

RAPPORTO DI APPROFONDIMENTO SUGLI EVENTI DI COLATA DETRITICA DELLA VAL DI SUSA

II CASO DEL RIO FREJUS (BARDONECCHIA) DEL 13 AGOSTO 2023



A cura del
Dipartimento Rischi Naturali e Ambientali
con il contributo del
Consorzio Forestale Alta Val Susa (CFAVS)

Torino, 17 novembre 2023

SOMMARIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUZIONE GENERALE | 1 |
| CARATTERIZZAZIONE DEI BACINI DELLA VAL DI SUSÀ | 2 |
| CARATTERIZZAZIONE LITOLOGICA | 2 |
| CARATTERIZZAZIONE MORFOMETRICA | 6 |
| DISTRIBUZIONE DELLE FRANE | 7 |
| CARATTERIZZAZIONE DELLA COPERTURA DEL SUOLO | 8 |
| ANALISI DEI PROCESSI TORRENTIZI STORICI | 9 |
| CONCLUSIONI | 16 |
| IL RIO FREJUS | 18 |
| CARATTERIZZAZIONE DEI PROCESSI TORRENTIZI DEL RIO FREJUS | 20 |
| INDICE DI CONNETTIVITÀ DEI SEDIMENTI (IC) | 20 |
| MODELLO AD AUTOMI CELLULARI | 22 |
| RISULTATI | 23 |
| CLASSIFICAZIONE CWI DEL RIO FREJUS | 23 |
| INDICE DI CONNETTIVITÀ E AREE SORGENTI | 26 |
| MODELLO DI PROPAGAZIONE (MODELLO AD AUTOMI CELLULARI) | 30 |
| CONCLUSIONI | 32 |
| APPROFONDIMENTO EFFETTI AL SUOLO | 33 |
| ABITATO DI BARDONECCHIA, TRATTO T. FREJUS FINO ALLA CONFLUENZA CON LA DORA DI VALLE STRETTA | 34 |
| T. FREJUS DALL'APICE DEL CONOIDE ALLA GOLA IN ROCCIA | 41 |
| T. FREJUS DALLA GOLA IN ROCCIA FINO ALLA CONFLUENZA CON COMBA GAUDET | 41 |
| BACINO DEL RIO MERDOVINE | 43 |
| APPROFONDIMENTO SULLE OPERE DI DIFESA IDRAULICO-FORESTALI NEL BACINO DEL T. FREJUS | 48 |
| REFERENZE | 61 |

In copertina: Alveo intasato di materiale detritico a valle del ponte di via Montenero, Bardonecchia (foto Arpa Piemonte)

INTRODUZIONE GENERALE

Questo documento di approfondimento ha la finalità di fornire un inquadramento, il più esaustivo possibile, delle conoscenze accumulate da Arpa Piemonte attraverso un lungo periodo di studio e osservazione anche in condivisione con Enti locali, accademici e di ricerca, dei processi di colata detritica che interessano i bacini alpini della Val di Susa.

In tale ottica, è affrontato in particolare il caso del Rio Frejus (Bardonecchia, Torino), che storicamente è stato sede di ricorrenti eventi di colata detritica responsabili di danni e disagi all'abitato di Bardonecchia, per gran parte edificato sul conoide alluvionale del Rio Frejus.

Il rapporto si articola in tre diverse sezioni, rispettivamente dedicate all'approfondimento di aspetti differenti, ma profondamente interconnessi, al fine di fornire un quadro completo dell'argomento trattato, partendo da una dissertazione scientifica di caratterizzazione dei bacini della Val di Susa e dei processi che in questi hanno luogo, passando attraverso l'analisi dei recenti eventi di colata detritica che hanno interessato il Rio Frejus, concludendo con una descrizione sintetica delle opere di difesa realizzate sul territorio per mitigare il rischio indotto dalle colate detritiche e degli effetti che quest'ultime hanno avuto sulle opere stesse (a cura del Consorzio Forestale Alta Val Susa – CFAVS).

Per la consultazione dei rapporti d'evento riguardanti gli episodi pregressi più significativi di colata detritica del Rio Frejus redatti dall'Agenzia, si rimanda ai seguenti link:

- Rapporto sui fenomeni di trasporto in massa dei rii Fenils e Frejus del 06-07 agosto 2004 – alta Valle di Susa: [Parte I](#) - [Parte II](#) - [Parte III](#);
- [Evento temporalesco del 7 agosto 2009 in alta Val Susa](#)
- [Colata detritica del 13 agosto 2023 nel comune di Bardonecchia - Rapporto preliminare d'evento](#)

CARATTERIZZAZIONE DEI BACINI DELLA VAL DI SUSÀ

Caratterizzazione litologica

Al fine di caratterizzare i bacini delle Alpi Occidentali e i fenomeni torrentizi che in questi avvengono, i bacini sono stati classificati mediante il Clay Weathering Index (CWI) (Tiranti et al., 2014). Questo indice identifica la predisposizione degli ammassi rocciosi a produrre argilla o minerali argillosimili come frazione fine del materiale sciolto a seguito di processi di alterazione/disgregazione. Questa classificazione considera l'influenza dei sedimenti a granulometria fine sui processi torrentizi. Infatti, la quantità di argilla determina lo stile e lo schema deposizionale delle colate detritiche, la loro frequenza e stagionalità, la reologia del flusso e l'architettura dei conoidi alluvionali (Figura 1; Figura 2) (Tiranti e Deangeli, 2015).

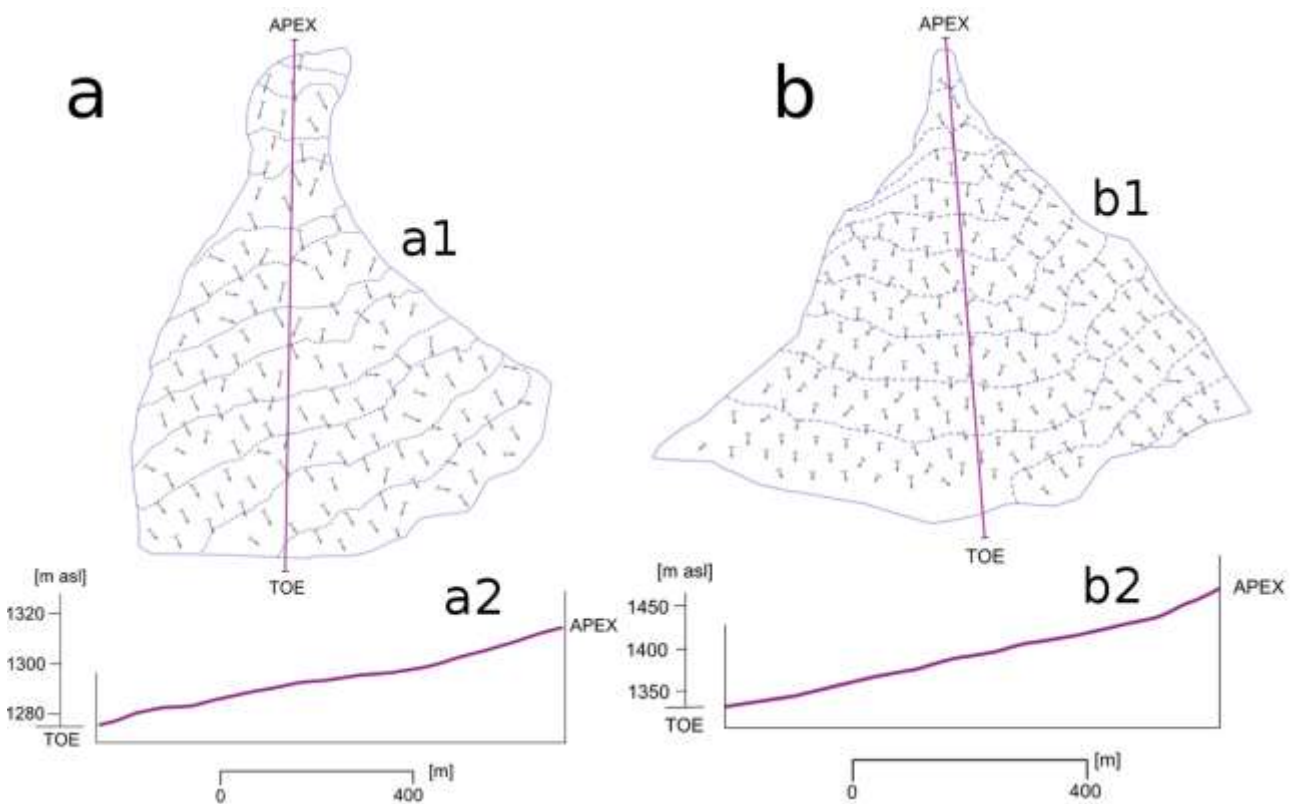


Figura 1 - (a) Geometria del conoide alluvionale ECM (e.g. Rio Frejus, Bardonecchia, Torino, Italia). (a1) Le pendenze maggiori della superficie deposizionale conservata dei conoidi sono indicate da frecce più lunghe. La pendenza della superficie del conoide è irregolare, con poca differenza dall'apice all'unghia. La sezione longitudinale dei conoidi ECM (a2) è caratterizzata da pendenze leggermente maggiori rispetto ai conoidi GCM e da un profilo regolare. (b) Geometria dei conoidi GCM (ad esempio Rio Fosse, Bardonecchia, Torino, Italia). (b1) Le pendenze maggiori della superficie deposizionale conservata dei conoidi sono indicate da frecce più lunghe. La sezione longitudinale dei conoidi GCM (b2) è caratterizzata da una pendenza regolare e dolce dall'apice all'unghia.

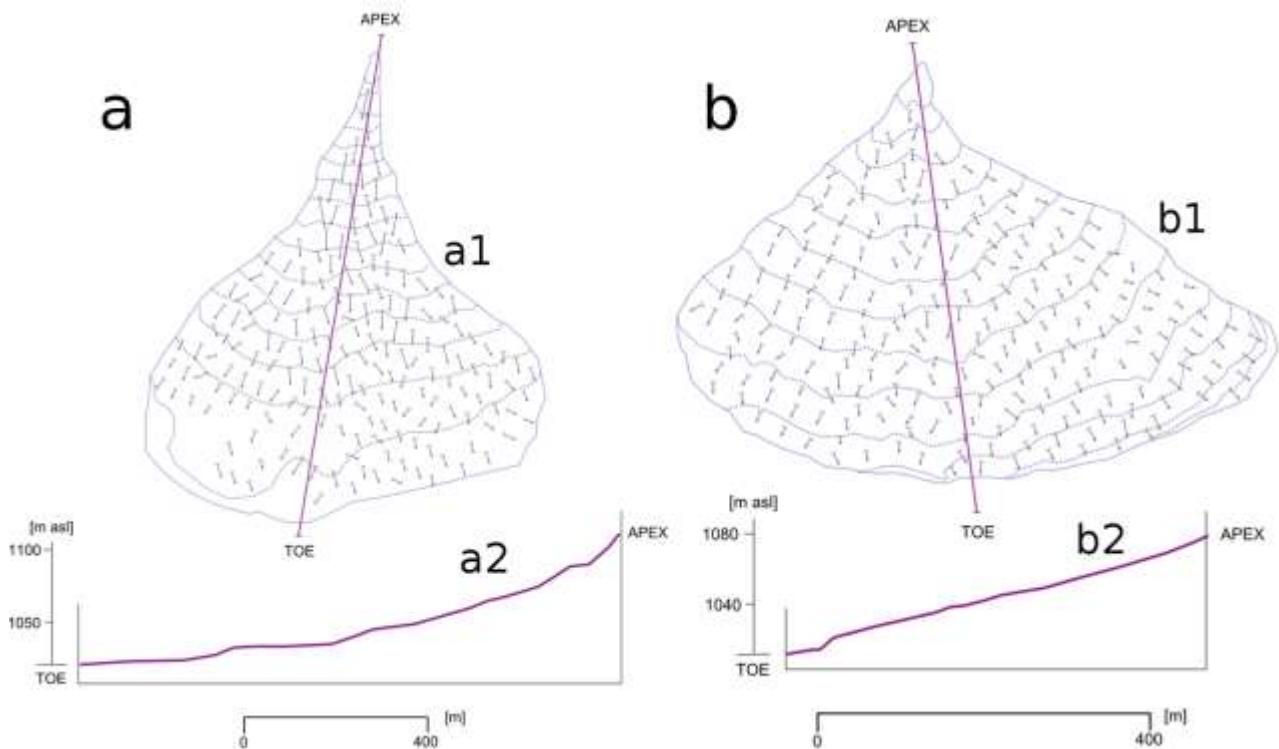


Figura 2 - (a) Geometria di conoidi BCM (ad esempio Rio Secco, Salbertrand, Torino). (a1) Le pendenze maggiori della superficie deposizionale conservata dei conoidi sono indicate da frecce più lunghe. La pendenza del conoide è irregolare con pendenza maggiore nella zona apicale. Le sezioni longitudinali dei conoidi BCM (a2) sono caratterizzate da pendenze significativamente più elevate rispetto ai conoidi ECM e GCM, mostrando un forte cambiamento di gradiente che corrisponde a cambiamenti granulometrici del materiale depositato. (b) Geometria del conoide BCM, accresciuto mediante esclusivi processi di flusso iperconcentrato (ad esempio Rio Geronda, Salbertrand, Torino). (b1) Le pendenze maggiori della superficie deposizionale conservata dei conoidi sono indicate da frecce più lunghe. La pendenza del conoide è regolare e caratterizzata da un profilo longitudinale (b2) con valori più moderati rispetto ai conoidi alluvionali BCM dominati da processi di colata detritica.

Il CWI identifica tre tipologie di bacino:

- **Excellent Clay Maker (ECM):** bacini formati principalmente da rocce sedimentarie ricche di argilla, o rocce metamorfiche a grana fine e foliate, o rocce vulcaniche che producono quantità significative di argilla (Figura 3a). In caso in trasporto di massa, la reologia del flusso è decisamente viscoplastica; l'innesco avviene prevalentemente nel periodo estivo (dove sono più frequenti i temporali) con intensità di pioggia pari o superiore a 20 mm/h, intensità caratterizzata da un tempo di ritorno di 5 anni per la Valle di Susa;
- **Good Clay Maker (GCM):** bacini formati principalmente da rocce carbonatiche massicce che producono moderate quantità di silt argilloso (Figura 3b). In caso di trasporto in massa, la reologia del flusso è prevalentemente viscoplastica; l'innesco avviene principalmente in tarda primavera (precipitazioni a carattere misto advettivo-convettivo) con intensità di pioggia pari o superiore a 30mm/h, intensità caratterizzata da un tempo di ritorno di 20 anni per la Valle di Susa;
- **Bad Clay Maker (BCM):** bacini formati principalmente da rocce metamorfiche o ignee massicce a grana grossa che producono quantità trascurabili di argilla (Figura 3c, d). In caso di trasporto in massa la reologia del flusso è frizionale-collisionale, l'occorrenza di innesco è prevalentemente autunnale con intensità di pioggia pari o superiore a 50 mm/h, intensità caratterizzata da un tempo di ritorno di 100 anni per la Valle di Susa.

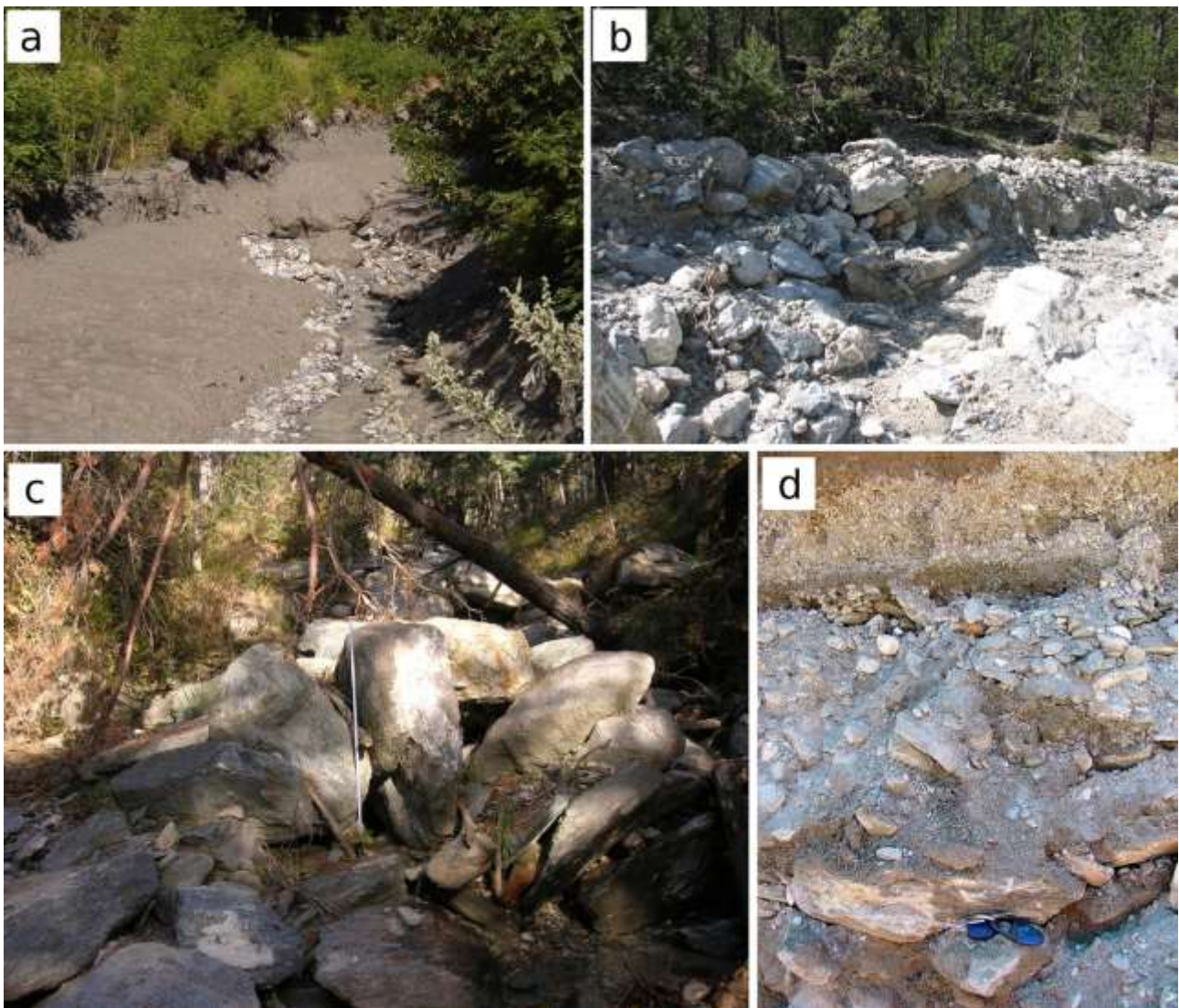


Figura 3 - (a) Esempio di deposito di colata iperconcentrata molto fangosa con rari massi proveniente dal bacino ECM del Rio Fenils, comune di Cesana, Valle di Susa. (b) Esempio di deposito di colata detritica con abbondanti massi in una matrice di silt argilloso proveniente dal bacino GCM di Comba Crosa, comune di Cesana, Valle di Susa. (c) Esempio di deposito di flusso iperconcentrato partially-openwork con massi molto abbondanti. (d) Particolare della matrice formata da sabbia, ghiaia e silt. Dal bacino Rio Secco BCM, comune di Salbertrand, Valle di Susa.

Per determinare la qualità dell'ammasso roccioso, il Geological Strength Index (GSI) (Hoek e Brown, 1997; Hoek e Marinos, 2001; Hoek et al., 2002; Marinos et al. 2004a, 2004b, 2005; Tiranti et al., 2008) è stato applicato come metodo qualitativo a ciascuna litologia che costituisce le unità tettonostratigrafiche presenti in Val di Susa.

A causa della complessa litologia dei bacini della Valle di Susa, i litotipi sono stati raggruppati in tre principali litogruppi: calcari e dolomie massicci (compresi i marmi), rocce cristalline massicce a grana grossa (metabasiti, ofioliti, gneiss, micascisti e quarziti) e rocce metamorfiche scistose a grana fine (calcescisti, scisti s.l., scisti carbonatici e filladici) (Figura 4).

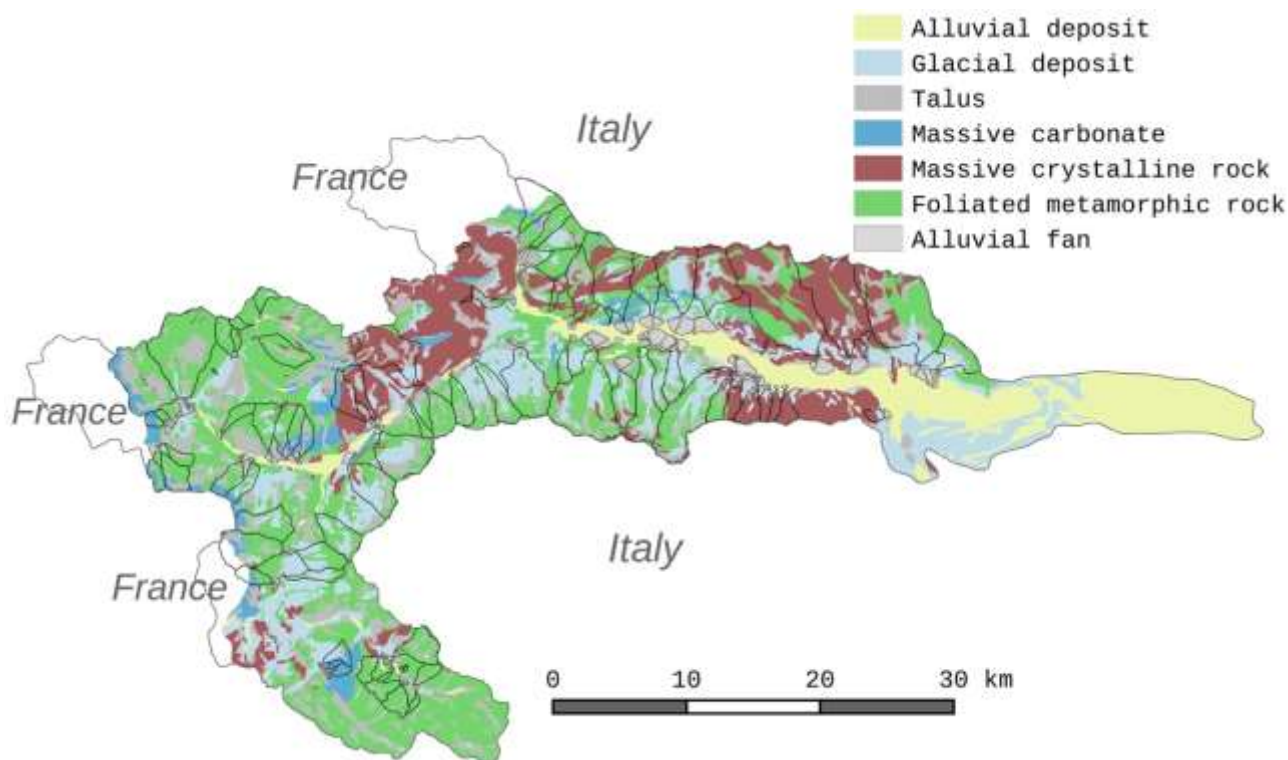


Figura 4 - Carta litologica dei bacini aventi dati storici su eventi torrentizi.

