanto non si rileva una variazione temporale del dato e non permette di catturare eventi ripetuti. Tuttavia, la reinstallazione dopo l'evento è facile e veloce, ed è l'unica tipologia di sensore che permette di ridurre al minimo i casi di falso allarme.

Il posizionamento delle tipologie di sensori appena presentate è stato ipotizzato in prossimità delle opere di protezione presenti lungo l'asta torrentizia. Al fine di sfruttare al meglio l'opportunità di ricerca data dal progetto, la disposizione dei sensori è stata effettuata su briglie realizzate con materiali diversi, per analizzare le differenti risposte del calcestruzzo, del metallo e del pietrame al passaggio della colata. Per comprendere meglio le valutazioni effettuate nella progettazione della disposizione dei sensori occorre esporre il principio di funzionamento della rete di comunicazione del sistema.

La tecnologia scelta per la comunicazione wireless dei sensori è il protocollo LoRa. Essa consente la trasmissione di piccoli pacchetti di dati su distanze che possono raggiungere diversi chilometri, anche in terreni accidentati.

Tra le caratteristiche di questa tecnologia, oltre alle lunghe distanze percorribili, vi è il basso consumo energetico, dovuto alla bassa frequenza del segnale emesso. Questo ha

permesso di ridurre la superficie di pannello solare necessaria per la ricarica del sensore, al punto tale da poterla integrare nel sensore.

Affinché i sensori riescano a trasmettere i dati ad un gateway centrale, che li trasmette a sua volta alla piattaforma web-based, è necessario che il gateway sia posizionato in una zona con copertura internet, e allo stesso tempo sia abbastanza centrale rispetto ai sensori in maniera che ne riceva il segnale. Infatti, nonostante il segnale LoRa sia altamente resistente alle interferenze, è necessario che non siano presenti grandi ostacoli lungo la linea retta che collega il sensore al gateway, oppure che vi sia la possibilità di rimbalzo del segnale, nonostante questo faccia perdere di intensità a quest'ultimo.

Sulla base delle precedenti affermazioni, è stato necessario svolgere diversi sopralluoghi, innanzitutto per verificare la presenza di copertura internet e per identificare il possibile posizionamento dei sensori rispetto all'asta torrentizia. Inoltre, avendo a disposizione due gateway per poter coprire sia il tratto di asta da monitorare che i pluviometri disposti sulle testate, è stato necessario effettuare un'analisi di visibilità, utilizzando il plugin "Visibility analysis" su QGIS, per verificare la presenza di ostacoli naturali rispetto ai sensori.

L'analisi di visibilità è un importante strumento che consente all'utente di ottenere una mappa di visibilità, in formato raster, che classifica il terreno circostante un punto di osservazione in "visibile" e "non visibile". Per questa operazione sarebbe necessario avere a disposizione un DSM, ovvero un modello digitale della superficie che includa gli oggetti presenti sopra, quali edifici, alberi e altri manufatti. Non disponendo di tale dato, l'analisi è stata svolta utilizzando il DTM, rappresentante l'andamento della superficie privato degli elementi antropici e vegetazione, con risoluzione a 5m, già impiegato nel metodo RES visto nel Capitolo 4.

L'analisi di visibilità si suddivide in due fasi: la prima include la definizione di un set di punti di osservazione, in cui i dati saranno riproiettati per corrispondere al modello di elevazione utilizzato. Durante la creazione di questo layer è necessario assegnare specifici nomi ai punti, insieme all'altezza da cui si effettua l'osservazione e il raggio di analisi. Inoltre, occorre ricordare che il posizionamento di tali punti, per il presente sistema di monitoraggio, deve avvenire in aree con copertura internet in quanto essi rappresentano i gateway.

Successivamente è possibile procedere al calcolo della visibilità; in questo caso lo scopo dell'analisi è la determinazione di una mappa per ogni singolo punto di osservazione, per individuare la posizione migliore che includa il maggior tratto di asta torrentizia. Tale operazione è possibile tramite l'analisi di tipo "binario", la quale permette di produrre una

mappa in cui viene assegnato un valore vero/falso (visibile /non visibile) ad ogni punto del raster (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).



Figura 5.6: Esempio di risultato di area visibile in azzurro e spazio nascosto in trasparenza. La posizione dell'osservatore è contrassegnata dal punto azzurro

Avendo a disposizione due gateway, e volendo distribuire i sensori lungo l'asta fluviale e i pluviometri nelle zone di innesco, l'analisi è stata effettuata variando le posizioni dei due punti di osservazione, uno in località Camini e l'altro in località Pian delle stelle. Tali aree considerano l'accessibilità e la copertura di segnale cellulare (Figura 5.7).

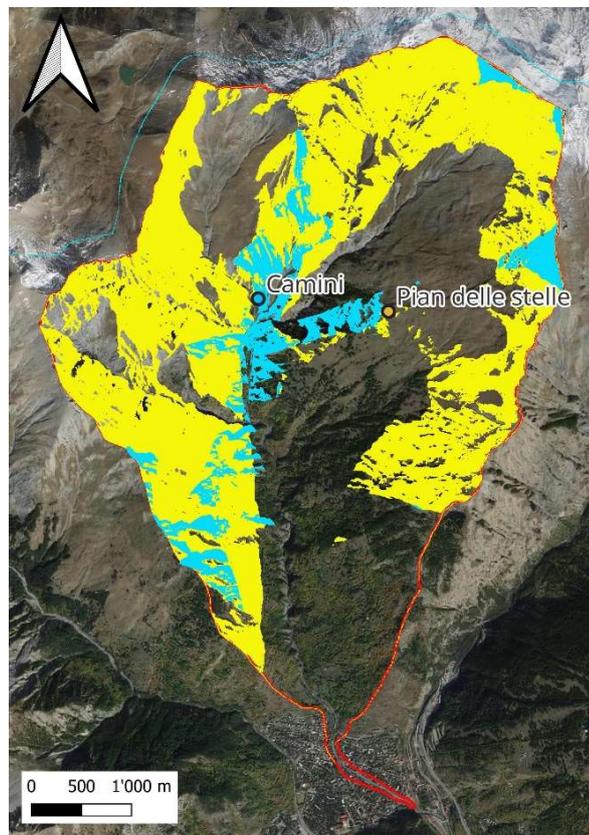


Figura 5.7: Risultati dell'analisi di visibilità

L'analisi è stata effettuata in quanto intuitiva e di semplice visualizzazione, anche per comprendere a grande scala la morfologia del bacino; tuttavia, non è possibile utilizzare i risultati come dato definitivo per il posizionamento dei sensori o per l'esclusione di alcune aree. In primis perché il modello digitale del terreno utilizzato non comprende la vegetazione ed ha una bassa risoluzione, e in secondo luogo perché non si tiene conto della capacità del segnale radio di propagarsi e aggirare gli ostacoli presenti.

Sulla base di quest'ultima affermazione, è stato necessario svolgere un test di segnale prima dell'installazione definitiva dei sensori.

Il posizionamento definitivo dei sensori è riportato in Figura 5.9 e in maniera schematica nella Tabella 5.1 e nella Tabella 5.2.

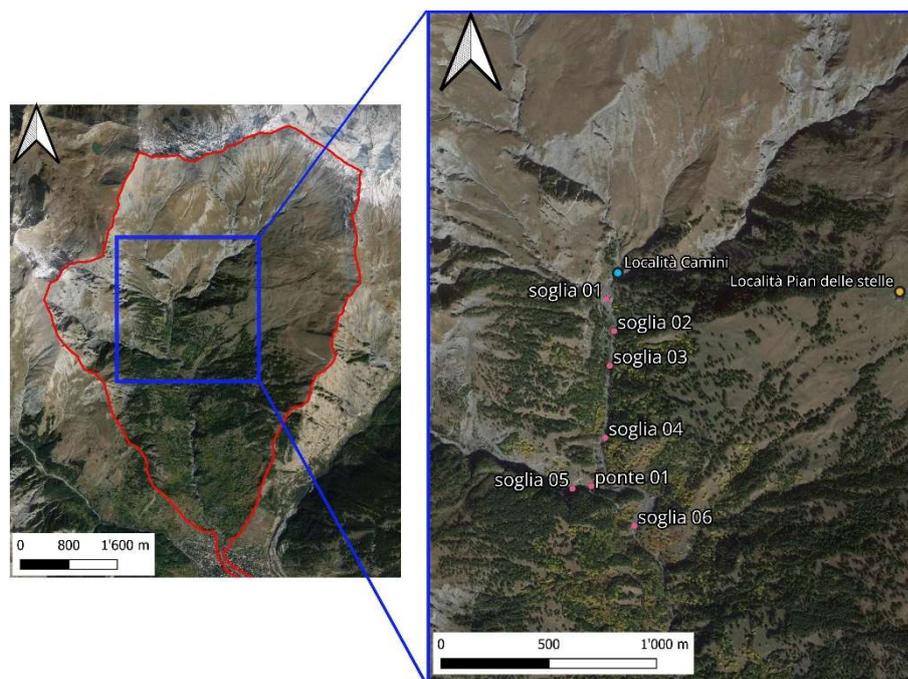


Figura 5.8: Località e posizione delle briglie utilizzate come supporto ai sensori

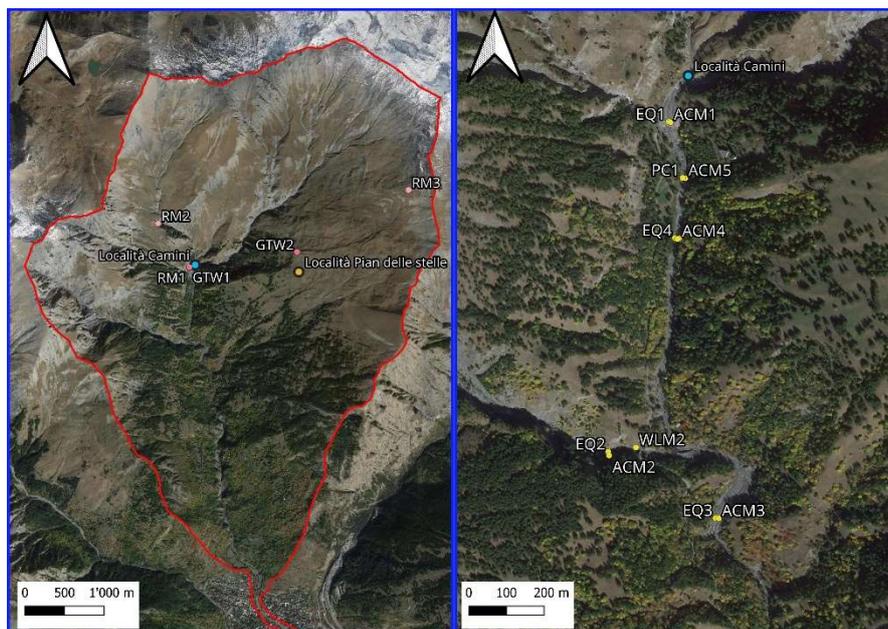


Figura 5.9: Posizionamento definitivo dei sensori

Tabella 5.2: Elenco dei sensori installati, con relativi dati tecnici

Sensori	n° installati	Frequenza di restituzione dati	Unità di misura	Sensibilità	Range di misura
pluviometro (RM)	3	30 sec	mm	0.25 mm	0 - infinito
accelerometro (ACM)	5	30 sec	m/s ²	0.01 m/s ² (=1 gal)	+ - 2g
sismometro (EQ)	4	30 sec	m/s ²	0.01 m/s ² (=1 gal)	+ - 2000 gal (=2g=20 m/s ²)
sensore di livello (WLM)	2	30 sec	mm	1 mm	500-10'000 mm = 0.5-10 m
cavo a strappo (PC)	1	1 min	/	/	0 - 1

Tabella 5.1: Codici dei sensori installati sulle opere di protezione

Soglia	Quota [m]	Sensori installati
01	1732	ACM1, EQ1
02	1714	ACM5, PC1
03	1670	ACM4, EQ4
04	1650	/
05	1640	ACM2, EQ2, WLM1
06	1605	ACM3, EQ3

Di seguito viene inoltre riportata una schermata della piattaforma, su cui è possibile visualizzare i dati registrati. Nella Figura 5.10 viene riportato un esempio di visualizzazione per ogni tipologia di sensore.

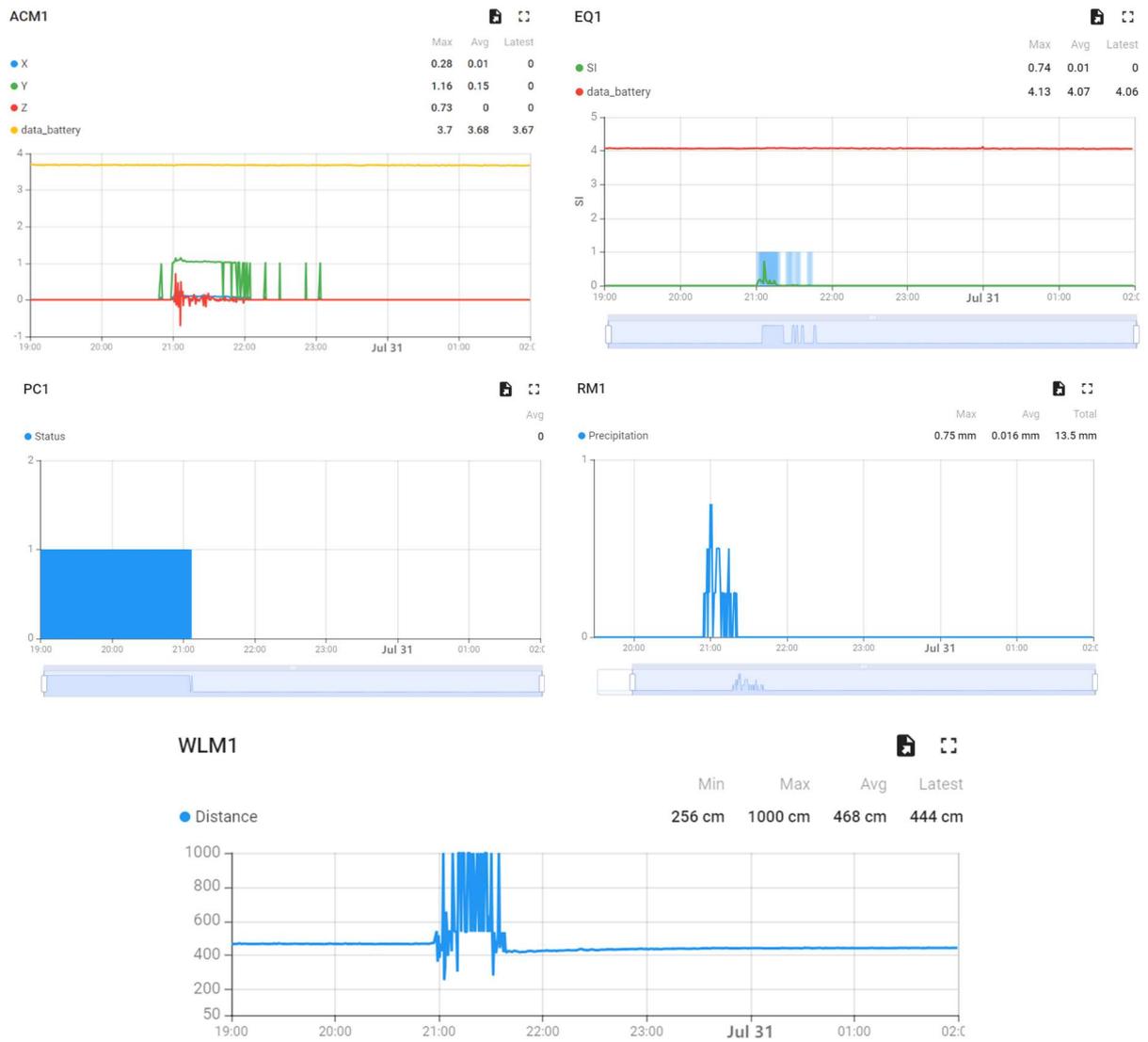


Figura 5.10: Esempio di visualizzazione dei dati sulla piattaforma provvisoria: accelerometro (ACM), sismometro (EQ), sensore di livello (WLM), pluviometro (RM), cavo a strappo (PC)

