

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MILANO

Facoltà di Agraria

Corso di Laurea in Valorizzazione e Tutela dell'Ambiente e del
Territorio Montano.



IL DISSESTO IDROGEOLOGICO IN AMBITO MONTANO :
ANALISI DELL'EVENTO DI COLATA DETRITICA CHE IL 27 LUGLIO 2012
HA COLPITO LA VAL RABBIA DI SONICO (BS).

Relatore: Prof. Gian Battista BISCHETTI

Correlatore: Dott. Luca ALBERTELLI

Tesi di Laurea di:

Simone BENEYTO ORGILES

Matricola 732561

Anno Accademico 2011-2012

Alla mia famiglia senza la quale, non avrei mai intrapreso e concluso questo percorso; alla mia ragazza Nicole, per il sostegno fornitomi.

Sommario

1	IL DISSESTO IDROGEOLOGICO IN ITALIA	6
1.1	Il dissesto idrogeologico in regione Lombardia	6
2	IL DISSESTO IDROGEOLOGICO:	10
3	I FENOMENI DI COLATA DETRITICA.....	14
3.1	Condizioni necessarie allo sviluppo di una colata detritica.....	14
3.2	Caratteristiche dinamiche di una colata detritica	16
3.3	Classificazione dei fenomeni torrentizi in base alla reologia	18
3.4	Innesco delle colate detritiche	18
3.5	Il ruolo del permafrost nelle dinamiche di dissesto idrogeologico	20
3.5.1	Metodi per individuazione permafrost:	20
3.5.2	L'influenza del permafrost sulla stabilità dei versanti a quote elevate.....	21
3.6	Il cambiamento climatico e l'influenza che esercita sulle colate detritiche	22
4	ASPETTI IDROLOGICI.....	24
4.1	Le precipitazioni	24
4.2	Tipologia di deflusso.....	25
4.3	L' Influenza della tipologia di terreno e della presenza di vegetazione sulle dinamiche di deflusso:	25
4.4	Coefficiente di forma del bacino.	26
4.5	Effetto dell'orografia sulle precipitazioni.....	27
4.6	Stima della portata	28
4.6.1	Formule empiriche	28
4.6.2	Metodo razionale	29
5	LA DIFESA E LA MITIGAZIONE DELLE COLATE.....	31
5.1	Le sistemazioni idraulico forestali (opere strutturali)	31
5.1.1	Briglie di trattenuta	31
5.1.2	Opere di difesa spondale.....	34
5.1.3	Cunettoni.....	34
5.2	Sistemi d'allerta per colate detritiche (opere non strutturali).....	35
5.2.1	Definizione di una soglia critica di precipitazione	35
5.2.2	Sensori in grado di segnalare il passaggio di una colata detritica:.....	36
6	IL BACINO DI STUDIO.....	37
6.1	Ubicazione val Rabbia.....	37
6.2	Aspetti geologici	38
6.3	Aspetti morfologici	40

6.4	Caratteristiche del bacino idrografico	43
6.5	Caratteri morfologici del bacino che lo predispongono ad eventi di colata	44
6.6	Dati storici	50
6.6.1	Tracce di precedenti colate storiche nel conoide del bacino	54
7	STIME DI PORTATA LIQUIDA E SOLIDA PER IL BACINO DEL TORRENTE RABBIA	55
7.1	Portate di massima del bacino della Val Rabbia calcolate con metodi empirici.....	55
7.2	Stima della portata di colata partendo dalla portata liquida	55
7.3	Stima della magnitudo	61
8	EVENTO DEL 27 LUGLIO 2012.....	62
8.1	Descrizione	62
8.2	Analisi del fenomeno di colata.....	69
8.2.1	Analisi delle precipitazioni.....	69
8.2.2	Confronto tra le precipitazioni del 27 luglio e le LSPP	71
8.2.3	Effetto dell'orografia sulla precipitazione	72
8.2.4	Analisi delle temperature:.....	73
9	RISPOSTA DELLE OPERE STRUTTURALI.....	76
9.1	Verifica del comportamento della briglia selettiva:.....	76
9.2	Comportamento della scogliera	77
9.3	comportamento del cunettone in selciato.....	79
10	OPERE NON STRUTTURALI PRESENTI NEL TORRENTE DEL BACINO RABBIA	80
10.1	Soglie d'allarme specifiche per il bacino del torrente Rabbia	81
11	LA PARTICOLARE SITUAZIONE DELL'ABITATO DI RINO	84
12	CONCLUSIONI	87
12.1	Progetti futuri per la messa in sicurezza del cono di deiezione del torrente Rabbia.....	88

INTRODUZIONE

Il dissesto idrogeologico è l'insieme di quei processi (dall'erosione alle frane) che modificano il territorio in tempi relativamente rapidi, con effetti spesso distruttivi sulle opere e sulle attività umane (Legambiente, 2010). Le porzioni montane della Lombardia sono per buona parte considerate a rischio idrogeologico, e necessitano per questo motivo di interventi per la messa in sicurezza del territorio e dei cittadini. Sotto questo aspetto è estremamente importante che nella progettazione delle opere si tenga conto delle caratteristiche del bacino idrografico e delle tipologie di dissesto alle quali è maggiormente soggetto.

Questi eventi hanno da sempre interessato i comuni situati in zone montane e in molti casi hanno provocato ingenti danni alle strutture urbane, causando talvolta perdite anche in termini di vite umane. Negli ultimi anni stiamo assistendo ad un'enorme espansione demografica che ha come effetto un'estesa urbanizzazione sulle conoidi di deiezione situate alla base dei bacini idrografici, anche in luoghi in cui in passato non si edificava in quanto ritenute aree soggette a rischio, e ad una modificazione climatica che sta facendo registrare aumenti delle temperature che sono causa di un'intensificazione dei fenomeni temporaleschi e una diminuzione dello strato di permafrost che a quote elevate determina la resistenza dei terreni. Queste due tendenze evolutive (cambiamento climatico ed espansione urbanistica) con buona probabilità renderanno sempre più frequenti, intensi e dannosi i fenomeni di dissesto idrogeologico nelle zone montane alpine, per questo motivo è di estrema importanza analizzare gli aspetti che predispongono i bacini montani a eventi potenzialmente distruttivi, in modo da permettere una più idonea ed efficace applicazione delle opere di sistemazioni idraulico forestali necessarie per la messa in sicurezza dei cittadini.

In tale contesto, nel presente studio è stato considerato il fenomeno della colata detritica (debris flow), verificatosi in alta Vallecamosonica il 27 luglio 2012 all'interno del bacino del torrente Rabbia in comune di Sonico. Il lavoro ha cercato di verificare le cause scatenanti di questo fenomeno, mettendo in risalto gli aspetti che lo hanno caratterizzato maggiormente. L'obiettivo finale è stato quello di ricostruire e analizzare gli eventi che interagendo tra loro hanno portato al verificarsi del debris flow, e di mettere in risalto le caratteristiche dinamiche e distruttive di quest'ultimo. Per raggiungere quest'obiettivo è stato necessario utilizzare sinergicamente strumenti e conoscenze appartenenti a differenti materie di studio, quali: l'idraulica, la topografia, l'idrologia, la geologia e le sistemazioni idraulico forestali. Solamente operando in questo modo è possibile comprendere al meglio quei fenomeni che portano alla formazione di eventi di trasporto di massa quali le colate detritiche.