La Figura 4 mostra che il litogruppo più abbondante è rappresentato dalle rocce metamorfiche scistose a grana fine che costituiscono circa il 52,44% dei litotipi totali nelle aree considerate; le rocce cristalline massicce a grana grossa sono presenti per il 38,57%, mentre i carbonati massicci rappresentano solo l'8,99%. I depositi superficiali rappresentano circa il 31% della superficie totale. Sulla base della litologia dominante, circa 48 bacini sono classificati come ECM, 26 come BCM e solo 4 come GCM (Figura 5).

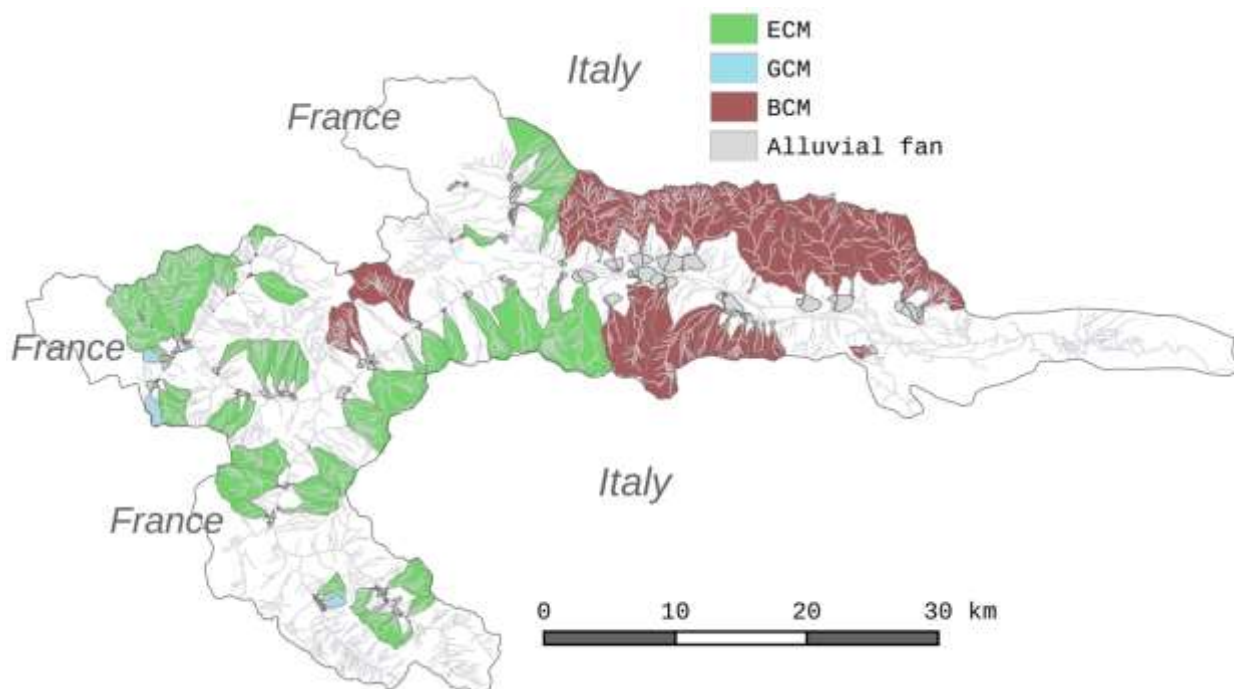


Figura 5 - Classificazione CWI dei bacini idrografici in base alla litologia dominante.

Poiché le caratteristiche strutturali dell'intera Valle di Susa sono uniformemente distribuite all'interno della stessa litologia, e quindi la varietà strutturale è limitata, il GSI viene applicato per la caratterizzazione degli ammassi rocciosi con il medesimo criterio per l'intera valle. Per ciascun gruppo principale CWI vengono calcolati i valori medi del GSI. La Tabella 1 mostra la corrispondenza tra le classi CWI e il GSI medio che le contraddistingue.

| Classe CWI | GSI medio |
|------------|-----------|
| ECM | 45 |
| GCM | 60 |
| BCM | 75 |

Tabella 1 - Corrispondenza tra le classi CWI e il GSI medio (da Tiranti et al., 2008).

Caratterizzazione morfometrica

La caratterizzazione morfometrica dei bacini si basa su Wilford et al. (2004), che determina il più probabile processo torrentizio che raggiunge l'area del conoide alluvionale considerando un insieme completo di parametri morfometrici. Questa caratterizzazione è derivata dal modello digitale del terreno (DTM) regionale con risoluzione di 5 metri. I processi torrentizi presi in considerazione sono le piene liquide (WF) a bassa concentrazione di sedimenti (0-20%); i flussi iperconcentrati (HF) sono trasporti in massa torrentizi con moderata concentrazione di sedimento (20-50%) caratterizzati da un comportamento newtoniano o non newtoniano a seconda della concentrazione; le colate detritiche (DF) sono movimenti di massa torrentizi con elevata concentrazione di sedimento (50-85%) caratterizzati da comportamento viscoplastico non newtoniano o collisionale-frizionale a seconda della quantità di sedimento fine (Pierson e Costa, 1987; Costa, 1998; Lavigne e Suwa, 2004).

Per stabilire la propensione di un bacino a generare uno specifico fenomeno torrentizio, la caratterizzazione morfometrica si basa principalmente sul rapporto di Melton (Melton, 1957) e sulla lunghezza dell'asse longitudinale del bacino. In sostanza, un bacino caratterizzato da un rapporto di Melton $<0,3$ e una lunghezza dell'asse longitudinale >8 km è più soggetto a piene liquide, mentre le colate detritiche sono caratteristiche di bacini con rapporto di Melton $>0,6$ e lunghezza dell'asse longitudinale del bacino <3 km. I flussi iperconcentrati interessano bacini con rapporto di Melton $>0,3$ e valori di lunghezza dell'asse longitudinale del bacino compresi tra 3 e 8 km.

Applicando Wilford et al. (2004), la maggior parte dei bacini della Valle di Susa sono caratterizzati da flussi iperconcentrati come processi principali (rapporto di Melton medio pari a 0,74 e lunghezza dell'asse longitudinale <8 km). Solo 27 bacini su 78 hanno maggiori probabilità di innescare colate detritiche (rapporto di Melton medio di 3,50 e lunghezza dell'asse longitudinale <3 km) (Figura 6). Nessuno dei bacini selezionati rientra nella classe "piena liquida".

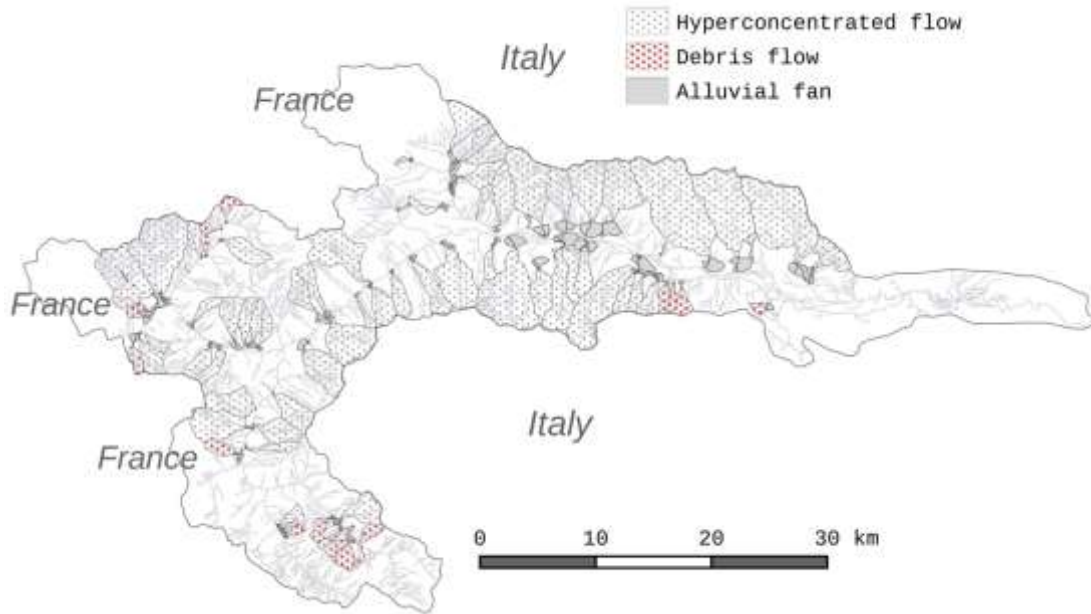


Figura 6 - Processo torrentizio che più probabilmente raggiungerà il conoide alluvionale.

Distribuzione delle frane

Secondo alcuni autori (Campbell, 1974; Johnsons and Rodine, 1984; Sassa, 1985; Ellen e Flaming, 1987; Iverson et al., 1997; Blair, 1999; Gregoretti, 2000; Lin et al., 2002; Reid et al., 2003; Maleta et al., 2005), la presenza di frane all'interno dei bacini sembra contribuire all'innescò di processi torrentizi in due modi:

- le frane possono innescare direttamente un trasporto di massa lungo il canale principale;
- i loro depositi costituiscono un'importante fonte di sedimento per un debris flow che si innesca nel letto del canale.

Infine, viene analizzata la distribuzione delle deformazioni gravitative profonde di versante (DGPV) per indagare la loro possibile influenza nel verificarsi di processi torrentizi. Le DGPV coprono circa 181,78 km², corrispondenti al 21,68% della Valle di Susa (Figura 7). Le altre tipologie di frana coprono 145,03 km², corrispondenti al 17,30% della superficie totale (Figura 8).

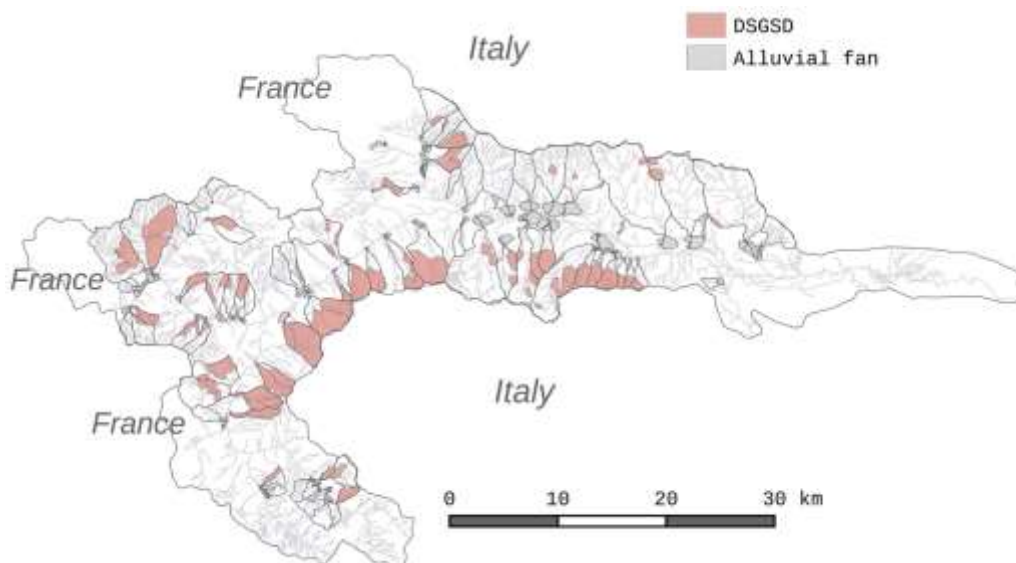


Figura 7 - Distribuzione delle DGPV (DSGSD come acronimo internazionale) lungo la Valle di Susa.

Le tipologie di frana presenti in Valle di Susa (escluse le DGPV) e la relativa quantità (Figura 8) sono riportate nella Tabella 2.

| Tipologia | Area coperta [km ²] | Abbondanza relativa [%] |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Crolli e ribaltamenti | 59,94 | 41,33 |
| Frane superficiali | 6,20 | 4,28 |
| Flussi lenti in terra | 10,03 | 6,91 |
| Flussi in terra | 0,53 | 0,37 |
| Frane a cinematica complessa | 55,03 | 37,95 |
| Scivolamenti traslativi e rotazionali | 13,30 | 9,19 |

Tabella 2 - Tipologia e abbondanza delle frane, escluse le DGPV (SIFRAP, Arpa Piemonte).

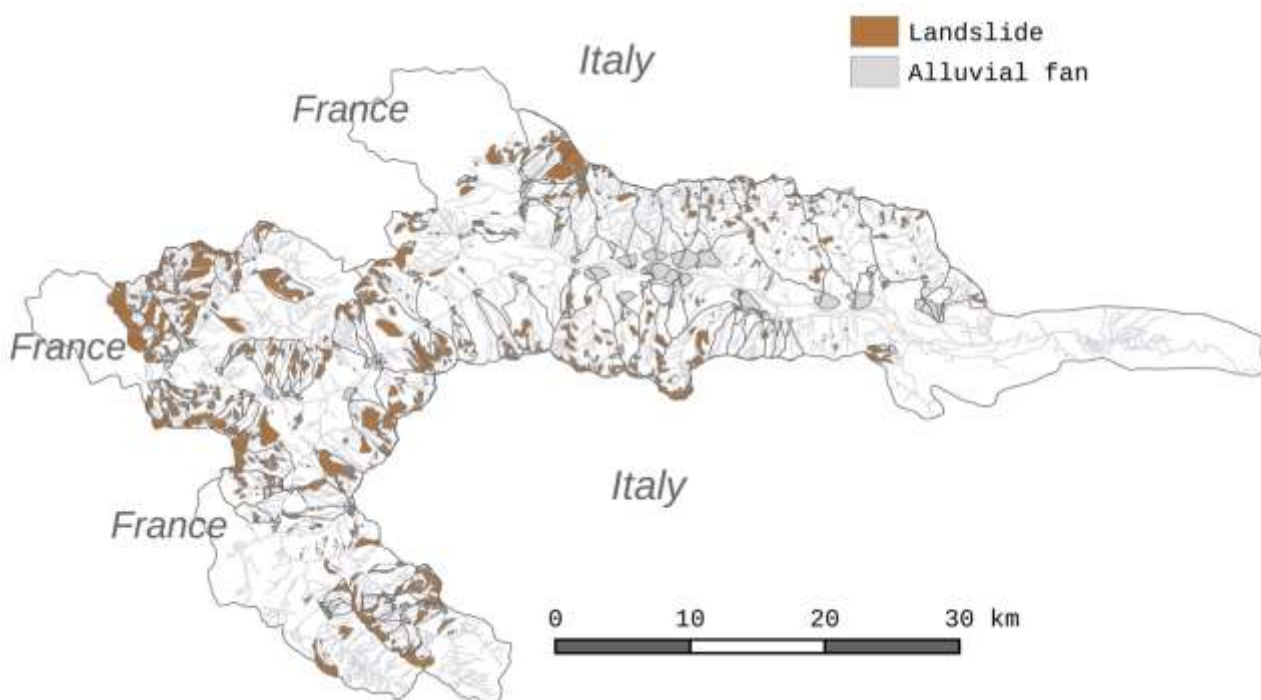


Figura 8 - Distribuzione spaziale delle frane in Valle di Susa, escluse le DGPV.

Caratterizzazione della copertura del suolo

Per quanto riguarda l'uso del suolo della Valle di Susa, le 35 diverse tipologie di uso del suolo rappresentate nella carta dell'uso del suolo a scala 1:10000 (IPLA, 2016) sono raggruppate in quattro macrocategorie (Figura 9) in base a caratteristiche simili: tutte le classi arboree e arbustive sono classificati come "bosco (forest)"; le aree prative e pastorali sono classificate come "prateria (grassland)"; le colture, i frutteti e i vigneti sono classificati come "area agricola (agricultural area)"; le aree antropizzate come "area urbana (urban area)" e il substrato roccioso affiorante, compresi i sub-affioramenti, sono classificati come "substrato roccioso (bedrock)" (Tabella 3).

| Gruppo uso del suolo | Area [km ²] | Distribuzione [%] |
|----------------------|-------------------------|-------------------|
| Prateria | 238,12 | 3,91 |
| Bosco | 358,96 | 48,09 |
| Area agricole | 3,63 | 0,49 |
| Area urbana | 5,51 | 0,74 |
| Substrato roccioso | 140,03 | 18,77 |

Tabella 3 - Macrocategorie di uso del suolo della Valle di Susa.

Quasi 600 km², corrispondenti all'80% della Valle di Susa, sono ricoperti da vegetazione. Le aree agricole e urbane insieme occupano poco più dell'1% della superficie totale e sono concentrate nella parte bassa della valle, fuori dai bacini selezionati. Le rocce affioranti ne coprono circa il 19%.

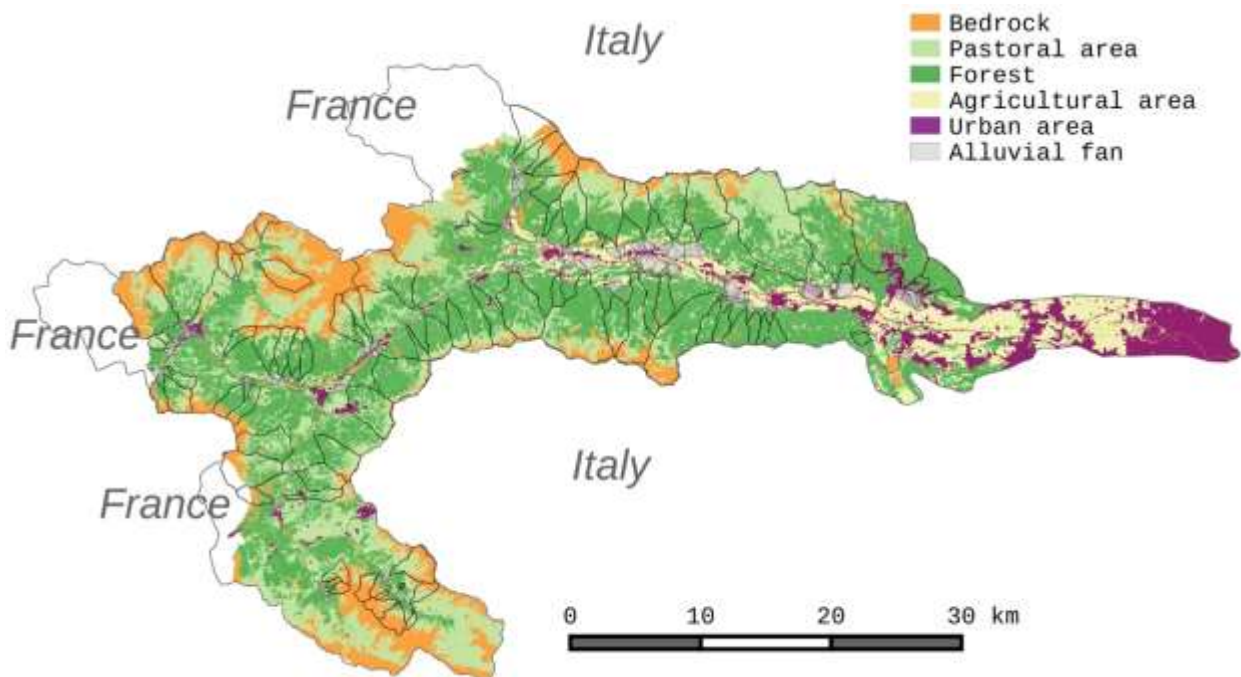


Figura 9 - Mappa delle macrocategorie derivate dalle classi di uso del suolo della Valle di Susa.

Analisi dei processi torrentizi storici

I processi torrentizi avvenuti in Valle di Susa sono stati scrupolosamente documentati: le fonti informative provengono da archivi comunali, pubblicazioni scientifiche o relazioni tecniche e raccolte in banche dati pubbliche (Banca Dati Geologica di Arpa Piemonte - <http://webgis.arpa.piemonte.it/bdgc/index.php> - integrata con dati provenienti dal CNR-IRPI - <http://polaris.irpi.cnr.it/>). Le informazioni includono la data di innesco, e a volte l'orario, l'ubicazione, il tipo di flusso (flusso liquido, flusso iperconcentrato e colata detritica) e i danni riportati da strutture e infrastrutture.

L'analisi della documentazione storica indica che solo 78 dei 208 bacini della Valle di Susa hanno riportato eventi dal 1728 al 2023 (Figura 10).

L'analisi ha restituito 415 eventi documentati nei bacini ECM, 305 nei BCM e solo 49 nei GCM. Il numero di eventi per classe CWI deve essere normalizzato in base all'area totale dei bacini ricadenti all'interno di ciascuna classe. I bacini ECM rappresentano la classe con la maggiore abbondanza di bacini (48), per una superficie totale di 227,91 Km², seguita dalla classe BCM (29 bacini per una superficie di 226,92 Km²), mentre la classe GCM è rappresentata da soli 49 bacini, occupando una superficie di 4,58 Km². La normalizzazione dell'occorrenza degli eventi per classe di bacino è espressa dal Relative Occurrence Index (ROI) (Tiranti et al., 2016) dato dal numero di eventi diviso per l'area totale coperta dai bacini riferita a ciascuna classe CWI (Tabella 4).

| | N. di DF | N. di HF | n. di WF | N. eventi totali |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| ECM | 84 | 222 | 97 | 415 |
| ROI | 0,37 | 0,97 | 0,43 | 1,82 |

| | | | | |
|------------|------|------|-----|------|
| BCM | 3 | 75 | 227 | 305 |
| ROI | 0,01 | 0,33 | 1 | 1,34 |

| | | | | |
|------------|------|------|---|-------|
| GCM | 43 | 6 | 0 | 49 |
| ROI | 9,39 | 1,31 | 0 | 10,70 |

Tabella 4 - Occorrenza degli eventi torrentizi per classe di bacino in Valle di Susa. Dove: DF sono le colate detritiche; HF sono i flussi iperconcentrati; WF sono le piene liquide.