5.4 Installazione dei sensori

L'installazione dei sensori è stata preceduta da un test di segnale, che ha determinato la posizione definitiva dei sensori, sia in termini di collocazione lungo il torrente che nel dettaglio della loro esatta posizione sulle strutture (Figura 5.11). Per questa operazione è stato temporaneamente installato il gateway 1, situato in località Camini, e in seguito i sensori sono stati collocati provvisoriamente nei punti previsti, verificando la trasmissione del segnale e l'intensità con cui veniva ricevuto.



Figura 5.11: Individuazione della posizione del sensore durante il test di segnale

Successivamente, l'installazione è iniziata con il gateway 1, in modo da consentire una seconda verifica della trasmissione del segnale durante il posizionamento dei sensori lungo l'asta torrentizia. Infine, in un secondo momento, è avvenuta l'installazione del gateway 2, posto in località Pian delle stelle, e del pluviometro in testata al bacino.

Di seguito vengono riportate le foto relative all'installazione dei sensori.



Figura 5.12: Fasi dell'installazione di accelerometri e sismometri, tramite tasselli



Figura 5.13: Gateway GWT1 in località Camini, con dettaglio del pluviometro RM1



Figura 5.14: Cavo a strappo e accelerometro ACM5 installati in corrispondenza della briglia 02



Figura 5.15: Sensore di livello WLM1, accelerometro ACM4 e sismometro EQ4 installati sulla soglia03



Figura 5.16: Sensore di livello WLM2 installato in corrispondenza del ponte01

Come si può notare, gli accelerometri e i sismometri sono stati posizionati sulle opere di protezione, generalmente sul lato a valle e lateralmente rispetto al flusso d'acqua, in modo da rilevare le vibrazioni della struttura mantenendo allo stesso tempo una posizione protetta.

I sensori sismici sono dotati di pannelli solari integrati nel dispositivo, così come i gateway e i pluviometri sono ad alimentazione solare, mentre i restanti sono provvisti di batterie al litio.

L'installazione del sistema di monitoraggio non è avvenuta in maniera lineare, poiché ci si è trovati ad affrontare alcune questioni di natura pratica che inficiavano sull'efficienza del sistema e sulla veridicità dei dati. In primo luogo, è stato necessario riposizionare alcuni sensori, in quanto erano stati originariamente installati in zone ombreggiate, compromettendo la loro efficienza energetica. Inoltre, la presenza di vegetazione e i versanti molto acclivi limitano l'esposizione al sole, riduceva drasticamente la capacità di ricarica dei pannelli; per questo si è scelto di implementare il sistema di alimentazione aggiungendo dei pannelli solari ai sensori sismici, per aumentare la superficie ricaricante.

Infine, è stato necessario proteggere i sensori installati sulle briglie tramite delle tettoie, per assicurare la qualità dei dati rilevati e ridurre le interferenze esterne (Figura 5.17). Infatti, la pioggia e il ruscellamento dell'acqua non solo potevano danneggiare i sensori, ma causavano anche misurazioni falsate, compromettendo l'integrità dei dati raccolti e causando la misurazione di vibrazioni senza che vi fosse mobilitazione di materiale.



Figura 5.17: Accelerometro ACM2 e sismometro EQ2 successivamente all'installazione dei pannelli solari aggiuntivi e della tettoia

Queste modifiche, sebbene non pianificate, sono state fondamentali per garantire l'affidabilità e l'efficacia del sistema di monitoraggio. Attraverso un approccio adattivo e una continua valutazione sul campo, è stato ottimizzato il funzionamento del sistema, per garantire che ogni componente potesse operare in condizioni ottimali e fornire misurazioni accurate.

5.5 Risultati ottenuti

Il sistema di monitoraggio installato nel bacino del Rio Frejus ha permesso il rilevamento degli eventi di colata avvenuti durante le serate del 30 e del 31 luglio 2024. I flussi hanno interessato il centro abitato di Bardonecchia senza esondare, causando unicamente il danneggiamento di alcune opere idrauliche di recente costruzione, asportando e mobilizzando alcuni elementi di scogliera.

I bollettini di previsione meteorologica indicavano la possibilità di temporali pomeridiani, anche localmente intensi, per il periodo tra il 30 luglio e il 1° agosto, provocati da deboli infiltrazioni di aria fresca in quota, le quali hanno causato un aumento di instabilità sui rilievi alpini. La sera del 30 luglio una cella temporalesca è transitata lungo le Alpi Cozie, attraversando il territorio comunale in direzione ovest-est.

Il fenomeno è transitato sul conoide tra le 21:30 e le 22:00, depositando materiale nell'alveo ma senza tracimare (Figura 5.18).



Figura 5.18: Evento del 30 luglio, ripreso dal cellulare, che transita nel centro abitato

Nel tratto a valle della località Camini, il flusso ha alternato fenomeni di erosione delle sponde e fenomeni di deposizione di detriti grossolani e frazione fine sabbiosa. Le altezze raggiunte dalla colata sono talvolta paragonabili all'evento del 13 agosto 2023.

Il 31 luglio una nuova cella temporalesca ha interessato il bacino del Rio Frejus, innescando un evento di colata che è transitata lungo il torrente Frejus tra mezzanotte e l'1:00 del 1° agosto, di portata inferiore rispetto a quella del 30 luglio, ma sufficiente a notare visivamente l'erosione dei depositi lasciati dalla precedente (Figura 5.19).

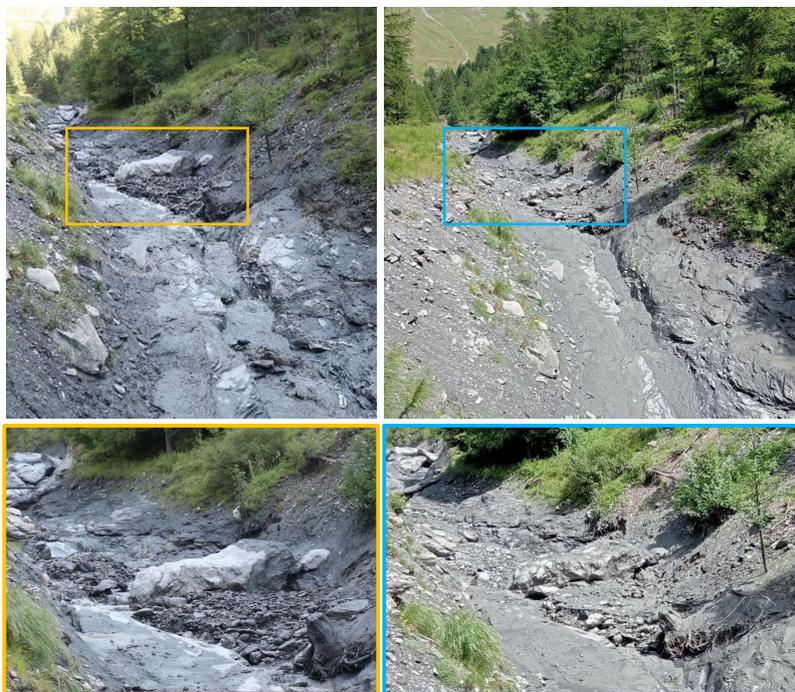


Figura 5.19: Differenze visualizzabili in uno stesso deposito in seguito all'evento del 30 luglio (sinistra) e del 31 luglio (destra)

Entrambi gli eventi sono stati monitorati dai sensori, i quali hanno sottolineato che il fenomeno ha interessato unicamente il Rio Merdovine; infatti, il sensore di livello WLM2 posizionato sul Rio Gautier non ha segnalato variazioni significative. Questo ha inoltre permesso di giustificare le piccole vibrazioni rilevate sulla briglia 5 come dovute al ruscellamento di acqua sui sensori.

Lungo l'asta del Torrente Frejus il sensore di livello WLM1 ha rilevato delle variazioni in corrispondenza degli eventi, senza però evidenziare nell'idrogramma il tipico andamento a ondate delle colate detritiche (Figura 5.22). Questo potrebbe essere dovuto ad una frequenza di campionamento troppo bassa (30s), mentre potrebbe essere necessario aumentare ad 1 dato/secondo. Tuttavia, dai grafici riportati in Figura 5.20 e Figura 5.21 si può comunque notare l'evoluzione temporale del fenomeno.

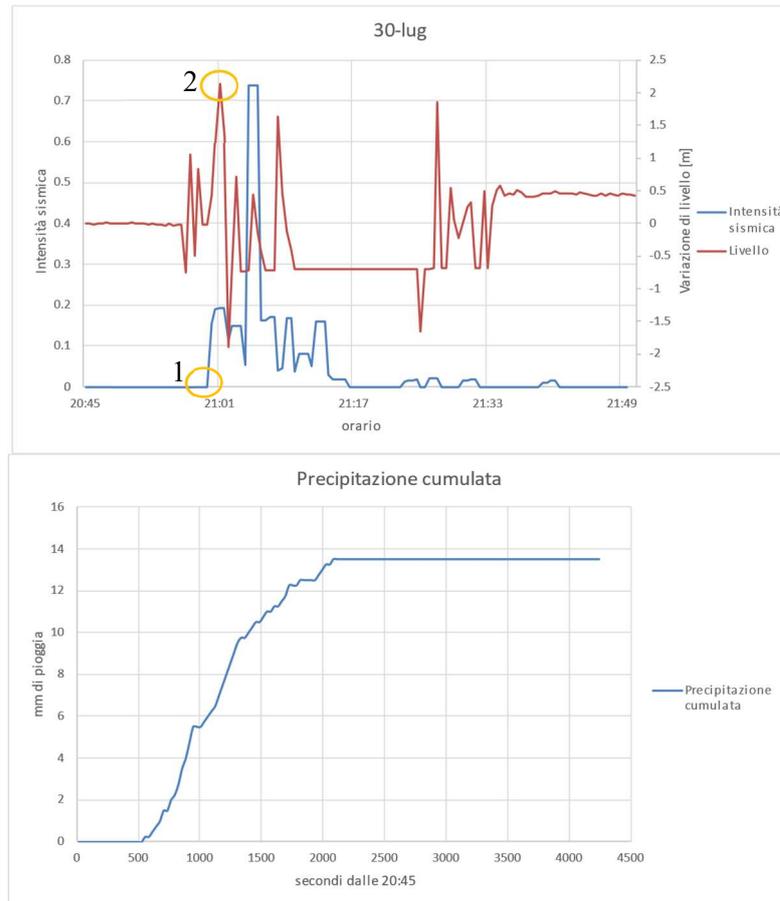


Figura 5.20: Registrazione di livello, intensità sismica e precipitazione dell'evento del 30 luglio 2024

Come accennato precedentemente nel Paragrafo 2.5, analizzando i dati relativi a più sensori posizionati lungo l'alveo, è possibile ricavare la velocità media del fronte della colata in quel tratto. Per questo evento, non essendo disponibili o attivi due sensori dello stesso tipo consecutivamente, sono stati utilizzati i dati registrati dal sensore di livello e dal sismometro, posizionati a 400 m di distanza.

In particolare, sono stati individuati gli istanti relativi al passaggio del fronte (punti 1 e 2, in Figura 5.20), collocati a 135 secondi e da questo dato si è ricavata la velocità pari a $2.9 \pm 0.6 \text{ m/s}^2$. Occorre valutare l'incertezza in quanto i sensori restituiscono il valore maggiore registrato nei 30 secondi precedenti, per cui il periodo di tempo da considerare potrebbe essere superiore di 30 secondi, ottenendo così una velocità inferiore.

Tale valore è confrontabile con quanto ricavato alla stessa maniera per l'evento del 31 luglio, pari a $3.2 \pm 0.7 \text{ m/s}^2$ (Figura 5.21). Tuttavia, tale valore è meno affidabile, in quanto quest'ultimo fenomeno si è verificato in maniera meno intensa e coinvolgendo unicamente i detriti presenti in alveo, depositati dal precedente evento. Questo porta a ipotizzare che il fenomeno non si sia sviluppato con il tipico carattere a ondate delle colate detritiche, ma

principalmente come svuotamento dell'alveo, per cui è difficile individuare il passaggio del fronte tra i dati registrati.