1 IL DISSESTO IDROGEOLOGICO IN ITALIA

La parola dissesto sta ad indicare un grave disordine difficilmente sanabile, mentre la parola idrogeologico si riferisce al fatto che questo disordine è provocato dalla presenza di acqua che in qualche modo interagisce con il terreno. Il territorio italiano è da sempre caratterizzato da un elevato grado di fragilità naturale, le dinamiche relative ai processi di dissesto idrogeologico hanno sin dai tempi antichi provocato gravi danni, sia in termini di perdita di vite umane che in termini di danni a strutture. Il perché di questa predisposizione del territorio al manifestarsi di questi fenomeni va ricercata nella costituzione geofisica del territorio italiano. L'Italia è infatti un paese geologicamente giovane, ed è quindi ancora molto esposta a fenomeni di orogenesi, inoltre è solcata per buona parte del suo territorio da due catene montuose: Le Alpi a nord, e dalla dorsale appenninica per gran parte della penisola. Un altro dato che predispone il nostro paese al rischio idrogeologico ci viene fornito dall'analisi altimetrica, la quale rivela che i suoi circa 30 Milioni di ettari costituenti il territorio nazionale, le zone superiori i 700 metri (quelle che secondo la definizione ISTAT sono da considerarsi "montagna") rappresentano il 35.2% e a questo dato va aggiunto il 41.6% del territorio rappresentato da colline, si giunge così ad una percentuale di circa il 77% di territorio caratterizzato da pendenze (IFFI,2011). Un altro fattore che rende l'Italia un territorio a forte rischio idrogeologico e da ricercare nella tipologia di precipitazioni a cui è soggetta. La distribuzione della pioggia sul territorio italiano è infatti solitamente concentrata in alcuni periodi dell'anno e spesso in questi periodi dell'anno si manifestano fenomeni particolarmente intensi o particolarmente prolungati i quali superano la capacità d'infiltrazione del terreno e ne modificano le caratteristiche meccaniche e di aggregazione di quest'ultimo.

1.1 Il dissesto idrogeologico in regione Lombardia

Secondo il progetto Avi (Aree vulnerate italiane) che mostra la ricostruzione del numero di frane e di alluvioni in Italia ricostruita sulla base di un'indagine storica, la Lombardia occupa il secondo posto in Italia come numero di frane, e il terzo posto per numero di alluvioni. Spetta ad alcune province lombarde quali Lecco, Sondrio, Bergamo, Brescia la maggior concentrazione di eventi rispetto alla superficie. Nel complesso la superficie totale di frana della regione Lombardia è di oltre 4000 km². La provincia con il maggior numero di frane è Sondrio, seguono Brescia, Bergamo, Como, Pavia, Lecco. Mentre le altre province lombarde hanno nel loro territorio un numero di frane nettamente inferiore rispetto alle sopracitate. Da quanto emerge dai dati del IFFI sembra che a livello generale le aree altimetriche più elevate siano anche le più franose. Secondo l'ultima pubblicazione dell'IFFI risalente al 2012 in Lombardia sono presenti 148.373 fenomeni franosi, di cui la tipologia più frequente è il colamento rapido. (tabella 1, figura1)

TIPOLOGIA DI FRANA	N° FRANE	%	AREA IN FRANA (KM2)	%
Crollo/ribaltamento	4731	3,189	28,276	0,685
Scivolamento rotazionale/traslatoivo	30576	20,608	875,727	21,229
Espansione	3	0,002	2,352	0,057
Colamento lento	1627	1,097	24,278	0,589
Colamento rapido	54546	36,763	212,043	5,140
Sprofondamento	65	0,044	0,532	0,013
Complesso	4692	3,162	168,607	4,087
DGPV	151	0,102	575,648	13,955
Area soggetta a crolli/ribaltamenti diffusi	42431	28,598	2044,908	49,573
Aree soggette a sprofondamenti diffusi	5	0,003	0,895	0,022
Aree soggette a fane superficiali diffuse	8862	5,973	191,200	4,635
n.d	684	0,461	0,617	0,015
TOTALE	148373	100,00	4125,083	100,00

Tabella 1 : Numero di frane e percentuale in base alla tipologia di movimento franoso nella regione Lombardia. (IFFI, 2012).

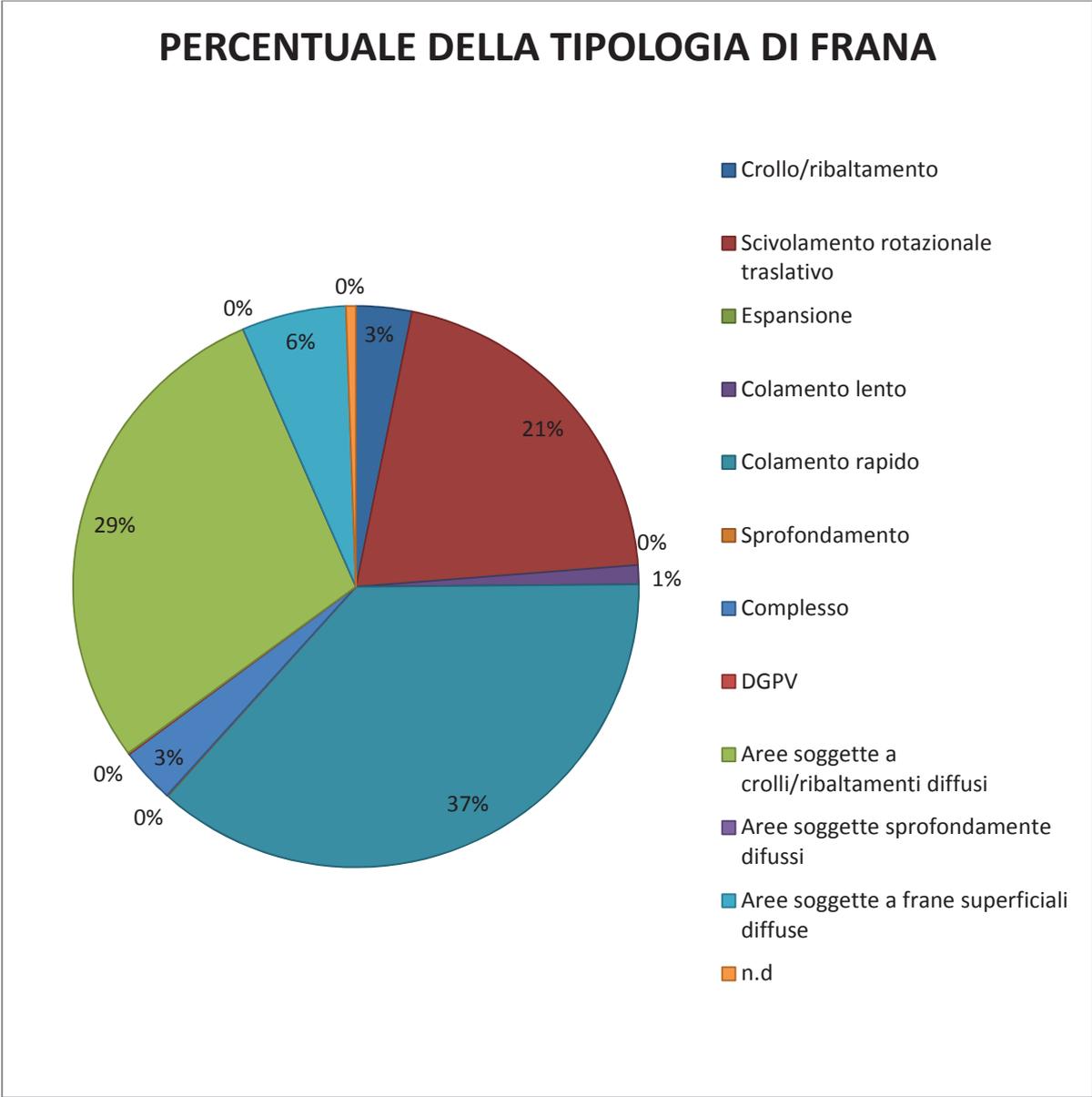


Figura 1 Istogramma relativo al numero di frane presenti in Lombardia per tipologia di dissesto. (IFFI,2012.)