I bacini ECM sono caratterizzati da un ROI di 1,82, mentre il BCM sono caratterizzati da 1,34. Sebbene il numero totale di eventi per GCM sia considerevolmente inferiore rispetto alle altre due classi, il valore ROI è 10,70, indicando un'elevata occorrenza di processi torrentizi.

In Tabella 4 è riportato anche il ROI calcolato distinguendo la tipologia di processo avvenuto: piene liquide (WF), flusso iperconcentrato (HF) e colata detritica (DF). Analizzando i valori del ROI nella Tabella 4, è chiaro che i bacini ECM generano un numero maggiore di trasporti di massa rispetto ai bacini BCM, che sono invece maggiormente interessati da piene liquide (Figura 12).

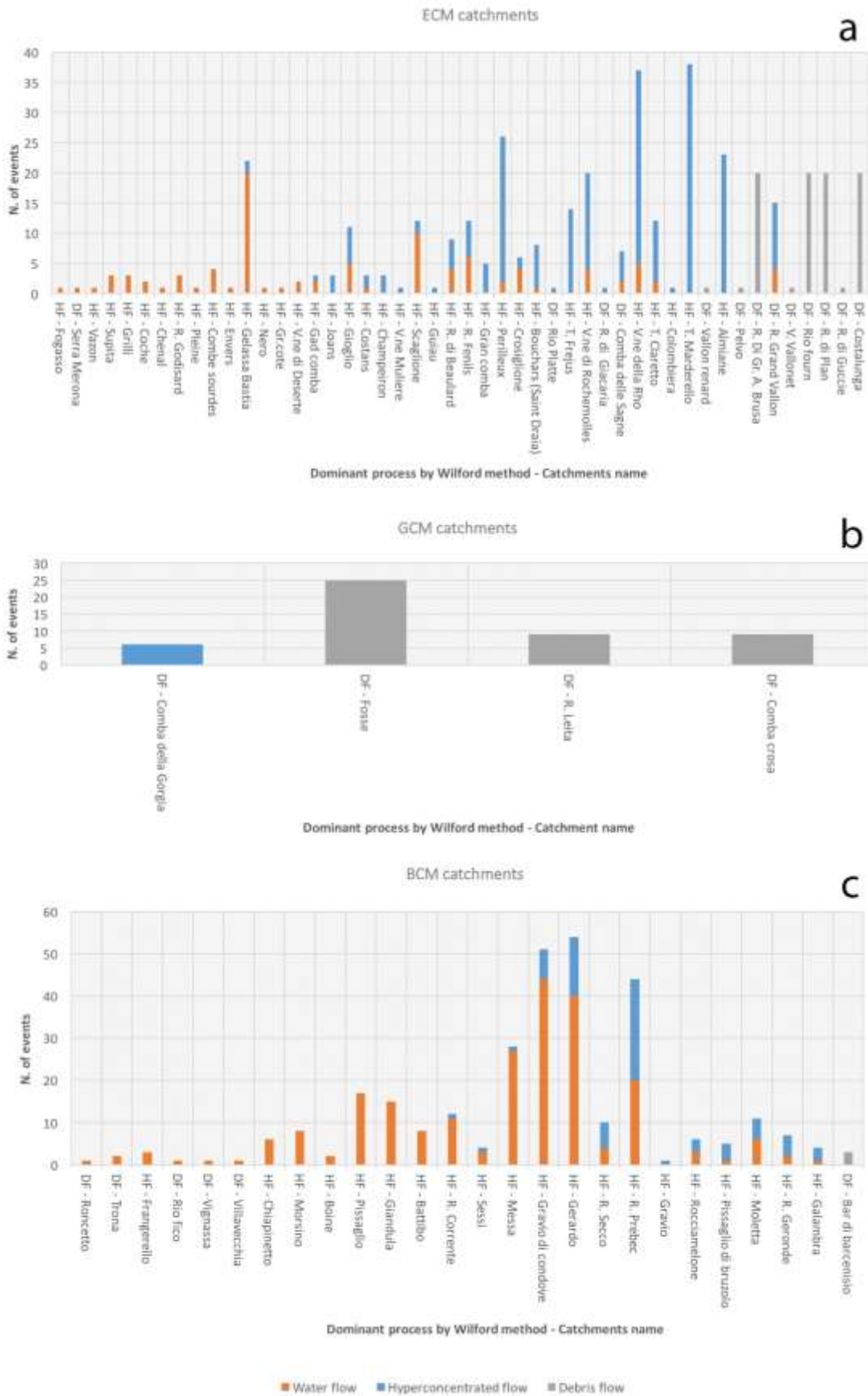


Figura 12 - Gli eventi torrentizi distinti per tipologia di processo che si sono verificati nelle tre classi di bacini CWI: a) bacini ECM; b) bacini GCM; c) bacini BCM.

Sebbene alcuni bacini ECM e BCM siano in grado di generare trasporti in massa secondo Wilford et al. (2004), per questi si riportano in Val di Susa prevalentemente piene liquide. Per interpretare questo risultato inaspettato e comprendere le ragioni del diverso comportamento, è necessario prendere in considerazione l'uso del suolo, la distribuzione delle frane e delle DGPV. Le figure seguenti correlano questi fattori con l'attività dei bacini (Figura 13a, b; Figura 14a, b; Figura 15, b).

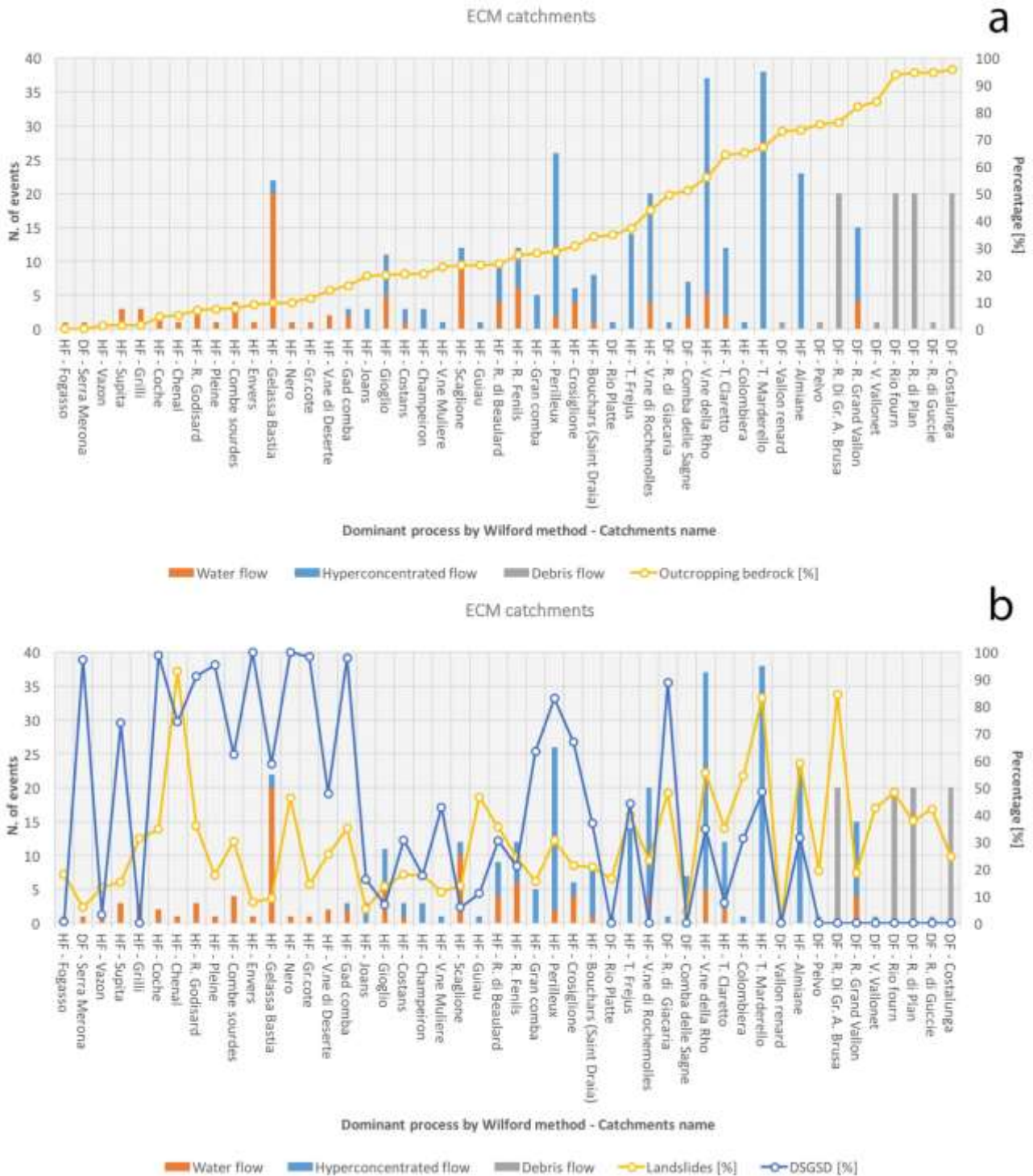


Figura 13 - (a) Correlazione tra eventi torrentizi e percentuale del substrato roccioso affiorante. (b) Distribuzione delle frane e DGPV [%] nei bacini ECM.

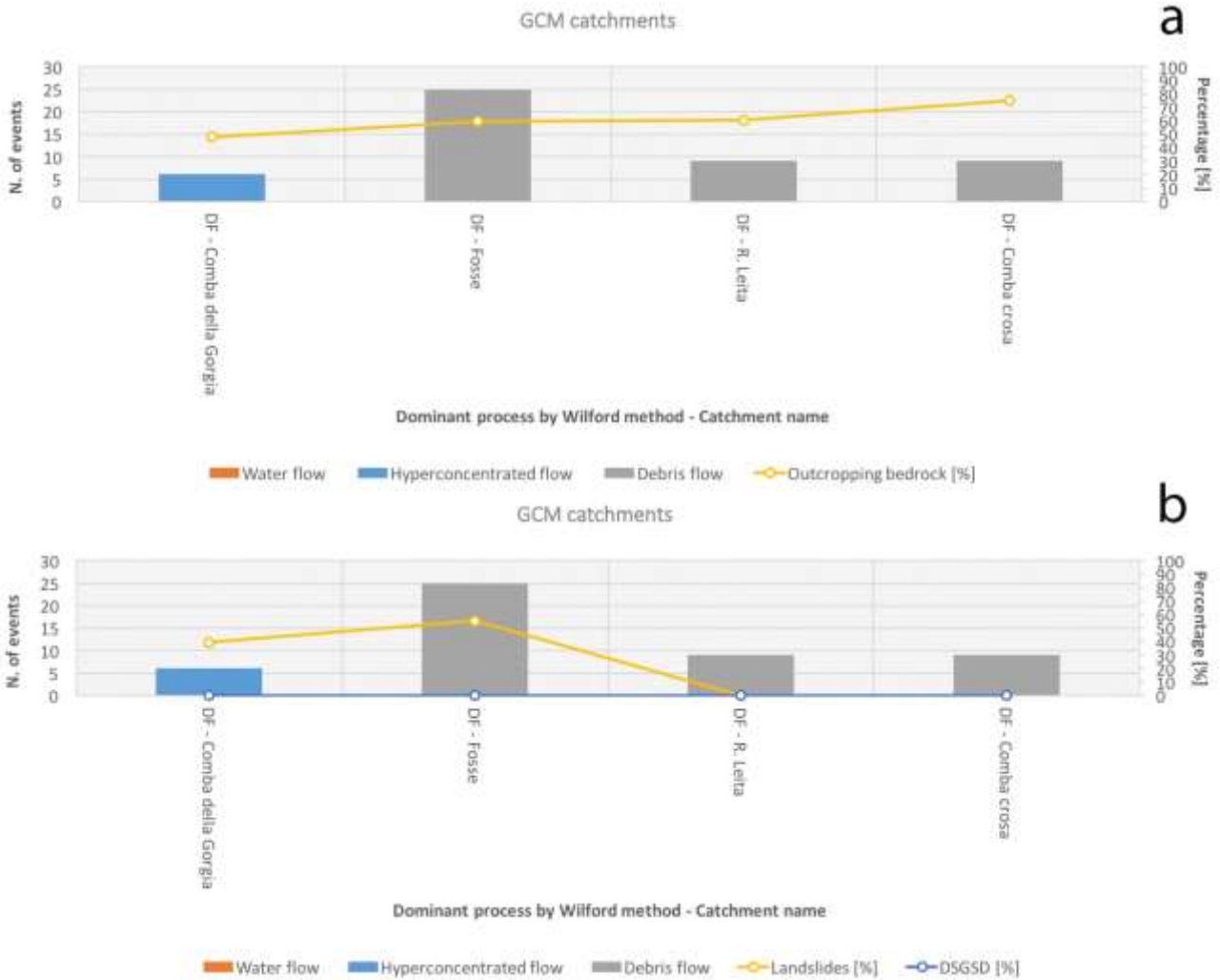


Figura 14 - (a) Correlazione tra eventi torrentizi e percentuale del substrato roccioso affiorante. (b) Distribuzione delle frane e DGPV [%] nei bacini del GCM.

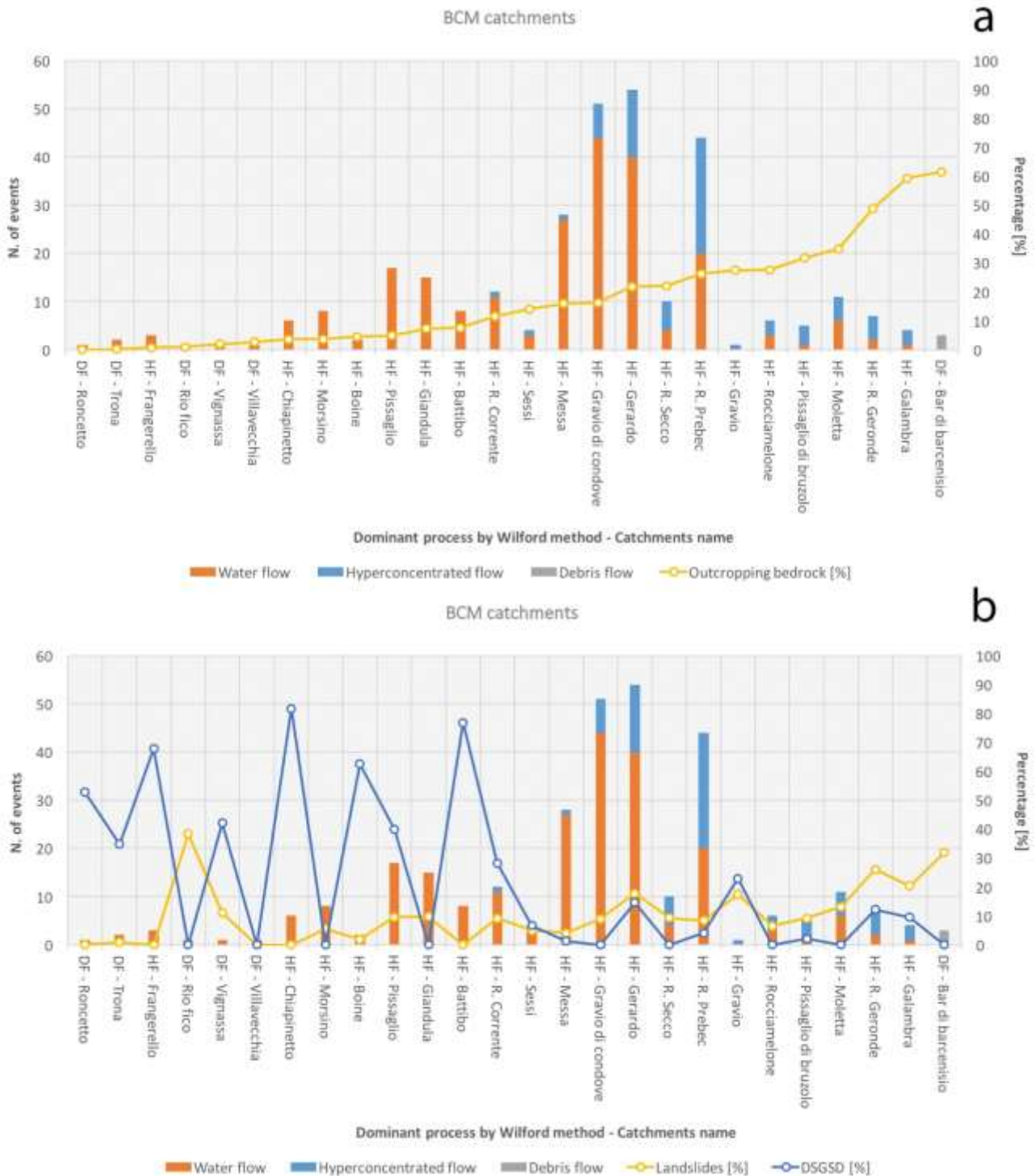


Figura 15 - (a) Correlazione tra eventi torrentizi e percentuale del substrato roccioso affiorante. (b) distribuzione delle frane e DGPV [%] nei bacini BCM.

L'analisi statistica multivariata (Johnson e Wichern, 1982) applicata ai bacini della Valle di Susa mostra che le colate detritiche e i flussi iperconcentrati sono rispettivamente fortemente e moderatamente correlate con la percentuale di substrato roccioso affiorante (coefficiente di correlazione di Pearson $\rho = 0,533$ con $p\text{-value} < 10^{-5}$, $\rho = 0,233$ con valore $p = 0,03$). Le piene liquide sono correlate negativamente con il substrato roccioso ($\rho = -0,364$ e valore $p = 0,002$). L'analisi mostra inoltre che le frane e le DGPV sono statisticamente correlate rispettivamente positivamente e negativamente con i substrati rocciosi affioranti. Come mostrato in Figura 16,

quando il substrato roccioso affiorante è maggiore del 10% potrebbero verificarsi processi di piena liquida, che diventano più probabili per valori superiori al 20%, soglia oltre la quale iniziano a verificarsi i flussi iperconcentrati. Questo valore sale al 59% per le colate detritiche.

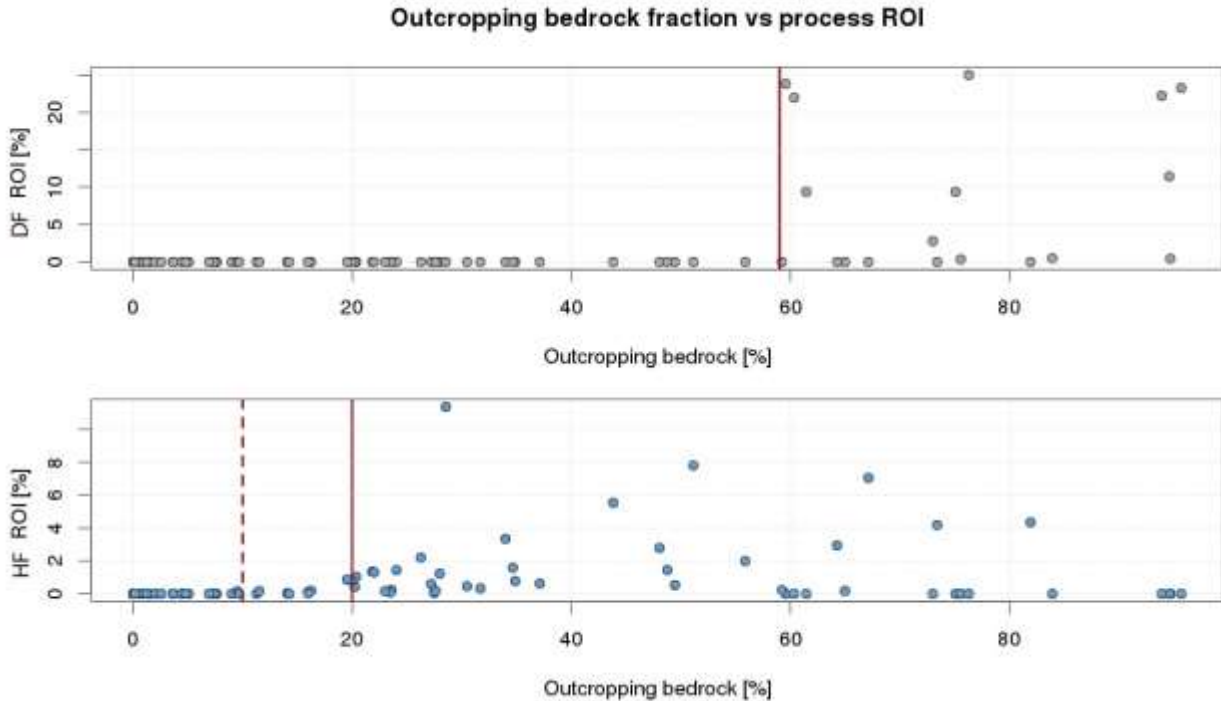


Figura 16 - Soglie di substrato roccioso affiorante per processo torrentizio.

La distribuzione dei processi torrentizi nei bacini studiati varia a seconda della classificazione. È più probabile che le piene liquide si verifichino nei bacini BCM piuttosto che negli ECM, mentre accade il contrario per le colate detritiche. I flussi iperconcentrati sono equamente distribuiti in entrambe le tipologie di bacini. I bacini GCM non sono stati considerati in tale trattazione a causa della dimensione limitata del campione statistico.