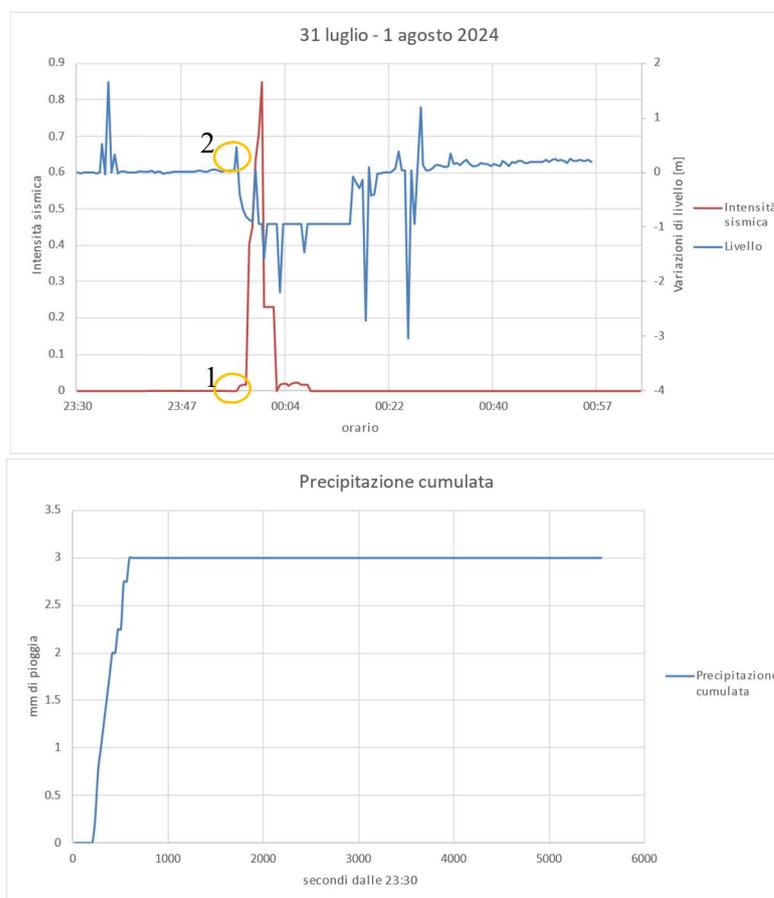


Figura 5.21: Registrazione di livello, intensità sismica e precipitazione dell'evento del 31 luglio 2024

Inoltre, il sensore di livello WLM1 ha registrato un lieve innalzamento dell'alveo in seguito all'evento del 30 luglio, mentre dopo l'evento del 1° agosto esso si è ristabilizzato. Tale variazione è riscontrabile anche dalle foto, le quali evidenziano la deposizione di materiale fine in alveo, mentre il 1° agosto tale volume è stato eroso (Figura 5.23). Dal grafico (Figura 5.22) è possibile individuare tale andamento ma invertito, in quanto viene restituito il valore grezzo misurato dal sensore, ovvero la distanza tra esso e l'oggetto rilevato. Per ottenere l'altezza del tirante idrico occorre quindi effettuare una sottrazione rispetto all'altezza di installazione del sensore.

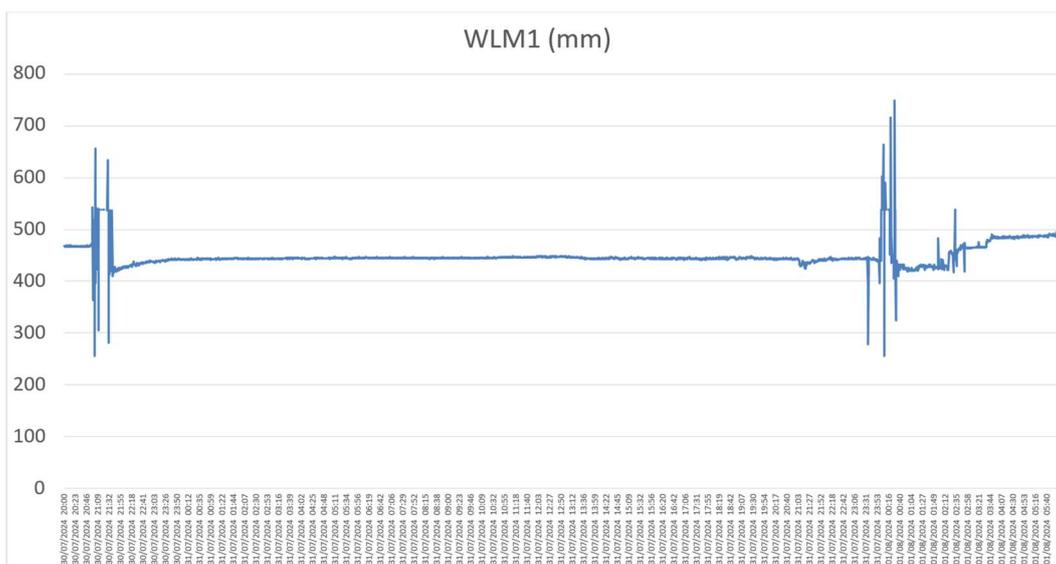


Figura 5.22: Andamento del livello del pelo libero nel periodo 30 luglio-1° agosto in corrispondenza di WLM1



Figura 5.23: Differenze nell'altezza dell'alveo successivamente all'evento del 30 luglio (sinistra) e del 31 luglio (destra), in corrispondenza del sensore di livello WLM1

Nonostante non tutti i sensori fossero attivi e funzionanti durante questi eventi, si è potuto apprezzare il rilevamento di vibrazioni sia da parte dei sismometri che degli accelerometri. Purtroppo, i sensori sulla briglia in pietrame erano scarichi e l'accelerometro sul palo della seconda briglia è stato rimosso dalla colata, per cui non è stato possibile notare differenze di vibrazione dovute al materiale delle opere di protezione su cui i sensori sono stati installati. Ciò ha comunque permesso di confermare l'utilità delle opere di protezione situate lungo il

torrente come sostegno per l'installazione dei sensori; pratica che quindi può essere riprodotta in altri bacini, per il monitoraggio di questi fenomeni.

Inoltre, anche se il monitoraggio delle colate detritiche del Rio Frejus era destinato a scopi di ricerca, i risultati hanno fornito indicazioni adeguate per l'eventuale utilizzo di soglie per un sistema di allarme. Questo potrebbe essere utilizzato unicamente per gli attraversamenti e le vie di comunicazione, in quanto la velocità con cui si verificano questi fenomeni non consente un tempo sufficiente per l'evacuazione di un'area urbana.

L'installazione del sistema di monitoraggio, considerando il tempo, le risorse avute a disposizione e la possibilità di accesso all'area, rappresenta il miglior risultato possibile al momento. Inoltre, essendo il primo sistema di questo tipo implementato dall'azienda, era inevitabile avere qualche inconveniente o limitazione.

Tuttavia, grazie all'infrastruttura e alla rete LoRaWAN operativa, sarà molto semplice in futuro migliorare il sistema, integrando nuovi sensori, con una spesa minima. Questo permetterà un aumento della precisione e della copertura del monitoraggio, migliorando la conoscenza e la gestione del fenomeno naturale. Ad esempio, sarebbe utile installare dei sensori di livello e accelerometri nel tratto di torrente all'apice del conoide, non con scopo di allerta ma per monitorare le variazioni di volume e di reologia del fenomeno. Inoltre, essendo il tratto di alveo che attraversa il centro abitato illuminato artificialmente, sarebbe semplice installare una videocamera, al fine di individuare la velocità e le ondate tramite le quali si propaga la colata detritica.

In sintesi, il sistema attuale è il miglior prodotto realizzabile in queste condizioni, ed è da considerarsi come un punto di partenza per ulteriori sviluppi e innovazioni.

6. RILIEVO MULTITEMPORALE CON DRONE

In quest'ultimo capitolo verranno descritte le operazioni che hanno portato alla realizzazione di un rilievo multitemporale tramite APR (aeromobili a pilotaggio remoto) nell'area individuata precedentemente, tramite l'analisi di suscettibilità. Tale lavoro si colloca nel progetto SAFE, per lo studio dell'apporto detritico proveniente dalle testate del bacino. I risultati provenienti dai rilievi eseguiti prima e dopo gli eventi del 30 e 31 luglio 2024 sono stati analizzati quantitativamente per identificare i fenomeni di erosione.

6.1 Fotogrammetria e processo fotogrammetrico

La fotogrammetria è una tecnica utilizzata per rilevare e misurare oggetti e superfici tridimensionali a partire da fotografie bidimensionali. Essa si basa su principi della geometria e della visione stereografica, permettendo di calcolare la posizione, la forma e la dimensione degli oggetti, grazie alla visione da più punti di vista (Cannarozzo et al., 2012). In particolare, le tecniche fotogrammetriche, mettono in relazione le informazioni metriche e radiometriche contenute in fotogrammi rappresentanti lo stesso oggetto ma ripreso da punti diversi.

La fotogrammetria può essere di tipo terrestre o aerea a seconda che la camera fotografica sia posta in stazione sul terreno o sia montata su un aeromobile. Questa seconda tipologia permette di rilevare aree anche molto estese, mantenendo un'elevata accuratezza del dato, grazie all'uso di aeromobili a pilotaggio remoto, comunemente noti come droni. Essi, volando a distanze dall'oggetto minori rispetto agli aerei, garantendo una buona risoluzione, con costi contenuti. Inoltre, permettono di accedere a zone difficilmente raggiungibili, come aree franose, e di ridurre significativamente i tempi necessari per effettuare i rilievi. La loro efficienza consente di ripetere facilmente le operazioni di monitoraggio, facilitando il rilevamento del fenomeno in evoluzione.

I droni utilizzati per la fotogrammetria sono dotati di camere digitali ad elevata risoluzione, le quali permettono l'acquisizione di immagini digitali. In esse il contenuto radiometrico associato ad ogni pixel è registrato sotto forma di numeri e viene utilizzato negli algoritmi su cui si basano i software di elaborazione delle immagini.

Il principio alla base della fotogrammetria riguarda la possibilità di determinare le posizioni dei punti di una superficie o di un oggetto nell'ambiente reale utilizzando le rispettive posizioni sulla fotografia, mediante alcune relazioni geometriche. Infatti, la fotografia è approssimabile ad una prospettiva centrale, dove tutti i punti del mondo fisico vengono convogliati attraverso le lenti della fotocamera e proiettati sulla corrispondente immagine. Tutti i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto fotografato con le corrispondenti immagini passano per un particolare punto detto centro di proiezione (O), posizionato all'interno dell'obiettivo della camera da presa.

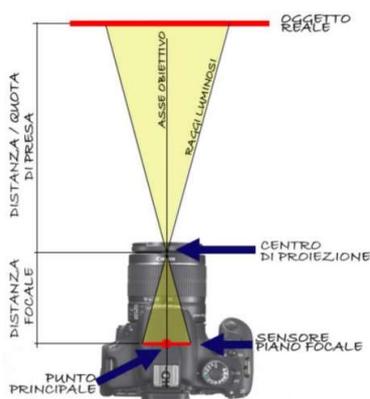


Figura 6.1: Schema geometrico della generazione di un fotogramma

La relazione geometrica, rappresentata in Figura 6.1, tra l'oggetto reale e la sua rappresentazione sul fotogramma permette di determinare le posizioni dei punti di un'oggetto nella realtà avendo a disposizione le posizioni dei punti nella fotografia. Tuttavia, con un solo fotogramma non è possibile andare a determinare la posizione tridimensionale di un punto immagine, in quanto una sola immagine piana non contiene informazioni sufficienti.

Ad esempio, si consideri un fotogramma in cui il punto reale A viene impresso nel punto A', detto punto omologo. Quest'ultimo può corrispondere a più punti nel mondo fisico (A, A1, A2, A3) perché tutti si trovano lungo il raggio proiettante r_1 , e per questo il problema risulta indeterminato Figura 6.2.

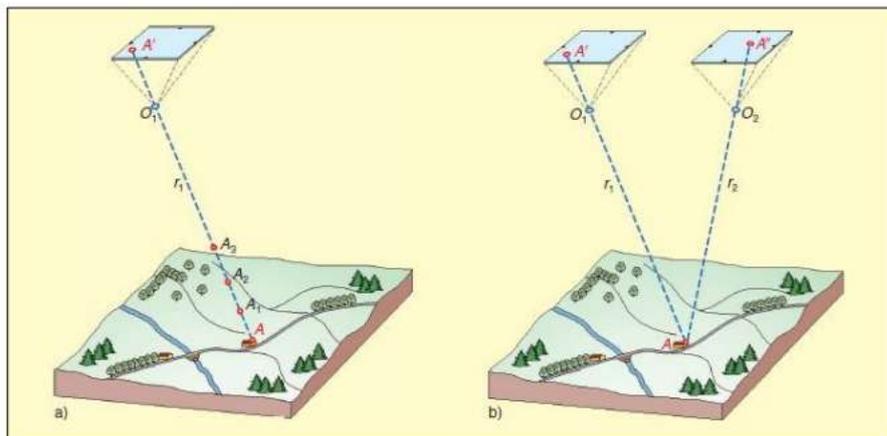


Figura 6.2: Determinazione della posizione del punto A al suolo a partire dal suo omologo A' fotografato con un solo fotogramma o due distinti (Cannarozzo et al., 2012)

Al contrario, nella parte destra della Figura 6.2 si può osservare che, utilizzando due fotogrammi scattati da una certa distanza, è possibile determinare la posizione del punto A , che si trova all'intersezione dei due raggi proiettivi provenienti dai rispettivi punti omologhi A' e A'' . Per questa operazione è però necessario conoscere le posizioni dei due centri di presa O_1 e O_2 e la distanza tra essi, detta base di presa. Poiché questi dati non sono noti a priori, diventa necessario disporre di alcuni punti di appoggio a terra, le cui coordinate vengono determinate con tecniche di rilevamento tradizionali, al fine di procedere con l'orientamento assoluto. Questi punti possono essere naturali, selezionati tra i manufatti esistenti, o artificiali, creati appositamente e adeguatamente segnalati.

Il problema fotogrammetrico viene quindi risolto conoscendo le caratteristiche della camera utilizzata e le coordinate di alcuni punto di appoggio. Queste informazioni si inseriscono in un sistema di equazioni dette di collinearità, il quale viene risolto con il metodo dei minimi quadrati e conferisce robustezza e affidabilità ai risultati. Inoltre, l'ausilio dei punti a terra di coordinate note permette di riprodurre l'elemento oggetto del rilievo con la giusta scala e georeferenziato correttamente.

Tali operazioni vengono attualmente svolte da algoritmi di elaborazione delle immagini, come lo Structure from Motion (SfM), i quali identificano i punti caratteristici e l'orientamento dei fotogrammi in maniera automatica, a partire da immagini prese da angolazioni differenti (Figura 6.3).