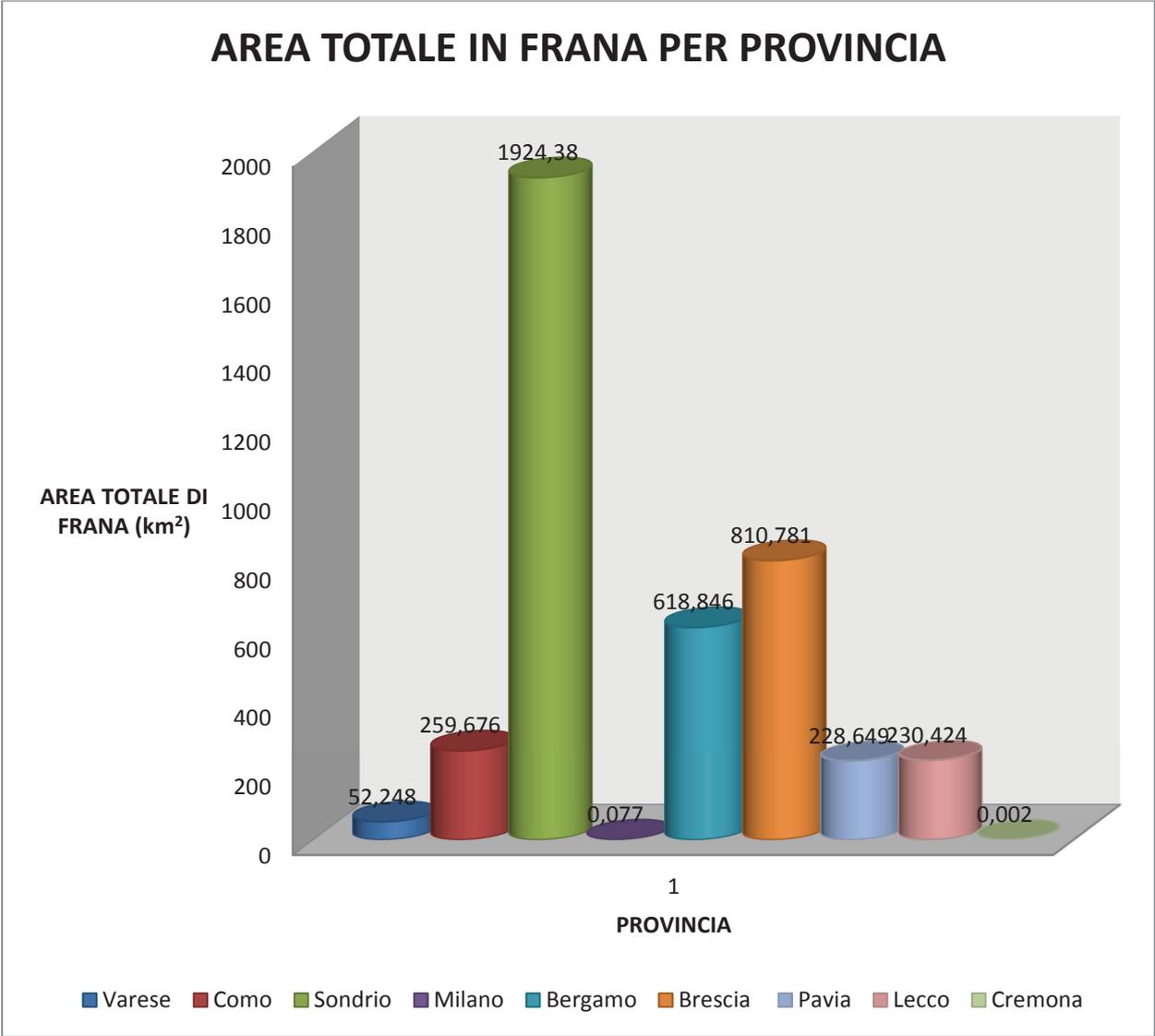


Figura 2: istogramma relativo all'area totale di frana per provincia lombarda.(IFFI, 2012)

2 IL DISSESTO IDROGEOLOGICO

Il dissesto idrogeologico può essere definito in generale come “un insieme di processi che vanno dalle erosioni contenute e lente alle forme più consistenti della degradazione superficiale e sottosuperficiale dei versanti, fino alle forme imponenti e gravi delle frane” (De Marchi 1967-1969). Le forme di dissesto idrogeologico sono molteplici e frequentemente sono il risultato di diversi processi che interagiscono reciprocamente. Possiamo classificare i fenomeni di dissesto in due tipologie in base alle dinamiche d’insacco:

- Erosione superficiale: l’erosione idrica superficiale consiste nel distacco e nel trasporto delle particelle di substrato in maniera isolata ad opera dell’acqua battente o dello scorrimento delle acque sulla superficie del suolo. L’erosione superficiale è influenzata da due fattori critici come l’intensità delle piogge (che determina la capacità di erosione della precipitazione) e le caratteristiche del substrato (che governano l’infiltrazione dell’acqua nel terreno e la resistenza alle forze di taglio di quest’ultimo). L’erosione superficiale è legata strettamente alla presenza di deflusso superficiale il quale solitamente non si verifica in quanto i bacini montani possiedono suoli con elevata capacità di infiltrazione data dalla presenza massiccia di materiale organico e molta macroporosità, e vegetazione. In ambito montano il deflusso superficiale si verifica in quegli ambienti caratterizzati da: suoli estremamente sottili, quasi privi di vegetazione e caratterizzati da elevate pendenze, i quali solitamente si trovano a quote che superano il limite di vegetazione arborea. (Bischetti, 2006).
- Movimento di massa: sono fenomeni che solitamente hanno ripercussioni molto più gravi rispetto al deflusso superficiale. Questi movimenti coinvolgono materiali di varia natura (terreno, roccia) che viene distaccato e trasportato verso valle lungo le superfici di scorrimento sotto l’effetto della forza di gravità. Nei movimenti di massa a differenza dei processi di erosione superficiale è la gravità a rappresentare la forza che governa questi fenomeni, mentre l’acqua la si può considerare come il fattore scatenante. I movimenti di massa sono classificati in base all’analisi di alcune caratteristiche specifiche:
 1. Tipo di materiale coinvolto (ghiaccio, rocce, terreno).
 2. In base alla velocità di movimento:
 - Rapido (crolli, colate, valanghe) -Intermedio (frane di detrito, scorrimenti)
 3. In base al meccanismo:
 - Frane ,Crolli ,Colate

La classificazione più utilizzata per i dissesti di versante è quella di Varnes (1978; si veda la tabella 2).

TIPO DI MOVIMENTO		TIPO DI MATERIALE		
		<i>terra (earth)</i>	<i>detrito (debris)</i>	<i>roccia (rock)</i>
crolli (falls)		crolli di terra	crolli di detrito	crolli di roccia
ribaltamenti (topples)		ribaltamenti di terra	ribaltamenti di detrito	ribaltamenti di roccia
scivolamenti (slides)	rotazionali	scivolamenti rotazionali di terra	scivolamenti rotazionali di detrito	scivolamenti rotazionali di roccia
	traslativi	scivolamenti traslazionali di terra	scivolamenti traslazionali di detrito	scivolamenti traslazionali di roccia
espandimenti laterali (lateral spreads)		espandimenti laterali di terra	espandimenti laterali di detrito	espandimenti laterali di roccia
colamenti o flussi (flows)		colata di terra	colata di detrito	flusso in roccia
frane complesse (complex)		combinazione di due o più tipi di movimento		

Tabella 2: classificazione dei movimenti franosi (Varnes 1978).

1. **Crolli:** Hanno origine da pareti verticali o fortemente inclinate, solitamente con inclinazioni non inferiori ai 45°-50°, nelle frane di crollo si ha un distacco di blocchi o di una massa rocciosa di dimensioni variabili. Solitamente si distingue la caduta dei singoli elementi di roccia (volume totale <math><1000\text{m}^3</math>) dai crolli in massa dove si stacca una massa rocciosa di un certo volume (>1000m³) la quale poi si disgrega durante la caduta in frammenti di varie dimensioni. Solitamente il distacco è improvviso senza segni premonitori. Il tempo di preallerta è così breve da non lasciare spazio ad una evacuazione. Il distacco del materiale avviene lungo una superficie definita in seguito ad uno spostamento di taglio minimo e la massa procede poi per caduta libera, rimbalzi, rotolamenti o scivolamenti (figura 3).

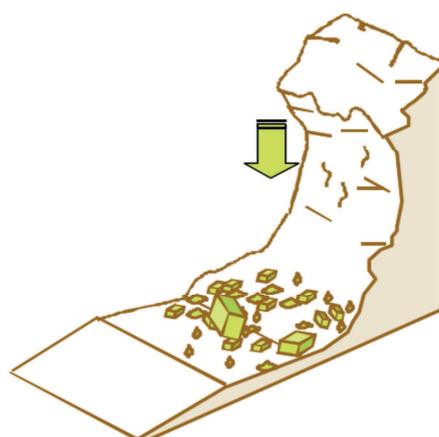


Figura 3 : schematizzazione di un crollo (Bischetti,2006).

Unico segno precursore è la presenza di nuovi frammenti detritici ai piedi del versante ed i crolli sono favoriti da forti escursioni termiche.