CONCLUSIONI

In sintesi, il verificarsi dei processi torrentizi dipende da molteplici fattori, classificabili come innescanti, predisponenti e mitiganti. Come precedentemente sottolineato, il principale fattore scatenante dei processi torrentizi sono le forti precipitazioni che ne precedono l'innescio. Partendo dall'analisi delle informazioni storiche sugli eventi torrentizi del passato, il presente contributo ha indagato i fattori che determinano la tipologia e l'occorrenza dei fenomeni torrentizi in Val di Susa. Le condizioni maggiormente responsabili di questi fenomeni sono state individuate e distinte in fattori predisponenti e scatenanti. Sono stati raccolti e analizzati oltre 769 processi torrentizi documentati, verificatisi dal 1728 al 2015 in 78 bacini idrografici della Valle di Susa. I set di dati relativi al clima, alla geologia e alla morfologia, all'uso del territorio e alla presenza di frane storiche sono stati elaborati come input di analisi statistiche multivariate per caratterizzare il comportamento dei piccoli bacini alpini sede di processi torrentizi. I bacini studiati sono stati classificati in base al Clay Weathering Index, al Geological Strength Index e a Wilford et al. (2004) per stabilire il ruolo della litologia e dell'assetto morfometrico come fattori predisponenti l'innescio dei processi torrentizi. In alcuni bacini potenzialmente soggetti al trasporto in massa, secondo Wilford et al. (2004), sono stati registrati solo processi di piena liquida. Per comprendere il motivo di questo comportamento inaspettato, sono stati presi in considerazione l'uso del suolo, la distribuzione delle frane e delle DGPV all'interno dei bacini indagati.

Tra i fattori predisponenti, le caratteristiche litologiche del bacino (CWI e GSI) e le impostazioni morfometriche (Wilford et al. 2004) giocano un ruolo chiave. Tuttavia, indipendentemente dalla classe di CWI/GSI presa in considerazione, è chiaro che il principale fattore determinante il tipo di processo torrentizio è la percentuale di affioramento del substrato roccioso (Figura 13, Figura 14 e Figura 15). Una maggiore percentuale di substrato roccioso affiorante favorisce la produzione di detriti, che costituisce la principale fonte di materiale mobilizzabile. Sebbene le frane possano comunque rappresentare un'importante fonte di sedimento in caso di attivazione, non influenzano le caratteristiche del processo torrentizio (Figura 13b, Figura 14b e Figura 15b). Anche le DGPV (Figura 13b, Figura 14b e Figura 15b) non influenzano particolarmente il comportamento dei processi torrentizi. Questo risultato può essere spiegato considerando che le DGPV interessano principalmente versanti formati da rocce scistose a grana fine (classificati come ECM), che sono già caratterizzati da proprietà geomeccaniche molto scadenti (vedi corrispondente classe GSI in Tabella 1), producendo grandi quantità di detriti anche in assenza di DGPV. Pertanto, il bilancio di disponibilità di materiale mobilizzabile in un determinato bacino dipende principalmente da un'elevata percentuale di substrato roccioso affiorante.

Di conseguenza, la vegetazione sembra essere il principale fattore mitigante per i trasporti in massa torrentizi. La vegetazione controlla l'infiltrazione, aumentando la superficie di run-in e riducendo il run-off grazie agli apparati radicali. Il ruolo della vegetazione è particolarmente evidente nei bacini ad elevata vegetazione, raramente soggetti a processi torrentizi e, in particolare, a movimenti di massa (HF e DF).

Le popolazioni vegetali più efficaci nella mitigazione dei processi torrentizi sono le foreste, perché i detriti vegetali che si accumulano sui suoli forestali favoriscono l'infiltrazione dell'acqua e l'orizzonte umido sottostante immagazzina acqua, rallentando così il deflusso superficiale e subsuperficiale (Figura 9). Le chiome intercettano e trattengono parzialmente la pioggia, riducendo l'energia di impatto delle gocce e la velocità del flusso della lama d'acqua fino a quattro volte rispetto al suolo nudo, con una conseguente riduzione di 16 volte del tasso di erosione (Campbell, 1974, 1975; Cannon et al. al., 2001, 2008; Lancaster et al., 2003; Shakesby e Doerr, 2006).

I risultati mostrano che la percentuale di affioramento del substrato roccioso è il fattore predisponente dominante che determina il tipo e la frequenza dei processi torrentizi. Se l'area del substrato roccioso affiorante è maggiore del 20% favorisce la generazione di flussi iperconcentrati e le colate detritiche per valori maggiori del 59%. La distribuzione delle frane e delle DGPV non influenza di norma il comportamento dei processi torrentizi.

Questa evidenza consente di distinguere con minore incertezza la tipologia di processo torrentizio che si può verificare nei bacini alpini in generale e in particolare, per questa trattazione, in Val di Susa.

Il Rio Frejus

Il bacino idrografico del Rio Frejus, situato alla testata della Val di Susa (Alta Valle di Susa, Comune di Bardonecchia, Torino), si estende su una superficie di circa 22 km² ed è composto da diversi sottobacini: Comba Merdovine, Comba del Frejus, Comba Gaudet, Comba Cougna, Comba Gautier e Rio Chaulet (Figura 17).

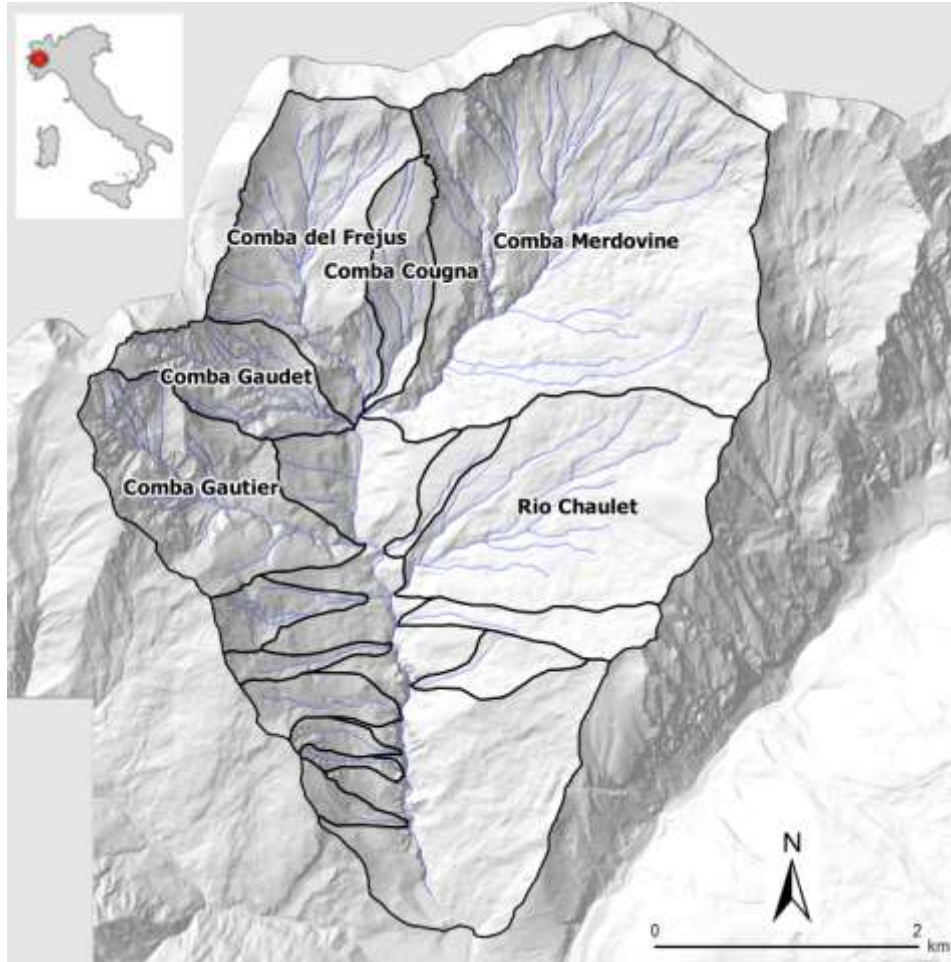


Figura 17 - Bacino idrografico del Rio Frejus e i suoi sottobacini.

Il Rio Frejus è caratterizzato da una complessa geomorfologia dovuta all'azione combinata di diversi processi, come frane, crolli in roccia, flussi detritici e processi criotici (degradazione del permafrost e processi nivali) alla testa dei bacini idrografici. I depositi superficiali legati all'attività glaciale sono poco frequenti e quasi completamente rielaborati dall'azione fenomeni torrentizi e franosi.

Il substrato roccioso del Rio Frejus appartiene principalmente all'Unità Tettonostratigrafica del Lago Nero (Polino et al., 2002), formata da carbonati e da calcescisti filladici. Gli affioramenti di serpentiniti, ofioliti e quarziti sono subordinati. Le percentuali di affioramento sono costituite dal 74,2% di depositi superficiali (compresa la copertura colluviale), dal 27,28% di scisti, dallo 0,22% di serpentini/ofioliti e dallo 0,03% di quarziti (Figura 18).

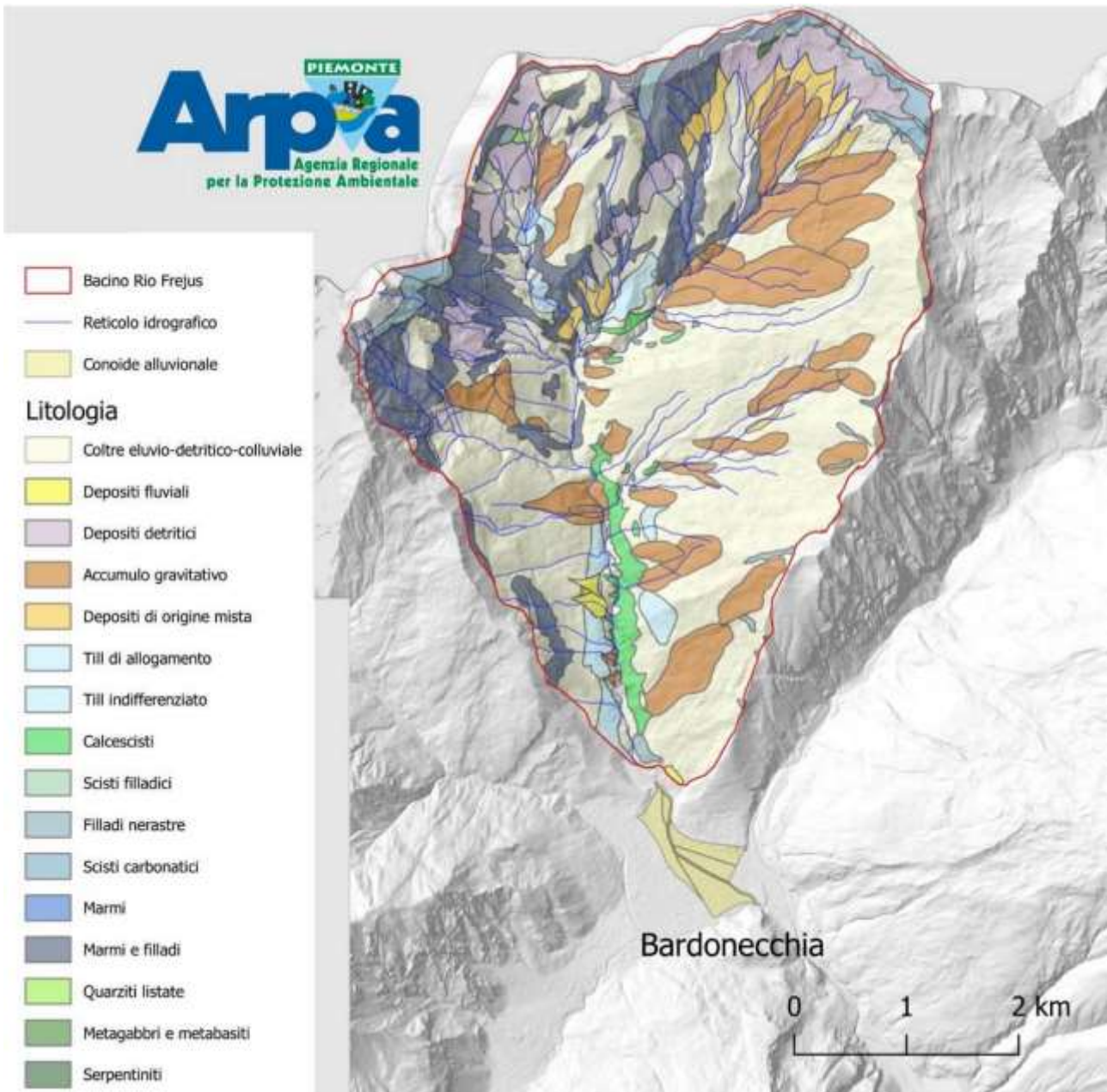


Figura 18 - Mappa litologica di dettaglio del bacino del Rio Frejus.

L'assetto strutturale principale è rappresentato da contatti debolmente inclinati e da faglie subverticali. Gli ammassi rocciosi intensamente fratturati presentano scarse caratteristiche geomeccaniche. I calcescisti, molto filladici, sono estremamente disgregabili e facilmente soggetti all'alterazione da parte degli agenti atmosferici con una conseguente alta produzione di materiale sciolto caratterizzato da un'alta percentuale di sedimenti fini. Le caratteristiche principali del Rio Frejus sono riportate nella Tabella 5.

| | |
|--|--|
| Area planare del bacino [km ²] | 22,32 |
| Inclinazione media del bacino [°] | 28,1 |
| Quota media [m slm] | 2169 |
| Area del conoide alluvionale [km ²] | 0,63 |
| Rapporto area bacino/area conoide [%] | 2,83 |
| Area totale in affioramento (depositi quaternari e rocce) [km ²] | 11,91 |
| Are in affioramento (rocce) [km ²] | 3,28 |
| Are in affioramento (depositi quaternari) [km ²] | 8,63 |
| Densità di affioramento (rocce) [%] | 14,69 |
| Densità di affioramento (depositi quaternari) [%] | 38,67 |
| Area copertura eluvio-detritico-colluviale [km ²] | 10,42 |
| Area copertura eluvio-detritico-colluviale [%] | 46,68 |
| Condizione media degli ammassi rocciosi | Fratturato/deformato |
| Tipo prevalente di deposito superficiale | <i>clast supported</i> , coesione scarsa |
| Reologia predominante dei flussi detritici | viscoplastica |
| Stile deposizionale dominante delle colate detritiche | Cordoli asimmetrici con fianchi ripidi e lobi piatti |

Tabella 5 - Sintesi delle caratteristiche del bacino del Rio Frejus.

Caratterizzazione dei processi torrentizi del Rio Frejus

In questa trattazione viene presentato uno studio integrato per ottenere informazioni sui potenziali pericoli legati alle colate detritiche. La metodologia proposta parte dalla classificazione del bacino e dalla caratterizzazione dei principali processi attivi. Considerando le caratteristiche del substrato litologico dominante nell'area (Tiranti et al., 2014) è possibile dedurre una potenziale frequenza di occorrenza di trasporti in massa, l'intensità di pioggia necessaria al loro innesco, la stagionalità prevalente di occorrenza, le caratteristiche sedimentologiche e reologiche delle colate detritiche (viscosità, propagazione e stile deposizionale). La seconda fase consiste nella caratterizzazione delle aree sorgenti per il detrito mobilizzabile, compreso il loro grado di connessione al canale principale, utilizzando un indice di connettività dei sedimenti (IC) proposto da Cavalli et al. (2013). La fase finale riguarda la propagazione e la deposizione di materiale proveniente dalle aree sorgenti, effettivamente collegate alla rete di canali, e di conseguenza potenzialmente prese in carico dai processi torrentizi mediante un modello ad automi cellulari (Deangeli, 2008) che simula i meccanismi di propagazione e deposizione del flusso detritico. Uno dei vantaggi dell'approccio integrato presentato risiede nel fatto che non è necessario simulare eventi di colata detritica storici per definire le aree di deposizione, poiché tale approccio tiene conto di un volume probabile basato sulla disponibilità e distribuzione delle aree sorgenti, di un'area deposizionale compatibile con l'architettura del conoide alluvionale e il comportamento dei processi caratteristici del bacino (secondo le classificazioni CWI, di Wilford e la percentuale di affioramento roccioso precedentemente descritte). Lo scopo delle simulazioni è quello di riprodurre lo stile deposizionale predominante osservato in conoide alluvionale e lungo il canale. In questo modo, il modello può essere applicato in assenza di un rapporto dettagliato (magnitudo effettiva, aree di deposizione, ecc.) di un evento di trasporto in massa utilizzato come test di calibrazione.

Indice di connettività dei sedimenti (IC)

Il Sediment Connectivity Index (IC) è stato originariamente proposto da Borselli et al. (2008) con un'applicazione ai bacini idrografici agricoli. Cavalli et al. (2013) hanno apportato importanti modifiche a questo approccio per sfruttare i vantaggi dei modelli digitali del terreno (DTM) ad alta

risoluzione e per renderlo adatto alle applicazioni in ambiente montano. L'IC è un indice morfometrico distribuito focalizzato sull'influenza della topografia sulla connettività dei sedimenti che rappresenta il grado di accoppiamento tra diverse porzioni del bacino rispetto a un obiettivo selezionato (ad esempio, la rete principale di canali).

Matematicamente l'IC è espresso dal logaritmo del rapporto tra le componenti della pendenza ascendente e di quella discendente (Eq. 1):

$$IC = \log \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) \text{ (Eq. 1)}$$

Questo indice indica il potenziale di instradamento verso il basso dei sedimenti prodotti a monte sul versante e la lunghezza (ponderata) del percorso del flusso fino al bersaglio o alla concavità più vicina.

Per modellare l'impedenza al deflusso e ai flussi di sedimenti, in entrambi i componenti dell'IC è incluso un fattore di ponderazione. Nei bacini montani, i DTM ad alta risoluzione possono rappresentare un input importante per derivare la rugosità superficiale al fine di includere una misura oggettiva dell'impedenza del flusso nella valutazione della connettività. È stato calcolato l'indice di rugosità come deviazione standard della topografia residua secondo Cavalli et al., (2008). L'indice di rugosità è stato utilizzato per calcolare il fattore di ponderazione utilizzando la seguente equazione (Eq. 2) (Cavalli et al., 2013):

$$W = 1 - \left(\frac{RI}{RI_{max}} \right) \text{ (Eq. 2)}$$

Dove RI è il valore dell'indice di rugosità e RI_{max} è il valore massimo di RI nell'area di studio.

Poiché il DTM dell'area di studio ha una risoluzione di 5 metri, è stato considerato come scala spaziale ottimale una finestra mobile di 3x3 pixel al fine di ricavare un indice di rugosità correlato all'impedenza del flusso e il relativo fattore di ponderazione.

La determinazione delle informazioni necessarie per individuare le aree sorgenti è stata effettuata mediante rilievi sul campo abbinati all'analisi della cartografia esistente (carte geologiche e geomorfologiche regionali).

È stata effettuata una valutazione della connettività dei sedimenti basata sul calcolo dell'IC (Cavalli et al., 2013) al fine di selezionare le aree effettivamente accoppiate al sistema principale di canali (ovvero, le aree responsabili della fornitura di sedimento). I risultati di questa analisi sono stati interpretati e integrati con osservazioni sul campo per caratterizzare i modelli di connettività a scala di bacino con particolare attenzione alle aree sorgenti.

Il sistema di drenaggio principale è stato estratto su base empirica dal DTM, adottando un approccio a soglia (Figura 19) per estrarre una rete sintetica corrispondente alla presenza di linee di drenaggio permanenti dalle prove sul campo. La principale rete di drenaggio permanente è stata selezionata come obiettivo per l'analisi IC.



Figura 19 - Bacino del Rio Frejus. La principale rete di drenaggio permanente è evidenziata ed è stata selezionata come obiettivo per l'analisi IC.

È stata utilizzata l'estensione del sistema di canali principale per determinare l'area soglia per l'estrazione della rete di corsi d'acqua (ovvero 4,8 km²). La mappa IC, la rugosità superficiale e il fattore di ponderazione sono stati calcolati utilizzando l'applicazione SedInConnect (Crema et al., 2015, Crema e Cavalli, 2018).

Modello ad automi cellulari

I modelli di propagazione e deposizione del flusso detritico sono stati simulati da un codice numerico 3D basato sul metodo degli automi cellulari (Segre e Deangeli, 1995; Deangeli, 2008). In questo codice il dominio computazionale è discretizzato in celle quadrate elementari. Ciascuna cella è caratterizzata da colonne di substrato rigido e materiale detritico mobilizzabile. Il volume del

materiale detritico è caratterizzato da parametri reologici, dipendenti dalla legge costitutiva scelta. Vengono implementate due leggi costitutive: una legge di attrito/collisione (Segre e Deangeli, 1995), basata sul comportamento del fluido dilatante di Bagnold (Takahashi, 1978; 1991), e una legge viscoplastica (Deangeli et al., 2013; Tiranti e Deangeli, 2015), basata sul comportamento dei fluidi di Bingham. La miscela solido-liquido è considerata un fluido monofase.

L'equazione di conservazione della quantità di moto lineare, il bilancio di massa e la legge costitutiva vengono combinati e integrati per ottenere la velocità del flusso. La velocità media viene utilizzata per il calcolo della portata in ciascuna cella.

L'evoluzione del sistema avviene in passi temporali discreti, in base al criterio di Courant. Ad ogni passo temporale, in ciascuna cella viene verificata una regola di inizio dipendente dalla reologia del flusso. Se la regola di inizio è soddisfatta per una cella, viene calcolata e memorizzata una portata di sedimento, proporzionale al passo temporale. Quando tutte le celle vengono controllate, il sistema viene aggiornato contemporaneamente, alla fine del time-step. La deposizione e la rimobilizzazione dei detriti possono verificarsi in ogni fase temporale e quando nessuna cella è in grado di ricevere o fornire una quantità adeguata di miscela solido-liquida la simulazione termina. Questo strumento numerico è stato applicato con successo per analizzare esperimenti sui canali (Deangeli, 2008) e il comportamento evolutivo dei flussi reali, avvenuti in diversi ambienti e contesti (Deangeli e Grasso 1996; Deangeli e Giani, 1998; Deangeli et al., 2013; Tiranti e Deangeli, 2015; Deangeli et al., 2015).

Le analisi numeriche per la definizione degli scenari deposizionali sono state effettuate per ciascun sottobacino in regime viscoplastico (fluido di Bingham), in quanto il bacino è stato classificato come Excellent Clay Maker. I parametri reologici, ovvero il carico di snervamento e la viscosità del fluido, utilizzati nelle prove numeriche si basano su uno studio di Tiranti e Deangeli (2015). In questo studio, gli autori hanno analizzato gli stili e gli scenari di deposizione di diversi bacini, nonché del canale principale del Rio Frejus. Hanno stimato la resistenza allo snervamento dallo sforzo di taglio basale medio al momento della deposizione e la viscosità dalla velocità massima del flusso di detriti. Tiranti e Deangeli (2015) hanno riscontrato che il carico di snervamento è pari a $\tau_y=1400$ e la viscosità è pari a $\mu=80$ Pa*s assumendo una concentrazione solida pari a $C=0,4$. Un'analisi degli stili deposizionali, della sensibilità alla resistenza, allo snervamento e alla viscosità, ha indicato che per il Rio Frejus il modello di deposizione non varia sostanzialmente nell'intervallo $\tau_y=1400-2000$ Pa e $\mu=80-100$ Pa*s. Sulla base di questo risultato, nelle nostre analisi numeriche abbiamo utilizzato i seguenti valori di carico di snervamento e viscosità: $\tau_y=1400$ Pa, $\mu=80$ Pa*s.