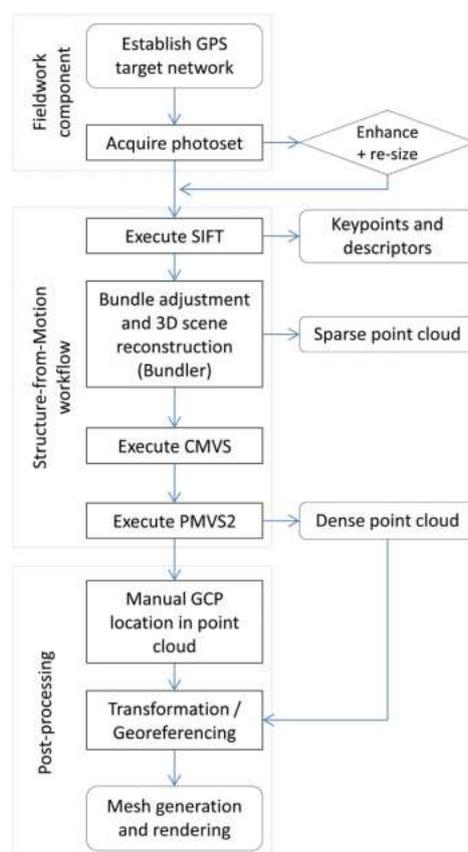


Figura 6.3: Il flusso di lavoro Structure-from-Motion: dalla fotografia alla nuvola di punti (SIFT, CMVS, PMVS2 sono acronimi di algoritmi di feature detection) (Westoby, 2012)

6.2 Realizzazione rilievo

Il rilievo fotogrammetrico tradizionale consta delle seguenti fasi:

- Pianificazione: operazioni riguardanti la pianificazione del rilievo, sulla base delle caratteristiche di restituzione richieste;
- Acquisizione: operazioni di presa delle immagini tramite camere posizionate su APR;
- Rilievo topografico: rilevazione dei punti di appoggio naturali o artificiali
- Orientamento: operazioni necessarie per il posizionamento dei centri di presa e i fotogrammi nella stessa posizione spaziale che avevano al momento della presa per la ricostruzione della forma e delle dimensioni dell'oggetto ripreso. Questa fase si divide in:
 - Orientamento interno: individuazione dei parametri che permettono di ricostruire la proiezione centrale della camera (posizione del centro di presa e lunghezza focale); dipende unicamente dal tipo di camera utilizzata.

- Orientamento esterno: determinazione della posizione e dell'orientamento della camera nello spazio al momento della presa, utilizzando i punti di controllo a terra (Figura 6.4).

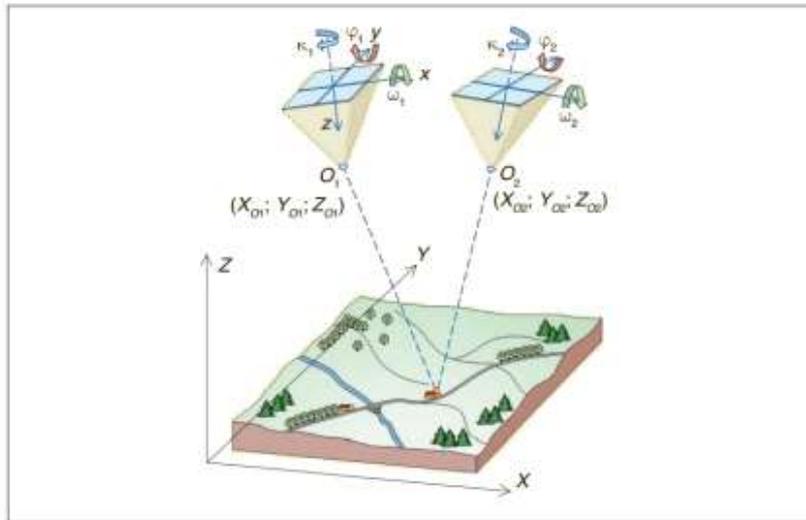


Figura 6.4: Modello stereoscopico e i 12 parametri di orientamento esterno (Cannarozzo et al., 2012)

- Restituzione: rappresentazione grafica e operazioni che consentono di effettuare misure sul modello dell'oggetto ricostruito.

Questa metodologia verrà applicata nel presente capitolo per la generazione di un modello digitale del terreno nella zona selezionata, situata nei pressi del colle di Rocce Verdi. L'area rilevata copre circa 60 ettari ed è stata scelta in base ai risultati dell'analisi di suscettibilità descritta nel Capitolo 4, oltre che per motivi di accessibilità. È infatti necessario che l'operatore disponga dei target di riferimento per la fase di orientamento, ed è preferibile pilotare un drone posizionandosi sul punto più elevato dell'area di interesse. Questi due elementi costituiscono un fattore limitante per la definizione della superficie rilevabile.

L'acquisizione dei dati è avvenuta nei giorni 30 luglio e 20 agosto 2024, per rilevare la situazione esistente e le modifiche a seguito di un importante evento temporalesco che ha portato all'innescò di una colata detritica. In particolare, nella giornata del 30 luglio sono state svolte le fasi preparatorie del rilievo, realizzando e rilevando i target a terra. Successivamente è stato svolto il primo volo, in modalità manuale, in quanto il DTM di cui si disponeva non era sufficientemente dettagliato per poter effettuare un'affidabile pianificazione del volo.

Infine, il 20 agosto è stato svolto il secondo rilievo, utilizzando gli stessi target ed effettuando il volo, pianificato sul DTM precedentemente ottenuto.

In questo paragrafo verranno descritti gli strumenti utilizzati per il rilievo, l'organizzazione e gli accorgimenti adottati.

6.2.1 Strumentazione

Il rilievo sul campo ha coinvolto l'impiego di diverse tipologie di strumenti, mirate a ottenere il miglior risultato possibile per il rilievo fotogrammetrico in oggetto:

- Aeromobile a pilotaggio remoto: è stato utilizzato un drone DJI Mavic 3 Multispectral (Figura 6.5). Esso consente l'acquisizione di immagini con differenti inclinazioni, seguendo una traiettoria di volo che può essere eseguita in modalità manuale o automatica.



Figura 6.5: APR DJI Mavic 3 Multispectral

- Ricevitore GNSS con correzione RTK: è stato utilizzato il ricevitore GPS/GNSS Geomax Zenith 60 (Figura 6.6). Questo strumento permette di materializzare i punti acquisiti con una precisione di ± 1.5 cm sul piano orizzontale e ± 3 cm sulla verticale. Il raggiungimento di tali precisioni è dato dalla capacità dell'antenna di ricevere il segnale da numerosi satelliti e le correzioni differenziali, mediante il sistema RTK (Real Time Kinematic).



Figura 6.6: Ricevitore GPS/GNSS Geomax Zenith 60

- Bombole di vernice spray per la realizzazione dei target a terra. Questi vengono rilevati mediante il ricevitore GPS/GNSS e hanno la funzione di scalare e georiferire il modello.

È stato necessario creare fisicamente dei target sul posto, con l'accorgimento di realizzarli su massi di notevoli dimensioni in maniera che fossero presenti anche per i successivi rilievi (Figura 6.7).



Figura 6.7: Esempio di target realizzato nell'area oggetto del rilievo

Di seguito sono riportate le specifiche tecniche del drone e del ricevitore utilizzati (Tabella 6.1 e Tabella 6.2).

Tabella 6.1: Caratteristiche tecniche dell'APR DJI Mavic 3 Multispectral

AEROMOBILE DJI MAVIC 3 MULTISPECTRAL	
Peso al decollo	1050 g
Dimensioni	Richiuso: 223×96.3×122.2 mm Aperto (senza eliche): 347.5×283×139.6 mm
Massima velocità ascensionale	6 m/s (modalità Normale) 8 m/s (modalità Sport)
Massima velocità di discesa	6 m/s (modalità Normale) 6 m/s (modalità Sport)
Velocità massima (al livello del mare, in assenza di vento)	15 m/s (modalità Normale)
Autonomia di volo	43 minuti (in assenza di vento)
Resistenza alla velocità del vento	12 m/s
Temperatura operativa	Tra -10 °C e 40 °C
Banda operativa	2.4000-2.4835 GHz 5.725-5.850 GHz
Global Navigation Satellite System (GNSS)	GPS + Galileo + GLONASS
Sensore inferiore	Intervallo di misurazione della distanza: da 0,3 m a 18 m
Fotocamera RGB	CMOS da 4/3"
Larghezza del sensore (mm)	17.3 mm
Lunghezza del sensore (mm)	13 mm
Risoluzione del sensore (MP)	20 MP
Larghezza immagine (pixel)	5280 pixel
Lunghezza immagine (pixel)	3956 pixel
Lunghezza focale equivalente (mm)	24 mm

Tabella 6.2: Caratteristiche tecniche dell'antenna GNSS

RICEVITORE GNSS GEOMAX ZENITH 60 LTE+UHF+IMU	
Specifiche del ricevitore	
Sistema di misurazione	NovAtel OEM7, 555 canali, multifrequenza, multi costellazione
Tracciamento GPS	L1 C/A, L1C, L2C, L2P, L5
Tracciamento GLONASS	L1 C/A, L2 C/A, L2P, L3
Tracciamento BeiDou	B1I, B1C, B2I, B2a, B2b, B3I
Tracciamento Galileo	E1, E5a, E5b, AltBOC, E6
Precise Point Positioning (PPP)	TerraStar C Pro, L-Band
Modalità di lavoro	
Modalità RTK	Selezionabile; ExtraSafe, Standard
Compensazione IMU	Esente da calibrazione, resistente alle interferenze magnetiche
Modalità di comunicazione	
Modulo 4G LTE	QUECTEL EG25-G LTE FDD, LTE TDD, UMTS, GSM
Protocolli dati RTK	RTCM 2.1, 2.3, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, CMR, CMR+, RTCA, NOVATELX
Modulo radio UHF	Ricetrasmittitore SATEL TR4+, 500 mW, 1000 mW, 403-473 MHz
Bluetooth	2.1 +EDR, V5.0 Funzionalità QR-iConnect
WLAN	Hotspot / modalità client 802.11 a/ac/b/g/n
Porta di comunicazione	USB, seriale e alimentazione
Precisione e prestazioni	
RTK	Hz 8 mm ± 1 ppm (rms) V: 15 mm ± 1 ppm (rms)
Rete RTK	Hz 8 mm ± 0,5 ppm (rms) V: 15 mm ± 0,5 ppm (rms)
Statica	Hz 3 mm ± 0,5 ppm (rms) V: 5 mm ± 0,5 ppm (rms)
Statico lungo	Hz 3 mm ± 0,1 ppm (rms) V: 3,5 mm ± 0,4 ppm (rms)
Real-time cinematico compensato con tilt	Incertezza Hz aggiuntiva 2 cm fino a 30° di inclinazione

6.2.2 Pianificazione del volo

La pianificazione della missione di volo dell'APR avviene preliminarmente all'acquisizione dei dati e permette di definire la traiettoria e le specifiche da utilizzare per il rilievo, al fine di soddisfare i criteri della fotogrammetria e garantire la precisione richiesta.

Il parametro utilizzato per stimare la precisione di un rilievo è la risoluzione spaziale, espressa in termini di Ground Sampling Distance (GSD), ovvero la risoluzione di un pixel a terra (Figura 6.8). Il GSD contiene l'informazione della porzione di terreno presente all'interno di un pixel; quindi, maggiore è il suo valore e minore sarà la risoluzione spaziale dell'immagine, e non sarà possibile vedere i dettagli (ottenendo dettagli meno visibili).

Il primo step risulta quindi la definizione della risoluzione del rilievo, a partire dalla quale è possibile determinare i parametri del volo.

Per pianificare adeguatamente l'acquisizione dei dati occorre conoscere le caratteristiche tecniche delle camere utilizzate, in particolare:

- Dimensione del sensore (l) da cui risalire alla dimensione del pixel (d_{pix})
- Distanza principale (focale) (p)

da cui si ricava l'altezza di volo tramite la relazione $H = \frac{GSD * p}{d_{pix}}$, e l'abbracciamento sarà

pari a $L = \frac{l * H}{p}$.

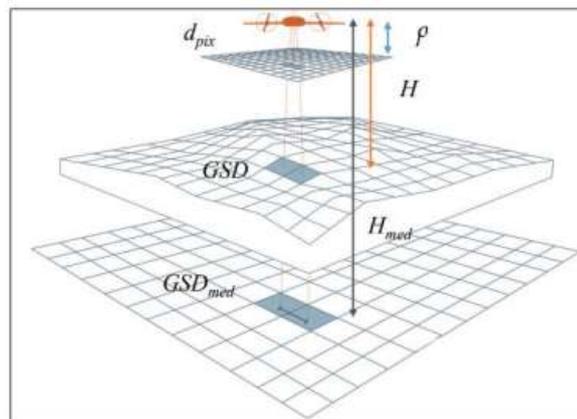


Figura 6.8: Rappresentazione schematica del Ground Simple Distance

Successivamente si può definire il percorso necessario al drone per sorvolare l'area, considerando che esso seguirà dei percorsi rettilinei (strisciate) affiancati, acquisendo i fotogrammi uno dopo l'altro.

Affinché si abbia un corretto modello stereoscopico, è necessario che i punti ripresi siano presenti in almeno due fotografie. Ciò si ottiene facendo mantenendo una sovrapposizione tra le acquisizioni almeno del 60%, permettendo un concatenamento tra i fotogrammi.

Oltre al ricoprimento longitudinale (μ) si considera una sovrapposizione tra le strisciate adiacenti del 20%, detto ricoprimento trasversale (ε), per avere una sufficiente numerosità dei fotogrammi (Figura 6.9). Per ottenere nuvole dense di punti e i prodotti che seguono, solitamente si utilizzano valori di ricoprimento longitudinale e trasversale rispettivamente dell'80% e del 60%.