2. **Ribaltamento:** si tratta di movimenti che avvengono per rotazione verso l'esterno del pendio in genere di elementi rocciosi attorno ad un punto di rotazione, situato al disotto del baricentro della massa interessata (figura 4).

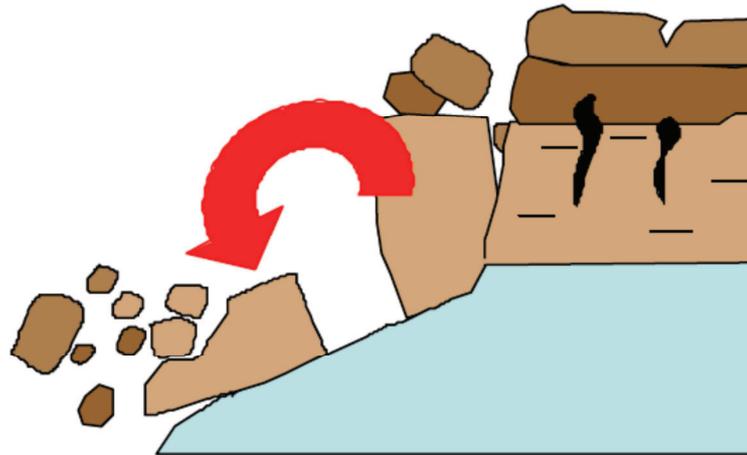


Figura 4: schematizzazione di un ribaltamento (Bischetti, 2006).

3. Scivolamenti: sono degli spostamenti a blocchi multipli o singoli per scorrimento lungo una o più superfici di rottura o lungo una zona di limitato spessore soggetta ad intense deformazioni di taglio. In funzione della forma della superficie di scivolamento si distinguono due tipologie di scivolamenti:

- **Traslazionali**: avviene solitamente lungo una ben precisa superficie di rottura o lungo una zona di spessore limitato (figura 5), sottoposta ad intense deformazioni di taglio. Normalmente si verifica quando c'è una discontinuità di substrato. Questa può essere anche molto in profondità (alcune decine di metri), ma più frequentemente interessano versanti di profondità minori (1 metro). Frequentemente si verifica una discontinuità in termini di densità di radicazione tra un primo strato molto radicato (dunque che aggiunge molta coesione) e in corrispondenza del cambiamento di substrato si ha una matrice meno fertile (assenza di radici) meno infiltrabile e dunque vi si deposita acqua. (possono evolvere in fenomeni di colata a causa dell'elevato contenuto d'acqua nel suolo).

Il movimento traslazionale è caratterizzato da superfici di scivolamento pressoché piana, tipica dei suoli colluviali di tipo alpino caratterizzati da poca coesione.

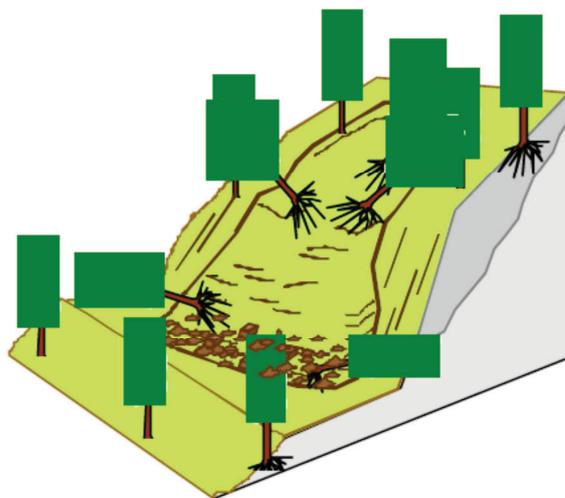


Figura 5: schematizzazione di uno scivolamento traslazionale (Bischetti, 2006)

- Scivolamenti rotazionali: la superficie di rottura è caratterizzata da una curvatura concava verso l'alto; essi sono dovuti a forze che producono quindi un movimento di rotazione attorno ad un punto situato al di sopra del centro di gravità della massa, sono fenomeni tipici di terreni coesivi (figura 6). (Bischetti, 2006)

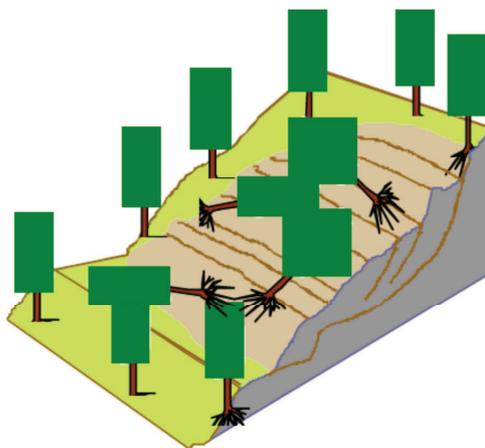


Figura 6 : schematizzazione di uno scivolamento rotazionale (Bischetti, 2006)

4. Colate : le colate detritiche (debris flow) si differenziano dalle altre tipologie di dissesto in quanto possiedono una sezione di distacco non ben definita (figura 7). Questa categoria coinvolge in genere dei materiali grossolani (che spesso provengono da altre tipologie di dissesto) lungo le aste torrentizie, scavano solchi a profilo a V e lasciano depositi laterali.

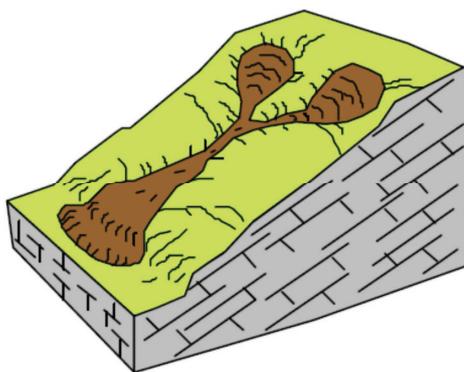


Figura 7: schematizzazione di una colata (Bischetti 2006).

5. Frane complesse: le frane ascrivibili a questa tipologia sono caratterizzate da un movimento risultante dalla combinazione di due o più tra le tipologie descritte in precedenza. Ad esempio uno scivolamento traslazionale sul versante può raggiungere un corso d'acqua a valle in grado di trasportare il materiale e se il materiale è sufficiente e le caratteristiche dell'alveo sono adeguate (es. pendenza) può formarsi una colata detritica.

3 I FENOMENI DI COLATA DETRITICA

Le colate di detriti sono fenomeni di trasporto solido assai intenso che si manifestano nei corsi d'acqua montani caratterizzati da una pendenza molto elevata; per quanto riguarda la modalità di formazione presentano delle spiccate differenze rispetto alle frane convenzionali vere e proprie poiché la superficie di distacco nelle colate non è ben definita. Si tratta di fenomeni molto frequenti nelle alpi e per questo molto insidiosi. Nei meccanismi d'innescò di colata solitamente il moto dei sedimenti è provocato direttamente dalla forza di gravità, mentre si può ritenere che l'acqua svolga il ruolo di fattore scatenante. Questo tipo di trasporto è definito trasporto di massa e, secondo la composizione granulometrica e mineralogica, viene distinto in colate di detriti o colate di fango.

Questi fenomeni sono noti da molto tempo alle popolazioni di tutto il mondo, di seguito alcune definizioni locali:

- PHAIRO (Himalaya)
- SHWA (Himalaya)
- ALUD (Paesi Andini)
- DESLAVES (America Latina)
- DEBRIS FLOW (Paesi Anglosassoni)
- DOSEKIRYU (Giappone)
- LAVE TORRENTIELLE (Francia)
- RUGHI (Friuli)
- LAVA (Val Chiavenna.)
- ROVINA (Piemonte)

Le colate detritiche sono fenomeni che presentano grande potenza distruttiva; essi riguardano soprattutto i bacini minori e in particolar modo i conoidi di deiezione, che sono stati oggetto di recente urbanizzazione. A causa del carattere inatteso di questi eventi, spesso la loro capacità distruttiva è sottovalutata; torrenti minori, che per lunghi periodi sono interessati da eventi liquidi o solidi assai modesti, sono saltuariamente percorsi da colate di detriti d'ingente intensità. Il più delle volte è molto difficile determinare la ricorrenza di tali eventi, perché i debris flow in molti casi hanno tempi di ritorno di cinquanta o più anni; ciò è dovuto al meccanismo d'innescò improvviso che porta alla formazione del fenomeno.