RISULTATI

Questa sezione riporta i risultati dello studio integrato passo dopo passo per sottolineare il singolo contributo di ciascun metodo e come questi possano fornire risultati più esaustivi rispetto a quelli risultanti da approcci più classici basati solo sull'output del modello di propagazione delle colate detritiche calibrato su eventi storici (Bertolo e Bottino 2008; Pirulli e Marco 2010) applicati in contesti geologici e geomorfologici simili.

Classificazione CWI del Rio Frejus

Sulla base delle caratteristiche litologiche dominanti del substrato roccioso riportate nella sezione introduttiva, il Rio Frejus è classificato come eccellente produttore di argilla (ECM) in base alla classificazione CWI (Tiranti et al., 2014) (Tabella 6).

| Tipo di affioramento | Struttura*/Tessitura | Coesione/Resistenza** | Litologia dominante | Area (km ²) | % |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| Depositi glaciali | Clast supported | Cohesive | Scisti (ECM) | 0,28 | 2,37 |
| Detrito di falda | Openwork | Non-cohesive | Rocce cristalline (BCM) | 0,04 | 0,34 |
| Detrito di falda | Openwork | Non-cohesive | Scisti (ECM) | 1,96 | 16,49 |
| Conoide alluvionale | Clast supported | Poorly-cohesive | Scisti (ECM) | 0,06 | 0,49 |
| Diamicton | Clast supported | Poorly-cohesive | Scisti (ECM) | 0,09 | 0,72 |
| Depositi glaciali | Clast supported | Poorly-cohesive | Scisti (ECM) | 0,35 | 2,96 |
| Depositi di frana | Clast supported | Poorly-cohesive | Rocce cristalline (BCM) | 0,43 | 3,68 |
| Depositi di frana | Clast supported | Poorly-cohesive | Scisti (ECM) | 5,41 | 45,42 |
| Serpentiniti | Blocky | Extremely strong | Rocce cristalline (BCM) | 0,03 | 0,22 |
| Marmi e filladi | Blocky/Disturbed/Seamy | Medium strong | Scisti (ECM) | 2,37 | 19,87 |
| Scisti carbonatici | Blocky/Disturbed/Seamy | Medium strong | Scisti (ECM) | 0,17 | 1,42 |
| Calcarei laminate e argilliti | Blocky/Disturbed/Seamy | Medium strong | Scisti (ECM) | 0,24 | 2,05 |
| Black shales | Laminated/Sheared | Medium strong | Scisti (ECM) | 0,36 | 2,97 |
| Calcescisti | Very Blocky | Strong | Scisti (ECM) | 0,12 | 0,97 |
| Quarziti | Very Blocky | Very strong | Rocce cristalline (BCM) | 0,004 | 0,03 |

Tabella 6 - Litologie dominanti del Rio Frejus. Il substrato roccioso e i depositi sono classificati secondo la classificazione CWI in base alle caratteristiche delle litofacies che formano i sedimenti dei depositi e le rocce del substrato roccioso. (*) sensu Marinis e Hoek (2001); (**) sensu Hoek e Brown (1997).

A causa della litologia dominante (scisti ricchi in fillosilicati), il bacino è caratterizzato da un'altissima produzione di materiale non consolidato ricco di argilla o minerali argillosimili. Questo materiale favorisce la formazione di colate detritiche coesive che presentano una reologia viscoplastica, come risultante dall'analisi di resoconti storici sui processi torrentizi avvenuti nel bacino del Rio Frejus (Tabella 7).

| Sottobacino | Giorno | Mese | Anno | Processo osservato in conoide | Stagione |
|-------------|--------|------|------|-------------------------------|-----------|
| - | ? | 7 | 1914 | ? | Estate |
| - | ? | 9 | 1920 | ? | Estate |
| - | 3 | 8 | 1934 | Mud-debris HF | Estate |
| - | 12 | 6 | 1947 | ? | Primavera |
| - | 5 | 9 | 1948 | ? | Estate |
| Merdovine | 2 | 5 | 1949 | Mud-debris HF | Primavera |
| Merdovine | 27 | 5 | 1951 | Mud-debris HF | Primavera |
| - | 21 | 6 | 1954 | Mud-debris HF | Estate |
| - | 21 | 8 | 1954 | Mud-debris HF | Estate |
| - | 8 | 6 | 1955 | Mud flow | Primavera |
| - | 14 | 6 | 1957 | ? | Primavera |
| - | 19 | 10 | 1966 | ? | Autunno |
| - | 4 | 11 | 1968 | Mud-debris HF | Autunno |
| Gautier | 7 | 8 | 1997 | Mud-debris HF | Estate |
| Gautier | 21 | 6 | 2002 | Mud-debris HF | Estate |
| Gautier | 6 | 8 | 2004 | Mud-debris HF | Estate |

| Sottobacino | Giorno | Mese | Anno | Processo osservato in conoide | Stagione |
|----------------------------|--------|------|------|-------------------------------|----------|
| Gautier | 25 | 7 | 2006 | Mud-debris HF | Estate |
| Gautier, Merdovine, Gaudet | ? | 8 | 2006 | Mud flow | Estate |
| Merdovine | 7 | 8 | 2009 | Mud-debris HF | Estate |
| Gautier | 16 | 7 | 2013 | Mud flow | Estate |
| - | 17 | 7 | 2013 | Mud flow | Estate |
| - | 9 | 8 | 2015 | Mud flow | Estate |
| - | 8 | 8 | 2017 | Mud-debris HF | Estate |
| Merdovine | 13 | 8 | 2023 | Mud-debris HF | Estate |

Tabella 7 - Processi osservati avvenuti tra il 1914 e il 2023.

Le colate detritiche avvenute lungo il Rio Frejus mostrano un'elevata viscosità e in media il 45% del materiale si deposita comunemente lungo i canali mentre il 55% dei sedimenti raggiunge il conoide alluvionale come colata di fango o colata di fango/detriti (Tiranti e Deangeli, 2015) come mostrato in Figura 20.



Figura 20 - Un esempio della principale tipologia di processo torrentizio che più frequentemente raggiunge l'area di conoide del Rio Frejus (6 agosto 2004).

Per questo motivo, il conoide alluvionale del Rio Frejus presenta un'area piuttosto piccola ("starved alluvial fan" *sensu* Tiranti e Deangeli, 2015) rispetto al bacino alimentante (vedi Figura 18 e Tabella 5), in accordo con la classificazione CWI.

Indice di connettività e aree sorgenti

Sono state identificate estese aree sorgenti prospicienti i canali del Rio Frejus, principalmente costituite da depositi di frana (Figura 21) tipicamente incise da diversi canali (Figura 22a), che coprono il 58% del bacino idrografico, con il 35% di fenomeni attivi. I punti di innesco delle colate detritiche più frequenti si verificano in corrispondenza dei depositi di frana erosi dalla rete di canali. In queste zone i sedimenti sono caotici ed eterometrici, caratterizzati da una matrice prevalente ghiaiosa e limoso argillosa. Questi depositi rappresentano la principale fonte sedimentaria di sedimenti erodibili.

Inoltre, la copertura colluviale (<2 m) sui pendii ripidi è interessata da frane superficiali e da diffusa erosione. Tuttavia, la più importante fonte di sedimenti è rappresentata dall'abbondante presenza di depositi di colate detritiche lungo il canale principale (Figura 22b).

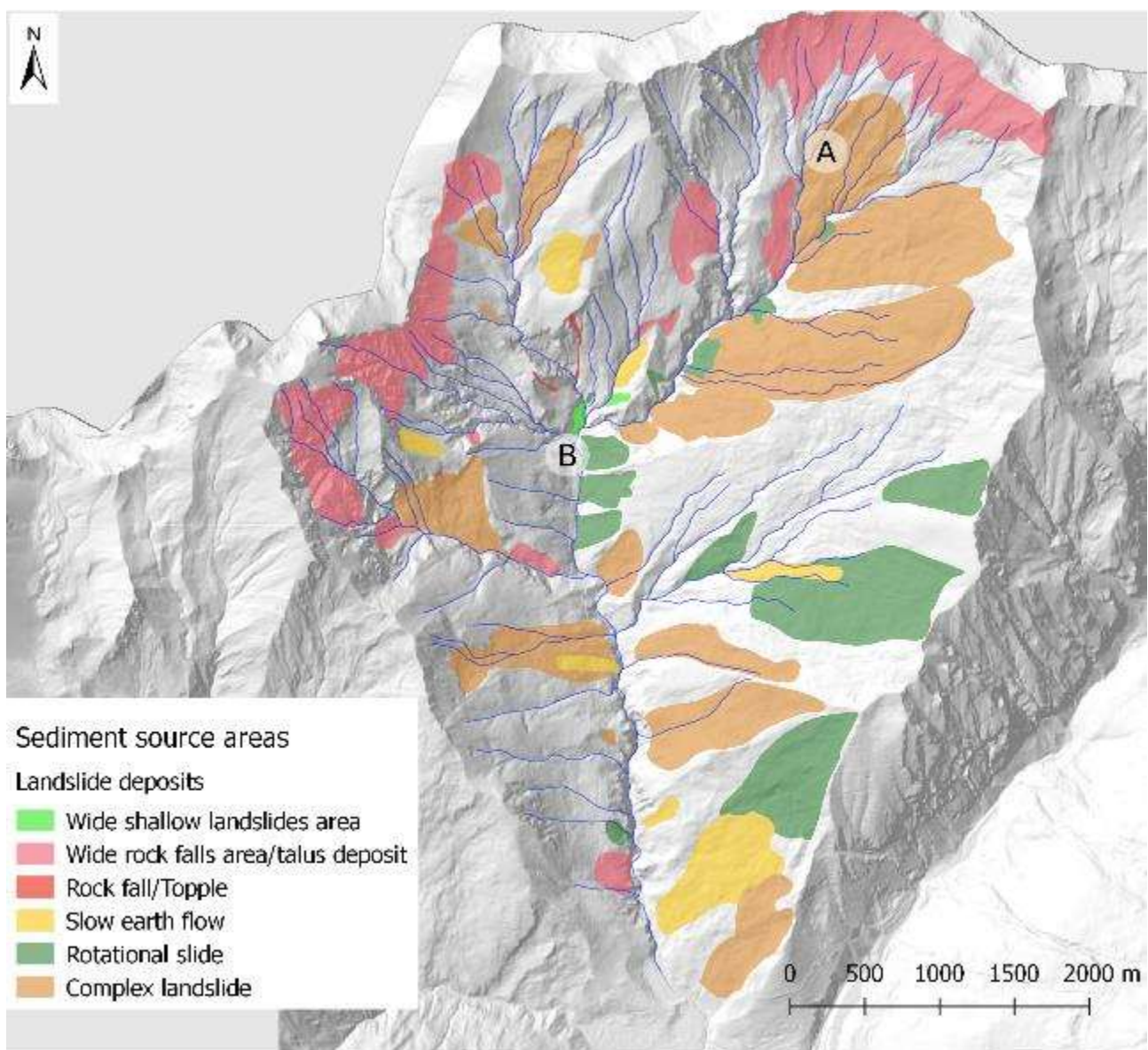


Figura 21 - Distribuzione delle aree sorgenti all'interno del bacino idrografico del Rio Frejus. A e B rappresentano la posizione dei depositi di esempio mostrati nella Figura 22.



Figura 22 - Esempio di depositi localizzati alla testata del bacino del Rio Frejus: (a) Un deposito di frana a lenta evoluzione inciso da canali. (b) Uno spesso deposito di colata detritica in prossimità di un canale principale inciso situato alla testata del bacino.

La mappa IC (Figura 23a), risultante dall'analisi riportata nella sezione precedente, è stata suddivisa in 4 classi (Bassa, Medio-Bassa, Medio-Alta, Alta) utilizzando la classificazione Natural Breaks (Jenks, 1967), come proposto da Crema e Cavalli (2018) e Tiranti et al. (2016a).

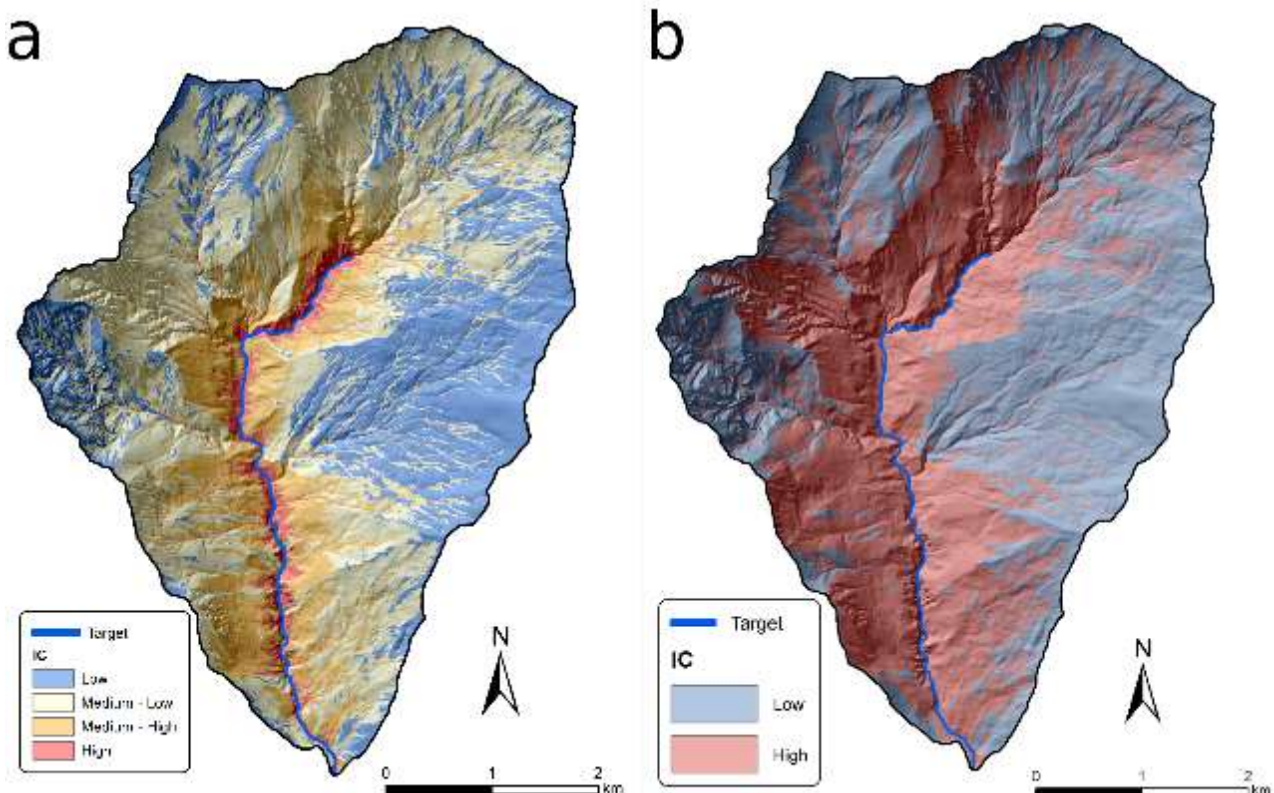


Figura 23 - (a) Risultati dell'analisi IC con il canale principale come target. I risultati sono divisi in quattro classi secondo l'algoritmo Natural Breaks. (b) Risultati dell'analisi IC che raggruppano i valori in due classi.

La Figura 23b mostra i risultati dell'analisi IC basata su due classi (alta/bassa). Questa analisi è stata effettuata per evidenziare aree potenzialmente accoppiate e disaccoppiate. La Figura 23 mostra chiaramente che tre sottobacini sembrano caratterizzati da un generale comportamento

disaccoppiato. Due di questi sottobacini, situati nella porzione superiore e occidentale del bacino principale, mostrano segni di attività geomorfologica e processi erosivi attivi, ma è possibile rilevare anche una barriera di disaccoppiamento strutturale allo sbocco di questi sottobacini. Questa barriera fisica potrebbe spiegare il fatto che i bassi valori di IC a monte giochino un ruolo importante nell'evoluzione geomorfologica del bacino. A differenza di questi due casi, i sottobacini disaccoppiati nella porzione orientale non mostrano importanti processi erosivi in corso. La disconnessione qui potrebbe essere correlata alla presenza di aree pianeggianti e pendii più dolci che influenzano principalmente i percorsi di flusso nella componente discendente dell'IC. Il confronto tra i risultati accoppiati e disaccoppiati è mostrato in Figura 24, in cui è chiaro come la distribuzione di elevata connettività sia principalmente in prossimità dei canali relativi ad ampie aree sorgenti.

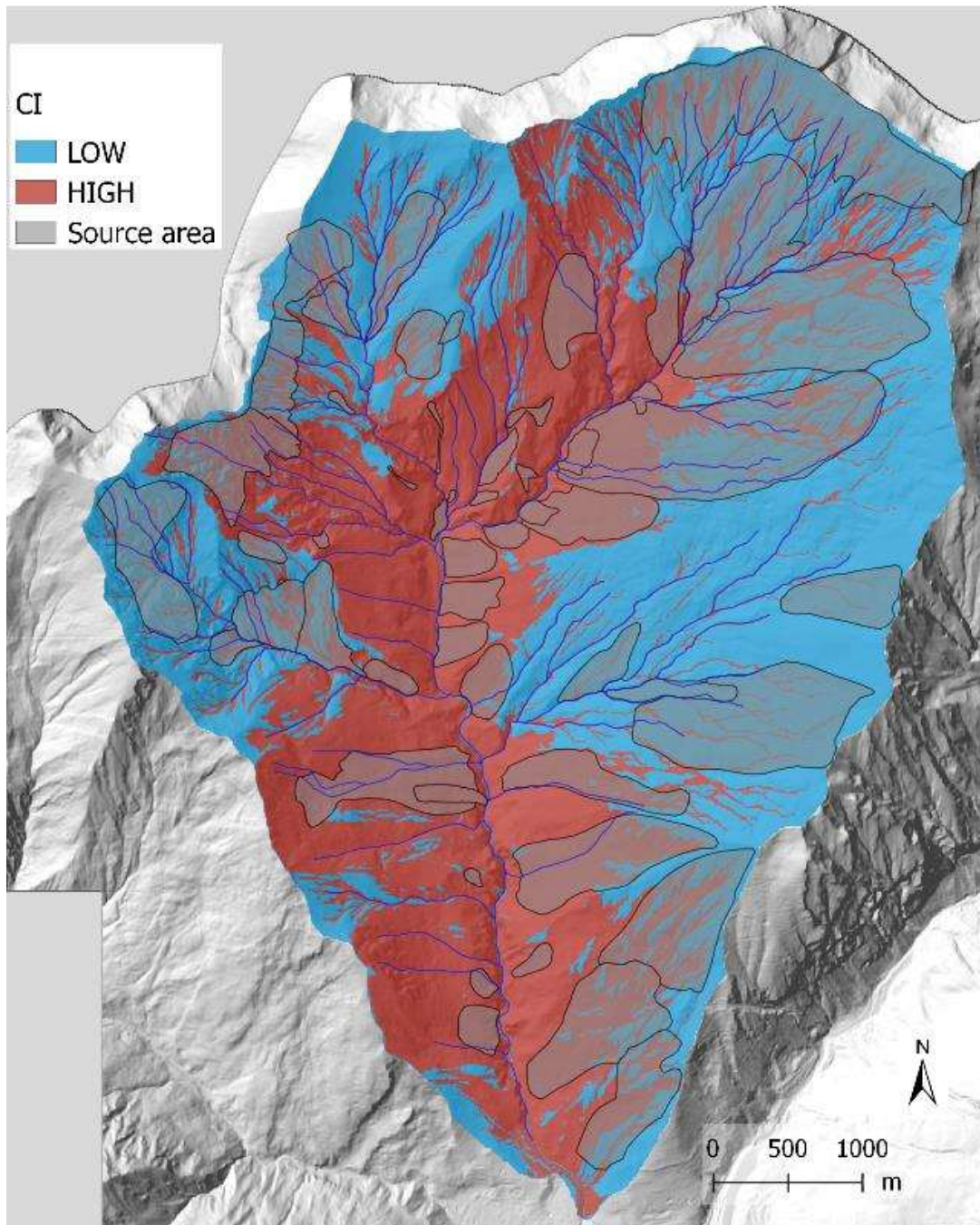


Figura 24 - Intersezione tra le aree sorgenti e la mappa IC.

La quantità più probabile di sedimenti che effettivamente possono contribuire a una colata detritica di magnitudo ordinaria, si ottiene selezionando le aree sorgenti sulla base della distribuzione del CI e dell'intersezione con la rete di canali entro 50 m di buffering dagli assi dei canali (Figura 25).