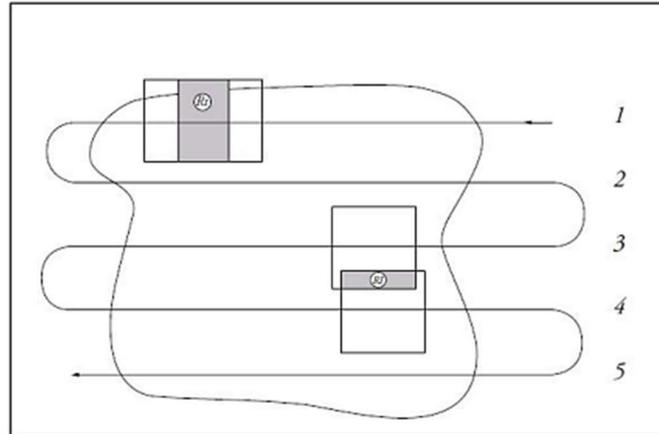


Figura 6.9: Esempio di schema di volo e zone di sovrapposizione

La distanza che il drone percorre tra uno scatto e il successivo è detta base di presa (B), ed è un parametro da calcolare per la pianificazione del volo, insieme all'interasse tra le strisciate (A). Considerando che la larghezza di sovrapposizione tra un fotogramma e il successivo è pari a $\mu \cdot L$ (Figura 6.10), si può ricavare $B = L - \mu \cdot L = L \cdot (1 - \mu)$ e $A = L \cdot (1 - \varepsilon)$.

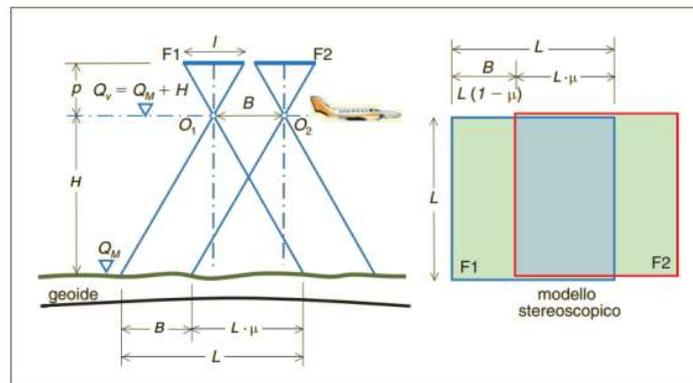


Figura 6.10: Schema di presa per il ricoprimento e per la creazione dei modelli stereoscopici (Cannarozzo et al., 2012)

Infine, l'ultimo parametro da calcolare è la velocità con cui il drone può volare, acquisendo i fotogrammi, senza comportare un errore di trascinamento eccessivo. Quest'ultimo è infatti un problema relativo al movimento della camera durante lo scatto perché, nell'intervallo di tempo in cui l'otturatore si apre, il centro di presa si sposta, acquisendo uno stesso punto in più pixel (Figura 6.11).

L'effetto di trascinamento è proporzionale al tempo di esposizione ($\Delta\tau$), alla velocità del drone (v) e all'altezza a cui esso vola (H):

$$\lambda = \frac{p \cdot v \cdot \Delta\tau}{H}$$

Per verificare che non vi sia un errore è sufficiente che tale valore sia inferiore a 1 pixel, agendo sulla velocità di volo se serve.

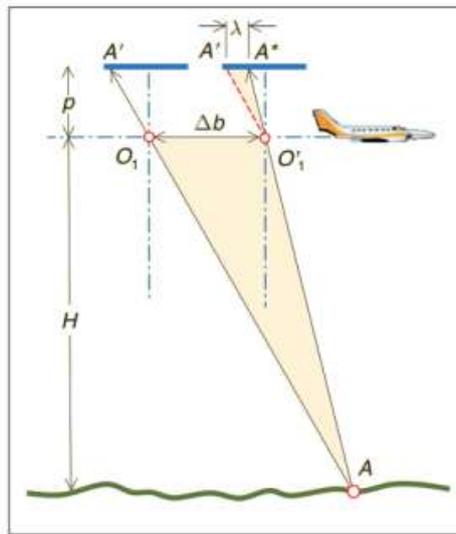


Figura 6.11: Effetto del trascinamento dell'immagine di un generico punto A sul terreno (Cannarozzo et al., 2012)

Le operazioni sopra descritte sono state svolte tramite l'utilizzo di DJI Pilot 2, un software sviluppato appositamente per il controller del drone, che permette di ricavare la traiettoria e le specifiche da utilizzare per il rilievo. L'applicazione permette di pianificare e svolgere missioni di volo mantenendo una quota costante rispetto al terreno. Per fare ciò è necessario importare all'interno dell'app un modello digitale del terreno.

Inoltre, è stato possibile utilizzare una modalità di volo, detta Smart Oblique, che permette di acquisire foto sia nadirali che oblique durante la stessa missione di volo, aiutando a ridurre il tempo necessario. Tale funzione risulta essenziale in questo contesto, in quanto la superficie da rilevare è molto inclinata e con dettagli tridimensionali, per cui è necessario acquisire fotogrammi da diverse inclinazioni per riuscire a ricostruire l'area.

Al fine di garantire una risoluzione sufficiente anche sul perimetro, l'acquisizione si estende anche oltre l'area selezionata. Al di fuori della regione di interesse, il drone scatterà unicamente fotografie inclinate, in direzione dell'area da rilevare, per limitare il numero di fotogrammi da elaborare.

L'applicazione permette di progettare il rilievo andando a tracciare sulla mappa l'area che deve essere rilevata e inserendo i parametri relativi alla camera, alla risoluzione e al ricoprimento.

Come output l'applicazione fornisce la quota di volo, il tempo stimato e il tracciato che il drone percorrerà, con il numero di foto che scatterà (Figura 6.12). La missione di volo pianificata è unica, in quanto comprende le strisciate necessarie a ricreare una maglia quadrata incrociata e acquisendo contestualmente sia foto nadirali che inclinate in avanti e indietro.

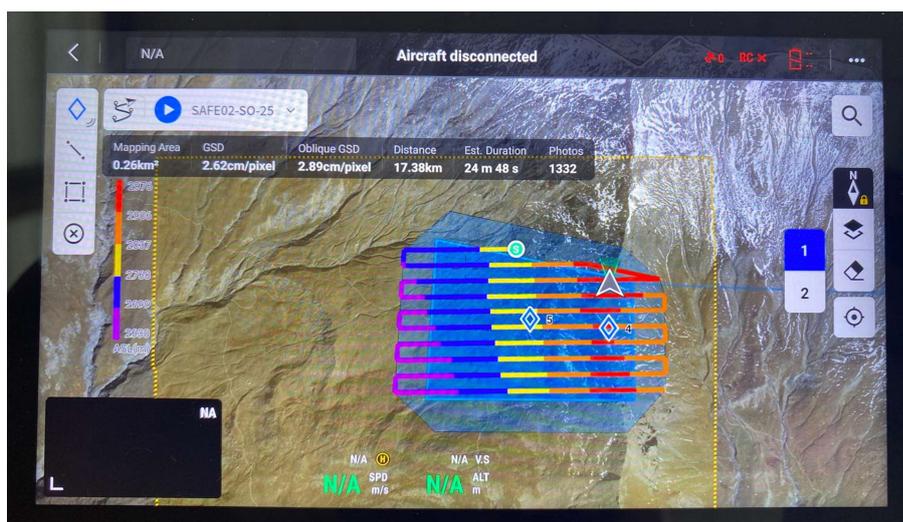


Figura 6.12: Visualizzazione della missione pianificata sull'applicazione

Infine, l'applicazione consente di caricare direttamente la missione pianificata sull'app di comando del drone, tramite la quale verrà avviato il volo in modalità automatica.

6.2.3 Materializzazione GCP e rilievo di punti con ricevitore GPS/GNSS

Come visto nel paragrafo precedente, durante il rilievo fotogrammetrico è necessario materializzare dei punti di appoggio a terra per eseguire l'orientamento esterno, scalare e orientare il modello finale. Questa operazione è chiamata appoggio fotogrammetrico, e consiste nella collocazione di marker o target detti Ground Control Point (GCP) sul territorio da rilevare.

In via teorica basterebbero tre punti per definire un piano di riferimento su cui orientare la nuvola di punti; tuttavia, è necessario ricordare che i target devono essere visibili da più fotogrammi per poter risolvere il sistema delle equazioni di collinearità. Per questo, solitamente, occorre trovare il giusto compromesso tra il numero di target da realizzare e il loro posizionamento, al fine di disporli in maniera omogenea e migliorare l'accuratezza del modello.

I target generalmente utilizzati in campo ambientale sono artificiali perché è necessario che abbiano un'alta visibilità ed essere riconoscibili nella fase di elaborazione. Per questo rilievo multitemporale sono state realizzate delle croci, di colore giallo o arancione, su massi di grandi dimensioni, affinché rimanessero visibili e utilizzabili anche per il secondo rilievo.

Tali punti sono classificati in due categorie: i Ground Control Point vengono utilizzati per georiferire il modello su un sistema di riferimento assoluto e per scalare il modello secondo misure reali; i Check Point (CP) sono invece utilizzati per definire l'errore medio ottenuto, confrontandoli con le coordinate dei punti sul modello. Tutti i punti vengono realizzati e materializzati alla stessa maniera, ed è poi solo in fase di elaborazione che si sceglie come suddividere i punti tra le due categorie, per ottenere la risoluzione migliore per il modello.

Il rilievo dei target avviene tramite l'utilizzo di strumenti topografici, per la rilevazione delle coordinate dei punti nello spazio. La materializzazione è stata effettuata mediante l'antenna ricevitore GPS/GNSS dotata di correzione RTK. Questo strumento permette la definizione delle coordinate di un punto, con elevata precisione, mediante la ricezione di segnali provenienti dal sistema di satelliti artificiali GNSS (Global Navigation Satellite System), che integra le informazioni satellitari con quelle terrestri di controllo.

Il funzionamento del sistema GNSS si basa sullo scambio di dati tra i satelliti orbitanti e i ricevitori posizionati sulla Terra, i quali confrontano il tempo del dato trasmesso con quello misurato dal proprio orologio interno, calcolando il tempo impiegato dal segnale per arrivare dal satellite, e determinano la propria posizione tramite la triangolazione. Affinché la posizione sia affidabile è richiesto che il ricevitore rilevi almeno quattro satelliti.

I punti sono stati acquisiti tramite posizionamento differenziale, utilizzando la tecnica NRTK (Network Real Time Kinematic) facendo stazione con un ricevitore mobile per 10 secondi così da ottenere le coordinate (Nord, Est, H quota) mediate su 10 misurazioni (epoche). Vengono così sfruttati sia i segnali dei satelliti che i dati di correzione forniti dalle basi a terra, per incrementare il livello di precisione del posizionamento.

Sono stati collocati 11 target, come è possibile vedere nella Figura 6.13.

Nella Tabella 6.3 sono riportati gli identificativi e le coordinate Est e Nord nel S.R. WGS 84 / UTM zone 32N e la quota ortometrica, ovvero riferita al geoide, insieme all'errore di tali punti sul piano orizzontale (HRMS) e sulla verticale (VRMS).

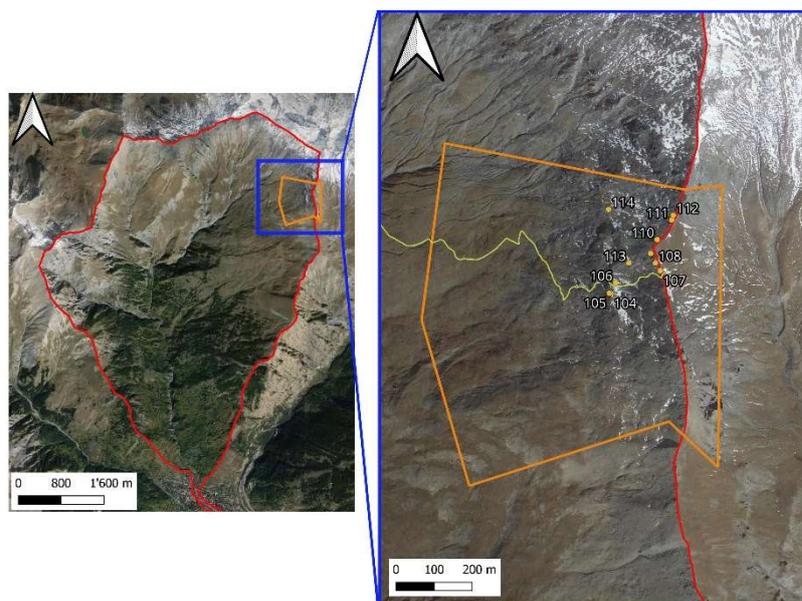


Figura 6.13: Distribuzione dei target nell'area oggetto del rilievo

Tabella 6.3: Coordinate dei target

Nome	Punto Est/E	Punto Nord/N	Punto H.	HRMS	VRMS
104	321018.58	4999988.314	2795.319	0.064	0.11
105	321014.347	4999989.081	2793.843	0.086	0.142
106	321030.818	5000016.441	2794.608	0.037	0.07
107	321147.662	5000047.97	2858.111	0.068	0.133
108	321135.418	5000068.896	2865.298	0.065	0.115
109	321122.678	5000093.971	2862.737	0.052	0.075
110	321139.999	5000130.639	2872.991	0.027	0.061
111	321178.046	5000182.637	2898.41	0.037	0.068
112	321181.969	5000194.823	2897.826	0.065	0.139
113	321065.938	5000068.947	2816.084	0.059	0.12
114	321012.698	5000210.622	2804.301	0.041	0.077

6.2.4 Esecuzione del volo

Il rilievo effettuato il 30 luglio 2024 ha incluso la realizzazione e materializzazione di 11 target, come descritto nel paragrafo precedente. Il volo è stato eseguito in modalità manuale, a causa dell'estensione dell'area di rilievo e dei dislivelli importanti. Dell'area rilevata ne è stata poi selezionata solo una parte, dove la confidenza risultava accettabile. Nella Tabella 6.4 sono riportati i dati relativi a tale rilievo.

Tabella 6.4: Dati riassuntivi del rilievo effettuato il 30 luglio 2024

RILIEVO 30 LUGLIO 2024	
Foto acquisite	4825
GSD di progetto	3.2 cm
GSD definitivo	5 cm

Il rilievo effettuato il 20 agosto 2024 non ha necessitato di una nuova materializzazione dei target, ed il volo è stato effettuato in modalità automatica, seguendo la pianificazione precedentemente descritta.

Nella Tabella 6.5 sono riportati i dati relativi a tale rilievo.

Tabella 6.5: Dati riassuntivi del rilievo effettuato il 20 agosto 2024

RILIEVO 20 AGOSTO 2024	
Foto acquisite	3618
GSD di progetto	4.75 cm
GSD definitivo	5 cm
Quota di volo	75 m

6.3 Elaborazione dati

In questo paragrafo verranno descritte le principali fasi operative che hanno permesso l'elaborazione dei dati acquisiti, trasformando i singoli fotogrammi in un modello tridimensionale.