Le colate detritiche derivano dalla movimentazione di ammassi granulari che risiedono in prossimità di pendii molto pendenti, (oltre i 20°) che proseguono lungo l'alveo e si arrestano solo con pendenze inferiori al 3%.

3.1 Condizioni necessarie allo sviluppo di una colata detritica

1) Caratteristiche morfologiche del bacino: la morfologia del bacino è una prerogativa fondamentale in quanto bacini con forme poco allungate (capaci di ricevere il centro di scroscio di una cella temporalesca breve e intensa) fanno sì che i tempi di corrivazione siano più brevi, ciò comporta picchi di colmo di piena nella sezione di chiusura più elevati, questo si traduce in

un'altezza di tirante idrico maggiore e dunque tensioni elevate esercitate dalla corrente capace di muovere sedimenti di maggiori dimensioni.

2) La presenza di materiale che alimenti la colata può esser distinto in tre tipologie:

- Materiale detritico originato dall'azione meccanica dei ghiacciai sulla roccia madre e accumulato solitamente su versanti caratterizzati da elevate pendenze in prossimità delle vedrette glaciali.
- Detrito presente nel letto del fiume, all'aumentare delle portate dunque della tensione può esser mobilizzato.
- Detrito originatosi dall'azione erosiva della colata che si autoalimenta erodendo i versanti.

3) Adeguata pendenza del fondo dell'alveo: Pendenza dell'alveo in cui la colata s'incanala sino a raggiungere il cono di deiezione; tanto maggiori sono le pendenze tanto maggiore sarà la componente tangenziale della forza di gravità che agisce sulla colata facendone aumentare la velocità e dunque l'energia cinetica.

4) Apporto d'acqua sufficiente per la mobilitazione dei sedimenti: Essendo le colate detritiche costituite da una mistura di solidi e acqua (in misura assai variabile) per la loro generazione e propagazione è necessario un certo volume d'acqua. Nella maggior parte dei casi l'acqua è fornita da un evento di pioggia, possiamo dire che un episodio di pioggia intensa (generalmente un temporale estivo, ma non solo) è una condizione necessaria allo sviluppo di una colata detritica torrentizia.

5) Tipologia di copertura del soprasuolo del bacino: la tipologia di copertura influenza la velocità con la quale l'acqua caduta attraverso l'evento piovoso raggiunge la sezione di chiusura del bacino, determinando livelli di picchi di piena più o meno elevati. Inoltre non bisogna sottovalutare l'azione compiuta dalla componente vegetale presente, in grado di attenuare l'impatto delle goccioline di pioggia con il suolo (dunque dissipamento di energia cinetica) e l'effetto assorbente esercitato dalle radici.

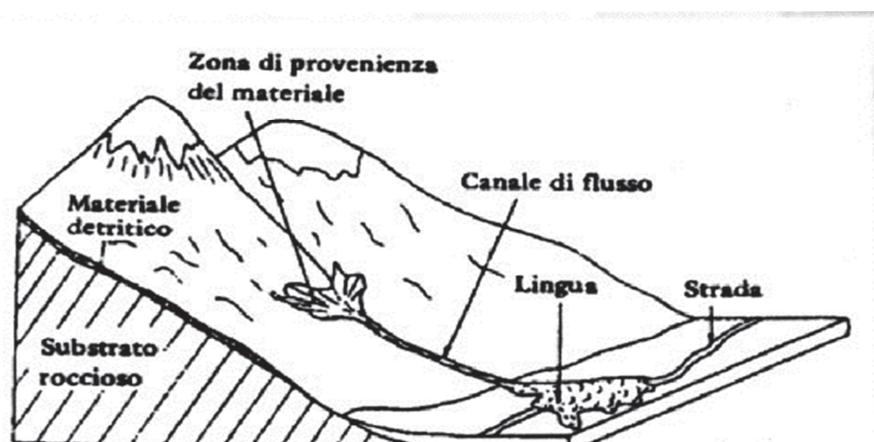


Figura 8: schematizzazione di una colata detritica

3.2 Caratteristiche dinamiche di una colata detritica

I flussi di detrito possono essere definiti come movimenti di massa di origine gravitativi con caratteristiche intermedie tra scivolamenti superficiali e processi di piena idraulica vera e propria, con caratteristiche meccaniche e idrauliche differenti da entrambi i processi citati.

Un flusso di detrito è costituito da una miscela d'acqua e componente solida, avente granulometria eterogenea che spazia dalle argille ai blocchi di diametro fino a diversi metri. La percentuale di frazione solida deve essere abbastanza grande, indicativamente superiore al 30 %, in modo da fornire a questo moto caratteristiche differenti da quello puramente idraulico, ma inferiori a un valore massimo del 70%, per disperdere la frazione solida su tutta l'altezza dell'acqua in modo da preservare le caratteristiche fluide del moto (che gli consentano di muoversi anche su pendenze inferiori al 5%) e non ricadere negli scivolamenti superficiali. Il moto è caratterizzato da velocità che vanno da 2 m/s a 20 m/s, il moto è caratterizzato da una natura pulsante, dovuto all'eterogeneità del materiale. Una volta innescati questi processi possono raggiungere portate superiori rispetto a quelle prevedibili per una piena di sola acqua chiara o trasporto ordinario di sedimento.

La miscela, che può includere anche blocchi di elevate dimensioni, può far sì che il loro potere distruttivo sia elevato. Osservando il movimento di una colata detritica si può intuire che un fenomeno di questo tipo varia molto con il variare delle caratteristiche di materiale solido da cui è composta (granulometria, concentrazione, assortimento). Il risultato di analisi su diverse colate di detrito ha indicato come la porzione di materiale limoso e argilloso, sia solitamente limitato al 10-20 %. Sono state calcolate viscosità, newtoniane superiori a $8 \cdot 10^3$ poise, da confrontarsi con la viscosità dell'acqua pura a 20 °C pari a circa 0,01 poise. La densità della colata può variare da caso a caso, essa può variare da 1400 kg/m^3 (per colate più vicine a un flusso di sedimenti iperconcentrato) a 2500 kg/m^3 (per colate relativamente asciutte).

Le colate tendono ad autoalimentarsi, per questo motivo sono molto erosive durante il loro moto, la forza totale di taglio esercitata da un fluido sul letto del canale può essere espressa come:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot S$$

DOVE:

- τ è lo sforzo di taglio totale, (N/m^2)

- g è l'accelerazione di gravità, (m/s^2)

- R è il raggio idraulico, (m)

- S è la pendenza del canale,

- ρ è la densità. (kg/m^3)

Tutte queste caratteristiche rendono il fenomeno di colata estremamente complesso da studiare poiché l'allontanano dai tipi di fluido Newtoniano, conferisce alla colata comportamenti differenti rispetto ai fluidi classici come l'acqua (figura 9).



Figura 9: passaggio della colata detritica sulla briglia, si evidenzia la forza distruttiva e la maggiore densità rispetto ad un trasporto solido classico.

Le colate detritiche tendono ad assumere una precisa conformazione, in cui la parte più avanzata prende il nome di testa ed è caratterizzata da una altezza maggiore rispetto alle porzioni più arretrate. Inoltre la testa di una colata detritica è caratterizzata da una maggiore percentuale di componente solida e solitamente presenta i massi di maggiori dimensioni (figura 10). Queste caratteristiche ne fanno aumentare la forza distruttiva.