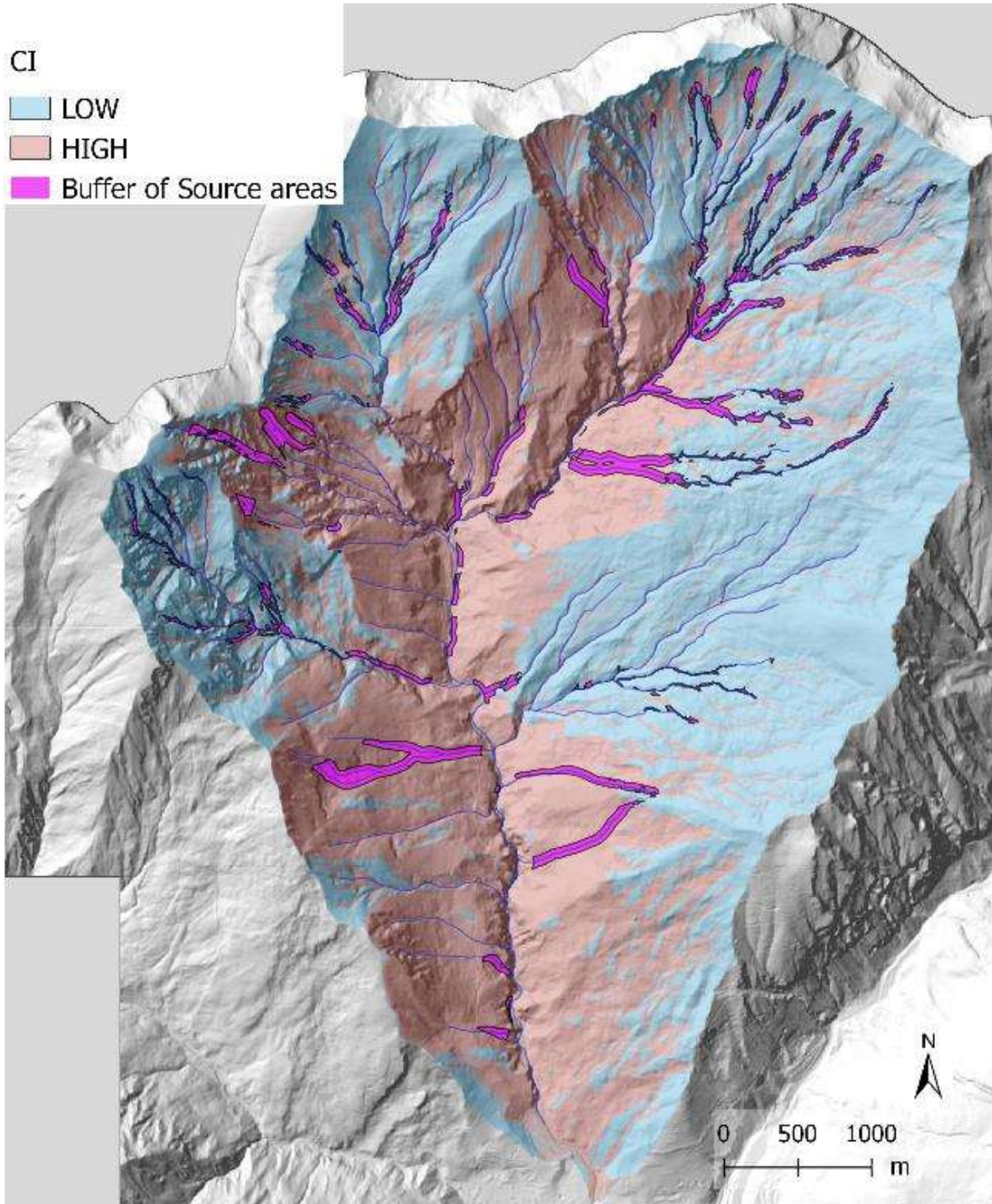


Figura 25 - Aree sorgenti effettive risultanti dall'intersezione tra i depositi e un buffer di 50 m della rete di canali.

Sulla base delle osservazioni sul campo, si è stimata la profondità media delle superfici di distacco per ciascun deposito al fine di determinare il volume mobilizzabile dalle aree origine dei sedimenti sui versanti.

Sono stati confrontati i volumi risultanti con volumi standard delle stesse tipologie di depositi disponibili in letteratura (Hungry et al., 1984; Marchi e D'Agostino, 2004; Dadson et al., 2004; Guzzetti et al., 2009; Tiranti et al., 2016b). La porzione identificata delle aree sorgenti rappresenta l'effettivo volume totale di sedimenti potenzialmente mobilizzabili dalle colate detritiche. Per determinare il volume totale dei sedimenti, è stato considerato lo spessore medio per ciascuna tipologia di deposito mobilizzabile (1,5 m per aree in frana, 1 m per aree soggette a frane superficiali, 2,5-3 m per colamenti lenti, 3-5 m per aree marginali/porzioni superficiali di frane complesse, 2-7 m per frane rotazionali) secondo il metodo proposto da Tiranti et al. (2016b). Si è calcolato un probabile volume massimo complessivo di sedimenti pari a 3.342.286 m³.

Modello di propagazione (modello ad automi cellulari)

Sulla base dei risultati delle analisi IC e delle osservazioni sul campo, sono state identificate le aree sorgenti e i volumi di sedimenti per ciascun sottobacino. Questi risultati sono stati utilizzati come input per simulare le dinamiche dei sottobacini attraverso scenari di deposizione con il modello ad automi cellulari. La Figura 26 mostra l'input iniziale di volume di sedimento determinato dall'intersezione delle aree sorgenti e della mappa IC.

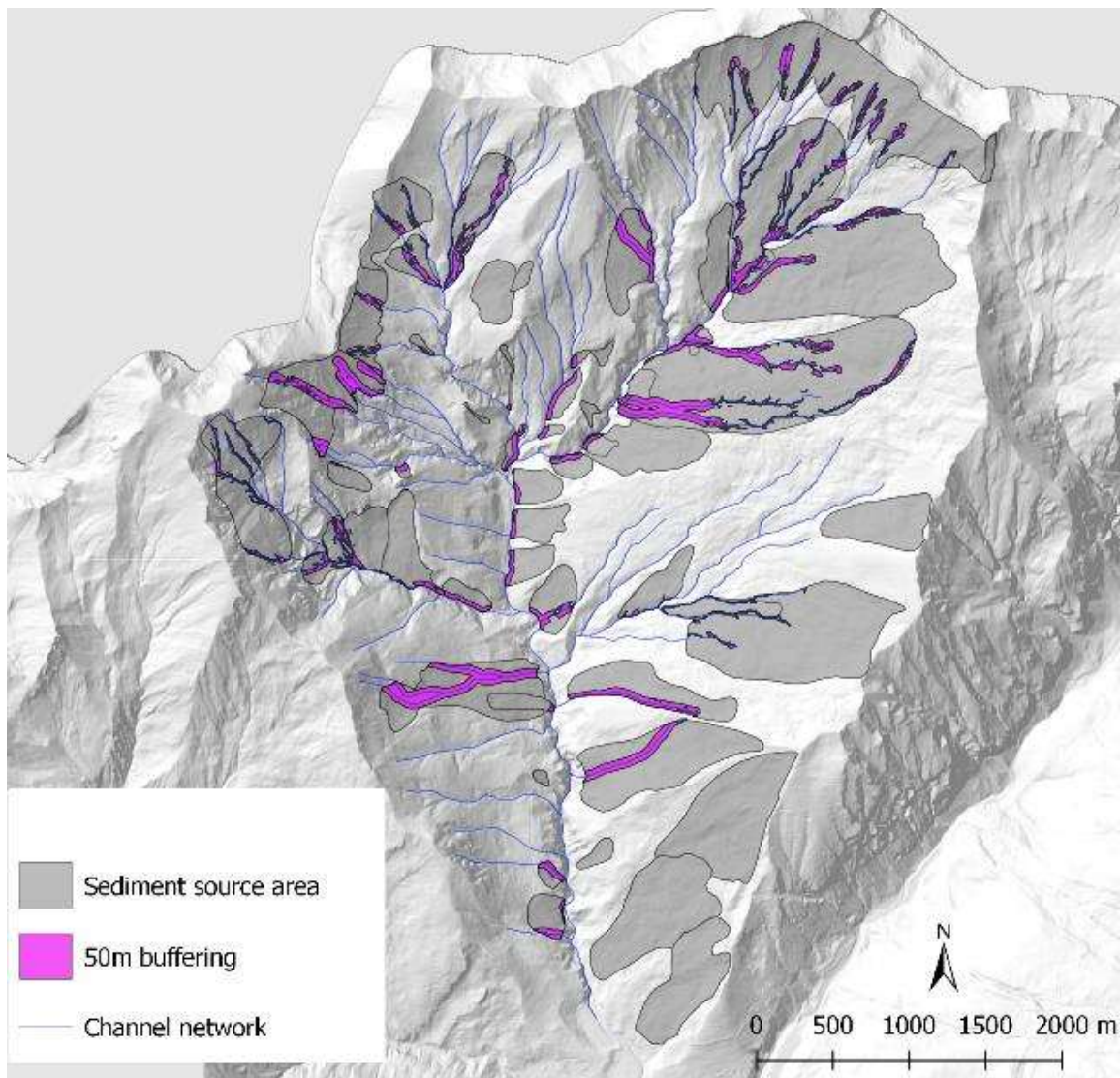


Figura 26 - Ingresso iniziale di volume sedimentario utilizzato nelle analisi numeriche.

Nelle simulazioni numeriche è stato suddiviso l'intero bacino idrografico in zona Ovest e zona Est. Ciascun'area è stata ulteriormente suddivisa in sottobacini, caratterizzati da un potenziale volume mobilizzabile di sedimenti:

- Zona Ovest. Comba Merdovine sx_1 e Comba Merdovine sx_2 con volume potenziale mobilizzabile rispettivamente di 258.784 m³ e 323.856,32 m³; Rio Chaulet e canali senza nome (sx_3) con volume mobilizzabile di 554.578 m³ (Figura 27).
- Zona Est. Comba del Frejus (dx_1) con volume potenziale mobilizzabile di 678.918 m³; Comba Gaudet e Gautier (dx_2) con volume potenziale mobilizzabile di 827.388 m³; canali senza nome (dx_3) con potenziale volume mobilizzabile di 532.745 m³ (Figura 28).

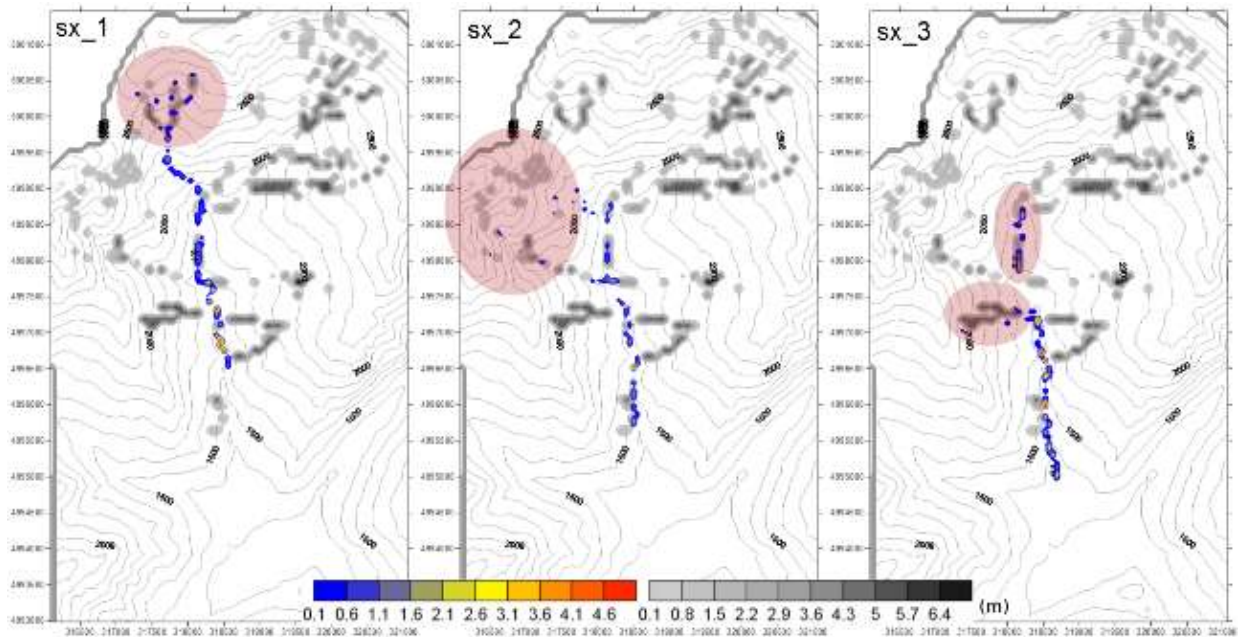


Figura 27 - Risultati delle analisi numeriche effettuate nell'area Ovest. Scala colorata: modelli di deposizione simulati. Scala dei grigi: depositi iniziali.

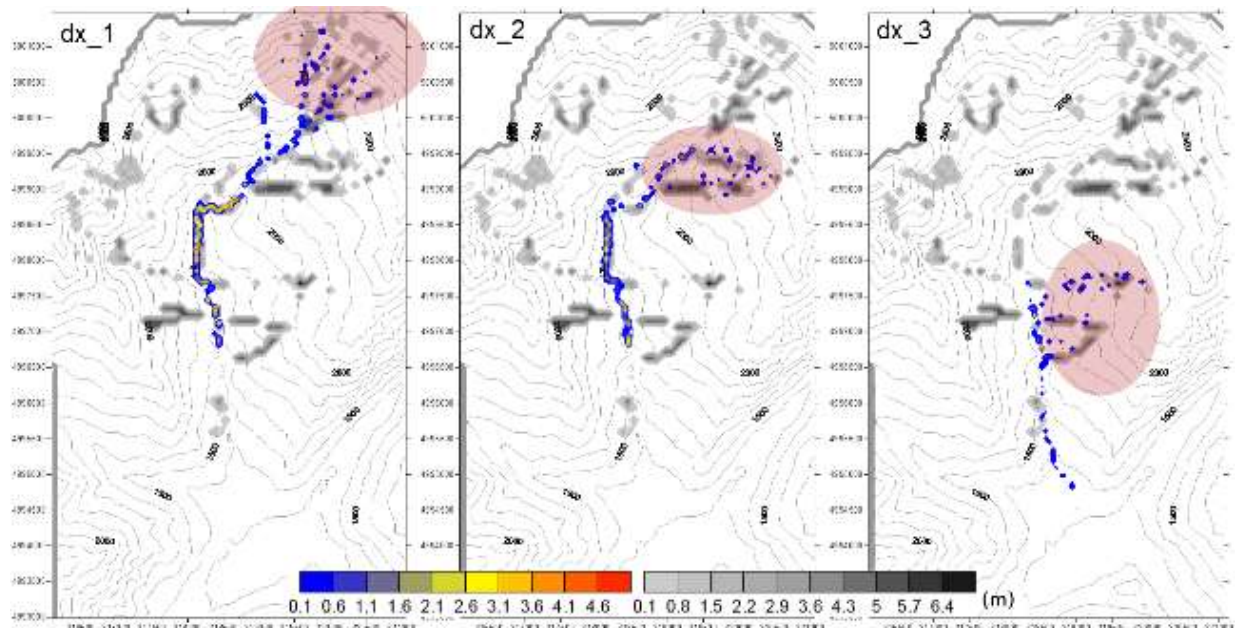


Figura 28 - Risultati delle analisi numeriche effettuate nell'area Est. Scala colorata: modelli di deposizione simulati. Scala dei grigi: depositi iniziali.

La Figura 27 e la Figura 28 mostrano i risultati delle simulazioni rispettivamente nella zona Ovest e nella zona Est. Tutti i flussi sedimentari raggiungono il canale target, in accordo con lo schema spaziale IC. Una parte dei depositi iniziali rimane nella sede originaria o si propaga per una piccola distanza su canali appartenenti ai sottobacini. Questo risultato è correlato alla morfologia locale di ciascun sottobacino, alla reologia viscoplastica della miscela riscontrata da osservazioni in situ. Inoltre, i risultati mostrano anche una significativa deposizione di sedimenti lungo il canale principale, in accordo con l'osservazione in situ e la classificazione dei bacini CWI. Solo le colate detritiche presenti nei sottobacini con maggiori volumi sedimentari iniziali raggiungono il fondovalle, con spessori di deposizione molto bassi. Questo risultato concorda con le caratteristiche del conoide alluvionale evidenziate dalle osservazioni in situ.

Per questo motivo, si sottolinea il fatto che la valutazione della pericolosità delle colate detritiche deve essere considerata in modo dinamico come un processo in evoluzione, con continui aggiornamenti.

CONCLUSIONI

L'integrazione presentata di diverse metodologie per caratterizzare l'innescò, la propagazione e la deposizione delle colate detritiche consente di definire scenari di pericolo senza riferire le simulazioni a eventi passati di colata detritica. Grazie all'applicazione della classificazione Clay Weathering Index è possibile dedurre "a priori" la potenziale tipologia di processi torrentizi che possono verificarsi e la sua evoluzione in base alla reologia del flusso e alle caratteristiche del sedimento trasportato. La caratterizzazione delle aree sorgenti mediante l'applicazione di un indice di connettività dei sedimenti ha permesso di includere nell'analisi la possibilità che i sedimenti siano accoppiati al sistema di drenaggio principale. Infine, gli scenari di propagazione e deposizione delle colate detritiche possono essere modellati utilizzando un modello ad automi cellulari 3D. Attraverso questo terzo passo è possibile ottenere numerosi scenari di propagazione e deposizione considerando solo le aree sorgenti che possono effettivamente alimentare una colata detritica. Grazie all'approccio integrato, è stato possibile ottenere informazioni accurate sugli impatti più probabili di una colata detritica, caratterizzandone la dinamica dalle aree di innescò fino al conoide alluvionale. Inoltre, si dimostra che la magnitudo massima attesa di una colata detritica può essere prevista escludendo tutte le aree sorgenti non collegate alla rete di canali, con interessanti applicazioni anche nella pianificazione urbana e nelle strategie di mitigazione del rischio.

I limiti di questo metodo integrato sono legati principalmente alla disponibilità di dataset territoriali (carte geologiche e geomorfologiche dettagliate, DTM ad alta risoluzione, conoscenza della natura e distribuzione delle potenziali aree sorgenti).

APPROFONDIMENTO EFFETTI AL SUOLO

Vengono di seguito descritti i principali effetti al suolo ripercorrendo il tragitto della colata da valle verso monte; quindi, dall'apice del conoide risalendo fino all'alto bacino dove si è innescato il processo torrentizio e dove ci sono le principali aree sorgenti del trasporto solido preso in carico dalla colata.

Sono stati suddivisi i seguenti tratti d'alveo:

- abitato di Bardonecchia, tratto T. Frejus fino alla confluenza con la Dora di Valle Stretta;
- T. Frejus dall'apice del conoide alla gola in roccia;
- T. Frejus dalla gola in roccia fino alla confluenza con Comba Gaudet;
- Bacino Rio Merdovine.

Le informazioni sono state raccolte a partire dall'analisi di foto aeree e da una serie di specifici rilievi effettuati con sopralluoghi su terreno. Nei giorni immediatamente successivi all'evento sono stati effettuati due sorvoli dell'area: in data 14/08/2023 è stato eseguito un sorvolo con sistema SAPR da parte del CFAVS (Consorzio Forestale Alta Valle Susa), mentre in data 15/08/2023 è stato effettuato un sorvolo aereo da parte della Società DIGISKY. Le immagini riprese con SAPR hanno interessato in dettaglio le aree coinvolte dal passaggio della colata in conoide nell'abitato di Bardonecchia, mentre quelle ad alta quota da aereo permettono una vista d'insieme estesa del bacino del T. Frejus. L'elaborazione fotogrammetrica delle immagini provenienti dai due voli ha permesso di generare orto-mosaici aventi scala ed estensione differenti in funzione delle differenti quote relative di volo. Nella Figura 29 a sinistra è riportato un estratto dell'orto-mosaico ricavato da immagini riprese con drone SAPR e a destra quello ricavato dalle immagini del volo aereo. Questi prodotti sono stati utili per una prima definizione delle aree coinvolte dalla colata detritica e per ottimizzare i rilievi di terreno.

Le informazioni raccolte hanno inoltre permesso l'implementazione della banca dati di Arpa Piemonte attraverso la compilazione di una scheda SIFRAP (Sistema Informativo Frane Piemonte) di dettaglio (II livello) pubblicata e visionabile al seguente indirizzo:

https://webgis.arpa.piemonte.it/geodissesto/sifrap/sifrap_ii_liv_carto.php?cod_frana=001-77601-00

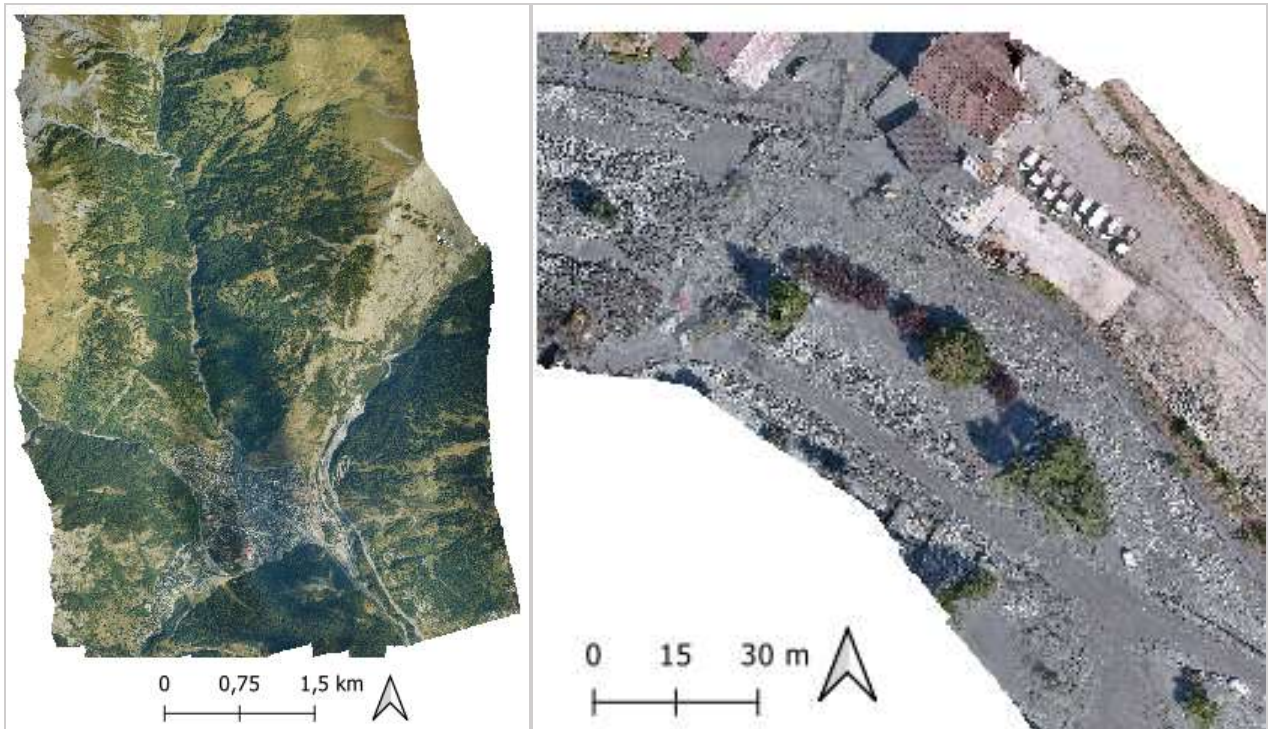


Figura 29 - La descrizione degli effetti al suolo si è basata anche sulle riprese aeree effettuate con drone (volo del 14/08/2023) e con volo aereo Digisky (volo del 15/08/2023). L'elaborazione fotogrammetrica delle immagini ha permesso di generare orto-mosaici aventi scala ed estensione differenti in funzione delle differenti quote relative di volo. A sinistra è riportato l'orto-mosaico ricavato da immagini riprese con SAR e a destra quello ricavato da volo aereo.