Il processo è stato eseguito tramite l'utilizzo di Agisoft Metashape, un software che sfrutta la tecnica Structure from Motion per generare dati spaziali 3D partendo da un dataset di immagini bidimensionali. Il software segue un workflow semplice e lineare, iniziando dall'allineamento dei fotogrammi e terminando con la creazione del modello tridimensionale (Figura 6.14).

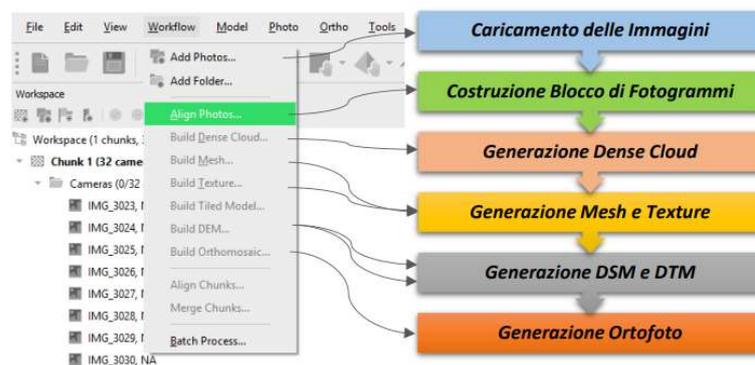


Figura 6.14: Schermata del workflow di Metashape e passaggi descritti nel seguente paragrafo

I fotogrammi acquisiti durante il volo vengono importati sul software, dove è possibile visualizzarli ed effettuare un'analisi speditiva del contenuto, per eventualmente rimuovere le immagini sfocate o con esposizione non corretta.

Successivamente vi è la fase di *costruzione del blocco di fotogrammi*, che coincide con l'orientamento interno e relativo di ogni fotogramma, ovvero l'allineamento delle immagini, in cui esse vengono posizionate correttamente le une rispetto alle altre (Figura 6.15). L'algoritmo individua punti caratteristici per ogni immagine (punti di legame) e li ricerca nelle immagini successive tramite un algoritmo di features detection, permettendo la creazione della nuvola di punti sparsa (sparse point cloud).

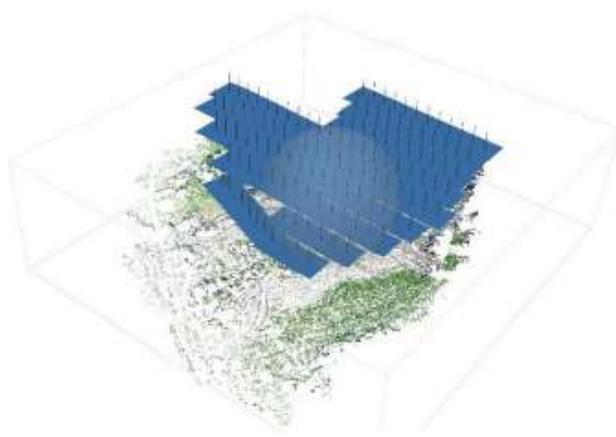


Figura 6.15: Esempio di nuvola di punti sparsa

Questa operazione non richiede punti di coordinate note ma si basa unicamente sulla ricerca dei descrittori, definiti sulla base del comportamento radiometrico dell'immagine nell'intorno del punto.

Dopo che i punti di legame sono stati determinati è possibile risolvere le equazioni di collinearità, mettendo in relazione:

- posizione nello spazio immagine del punto di legame;
- parametri di calibrazione della fotocamera;
- parametri esterni della fotocamera (punto di presa e orientamento);
- coordinate nello spazio reale del punto di legame.

Il sistema di equazioni viene risolto per l'intero blocco di fotogrammi, utilizzando la tecnica dei minimi quadrati per ottimizzare la valutazione dei parametri di orientamento e le coordinate dei punti di legame per la nuvola sparsa. Tali parametri verranno successivamente rielaborati tenendo conto dei GCP.

L'inserimento dei Ground Control Point è essenziale per poter effettuare le operazioni di scalatura e di rototraslazione della nuvola di punti, per migliorare la precisione del modello.

A seguito dell'inserimento delle coordinate dei target nel software, con il sistema di riferimento selezionato (SR: WGS 84 /UTM zone 32 N, EPSG:32632), occorre collimare tali

punti in un numero di fotogrammi variabile tra 10 e 15. La collimazione si effettua analizzando le fotografie e spostando la bandierina relativa al marker nella posizione corretta. Dopo l'inserimento dei primi target il software procede in automatico al posizionamento dei restanti, ma occorre comunque controllare e migliorare manualmente la posizione.

I punti di appoggio a terra non vengono utilizzati tutti alla stessa maniera; infatti, come spiegato precedentemente, si fa una distinzione tra GCP e CP. In particolare, vengono utilizzati come GCP quelli con le precisioni maggiori mentre i rimanenti vengono deselezionati e utilizzati dal software come Check Point per determinare l'errore medio, tramite il confronto delle coordinate. Nelle due elaborazioni effettuate, degli 11 target materializzati, ne sono stati utilizzati 8 come GCP e 3 come CP.

L'errore medio si attesta a 12 cm per il primo rilievo e 5.3 cm per il secondo rilievo.

Dopo l'allineamento dei fotogrammi e l'ottenimento di una nuvola di punti georeferenziata, si procede alla generazione dei modelli digitali, partendo dalla nuvola di punti densa. Essa consiste in una densificazione del modello precedentemente ottenuto durante l'allineamento, tramite algoritmi di image matching, utilizzando il confronto pixel to pixel.

Il secondo prodotto è il modello digitale di elevazione (Digital Elevation Model, DEM), risultante dall'elaborazione della nuvola di punti densa. Esso è un termine generico utilizzato per indicare una rappresentazione delle quote dei punti, senza distinguere a priori la superficie riflettente. In questa categoria si possono distinguere i modelli digitali della superficie (DSM) o del terreno (DTM). Nei primi la superficie rappresentata è comprensiva degli oggetti presenti sulla superficie terrestre, come gli edifici e la vegetazione; i secondi invece rappresentano l'andamento della superficie del terreno nudo (Figura 6.16).

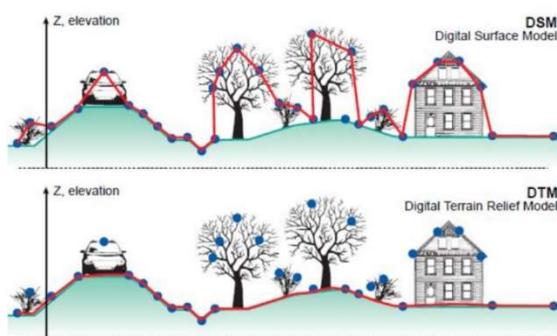


Figura 6.16: Rappresentazione schematica del DSM e DTM

La generazione del DTM avviene in base ai dati della nuvola densa perché questa opzione consente di eseguire una classificazione dei punti e ottenere una nuvola filtrata con i soli punti del terreno.

In questo lavoro sono stati generati due file in formato raster per i DTM, relativi ai due rilievi effettuati in prossimità del colle di Rocce Verdi, con dimensione del singolo pixel di 5 cm (Figura 6.17).

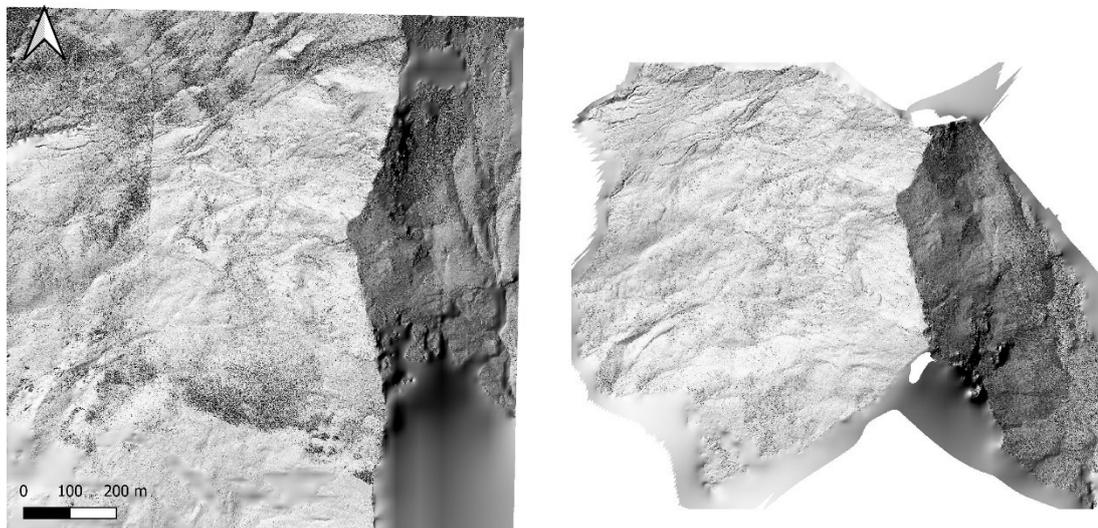


Figura 6.17: DTM risultanti dai due rilievi

Infine, vi è la generazione dell'ortomosaico, ovvero un'immagine creata dalla fusione delle immagini originali, trasformate nella proiezione selezionata grazie ad un processo di ortorettifica (Figura 6.18). Questo prodotto ha la stessa valenza di una carta geografica, in quanto subisce un processo di georeferenziazione che permette di uniformare la scala di rappresentazione in ogni sua parte.

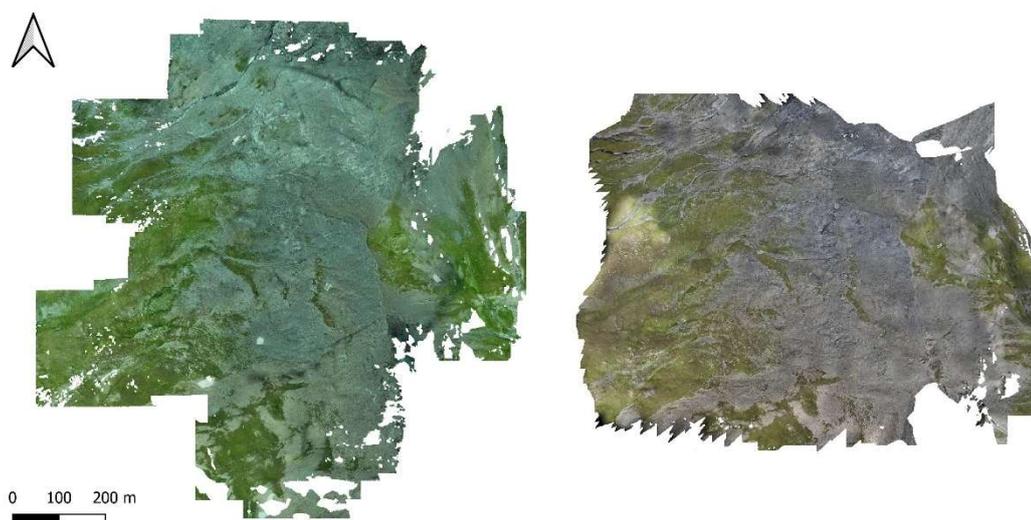


Figura 6.18: Ortofoto risultanti dai due rilievi

Del processo di elaborazione appena descritto, i risultati più importanti sono dati dall'estrazione dei modelli digitali del terreno relativi ai due rilievi svolti prima e dopo gli

eventi di colata detritica del mese di luglio 2024. Essi sono indispensabili per procedere all'analisi sui volumi movimentati, che verrà descritta nel paragrafo seguente.

6.4 Change detection e Tasso di ricarica

L'obiettivo finale di questo capitolo è valutare l'evoluzione dell'area di studio rilevata per analizzare la dinamica dei sedimenti. Le variazioni sono state rilevate tramite la differenza di DEM (DEM of Difference, DoD), ricavato dai rilievi effettuati con APR. Questo prodotto, pur essendo semplice, permette di individuare le aree sorgente e quantificare i volumi di sedimenti movimentati, per correlare tali dati con le caratteristiche della precipitazione.

L'erosione consiste nella rimozione di materiali rocciosi o detritici lungo il pendio, ed è provocata e controllata dagli agenti naturali (acqua, ghiaccio, vento) e dalla forza di gravità. Questi sedimenti, trasportati dai versanti alla rete di canali, giocano un ruolo cruciale nell'evoluzione dei bacini montani e influiscono sulla possibile formazione di colate detritiche (Cazzador et al., 2020).

Il tasso di ricarica di un bacino (o "recharge rate") si riferisce alla velocità con cui il materiale solido, come detriti e sedimenti, viene accumulato nel canale del bacino idrografico. Questo materiale, durante eventi di pioggia intensa o fusione nivale, può essere rimobilizzato, innescando fenomeni di colata detritica. Esso, quindi, rappresenta un fattore importante per il controllo dell'attività del bacino ed è un parametro chiave nella valutazione del rischio di future colate poiché esprime la quantità di sedimenti che si è accumulata nel tempo lungo il canale (Jakob et al., 2005). Infatti, come descritto nel Capitolo 2, affinché si verifichi un fenomeno di colata non sono sufficienti solo elevate concentrazioni idriche, ma è anche necessario che sia presente materiale detritico facilmente mobilizzabile.

L'analisi dei processi erosivi nelle porzioni superiori del bacino e del trasporto dei sedimenti sono quindi fondamentali per comprendere il fenomeno di colata detritica e gestirne il rischio associato.

Le tecniche moderne, come la fotogrammetria SfM e il LiDAR (Light Detection and Ranging) permettono di ottenere DEM ad alta risoluzione, per analizzare i cambiamenti morfologici. In particolare, la Structure from Motion consente la creazione di modelli digitali di elevazione ad alta risoluzione, in modo economico e rapido (Westoby et al., 2012). La realizzazione di rilievi multitemporali in un'area di testata del bacino consente, successivamente, di ricavare un raster della differenza tra DTM, chiamati DoD. Essi permettono il confronto quantitativo tra i modelli di elevazione pre e post-evento per valutare i cambiamenti morfologici e quantificare l'entità dello spostamento dei detriti. Il calcolo

avviene a scala di pixel, applicando la differenza tra la quota nuova e quella precedente; tuttavia, la precisione dell'analisi dipende dall'accuratezza dei DEM utilizzati e dalla gestione degli errori di propagazione.