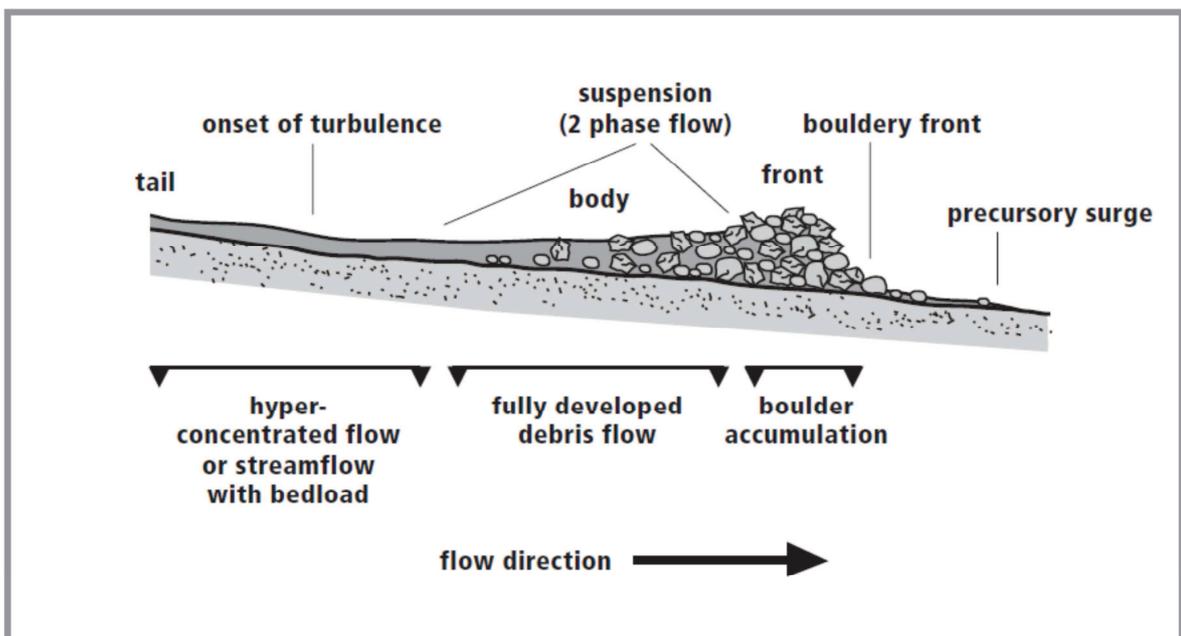


Figura 10: schematizzazione di una colata detritica, la quale per sua natura è costituita da una testa nella quale si accumula il materiale di diametro maggiore e una coda di portata inferiore costituita da una maggiore percentuale di acqua e materiale di diametri inferiori.

3.3 Classificazione dei fenomeni torrentizi in base alla reologia

La reologia è la scienza che si occupa dello studio dello scorrimento di quei materiali che hanno un comportamento non newtoniano. Le colate detritiche sono spesso caratterizzate da comportamenti non newtoniani.

$$C_v = V_s/v$$

Dove:

C_v = concentrazione volumetrica

V = volume solido

V = volume totale

LIQUIDO	C_v (%)	DENSITA' (kg/m^3)
Fluido acquoso	0-20%	1000-1330
Fluido iperconcentrato	20-47%	1330-1800
Debris flow	47-77%	1800-2300

Tabella 2: Classificazione dei liquidi in funzione della densità, si può comprendere che una volta che la concentrazione di sedimenti supera una certa percentuale e ciò fa aumentare la densità del fluido ecco che non si ha più a che fare con un tradizionale trasporto solido ma con una colata, fenomeno quest'ultimo che è caratterizzato da dinamiche di scorrimento differenti rispetto un fluido newtoniano.

Vi sono tre tipologie di debris flow in base alla composizione: (tabella 2)

- Stony debris flow : corrente detritica matura-pietrosa, il sedimento risulta distribuito sull'intera profondità della corrente. Viscosità molto elevata.
- Debris flow macroviscoso; E' una via di mezzo tra i due.
- Immature debris flow: il sedimento è concentrato solo nella parte inferiore della corrente ed è sovrastato da acqua che in genere contiene particelle solide in sospensione.

3.4 Innesco delle colate detritiche

Possiamo dividere in due le tipologie d'innescò, in entrambi i casi vi è la necessità di presenza di materiale detritico non consolidato.

- Il modello di flusso superficiale schematizzato da Takahashi stabilisce che:

la possibilità d'innescò di un flusso di detrito sia dovuta alla comparsa di un flusso d'acqua superficiale, la cui azione di trascinamento sui sedimenti sia tale da determinare il distacco di una porzione di materiale sufficiente a provocare un deflusso di detriti. Il flusso superficiale è solitamente la causa più frequente per l'innescò del moto.

Secondo il valore dei parametri geologici, topografici e dell'altezza della lama d'acqua, si eserciteranno tensioni sui sedimenti in grado di creare o no il moto verso valle di questi ultimi, quindi maggiori saranno le tensioni esercitate, maggiori saranno le dimensioni del sedimento trasportate a valle.

Dove:

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot j$$

τ = Tensione esercitata dalla corrente (N/m²).

γ = Peso specifico della colata N/m³

R = Raggio idraulico(m).

j = Pendenza al fondo che in condizioni di moto uniforme coincide con la linea dei carichi totali.

La tensione critica è proporzionale al peso specifico del liquido e le colate hanno un peso specifico superiore circa il doppio rispetto all'acqua, ecco che le tensioni aumentano e dunque si incrementa anche la capacità di trasportare materiale più grossolano verso valle.

- Aumento della pressione interstiziale delle particelle di suolo (legge di Mour- Coulumb): nel momento in cui l'acqua colma i pori l'attrito tra le particelle di sedimento diminuisce, questo si verifica perché in qualche modo la pressione che si ha all'interno dei pori tende a spingere in maniera contraria all'effetto stabilizzante della forza normale.

Questo è il motivo per cui l'acqua tende a provocare movimenti di massa e innesco di colate. Per questo aspetto l'acqua possiede grande importanza nelle dinamiche relative ai movimenti di massa rendendola il fattore scatenante.

Legge di Mour-Coulumb:

$$\tau = C + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi$$

Dove:

T= Tensione, resistente alla rottura del terreno (N/m²).

C= Coesione, rappresenta le forze elettriche che tengono unite le particelle di terreno(N/m²).

σ = Pressione di confinamento efficace (N/m²).

u=Pressione interstiziale (N/m²).

$\operatorname{tg} \varphi$ = Rappresenta il coefficiente di attrito (adimensionale), dove φ è l'angolo di resistenza al taglio (angolo di naturale declivio).

$(\sigma - u)$ = Tensione efficace (N/ m²).

Quando lo spessore dello strato saturo raggiunge un livello critico, cioè in grado di superare le forze d'attrito, un apporto idrico graduale produce in questi casi eventi franosi più o meno saturi, che normalmente non si trasformano in debris flow poiché l'acqua è insufficiente a portare ad una fluidificazione del materiale, mentre in presenza di grandi quantità d'acqua e rilevanti pendenze possono portare alla formazione d'intensi e rapidi debris flow. Questo meccanismo può portare al franamento di un versante all'interno di un alveo e dunque alla conseguente formazione di una colata.

3.5 Il ruolo del permafrost nelle dinamiche di dissesto idrogeologico

La fusione del permafrost negli ultimi anni è stata indicata come una delle principali responsabili di diversi fenomeni di dissesto idrogeologico. Il permafrost viene definito come: “qualsiasi materiale che rimane ad una temperatura inferiore a 0°C per almeno più di due anni consecutivi” (Brown e Kupsich, 1974). Questa definizione indica che il permafrost può essere totalmente asciutto, privo pertanto di ghiaccio. La stabilità dei versanti, in condizioni di permafrost è fortemente condizionata dalla distribuzione areale e verticale (in profondità) del permafrost, ma ancor più dalla distribuzione del ghiaccio, della sua tipologia e della sua temperatura all'interno del permafrost stesso. Il permafrost si forma conseguentemente ad un bilancio energetico deficitario della superficie per cui la temperatura superficiale rimane per la maggior parte dell'anno al di sotto degli 0°C. Tale bilancio energetico dipende quindi dalle condizioni climatiche e dalle caratteristiche della superficie stessa. La variazione della superficie, in particolare per quanto riguarda l'albedo e la rugosità che influiscono rispettivamente sul bilancio radioattivo e sui flussi di calore sensibile e latente possono, a parità di input climatico, far variare significativamente di diversi gradi la temperatura superficiale. Le variazioni della superficie sono quindi fondamentali nel variare le condizioni del permafrost, quindi sia le variazioni di vegetazione che le variazioni legate a modificazioni antropiche e soprattutto le variazioni areali e temporali di copertura nevosa, sono fondamentali nell'equilibrio di questa componente criosferica (Guglielmin, 2004, 2006). Dunque si capisce come il clima, in modo particolare la temperatura dell'aria, radiazione solare, concorrono in modo fondamentale direttamente nel bilancio, ma anche la precipitazione nevosa (soprattutto nell'ambito alpino) ed il suo accumulo al suolo, quest'ultimo fortemente condizionato dalle caratteristiche superficiali e dal vento, sono fondamentali per consentire la formazione del permafrost, il suo aumento o la sua degradazione. Nelle regioni alpine durante la stagione estiva il permafrost è sempre sottostante ad uno strato più o meno elevato solitamente due-tre metri di sedimenti o di roccia con temperature che rimangono positive da qualche giornata a qualche mese all'anno.