Abitato di Bardonecchia, tratto T. Frejus fino alla confluenza con la Dora di Valle Stretta

Il presente paragrafo è tratto dal rapporto preliminare d'evento pubblicato da Arpa Piemonte il 18 agosto 2023 (https://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/relazioni-tecniche/analisi-eventi/eventi-2023/Rapporto_Bardonecchia_2023.pdf/at_download/file).

In corrispondenza dell'abitato di Bardonecchia il torrente scorre completamente incanalato artificialmente; qui la colata ha colmato completamente la sezione di deflusso del canale, ma mantenendosi generalmente all'interno dell'alveo, almeno fino al ponte con l'incrocio di Viale S. Francesco – Piazza Alcide de Gasperi. Lungo questo primo tratto cittadino il passaggio dell'onda di piena ha depositato in diversi punti materiale prevalentemente fangoso senza però causare danni particolarmente gravi se non alle autovetture parcheggiate lungo la viabilità che costeggia il torrente. Danni più significativi sono stati registrati unicamente in corrispondenza del condominio in sinistra idrografica (Via Medail, 12) dove il materiale ha invaso alcuni appartamenti posti al pian terreno e gli schizzi di fango hanno raggiunto il secondo piano fuori terra (Figura 30). Lo stesso condominio era già stato lambito dalle colate detritiche del 2004 e del 2009, ma senza causare particolari danni.



Figura 30 – Edificio in sinistra idrografica posto poco a valle del ponte di Via Medail interessato dalla colata detritica. Gli stessi edifici erano stati lambiti dalla colata del 2009 e 2004.

Gli attraversamenti di via Medail e di piazza Alcide de Gasperi sono stati parzialmente sormontati dal materiale fangoso detritico senza però comprometterne la funzionalità (Figura 31). Il ponte in corrispondenza di via Montenero è stato completamente sormontato dal materiale, che ne ha causato l'asportazione del corrimano in legno e calcestruzzo sia a monte che a valle (Figura 32, a sinistra). La viabilità, limitata a 30 quintali, è stata ripristinata il 17 agosto. Negli attraversamenti di Piazza De Gasperi e di via Montenero, i sottoservizi presenti (teleriscaldamento, acqua potabile e gas) sono stati danneggiati, riportando anche una fuga di gas.



Figura 31 – Il ponte di via Medail (a sinistra) e quello di Piazza Alcide de Gasperi (a destra), parzialmente sormontati dalla parte liquida e più fine della colata.

Tra il ponte di via Montenero ed il sottostante di via Stazione la colata è fuoriuscita dall'alveo invadendo la viabilità che fiancheggia il canale, la rotonda di via Torino e tutte le aree adiacenti fino al ponte della ferrovia. In questo tratto il fronte della colata detritica ha rallentato, depositando la maggior parte del materiale grossolano ed intasando completamente l'alveo (Figura 32, a destra e Figura 33 a sinistra) a partire da un centinaio di metri a monte del ponte di via Stazione e fino al ponte di via Torino.



Figura 32 – A sinistra: il ponte di via Montenero, visto da monte, privato totalmente delle sponde. A destra: alveo intasato di materiale detritico a valle del ponte di via Montenero



Figura 33 – Ponti di via Stazione (a sinistra) e di via Torino (a destra) completamente occlusi, nelle foto rispettivamente del 14 agosto e del 16 agosto dopo i primi interventi di ripristino.

Gravi danni sono stati registrati agli edifici prospicienti la rotonda di via Torino: in sinistra gli edifici in Via Papa Giovanni XXIII hanno subito l'allagamento dei garage (civico n° 2B) e l'invasione del piano terreno (civico n° 2 all'angolo con il distributore di benzina); analogamente in destra l'albergo di Viale della Vittoria n° 4 e il prospiciente Commissariato di Polizia sono stati completamente invasi dal materiale detritico; in quest'area numerose autovetture e camper sono stati travolti e trasportati dalla colata, fortunatamente senza coinvolgere persone. I vigili del fuoco riportano che la colata ha travolto 52 mezzi, mentre il numero dei mezzi allagati nei garage è attualmente in valutazione (per i dettagli da Figura 34 a Figura 39).



Figura 34 – Rotonda di via Torino, imponente accumulo di materiale grossolano e dettaglio di automezzi coinvolti.



Figura 35 – Automezzi coinvolti nelle adiacenze della rotonda di via Torino.



Figura 36 – A sinistra: garage allagati dell'albergo la Betulla (Viale della Vittoria, n 4) e, a destra, del condominio Merdovine 2 (Via Papa Giovanni XXIII, n 2B).



Figura 37 – In sponda sinistra, gli spruzzi di fango hanno raggiunto il secondo piano fuori terra: distributore di carburante, Piazza Europa 11 (a sinistra) e lo stesso edificio lato Via Papa Giovanni XXIII (a destra).



Figura 38 – A sinistra, accumulo di materiale grossolano a monte del ponte di via Stazione e coinvolgimento dell'Hotel la Betulla e, a destra, visto dal lato di Viale della Vittoria dove l'accumulo è stato prevalentemente di granulometria fine.



Figura 39 – A sinistra, area antistante il Commissariato di Polizia, completamente intasata di deposito grossolano. A destra, Attraversamento della ferrovia, visto da monte

A valle del ponte della ferrovia la colata ha invaso la sponda sinistra sia a monte che a valle della confluenza della Dora di Valle Stretta; in particolare il parcheggio automezzi comunali in corrispondenza di via Torino 11 (Figura 40), poi la SS335 a monte e a valle (Figura 41-Figura 42) del ponte che conduce alla caserma dei VVF. Qui il materiale detritico depositato ha occluso quasi completamente la luce del sopracitato ponte, determinando la fuoriuscita in sinistra con coinvolgimento della SS335 e degli edifici a lato (via Susa 21-27 – Figura 43 a sinistra). La colata si è poi divisa in due lobi (Figura 43 a destra): uno diretto lungo l'alveo e l'altro lungo la SS335 per esaurirsi dopo circa 250 m.



Figura 40 – Automezzi comunali parzialmente coinvolti dall'accumulo di materiale fine nel piazzale di via Torino.



Figura 41 – Asta a monte della confluenza del T. di Rochemolles.



Figura 42 – Panoramica verso valle dall'attraversamento della caserma dei VVF.



Figura 43 – Attraversamento della caserma dei VVF: vista verso gli edifici di Via Susa coinvolti (a sinistra). Vista verso valle della SS335, poco a monte del punto di biforcazione tra i due lobi (a destra).

T. Frejus dall'apice del conoide alla gola in roccia



Figura 44 - Tratto del T. Frejus dall'apice del conoide alla gola in roccia (immagini Digisky 2023, post-evento); opere presenti in questo tratto d'alveo: 1. doppia soglia; 2. briglia selettiva a pettine; 3. soglia; 4. briglia fenestrata.

Il tratto compreso tra l'apice del conoide e la gola in roccia a monte presenta una debole pendenza con andamento sinuoso e con aree a prevalente deposizione determinata dalla riduzione di velocità e all'ampliamento della sezione d'alveo. In questo tratto sono state costruite diverse opere (difese spondali, briglie selettive e soglie) a difesa dell'abitato di Bardonecchia. In Figura 44 è indicata la posizione delle opere trasversali costruite con le relative piazze di deposito adiacenti.

Per i dettagli sulle opere si rimanda al capitolo dedicato all'approfondimento sulle opere di difesa idraulico-forestali a cura del CFAVS (Consorzio Forestale Alta Val Susa).

A monte di questo tratto inizia la gola in roccia, con lunghezza di circa 1,5 km, sezione d'alveo in restringimento (tratti con larghezza di 1-2 metri) e conseguente aumento della velocità della colata che comporta una componente di prevalente trasporto.

T. Frejus dalla gola in roccia fino alla confluenza con Comba Gaudet

A monte della gola in roccia sono presenti due importanti tratti di confluenza del t. Frejus con rii laterali:

1. confluenza con il Rio Gautier (Figura 45), caratterizzata da un allargamento della sezione e riduzione della pendenza (soprattutto a valle della confluenza) nella quale interagiscono due caratteri sostanzialmente differenti dei torrenti Frejus e Gautier; il primo presenta pendenza minore e un apporto maggiore di materiale detritico medio-fine rispetto al secondo. Il tratto di confluenza è costituito da una componente sia deposizionale che di trasporto e immediatamente a valle il torrente Frejus lambisce in sinistra idrografica un settore di versante particolarmente instabile che fornisce significative quantità di materiale per il trasporto solido. Dai rilievi effettuati si evidenzia come la colata dell'agosto 2023 sia stata alimentata in modo minoritario dal bacino del rio Gautier.



Figura 45 - Confluenza T. Frejus con Rio Gautier (immagini Digisky post-evento agosto 2023).

2. confluenza T. Frejus con il Rio Comba Gaudet (Figura 46) caratterizzata da un allargamento della sezione e conseguente prevalente componente deposizionale. Immediatamente a valle della confluenza è presente un'opera trasversale in parte danneggiata dal passaggio della colata dell'agosto 2023. Anche in questo tratto l'apporto solido del bacino della Comba Gaudet risulta minoritario rispetto a quello fornito dal Rio Merdovine. A valle della confluenza, il T. Frejus assume un andamento piuttosto rettilineo con conseguente aumento della velocità della colata e della componente erosiva significativa delle sponde.



Figura 46 - Tratto T. Frejus dalla confluenza con il R. Gautier alla Confluenza con R. Comba Gaudet (immagini Digisky post-evento agosto 2023).

Il versante in sinistra idrografica del T. Frejus è stato interessato da processi di ruscellamento concentrato e attivazione di modeste colate detritiche sul reticolato idrografico minore (Figura 47). Tali depositi non hanno contribuito a fornire materiale alla colata giunta a Bardonecchia, se non in misura trascurabile.

Tutto il versante è coinvolto da fenomeni gravitativi profondi (DGPV, codice SIFRAP 001-00105-01) e fenomeni più superficiali (scivolamenti rotazionali e colamenti lenti) che non hanno subito particolari accelerazioni a seguito delle precipitazioni dell'agosto 2023. Tali fenomeni sono soggetti in genere ad accelerazioni tardo primaverili a seguito di fusione nivale e precipitazioni primaverili rilevanti. L'unica frana monitorata nella RERCOMF in questo settore è il colamento lento di Vernets (codice SIFRAP 001-00105-07) che alla data dell'ultima misura manuale effettuata (frequenza annuale maggio 2023) non presentava accelerazioni significative (GDE "ordinario").



Figura 47 - Deposito detritico misto a sabbia, limo e componenti vegetali Rio Chaulet.

Bacino del Rio Merdovine

Risalendo dalla confluenza del rio Comba Gaudet il tratto d'asta torrentizia prende il nome di Rio Merdovine. Fino alla confluenza con Rio Graviere, è ben evidente il passaggio della colata detritica, la quale ha parzialmente rallentato e quindi deposto materiale nel piano in prossimità della confluenza con il Rio Comba Gaudet (Figura 48). Risulta evidente che la colata sia transitata dal bacino del Rio Merdovine il quale ha contribuito in modo prevalente al trasporto solido giunto poi a Bardonecchia. Il versante in destra tra Rio Comba Gaudet e il Rio Graviere non è stato interessato da processi torrentizi importanti e non ha quindi contribuito in maniera significativa all'apporto di materiale alla colata principale.

La natura dei depositi della colata principale è costituita da abbondanti ghiaie eterogenee con una discreta quantità di blocchi di volume oltre il metro cubo, immersi in una matrice limoso-sabbiosa di colore grigio scuro.



Figura 48 - Passaggio e deposito della colata del Rio Merdovine alla confluenza con il Rio Comba Gaudet (in alto a destra).

Proseguendo verso monte lungo il Rio Merdovine, la colata ha raggiunto altezze di oltre 5 metri con prevalente trasporto e una significativa componente erosiva sulle sponde in destra idrografica (Figura 50), con notevole estensione in particolare su gran parte della sponda in sinistra idrografica in frana (Figura 49).



Figura 49 - Importanti erosioni in sponda sinistra del Rio Merdovine, a monte della confluenza con il Rio Comba Gaudet. In questo tratto, la diffusa presenza di frane determina una disponibilità pressoché illimitata di detrito mobilizzabile dal passaggio di ondate di piena e colate detritiche.



Figura 50 - Recenti erosioni in sponda destra del Rio Merdovine a seguito del passaggio della colata detritica dell'agosto 2023.

Proseguendo verso monte si evidenziano continue erosioni in sponda sinistra idrografica alcune delle quali hanno destabilizzato il piede del versante ed innescato veri e propri fenomeni franosi, quindi successivi al passaggio della colata, uno dei quali ha coinvolto alcune migliaia di metri cubi di materiale (Figura 51). Tali fenomeni presentano ancora una instabilità residua che potrebbe causare l'ostruzione del Rio Merdovine che in questo tratto risulta particolarmente stretto. Non si esclude che situazioni simili siano accadute durante l'evento dell'agosto 2023 con la parziale ostruzione del canale principale e il conseguente rilascio e innesco di ondate di piena in grado poi di accrescere il potere erosivo e quindi le dimensioni della colata verso valle.



Figura 51 - Frana successiva al passaggio della colata dell'agosto 2023 in sponda destra del Rio Merdovine.

In tutto l'alto bacino del Rio Merdovine sono state osservate estese coperture detritiche da cui hanno origine fenomeni di colata; all'interno degli alvei del reticolato idrografico sono diffusamente

presenti ingenti quantitativi di detriti eterometrici incoerenti provenienti dai versanti o già in alveo in quanto i corsi d'acqua incidono parzialmente gli accumuli detritici.

In particolare, dai settori di cresta al confine con la Francia e proseguendo verso valle su tutto il tratto dell'alveo del Rio Merdovine sono presenti imponenti accumuli detritici (in sinistra idrografica) di origine mista alla base di pareti rocciose ad elevato grado di fratturazione ed alterazione con segni di erosione nel corso dell'evento dell'agosto 2023. Tali accumuli risultano profondamente incisi da numerosi corsi d'acqua e hanno rappresentato una importante sorgente di materiale detritico.

Questo settore è caratterizzato da una spiccata differenza tra le due sponde del Rio Merdovine: la sponda sinistra delimita un settore particolarmente evoluto di una estesa Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV) ed è costituita prevalentemente da depositi di frana in equilibrio precario; l'erosione al piede della DGPV causa importanti instabilità localizzate lungo tutta la sponda sinistra con continui apporti di materiale detritico in alveo. La sponda destra invece è costituita da affioramenti di calcescisti più o meno carbonatici alternati a modesti depositi detritico-colluviali che contribuiscono in minor misura al trasporto solido.

Dalle riprese aeree si evidenziano diverse aree sorgenti ubicate nell'alto bacino del Rio Merdovine nel tratto di dorsale spartiacque compresa tra Punta Vallone (quota 3171 m) e la Punta Rocca Verde (quota 2842 m). Alcune di queste hanno attraversato l'area a pascolo e sono evidenziate in Figura 52 con un confronto temporale di ortofoto del 2021 (Agea) e successive all'evento dell'agosto 2023 (Digisky). In Figura 53 è riportata una elaborazione da immagini satellitari Sentinel riprese prima e dopo l'evento dell'agosto 2023 in cui sono evidenziate alcune aree sorgenti attivate nell'alto bacino del Rio Merdovine.

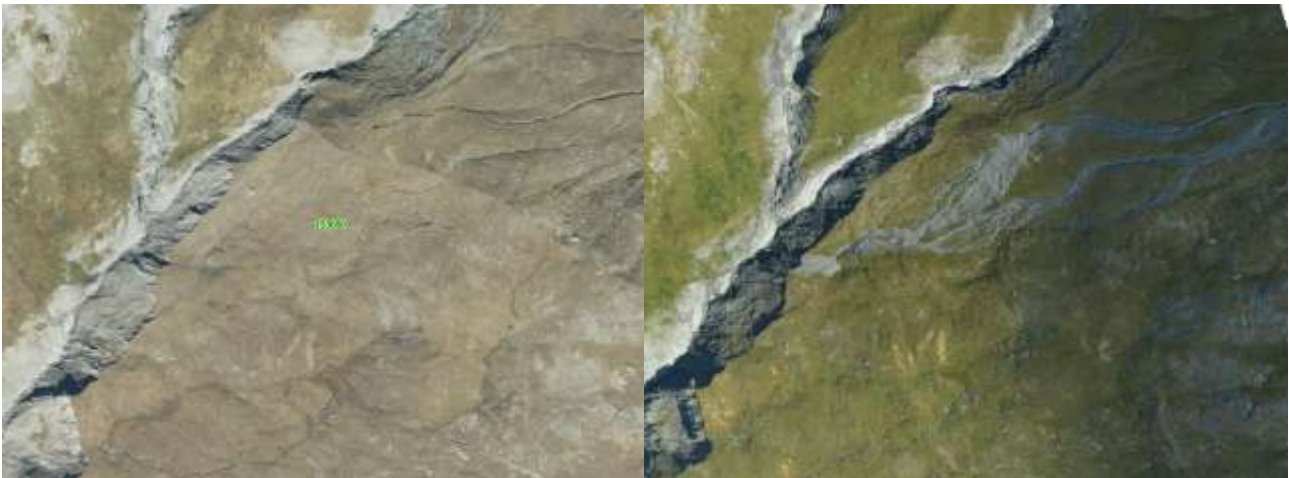


Figura 52 - Confronto tra ortofoto Agea 2021 e Digisky 2023 post-evento. In quest'ultima si vedono bene le colate detritiche secondarie attivate sul versante confluite poi nel Rio Merdovine.

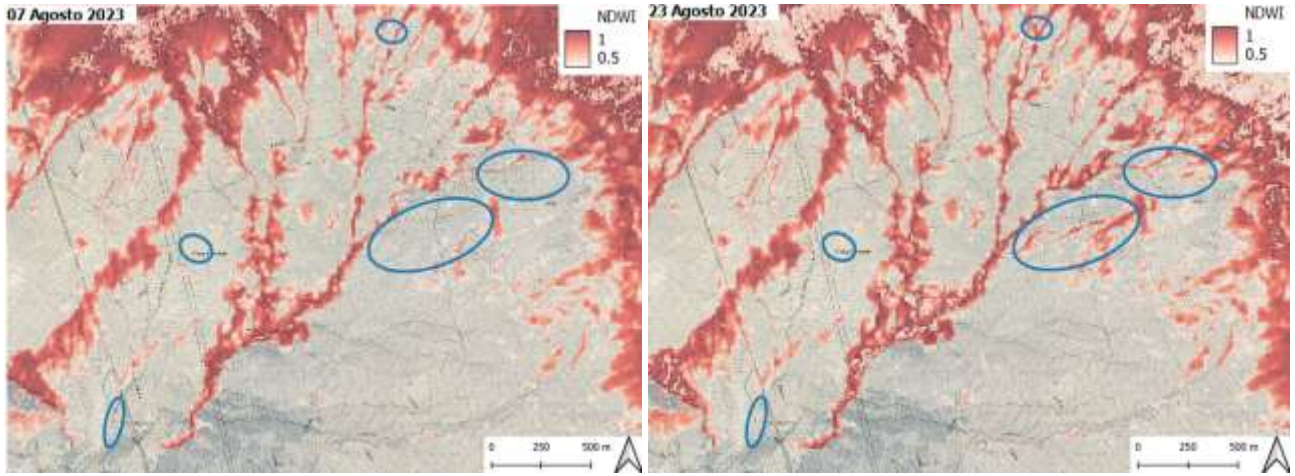


Figura 53 - Composizione a falsi colori delle immagini Sentinel utilizzando la banda 1 dell'indice NDWI (Normalized Difference Water Index). I valori dell'indice NDWI maggiori di 0,5 sono rappresentativi della presenza di acqua. L'immagine di sinistra si riferisce alla data del 7 agosto 2023 (pre-evento), mentre l'immagine di destra al 23 agosto 2023 (post-evento). Questa rappresentazione, oltre ad evidenziale la distribuzione del reticolo idrografico minore, consente di riconoscere alcune colate detritiche attivate durante l'evento (ellissi blu).

APPROFONDIMENTO SULLE OPERE DI DIFESA IDRAULICO-FORESTALI NEL BACINO DEL T. FREJUS

(a cura del CFAVS – Consorzio Forestale Alta Val Susa)

Come anticipato nei capitoli precedenti, lungo l'asta del Torrente Frejus si verificano eventi di *mud-debris flow* ogni circa tre anni. Recentemente, con l'aumento di fenomeni temporaleschi molto intensi e localizzati anche su esigui settori del bacino idrografico, la frequenza delle piene tende ad aumentare e si sono osservati eventi di colata, anche non distruttivi, nel periodo luglio-agosto, a cadenza annuale o biennale, come evidenziato dagli eventi del 7 agosto 2009, 16 luglio 2013, 1 agosto 2014, 9 agosto 2015, 21 ottobre 2019, 5 agosto 2022, 13 agosto 2023.

In passato era ben nota la dinamica torrentizia del Frejus e, nei primi decenni del secolo scorso, il Comune provvedeva annualmente alla manutenzione dei gabbioni posti alla difesa delle sponde, dei terreni e delle abitazioni fiancheggianti il torrente. Il *“Progetto di sistemazione idraulico-forestale del Bacino Montano della Dora Riparia (Ministero dell'Agricoltura e Foreste, 1934)”* prevedeva la realizzazione di briglie lungo l'asta principale e le aste secondarie del Gautier e Sagneras, nonché di m³ 26.000 di muretti di consolidamento delle pendici in frana e di soglie nelle incisioni, per un ammontare di Lit. 1.068.933,85. Era previsto anche il rimboschimento di ampi settori dei versanti con un costo di Lit. 1.343.034,55. Infine, Lit. 512.581,60 erano destinati alla viabilità, ricoveri, attrezzature. L'ammontare complessivo del progetto era di Lit. 2.924.550,60 equivalenti a circa € 3.417.422 attuali.