L'elaborazione del DEM of Difference è stata effettuata utilizzando il software QGIS (tramite il calcolatore raster), confrontando i DTM riferiti ai rilievi del 30 luglio 2024 e del 20 agosto 2024, ricavati nel paragrafo precedente. Il DoD fornisce un modello di superficie ad alta risoluzione, spazialmente distribuito, di cambiamento altimetrico nel tempo (Brasington et al., 2003).

Una volta che i due DTM sono stati sviluppati e registrati con la stessa tassellazione della griglia, è possibile creare un DoD sottraendo il DTM precedente dal DTM successivo:

$$\Delta E_{ij} = Z_{2ij} - Z_{1ij}$$

dove ΔE_{ij} è il valore della griglia i, j del modello di variazione di elevazione, Z_{1ij} è il valore i, j del DEM iniziale e Z_{2ij} è il valore i, j del DEM successivo. Il DoD risultante rappresenta le riduzioni di elevazione come valori negativi e gli aumenti di elevazione come valori positivi.

La realizzazione di un'accurata mappa DoD, al fine di quantificare con precisione l'erosione e la deposizione, deve necessariamente passare attraverso la valutazione dell'incertezza dei DEM e degli errori di propagazione (Brasington, 2003). Infatti, considerando che i modelli digitali del terreno sono rappresentazioni imperfette della realtà, perché affetti da errori e imprecisioni, si avrà una propagazione di tali incertezze anche nel DoD.

L'entità dell'errore del DoD può essere valutata a partire dagli errori associati ai singoli modelli digitali che lo hanno generato, utilizzando la somma degli errori in quadratura (Williams, 2012):

$$\delta U_{DoD} = \sqrt{\delta z_1^2 + \delta z_2^2}$$

L'errore da considerare in tale contesto è pari a 5 cm, in quanto si sta analizzando unicamente la porzione centrale dell'area rilevata, per cui essa è soggetta ad un errore inferiore rispetto a quanto ricavato dal confronto con i CP.

Considerando un errore di 5 cm per entrambi i DTM, l'errore del DoD diventa:

$$\delta U_{DoD} = \sqrt{0.05^2 + 0.05^2} = 0.07 \text{ m} = 7 \text{ cm}$$

Tale valore è nominato Minimum Level of Detection (minLoD), il quale costituisce una soglia per la significatività delle variazioni considerate: le modifiche superiori a minLoD sono state considerate reali, mentre quelle inferiori a minLoD sono state considerate incerte e non utilizzate nel calcolo finale. Inoltre, il DoD è stato ricavato su una porzione di superficie inferiore rispetto a quella acquisita durante i rilievi. Questo per via delle zone restituite tramite ampie interpolazioni per via della bassa densità di punti lungo i bordi o nelle regioni topograficamente più complesse, a causa della scarsa copertura fotografica e delle ombre (Figura 6.19).

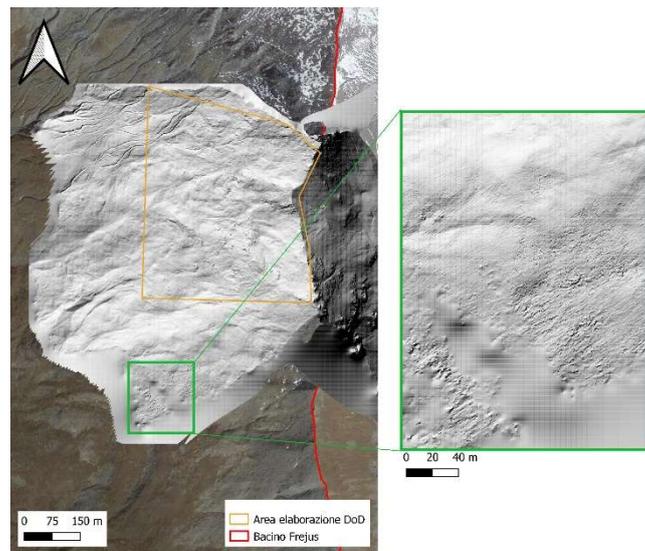


Figura 6.19: Esempio di porzione di DTM interpolata, non utilizzabile per l'estrazione del DoD

Di seguito è riportato il risultato del DoD ottenuto:

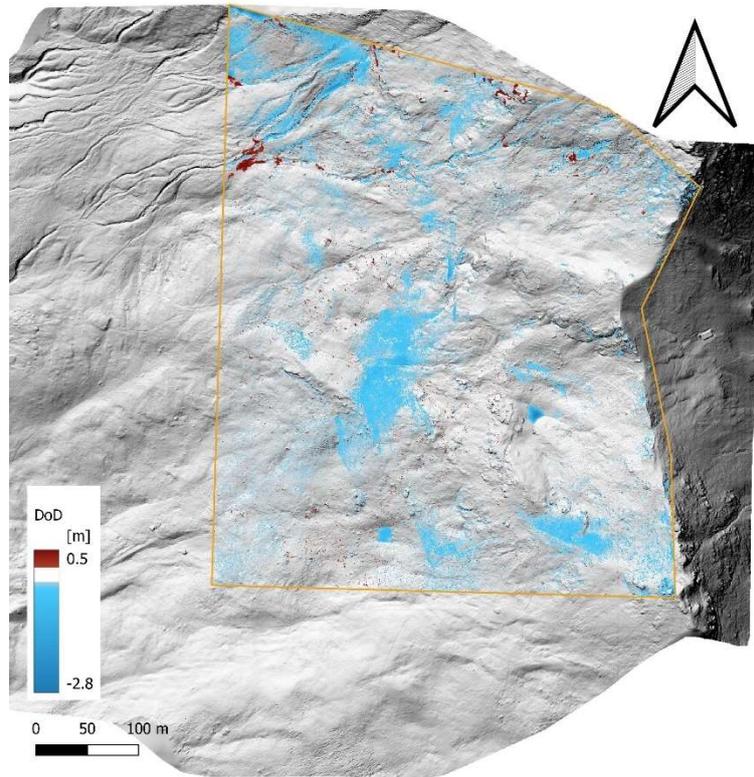


Figura 6.20: DoD dell'area rilevata in località colle di Rocce Verdi

In rosso sono indicate le zone che presentano valori altitudinali più elevati rispetto al rilievo precedente, mentre in blu sono indicate le aree interessate da un abbassamento di quota. Considerando che tra le zone in blu sono presenti anche processi di fusione nivale (Figura 6.21), riconoscibili per i bordi netti, i principali processi rappresentati sono di erosione (blu) (Figura 6.22) e di deposizione (rosso).

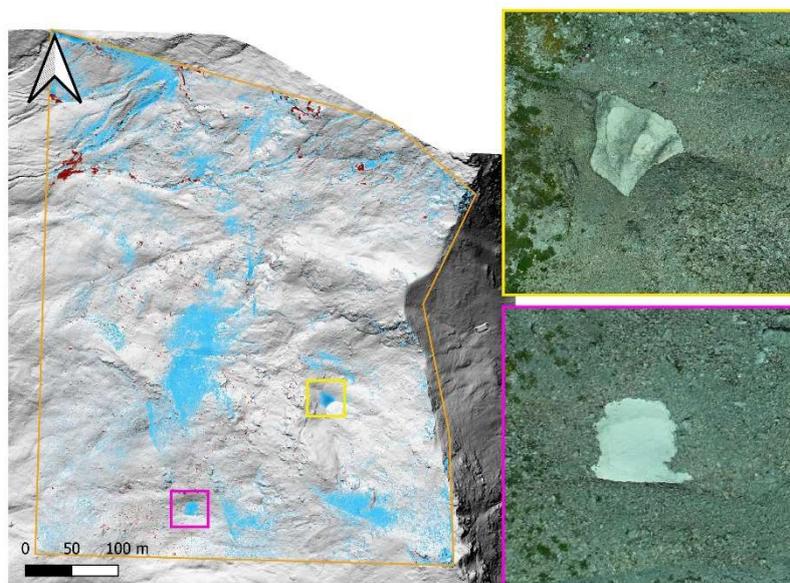


Figura 6.21: Esempi di abbassamento di quota dovuto a fusione nivale

Selezionando le porzioni di DoD che interessano unicamente la dinamica dei sedimenti e non la fusione nivale, l'erosione ha avuto luogo dove la pendenza si aggira tra i 20° e 40°, mentre la deposizione di materiale è avvenuta per pendenze inferiori a 20°.

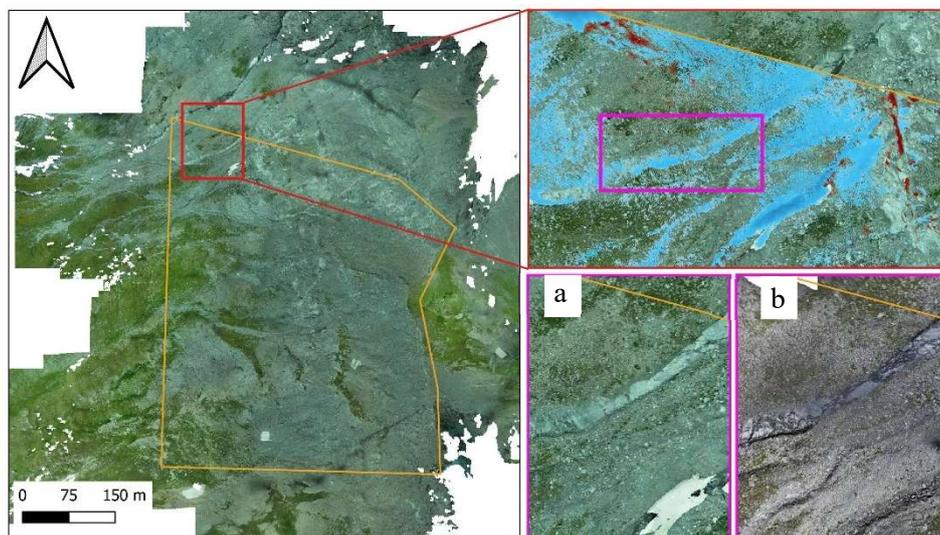


Figura 6.22: Dettaglio di erosione lungo un canale: a) rilievo 30 luglio, b) rilievo 20 agosto

Inoltre, andando a sovrapporre il DoD ottenuto con la mappa dell'indice di connettività (Figura 3.18) è possibile visualizzare che il materiale depositato si trova lungo un canale con connettività alta (Figura 6.23).

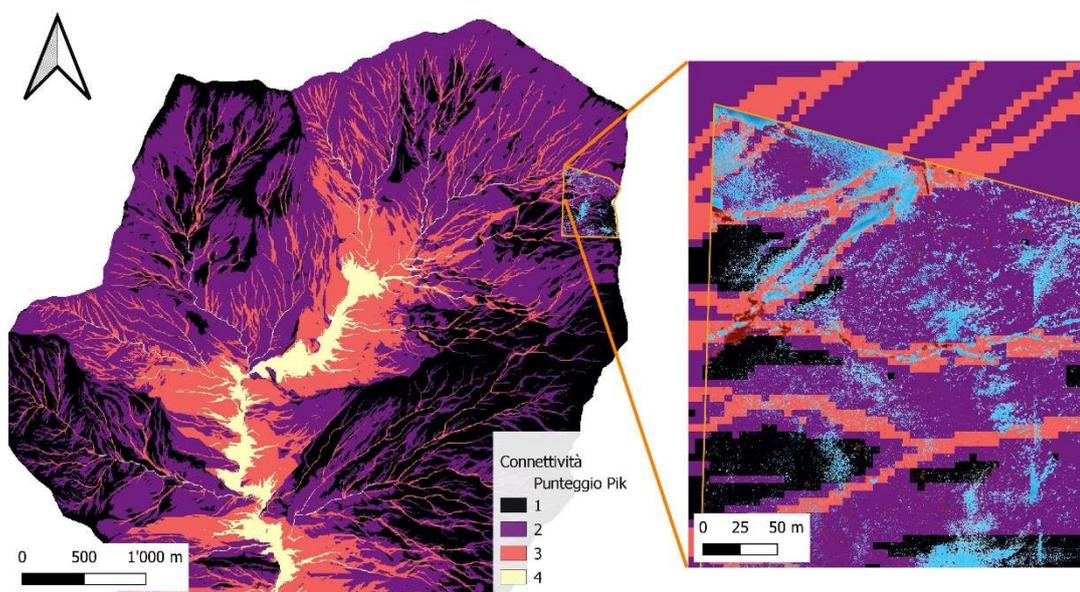


Figura 6.23: Rappresentazione del DoD in relazione alla connettività

Le variazioni principali si sono registrate nella porzione nord-occidentale dell'area di studio, in corrispondenza dei versanti più acclivi e delle porzioni più connesse con il Rio Frejus.

I volumi sono stati mobilizzati e spostati durante un evento temporalesco; ciò indica che sono disponibili ad essere mobilizzati nuovamente ad un futuro evento di precipitazioni, percorrendo un ulteriore tratto di canale. Probabilmente, avvicinandosi al canale principale del bacino, essi potranno essere coinvolti in un evento di colata detritica. Questo meccanismo rappresenta la ricarica dei sedimenti precedentemente descritta, e il tasso di ricarica consiste nella velocità con cui questo fenomeno avviene e i sedimenti si rendono disponibili ad un nuovo evento di colata detritica.

Per concludere, è stata osservata una deposizione di $230 m^3$ di materiale rispetto a $224'000 m^2$ (22 ettari) di superficie rilevata. Tale movimentazione è avvenuta a seguito di due eventi di pioggia, con quantità di pioggia caduta di 13.5 mm il 30 luglio e 3 mm il 31 luglio, durante intervalli di tempo di 25 e 6 minuti rispettivamente (misurate in corrispondenza di RM1). È ipotizzabile che in corrispondenza delle testate del bacino del Rio Merdovine l'intensità fosse maggiore.

L'analisi geomorfica attraverso il DoD si è quindi dimostrata uno strumento efficace per monitorare i cambiamenti morfologici in ambiente montano. Tuttavia, la grandezza della superficie rilevata ha consentito unicamente di ottenere un riscontro numerico sui volumi mobilizzati in questa piccola porzione e confrontare tali dati con la precipitazione misurata. Per ottenere una stima dei sedimenti disponibili, e valutare il rischio di future colate detritiche, occorrerebbe effettuare un rilievo sull'intera porzione di testata del bacino, la quale ammonta a 160 ettari solamente per il bacino del Rio Merdovine.