3.5.1 Metodi per individuazione permafrost:

L'individuazione del permafrost è un'operazione non semplice, per compierla solitamente vengono utilizzati diversi metodi:

1. Metodo diretto: attraverso l'esecuzione di sondaggi che raggiungono la tavola del permafrost e vengono poi attrezzati per la misura della loro temperatura.
2. Metodi indiretti:
 - Rilevamento idrogeologico: infatti a parità di quota, le sorgenti localizzate in corrispondenza di permafrost presentano temperature estive nettamente inferiori a quelle di risorgive senza permafrost.
 - Analisi chimiche delle acque: si possono ricavare utili informazioni sulla presenza di permafrost in quanto diversi processi chimici di alterazione e pedogenesi vengono limitati o impediti nel permafrost.

- Rivelamento vegetazionale: diversi tipi di associazione vegetale possono indicare la diversa distribuzione del permafrost, in particolar modo in piante con radicale profondo.
- Metodi termici: l'analisi dei profili termici nella parte più superficiale (30cm) durante la stagione estiva, permette di ottenere una stima del permafrost. (Guglielmin, 1997).
- Metodi geofisici: si basano sul concetto che il ghiaccio muta le proprietà elettriche, elettromagnetiche di propagazione delle onde sismiche e dunque può essere facilmente individuato.
- Modelli di distribuzione del permafrost: modelli basati su regole di carattere geografico (es.: quota-esposizione), sulla distribuzione di forme correlate al permafrost in relazione a parametri geomorfologici.

3.5.2 L'influenza del permafrost sulla stabilità dei versanti a quote elevate

La presenza di strati più o meno profondi di permafrost nei versanti situati a quote elevate, al di sopra del limite della vegetazione arborea in quei versanti costituiti per la maggior parte da materiali con proprietà coesive pressoché nulle come sabbia e ghiaia, ne garantisce una maggiore stabilità e resistenza alle forze di taglio. Questo aumento di resistenza è dovuto sostanzialmente all'aggregazione che la componente acquosa congelata presente nel terreno provoca tra le diverse componenti del suolo, rendendole uno strato maggiormente compatto (figura 11). A causa delle alte temperature che si raggiungono durante le stagioni estive e a causa del forte irraggiamento solare, caratteristico di quel periodo, lo strato di permafrost può in certi casi sciogliersi, anche in profondità a diversi metri dalla superficie. Questo processo rende quei versanti esposti a quote elevate che molto spesso sono anche caratterizzati da spiccate pendenze, fortemente instabili e più facilmente soggetti processi di dissesto idrogeologico.



Figura 11: immagine rappresentante permafrost alpino. (permaNET,2012)

3.6 Il cambiamento climatico e l'influenza che esercita sulle colate detritiche

Dal rapporto sullo stato dell'ambiente in Lombardia del 2007, sui cambiamenti climatici effettuato dall'arpa, emerge che l'aumento della percentuale di gas serra nella composizione dei gas atmosferici, in particolar modo dell'anidride carbonica che è passata dalle 280 parti per milione (ppm) nell'epoca preindustriale fino ai livelli attuali ormai prossimi a 400 ppm, le analisi dei ghiacci polari dimostrano che si tratta di valori mai raggiunti da centinaia di migliaia di anni almeno. Questa variazione della composizione atmosferica ha innescato una serie di effetti fra i quali il più concordemente accettato è l'aumento della temperatura globale, particolarmente evidente negli ultimi decenni. Considerando quale temperatura media annuale quella calcolata sul trentennio di riferimento climatologico 1961-1990 pari a 13°C per le stazioni di misura Lombarde studiate, e convenzionalmente indicate con il valore zero le temperature medie di ogni anno che oscillano intorno a tale valore. L'aumento tendenziale delle temperature medie annuali fenomeno ampiamente descritto a scala planetaria, continentale, nazionale appare rilevabile anche a scala regionale. In Lombardia, sporadiche anomalie positive comprese tra 0,5 c° e 1,0 c° sono state registrate negli ultimi cinquant'anni ma è dal 1999 che le tendenze alle anomalie positive si è fatta decisa, raggiungendo il valore di 1,9 °C sopra il valore di riferimento nel 2003(figura 12, arpa Lombardia,2007).

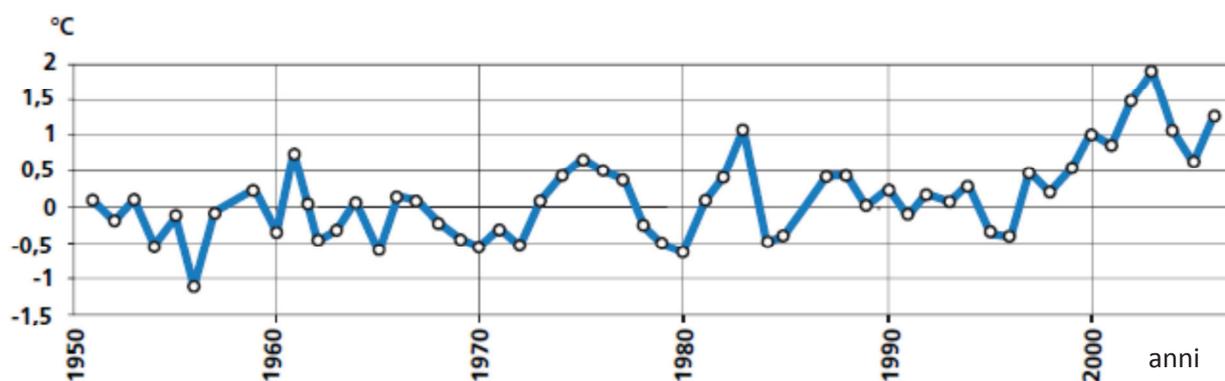


Figura 12: Grafico delle temperature medie annuali. (ARPA Lombardia, 2007)

Questo aumento delle T° crea forti ripercussioni anche a livello di dissesto idrogeologico, in particolar modo nei riguardi dei fenomeni di colata detritica.

Le alte temperature agiscono:

- Modificano la struttura del permafrost, facendo diminuire la coesione dei terreni d'alta quota.
- Causano il ritiro dei ghiacciai.
- Portano alla formazione di fenomeni temporaleschi maggiormente intensi, anch'essi in aumento negli ultimi anni (figura 13).

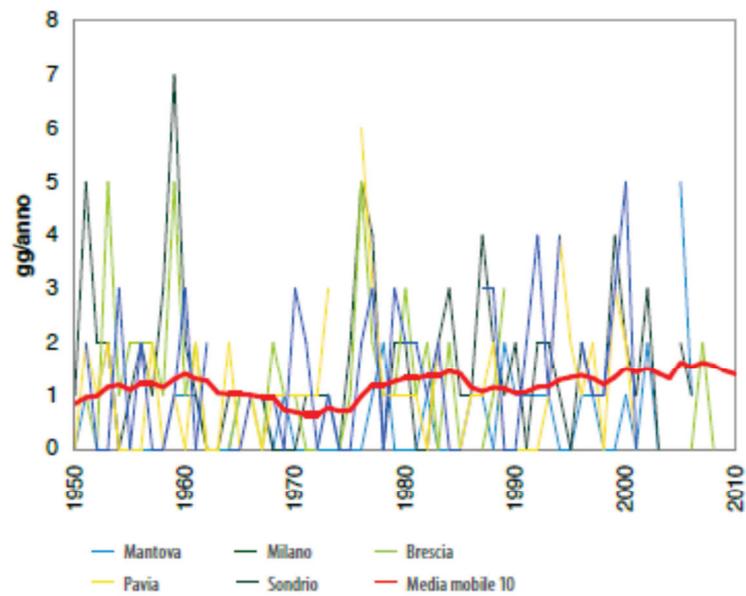


Figura 13 : andamento dei giorni di pioggia molto intensa in siti significativi della Lombardia 1950-2010. (ARPA Lombardia,2010-2011). Dal grafico si può intuire come negli ultimi dieci anni vi sia stato un incremento nella frequenza dei fenomeni piovosi intensi.