Nel corso degli anni '70 ed '80 la pericolosità del Frejus appare nuovamente evidente anche alla luce di gravi eventi di piena. L'amministrazione Comunale ottenne il finanziamento di interventi di sistemazione e di manutenzione delle briglie esistenti. Nel periodo 1987-98 sono state realizzate nuove briglie a monte dell'abitato e difese spondali (importo Lit. 2.000.000.000). Inoltre, sono stati realizzati interventi di rimozione di materiale in alveo, tagli di vegetazione e una nuova briglia filtrante a valle della confluenza con il Rio Gautier.

A seguito dell'evento alluvionale del 7 agosto 2009 sono stati rimossi circa m³ 12.400 negli alvei del Frejus, della Dora di Rochemolles e della Dora di Melezet.

Nell'estate del 2014 sono state disalveate, su progetto della Regione Piemonte, le spiagge di deposito di due briglie finestrate site a quota m 1610 che, a seguito dell'evento del 1 agosto 2014, sono state nuovamente completamente riempite.

Nel dicembre 2020 sono terminati i lavori di manutenzione della briglia di quota m 1732 (consolidamento dell'ala sinistra completamente aggirata e scalzata, rifacimento della platea di caduta) e della briglia situata in corrispondenza dell'apice del conoide, a quota m 1371. Nel 2022-2023 sono stati ultimati i lavori di realizzazione di una briglia selettiva e di una briglia situate a monte dell'apice del conoide. Nel corso degli anni sono state mantenute numerose volte le difese spondali presenti nel canale in conoide, con sottomurazioni e rifacimento di scogliere in massi.

Lungo l'asta del torrente sono presenti numerose opere trasversali di regimazione. A causa dell'intensa azione erosiva attuata dai sedimenti sui materiali costituenti, sia calcestruzzi sia ferri e acciai, si sono resi necessari nel corso degli ultimi 20 anni numerosi interventi di manutenzione e/o ricostruzione. In Figura 54 sono riportate le ubicazioni delle opere realizzate negli anni ed oggetto di osservazione e descrizione del presente approfondimento.

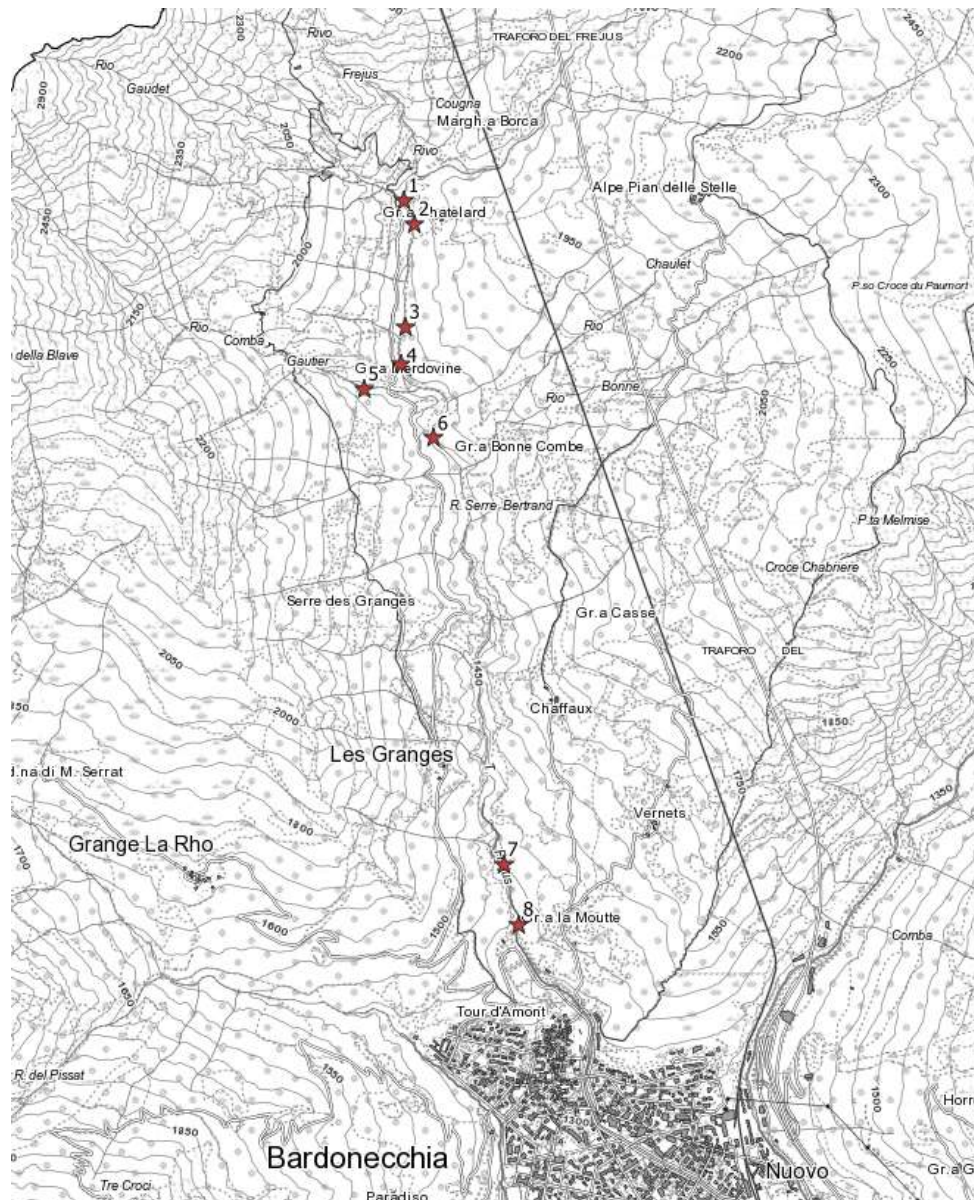


Figura 54 - Ubicazione delle opere idraulico-forestali realizzate nell'asta del T. Frejus e del R. Gauthier, oggetto di osservazione e descrizione nel presente report di approfondimento.

La prima traversa a monte (1 in Figura 54), a quota m 1732 in corrispondenza della confluenza del Rio Chatelard – Merdovine – Guntard e dell'attraversamento per i Camini di aerazione del traforo autostradale del Frejus, è stata realizzata nel 1998-1999. Era stata progettata secondo una tipologia ibrida, in quanto è sprovvista di gaveta e ali, e quindi in grado di fissare la quota del talweg ma non di indirizzare verso una direzione precisa il flusso delle piene (Figura 55).

Nel 2007 risultava aggirata in sinistra, con il denudamento dei micropali di fondazione e presentava fenomeni di erosione e scalzamento in corrispondenza dell'asse mediano (Figura 56 e Figura 57).



Figura 55 - Briglia a quota m 1732 ripresa nell'anno 2002.



Figura 56 - Briglia a quota m 1732 ripresa nell'anno 2007. Visibili i danni alla platea di caduta ed alla ala destra della briglia.



Figura 57 - Briglia a quota m 1732 ripresa nell'anno 2007 in cui si evidenzia l'aggiramento dell'ala sinistra della briglia, sospesa di m 3 sull'alveo.

La stessa briglia è stata mantenuta nel 2020, in particolare è stata rinforzata in sinistra idrografica la sponda e l'immorsamento dell'ala, nonché il rifacimento della platea di caduta (Figura 58).



Figura 58 - Briglia a quota m 1732 dopo la manutenzione effettuata nell'anno 2020.

A seguito dell'evento del 13 agosto 2023 l'opera si presenta in buone condizioni, ad eccezione di un modesto danneggiamento della platea di caduta, causato dall'intensa erosione sviluppatasi a valle che ha esumato il substrato roccioso del talweg, asportando spessori di depositi torrentizi per uno spessore di non meno di m 3 (Figura 59).



Figura 59 - Briglia a quota m 1732 ripresa dopo l'evento torrentizio dell'agosto 2023.

Segue a quota 1714 (2 in Figura 54) una briglia in cemento armato, non terminata nel 1999, la cui gavetta era semidistrutta già nel 2007 (Figura 60).



Figura 60 - Briglia a quota m 1714 ripresa nell'anno 2007. Si nota il forte ammaloramento del calcestruzzo e l'assottigliamento dei ferri di armatura nella direzione della corrente (da destra verso sinistra).

Il 13 agosto 2023 la piena ha asportato quanto rimaneva dell'opera; rimangono solo alcuni micropali di fondazione sulle sponde (Figura 61).



Figura 61 - Briglia a quota m 1714 ripresa in seguito all'evento torrenziale del 13 agosto 2023: completa distruzione della gaveta.

A quota m 1670 era presente una briglia in pietrame cementato (3 in Figura 54), risalente probabilmente agli interventi effettuati dal Genio Civile nella decade 1950. Tale opera è stata completamente distrutta dall'evento del 2009 e ora rimangono i relitti delle ali (Figura 62 e Figura 63).



Figura 62 - Briglia a quota m 1670 ripresa nell'anno 2007.



Figura 63 - Briglia a quota m 1670 ripresa dopo l'evento del 13 agosto 2023.

A quota m 1650, in località Grangia Merdovine (5 in Figura 54), una briglia in calcestruzzo è prossima allo sfondamento a causa dell'indebolimento della gaveta, della profonda incisione per erosione, dello scalzamento parziale e del danneggiamento della platea di caduta (Figura 64).



Figura 64 - Briglia a quota m 1650 ripresa dopo l'evento del 13 agosto 2023.

A quota m 1640 il T. Frejus riceve da destra il Rio Gautier, collettore di ingenti quantità di detriti. La briglia presente nella forra a monte della confluenza non è danneggiata, sebbene si presenti colma di detriti come di consueto (Figura 65).



Figura 65 - Briglia a quota m 1640 nel Rio Gauthier ripresa dopo l'evento del 13 agosto 2023.

Poco a valle della confluenza da destra del Rio Gautier, a quota m 1605, sono presenti due briglie fenestrate (Figura 66 e Figura 67). Le spiagge di deposito sono state svuotate nel luglio 2014 e ricolmate dal successivo debris flow verificatosi il 1° agosto dello stesso anno.



Figura 66 - Briglia fenestrata a quota m 1650 più a monte ripresa nell'anno 2006. Il lato maggiore delle finestre misura 3 metri.



Figura 67 - Briglia fenestrata a quota m 1650 più a valle ripresa nell'anno 2006.

A monte dell'apice del conoide, a quota m 1390, si sviluppa una zona sub-pianeggiante dove erano presenti due soglie in calcestruzzo, danneggiate. Nel luglio 2023 sono terminati i lavori di realizzazione di una briglia selettiva, dotata di un'ampia spiaggia di deposito (Figura 68). Contestualmente, è stata ricostruita una soglia in cemento armato ed è stata eseguita la riprofilatura delle sezioni idrauliche e le manutenzioni delle opere longitudinali (scogliere) e trasversali (soglie) presenti nel canale in conoide.



Figura 68 - Briglia selettiva a quota m 1390 alla fine lavori del giugno-luglio 2023.

L'evento di agosto 2023 ha danneggiato le traverse tubolari delle finestrate che sono state sostituite con putrelle (Figura 69).



Figura 69 - Briglia selettiva a quota m 1390 ripresa il 15 settembre 2023.

A quota 1371 sono presenti una briglia ed una controbriglia in calcestruzzo, nel 2020 fortemente ammalorate. In particolare, la platea di caduta e la soglia sottostante erano state più volte sifonate nel corso degli anni (Figura 69 e Figura 70).



Figura 70 - Briglia in apice del conoide, alla quota m 1371 ripresa nell'anno 2011 in cui si evidenzia lo scalzamento della controbriglia.



Figura 71 - Briglia in apice del conoide, a quota m 1371 ripresa nell'anno 2015. La spiaggia di deposito si è svuotata, la contro briglia è scalzata e sifonata.

La briglia e la controbriglia sono state rifatte, in cemento armato, nel 2020. Nel maggio 2023 erano in ottime condizioni (Figura 71) ed hanno resistito all’impatto dell’evento del 13 agosto 2023 (Figura 72 e Figura 73).



Figura 72 - Briglia e controbriglie in apice del conoide, a quota m 1371 riprese il 18 maggio 2023.



Figura 73 - Briglia in apice del conoide, a quota m 1371 riprese nel post-evento del 13 agosto 2023. Il leggero deposito sabbioso sulla sponda sinistra idrografica indica la quota del colmo della colata.



Figura 74 - Briglia in apice del conoide a quota m 1371 ripresa nel post-evento del 13 agosto 2023. La colata del 13 agosto ha sormontato l'ala sinistra ed è poi rientrata in alveo poche decine di metri più a valle.

REFERENZE

1. Blair, T. C. (1999). Alluvial fan and catchment initiation by rock avalanching, Owens Valley, California. *Geomorphology* 28, 201–221. doi: 10.1016/S0169-555X(98)00111-1
2. Borselli, L., Cassi, P., Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *CATENA* 75, 268–277. doi:10.1016/j.catena.2008.07.006
3. Campbell, R. H. (1974). Debris flow originating from soil slip during rainstorms in southern California. *Q.J. Eng. Geol. London* 7, 339–349. doi: 10.1144/GSL.QJEG.1974.007.04.04
4. Campbell, R. H. (1974). Debris flow originating from soil slip during rainstorms in southern California. *Q.J. Eng. Geol. London* 7, 339–349. doi:10.1144/GSL.QJEG.1974.007.04.04
5. Campbell, R. H. (1975). “Soil slip, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity. Southern California,” in U.S. Geological Survey Prof. Paper 851, 51.
6. Cannon, H. S., Gartner, J. E., Wilson, R. C., Bowers, J. C., Laber, J. L. (2008). Storm rainfall conditions for floods and debris flows from recently burned areas in Southwestern Colorado and Southern California. *Geomorphology*, 96, 250–269. doi: 10.1016/j.geomorph.2007.03.019
7. Cannon, H. S., Kirkham, R. M., Parise, M. (2001). Wildfire-related debris-flow initiation processes, Storm King Mountain, Colorado. *Geomorphology* 39, 171–188. doi: 10.1016/S0169-555X(00)00108-2
8. Cavalli, M., Tarolli, P., Marchi, L., Dalla Fontana, G. (2008). The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. *CATENA* 73, 249–260. doi:10.1016/j.catena.2007.11.001
9. Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology* 188, 31–41. doi:10.1016/j.geomorph.2012.05.007
10. Costa, J. E. (1988). “Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows,” in *Flood Geomorphology*, eds V. R. Baker, R. C. Kochel, and R. C. Patton (New York, NY: John Wiley and Sons), 113–122.
11. Crema, S., Cavalli, M., (2018). SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. *Comput. Geosci.* 111, 39–45. doi:10.1016/j.cageo.2017.10.009
12. Crema, S., Schenato, L., Goldin, B., Marchi, L., Cavalli, M. (2015). Toward the development of a stand-alone application for the assessment of sediment connectivity. *Rendiconti Online Della Soc. Geol. Ital.* 34, 58–61. doi: 10.3301/ROL.2015.37
13. Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W. B., Lin, J. C., Hsu, M. L. (2004). Earthquake-triggered increase in sediment delivery from an active mountain belt. *Geology* 32, 733–736. doi:10.1130/G20639.1
14. Deangeli, C. (2008). Laboratory granular flows generated by slope failures. *Rock Mech. Rock Eng.* 41, 199–217. doi: 10.1007/s00603-007-0131-1
15. Deangeli, C., Giani, G. P. (1998). “Physical and Numerical models to rehabilitate a waste disposal site,” in *Proceedings of the 8th International Congress IAEG (Vancouver, BC; Balkema; Rotterdam)*, 1813–1818.
16. Deangeli, C., Grasso, P. (1996). “The evolutive mechanism of debris flows: analysis and protection works,” in *Proceedings of 7th International Symposium on Landslides (Trondheim; Balkema; Rotterdam)*, 1183–1188.
17. Deangeli, C., Paltrinieri, E., Tiranti, D. (2013). Debris flow analysis: from lithological classification of the basin to deposition,” in *Landslide Science and Practice, Vol. 3, Spatial Analysis and Modeling Chap. 2: Rapid Landslide Runout Analysis*, eds C. Margottini, P. Canuti, and K. Sassa (Springer), 301–307.
18. Deangeli, C., Tiranti, D., Marco, F., Volpato, M. (2015). “Comparison of Debris flow depositional scenarios using different DTMs,” in *Engineering Geology for Society and Territory, Vol. 2*, eds G. Lollino, D. Giordan, G. B. Crosta, J. Corominas, R. Azzam, J. Wasowski, and N. Sciarra (Springer International Publishing), 1667–1671.

19. Ellen, S. D., Flaming, R. W. (1987). Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region. *Geol. Soc. Am. Rev. Eng. Geol.* 7, 31–40. doi:10.1130/REG7-p31
20. Gregoretto, C. (2000). Experimental evidence from the triggering of debris flow along a granular slope. *J. Phys. Chem. Earth* 25, 387–390. doi: 10.1016/S1464-1909(00)00031-9
21. Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D. (2009). Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth Planetary Sci. Lett.* 279, 222–229. doi:10.1016/j.epsl.2009.01.005
22. Hoek, E., Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomechanics Abs* 34, 1165–1186. doi: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X
23. Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B. (2002). “Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition,” in *Proceedings of North American Rock Mechanics Society (Toronto, ON)*, 267–273.
24. Hungr, O., Morgan, G. C., Kellerhals, R. (1984). Quantitative analysis of debris torrent hazard for design of remedial measures. *Can. Geotech. J.* 21, 663–677. doi: 10.1139/t84-073
25. Iverson, R. M., Reid, M. E., LaHusen, R. G. (1997). Debris flow mobilization from landslides. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 25, 85–138. doi:10.1146/annurev.earth.25.1.85
26. Jakob, M., Hungr, O. (2005). *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Heidelberg; Chichester: Springer-Verlag Praxis; Publishing Ltd.; Hardbound.
27. Johnson, A. M., Rodine, J. R. (1984). “Debris flow,” in *Slope Instability*, eds D. Brunsten, and D. B. Prior (Chichester: Wiley), 257–361.
28. Johnson, R. A., Wichern, D. W. (1982). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc.
29. Lancaster, S. T., Hayes, S. K., Grant, G. E. (2003). Effects of wood on debris flow runout in small mountain watersheds. *Water Resour. Res.* 39, 1168. doi:10.1029/2001WR001227
30. Lavigne, F., Suwa, H. (2004). Contrasts between debris flows, hyperconcentrated flows and stream flows at a channel of Mount Semeru, East Java, Indonesia. *Geomorphology* 61, 41–58. doi:10.1016/j.geomorph.2003.11.005
31. Lin, P. S., Lin, J. Y., Huang, J. C., Yang, M. D. (2002). Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan. *Eng. Geol.* 66, 295–313. doi: 10.1016/s0013-7952(02)00105-9
32. Maleta, J. P., Laigle, D., Remaitre, A., Maquaire, O. (2005). Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows. *Geomorphology* 66, 215–235. doi: 10.1016/j.geomorph.2004.09.014
33. Marchi, L., D’Agostino, V. (2004). Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surf. Process. Landforms* 29, 207–220. doi: 10.1002/esp.1027
34. Marinos P, Hoek E (2001) Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull Eng Geol Env* 60:85–92
35. Marinos, P., Hoek, E., Marinos, V. (2004a). Variability of the Engineering properties of rock masses quantified by the Geological Strength Index. The case of Ophiolites with special emphasis on tunneling. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 65, 129–142. doi: 10.1007/s10064-005-0018-x
36. Marinos, P., Marinos, V., Hoek, E. (2004b). “Geological Strength Index, GSI: Applications, recommendations, limitations and alteration fields commensurately with the rock type. *Bull. of the Geol. Society of Greece vol XXXVI*,” in *Proc. of the 10th Intern. Congress (Thessaloniki)*.
37. Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 64, 55–65. doi:10.1007/s10064-004-0270-5
38. Melton, M. A. (1957). *An analysis of the Relation Among Elements of Climate, Surface Properties and Geomorphology*, Tech Rep11. Office of Nav Res Dept Geol Columbia Univ.
39. Pierson, T. C., Costa, J. E. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment–water flows. *Geol. Soc. Am. Rev. Eng. Geol.* 7, 1–12.
40. Polino, R., Dela Pierre, F., Fioraso, G., Giardino, M., Gattiglio, M. (2002). Foglio 132-152-153 “Bardonecchia” Carta Geologica d’Italia, scala 1:50,000. Servizio Geologico d’Italia.
41. Reid, M. E., Brien, D. L., LaHusen, R. G., Roering, J. J., de la Fuente, J., Ellen, S. D. (2003). “Debris-flow initiation from large, slow-moving landslides,” in *Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, eds. Rickenmann and Chen (Rotterdam : Millpress), 155–166.

42. Sassa, K. (1985). "The mechanism of debris flow," in Proceedings of XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 1985 (San Francisco, CA), 1173–1176.
43. Segre, E., Deangeli, C. (1995). Cellular automaton for realistic modelling of landslides. *Nonlinear Process. Geophys.* 2, 1–15. doi: 10.5194/npg-2-1-1995
44. Shakesby, R. A., Doerr, S. H. (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth Sci. Rev.* 74, 269–307. doi:10.1016/j.earscirev.2005.10.006
45. Tiranti D., Deangeli C. (2015) Modeling of debris flow depositional patterns according to the catchment and sediment source area characteristics. *Front. Earth Sci.* 3:8. doi:10.3389/feart.2015.00008
46. Tiranti D., Bonetto S., Mandrone G. (2008) Quantitative basin characterization to refine debris-flow triggering criteria and processes: an example from the Italian Western Alps. *Landslides* 5 (1): 45-57. doi:10.1007/s10346-007-0101-4
47. Tiranti D., Cremonini R., Asprea I., Marco F. (2016b) Driving Factors for Torrential Mass-Movements Occurrence in the Western Alps. *Front. Earth Sci.* 4:16. doi:10.3389/feart.2016.00016
48. 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 The using a Geographic Information System (GIS). *Computers & Geosciences* 70: 96-109. doi:10.1016/j.cageo.2014.05.004
49. Tiranti, D., Cavalli, M., Crema, S., Zerbato, M., Graziadei, M., Barbero, S., et al. (2016a). Semi-quantitative method for the assessment of debris supply from slopes to river in ungauged catchments. *Sci. Total Environ.* 554–555, 337–348. doi:10.1016/j.scitotenv.2016. 02.150
50. Wilford DJ, Sakals ME, Innes JL, Sidle RC, Bergerud WA (2004) Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides* 1:61–66