CONCLUSIONI

L'aspetto principale su cui si è voluto porre l'attenzione in questo lavoro di tesi è la possibilità di effettuare un monitoraggio innovativo e integrato di un fenomeno franoso, in questo caso di colate detritiche, tramite l'analisi di dati open source, l'installazione di sensori IoT e l'utilizzo di tecnologie APR per la realizzazione di rilievi multitemporali da correlare all'innesco di eventi.

Il sito oggetto del monitoraggio è un tratto del Rio Frejus, nell'omonimo bacino, nel Comune di Bardonecchia (TO), in cui la Soc. Coop. Corintea ha scelto di sviluppare e testare il proprio progetto.

Il percorso seguito per sviluppare tale sistema si è articolato in diverse fasi chiave, ciascuna delle quali ha richiesto un'approfondita analisi del contesto territoriale e l'adozione di soluzioni tecnologiche adeguate alle specificità del fenomeno e alle caratteristiche locali.

In una prima fase, è stato necessario effettuare uno studio approfondito dell'area, analizzando le condizioni geomorfologiche e climatiche dell'area, e gli eventi pregressi. Tale studio ha fornito informazioni essenziali sulle dinamiche di innesco e di propagazione del fenomeno e ha consentito l'individuazione dei fattori predisponenti.

Successivamente è stata effettuata un'analisi di suscettibilità, tramite il metodo Rock Engineering System (RES), per definire una mappa di suscettibilità all'innesco di colate detritiche e individuare le zone più critiche, sulle quali concentrare il monitoraggio. L'applicazione di tale metodo, già effettuata in studi precedenti, è stata modificata tenendo in considerazione l'indice di connettività e variando i pesi relativi ad alcuni fattori predisponenti. Ciò ha permesso una rappresentazione più continua sul territorio, con valori di suscettibilità maggiori sulle porzioni sommitali del bacino, in corrispondenza delle quali si ha l'innesco.

Sulla base di tali risultati è stata affrontata la fase di progettazione del sistema di monitoraggio, che ha incluso la scelta delle tecnologie più appropriate al rilevamento efficace e continuativo del fenomeno, e il loro posizionamento. La tecnologia LoRaWAN è stata selezionata per la sua capacità di trasmettere dati in tempo reale, a basso costo e su lunghe distanze, rendendo possibile la copertura di un'area ampia e difficilmente accessibile come quella del Rio Frejus. Ciò ha permesso di creare una rete di sensori, disposti lungo l'asta

torrentizia, capaci di rilevare variazioni significative del livello dell'acqua, vibrazioni e precipitazioni, per individuare il passaggio di una colata detritica e correlarlo ai fattori di innesco.

Durante l'installazione del sistema sono stati effettuati dei test di segnale per individuare il posizionamento ottimale dei sensori lungo le opere di protezione idraulica esistenti. Inoltre, sono stati apportati dei miglioramenti per garantire il rilevamento efficace e corretto dei parametri monitorati.

Successivamente, la fase di monitoraggio ha prodotto dati preliminari che, pur essendo limitati a causa del breve periodo di osservazione e del limitato numero di sensori attivi, hanno mostrato una prima conferma dell'efficacia del sistema. Gli eventi di colata detritica registrati durante il 30 e il 31 luglio 2024 hanno evidenziato la capacità del sistema di riconoscere in tempo reale il passaggio del fenomeno e di raccogliere dati utili alla definizione di soglie di allerta. Tuttavia, per poter stabilire soglie d'innesco sito-specifiche affidabili, sarà necessario prolungare il monitoraggio nel tempo e aumentare la quantità di dati raccolti, in modo da migliorare l'accuratezza del sistema.

Infine, il progetto del sistema di monitoraggio, a fine conoscitivo, prevedeva la realizzazione di un rilievo multitemporale in una porzione di testata del bacino, per comprendere il comportamento dinamico dei detriti e prevedere la magnitudo di eventi futuri, in correlazione alla forzante pluviometrica. Nonostante le difficoltà di un rilievo in quota, è stato possibile elaborare un DEM of Difference (DoD), risultante dalla sottrazione tra i due DTM ottenuti dai rilievi. Esso ha consentito la valutazione quantitativa dei volumi di materiale eroso e depositato, disponibili per una successiva movimentazione.

In conclusione, il sistema di monitoraggio sviluppato per il bacino del Rio Frejus ha dimostrato un'efficacia preliminare nell'identificazione delle colate detritiche, sebbene i dati raccolti finora siano limitati dal breve periodo di monitoraggio. Le fasi di studio del territorio, progettazione e installazione del sistema, insieme alla raccolta e analisi dei dati, hanno fornito una solida base di conoscenza che sarà fondamentale per sviluppare un sistema di allerta precoce, capace di ridurre in modo significativo i rischi legati alle colate detritiche nel lungo termine.

Nonostante alcune limitazioni, il lavoro svolto rappresenta un primo passo importante per la comprensione e mitigazione del rischio associato alle colate detritiche con un approccio innovativo e tecnologicamente avanzato che potrà essere replicato in altri contesti simili.

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo percorso, vorrei esprimere la mia più sincera gratitudine. Prima di tutto, un ringraziamento speciale va alla mia famiglia e a tutte le persone che mi hanno supportato durante questo periodo di impegno, lavoro e soddisfazioni.

Un particolare ringraziamento al Professore Federico Vagnon per aver dato fiducia a questo progetto di tesi e per il suo continuo supporto, disponibilità e cortesia.

Ringrazio inoltre il Dott. Geol. Davide Tiranti per aver condiviso la sua preziosa esperienza in questo ambito e per aver la costante disponibilità al confronto.

Infine, desidero ringraziare la Soc. Coop. Corintea e Giulio Lissari per avermi offerto l'opportunità di seguire da vicino il progetto e partecipare attivamente alle attività sul campo. È stata per me un'esperienza particolarmente stimolante e formativa, che mi ha arricchito di nuove conoscenze e competenze.

BIBLIOGRAFIA

- Ahmadi-adli, M., Huvaj, N., & Toker, N. K. (2017). Rainfall-triggered landslides in an unsaturated soil: a laboratory flume study. *Environmental Earth Sciences*, 76(21). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7049-z>
- Ancey, C. (2001). Debris Flows and Related Phenomena, cap. 21. In N. J. Balmforth & A. Provenzale (Eds.), *Geomorphological Fluid Mechanics* (pp. 528–547). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-45670-8_21
- Ancey, C. (2002). Dry granular flows down an inclined channel: Experimental investigations on the frictional-collisional regime. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 65, 011304. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.011304>
- Arattano, M. (1999). On the Use of Seismic Detectors as Monitoring and Warning Systems for Debris Flows. In *Natural Hazards* (Vol. 20).
- Arattano, M., Deganutti, A. M., & Marchi, L. (1997). *Debris Flow Monitoring Activities in an Instrumented Watershed on the Italian Alps*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133797205>
- Arattano, M., & Marchi, L. (2008). Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning. *Sensors*, 8, 2436–2452. www.irpi.to.cnr.it;
- Bonetto, S., Mosca, P., Vagnon, F., & Vianello, D. (2021). New application of open source data and Rock Engineering System for debris flow susceptibility analysis. *Journal of Mountain Science*, 18(12), 3200–3217. <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. *Catena*, 75(3), 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Bosco, F., Gandini, D., Giudici, I., Marco, F., Paro, L., Tararbra, M., & Tiranti, D. (2004). *Il trasporto in massa del Rio Frejus (Bardonecchia) - Evento del 6 agosto 2004*.
- Brasington, J., Langham, J., & Rumsby, B. (2003). Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology*, 53(3–4), 299–316. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3)

- Cannarozzo, R., Cucchiarini, L., & Meschieri, W. (2012). *Misure, rilievo, progetto* (Zanichelli S.p.A.).
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, *188*, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>
- Cazzador, D., Rainato, R., Cavalli, M., Lenzi, M. A., & Picco, L. (2020). Integrated analysis of sediment source areas in an Alpine basin. *Catena*, *188*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104416>
- 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. *Engineering Geology*, *203*, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.009>
- Chen, Y., Qin, S., Qiao, S., Dou, Q., Che, W., Su, G., Yao, J., & Nnanwuba, U. E. (2020). Spatial predictions of debris flow susceptibility mapping using convolutional neural networks in Jilin province, China. *Water (Switzerland)*, *12*(8). <https://doi.org/10.3390/W12082079>
- 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. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *73*(2), 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Costa, J. E. (1984). Physical Geomorphology of Debris Flows. In J. E. Costa & P. J. Fleisher (Eds.), *Developments and Applications of Geomorphology* (pp. 268–317). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69759-3_9
- Coussot, P., & Meunier, M. (1996). Coussot, P. and M. Meunier. Recognition, classification, and mechanical description of debris flows. *Earth Science Review. Earth-Science Reviews*, *40*, 209–227. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8)
- Coviello, V., Arattano, M., Comiti, F., Macconi, P., & Marchi, L. (2019). Seismic Characterization of Debris Flows: Insights into Energy Radiation and Implications for Warning. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *124*(6), 1440–1463. <https://doi.org/10.1029/2018JF004683>
- Davies, T. R. (1997). *Using hydroscience and hydrotechnical engineering to reduce debris flow hazards*.
- Evans, S. G., & Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, *30*(4), 620–636. <https://doi.org/10.1139/t93-054>

- 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. *Engineering Geology*, 102(3–4), 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1), 181–216. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/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. *Geomorphology*, 72(1–4), 272–299. <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. *Proceedings of the 41st U.S. Rock Mechanics Symposium - ARMA's Golden Rocks 2006 - 50 Years of Rock Mechanics*.
- Hudson, J. A. (1992). *Rock Engineering System: Theory and Practice*.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M., Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). *A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type*. <https://wiwwresearchgate.net>
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- Hungr, O., Morgan, G. C., VanDine, D. F., & Lister, D. R. (1987). *Debris flow defenses in British Columbia* (pp. 201–222). <https://doi.org/10.1130/REG7-p201>
- Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., Hübl, J., Miyata, S., Smith, J. B., & Yin, H. Y. (2019). Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 199). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>
- Hutchinson, J. N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology : Proc 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 10–15 July 1988V1, P3–35. Publ Rotterdam: A A Balkema, 1988. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127121468>
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>

- Jakob, M., Bovis, M., & Oden, M. (2005). The significance of channel recharge rates for estimating debris-flow magnitude and frequency. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(6), 755–766. <https://doi.org/10.1002/esp.1188>
- Johnson, A. M., & Rodine, J. R. (1984). Debris Flow. In D. Brunsten & D. B. Prior (Eds.), *Slope Instability* (pp. 257–361). John Wiley & Sons Ltd.
- Kumar, A., & Sarkar, R. (2023). Debris Flow Susceptibility Evaluation—A Review. In *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering* (Vol. 47, Issue 3, pp. 1277–1292). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-01000-x>
- LaHusen, R. (2005). *Debris-flow instrumentation*.
- Lenzi, M. A. (2006). Research developments in debris flow monitoring, modelling and hazard assessment in Italian mountain catchments. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 90, 135–145. <https://doi.org/10.2495/DEB060141>
- Li, Z., Chen, J., Tan, C., Zhou, X., Li, Y., & Han, M. (2021). Debris flow susceptibility assessment based on topo-hydrological factors at different unit scales: a case study of Mentougou district, Beijing. *Environmental Earth Sciences*, 80(9). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09665-9>
- Liu, K.-F., Chen, S.-C., Liu, K. F., & Chen, S. C. (2003). *Integrated debris-flow monitoring system and virtual center*. <https://www.researchgate.net/publication/286984650>
- Lorenzini, G., & Mazza, N. (2004). *Debris Flow – Phenomenology and Rheological Modelling*.
- Mazzoccola, D. F., & Hudson, J. A. (1996). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29(1), 37–56. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.03>
- Melton, M. A. (1957). *An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology*.
- Moscariello, A., Marchi, L., Maraga, F., & Mortara, G. (2002). Alluvial Fans in the Italian Alps: Sedimentary Facies and Processes. In *International Association of Sedimentologists Special Publications* (pp. 141–166). <https://doi.org/10.1002/9781444304299.ch9>
- Pierson, T. C. (1980). *Debris flows*.
- Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). A rhéologie classification of subaerial sediment-water flows. *GSA Reviews in Engineering Geology*, 7, 1–12. <https://doi.org/10.1130/REG7-p1>

- Rozos, D., Bathrellos, G. D., & Skillodimou, H. D. (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. *Environmental Earth Sciences*, 63(1), 49–63. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0687-z>
- Statens Vegvesen. (2014). *Håndbok V139 - Flom- og sørpeskred*.
- Taboni, B., Vianello, D., Vagnon, F., Ferrero, A. M., & Bonetto, S. M. R. (2023). The RES approach for debris flow susceptibility analysis: A case study. *E3S Web of Conferences*, 415. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341503028>
- Takahashi T. (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*.
- Tecca, P. R., Galgaro, A., Genevois, R., & Deganutti, A. M. (2003). Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites (Acquabona, Italy). *Hydrological Processes*, 17(9), 1771–1784. <https://doi.org/10.1002/hyp.1212>
- Tiranti, D. (2024). Alpine Catchments' Hazard Related to Subaerial Sediment Gravity Flows Estimated on Dominant Lithology and Outcropping Bedrock Percentage. *GeoHazards*, 5(3), 652–682. <https://doi.org/10.3390/geohazards5030034>
- Tiranti, D., Crema, S., Cavalli, M., & Deangeli, C. (2018). An integrated study to evaluate debris flow hazard in alpine environment. *Frontiers in Earth Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00060>
- Tiranti, D., Cremonini, R., Marco, F., Gaeta, A. R., & Barbero, S. (2014). The DEFENSE (debris Flows triggered by storms - nowcasting system): An early warning system for torrential processes by radar storm tracking using a Geographic Information System (GIS). *Computers and Geosciences*, 70, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.05.004>
- Tiranti, D., & Deangeli, C. (2015). Modeling of debris flow depositional patterns according to the catchment and sediment source area characteristics. *Frontiers in Earth Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00008>
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- VanDine, D. F. (1996). *Debris Flow Control Structures for Forest Engineering*.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*.
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*.

- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, *179*, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., & Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, *1*(1), 61–66. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>
- Williams, R. D. (2012). *DEMs of Difference*.
- 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. *Remote Sensing*, *14*(12). <https://doi.org/10.3390/rs14122942>