Da un'analisi dell'andamento delle temperature medie della regione Lombardia si intuisce come lo scenario relativo agli eventi di colate detritiche non può che peggiorare, in quanto l'aumento delle temperature sarà accompagnato sempre più da un numero maggiore di fenomeni di colata e da eventi caratterizzati da maggiore intensità.

4 ASPETTI IDROLOGICI

L'idrologia è la scienza che studia l'acqua e ne considera la sua distribuzione spaziale e temporale, la sua circolazione e le sue proprietà chimico- fisiche.

4.1 Le precipitazioni

Gli studi idrologici si occupano anche delle precipitazioni le quali sono legate al sollevamento di massa di aria umida che raffreddandosi condensa provocando la pioggia. Esistono diverse tipologie di precipitazione:

Convettive: sono le più pericolose per i bacini montani in quanto possiedono caratteristiche spazio temporali tali da provocare i picchi di piena più pericolosi. Il meccanismo con cui si formano è innescato dal forte irraggiamento solare, tipico dei mesi estivi, che tende a scaldare molto la superficie terrestre, ciò provoca l'evaporazione dell'umidità contenuta nel suolo. La massa d'aria calda formata tende a sollevarsi sino a quando raggiunge temperature prossime allo zero termico dove tende a condensarsi formando precipitazioni molto intense e molto localizzate. Appartengono alla categoria delle precipitazioni convettive i temporali, essi sono costituiti da una o più nubi cumuliformi o celle, per la cui formazione è necessario che l'atmosfera sia instabile e che l'aria contenga un'elevata quantità di vapore acqueo (Battan 1967). Ogni cella ha un diametro di qualche km e un ciclo di vita di circa mezz'ora. Poiché le celle si succedono nel tempo l'una dopo l'altra, il temporale può durare anche diverse ore, se pur con intensità differenti (figura14).

Frontali: si verificano quando una massa di aria calda tende a scorrere su un fronte di aria fredda, in questo caso la pendenza della linea di separazione tra i due fronti è poco inclinata e questo meccanismo dà origine a precipitazioni molto estese e poco intense. Questa tipologia di perturbazione è in grado di mettere in crisi bacini molto estesi.

Cicloniche: si verificano quando un fronte freddo si incunea al di sotto di un fronte di aria calda creando una linea di separazione molto ripida, ciò ha come conseguenza il manifestarsi di perturbazioni meno estese rispetto a quelle frontali ma più intense, capaci di mettere in crisi quei bacini di dimensioni medio-piccole dell'ordine dei centomila km².

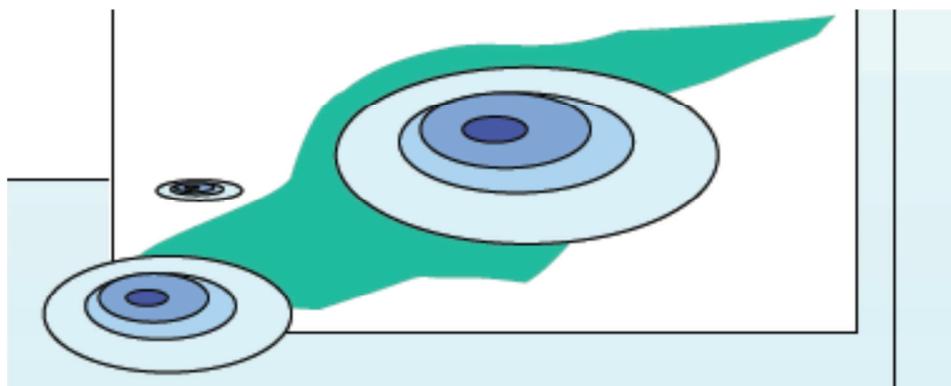


Figura 14 : schematizzazione del carattere concentrico di una perturbazione. (Bischetti, 2006).

4.2 Tipologia di deflusso

La tipologia di deflusso che si verifica all'interno di un bacino idrografico durante una precipitazione a forti ripercussioni sul picco di piena, tanto più veloce sarà il deflusso e tanto maggiore sarà la portata massima nella sezione di chiusura, e di conseguenza tanto maggiore sarà la possibilità che si verifichino episodi di trasporto solido. Il deflusso superficiale è la modalità di deflusso che maggiormente caratterizza i picchi di piena e può esser diviso in due tipologie:

Deflusso di tipo Hortoniano: si verifica quando l'intensità di pioggia supera la velocità d'infiltrazione. La conducibilità idraulica nei suoli complessi è molto elevata e difficilmente l'intensità di precipitazione che si verifica nei climi temperati è in grado di superare la velocità d'infiltrazione e dunque di provocare deflusso superficiale di tipo Hortoniano. Questa tipologia è invece molto tipica negli ambienti aridi, con suoli sottili e poca vegetazione.

Deflusso di tipo Duniano: è caratterizzato da condizioni di saturazione alla base dei versanti e in zone di concavità. L'acqua precipitata si infiltra nel terreno e poi scorre a valle poiché il suolo è caratterizzato da grande conducibilità, in questo modo l'acqua satura i versanti al piede ed è proprio in quel punto in cui la precipitazione che raggiunge il suolo crea deflusso superficiale. Solitamente è meno rapido rispetto all'Hortoniano e genera picchi di piena meno elevati.

4.3 L'Influenza della tipologia di terreno e della presenza di vegetazione sulle dinamiche di deflusso:

la presenza di vegetazione, sia arborea che erbacea, esercita consistenti effetti sulla stabilità dei versanti. Questi effetti sono riassumibili in:

1) L'intercettazione: è il fenomeno per cui l'acqua piovana viene trattenuta dalle foglie o scorre lungo i rami e i fusti delle piante, per poi in parte ritornare per evapotraspirazione nell'atmosfera. In tal caso la piovosità al suolo, cioè la quantità di pioggia che raggiunge la superficie del terreno, è inferiore alle precipitazioni registrate dalle stazioni meteorologiche. L'entità dell'intercettazione dipende dall'impatto della pioggia e dalle caratteristiche del bosco, quali la densità della massa fogliare e quindi del bosco. Specie arboree, età, statura delle piante, interventi colturali effettuati. All'inizio di una pioggia quando le chiome sono asciutte, una notevole parte dell'acqua può restare intercettata: col crescere dell'importo di acqua, vale a dire della durata o dell'intensità di pioggia, o di entrambe, l'intercettazione va attenuandosi, fino a diventare minima o nulla.

2) Riduzione della forza d'impatto delle gocce d'acqua sul terreno: gli organi aerei della vegetazione hanno anche il potere di frenare la velocità e quindi ridurre l'energia cinetica delle gocce al momento dell'impatto con il terreno. Impedendo così che la maggior parte di essa percuota violentemente e direttamente la superficie del terreno, in tal modo le foglie i rami e i fusti rallentano l'impatto dell'acqua al suolo facendola scaricare su se stessi e non sul terreno assorbendo così gran parte dell'energia posseduta dalle gocce. L'impatto dell'acqua al suolo può provocare lo spostamento delle particelle più fini del terreno, che possono andare ad occludere i pori dello stesso, diminuendone così la permeabilità.

3) Effetto regimante: un notevole effetto regimante si ha quando il suolo è dotato di favorevoli caratteristiche sedimentologiche, come la classazione granulometrica e l'intelaiatura tessiturale (ad esempio granulare) e presenti un buon contenuto di sostanza organica (lettiera e humus), con anche uno spessore adeguato: ciò comporta un'elevata infiltrazione e una buona capacità di ritenuta idrica. Tutto questo significa che ci troviamo in presenza di un bosco efficiente, in cui la vegetazione è in equilibrio con il suolo e con altri parametri ambientali (fauna-clima) a costruire un ecosistema naturale. In queste condizioni il deflusso superficiale è ridotto, anche in caso di piogge intense.

4) Azione antierosiva: dipende in parte dalle stesse condizioni che ne determinano la funzione regimante, prima descritta, e che producono una certa permeabilità nel terreno: Per altra parte essa deriva dalla protezione meccanica offerta dalle piante. Questa si esplica attraverso un'azione frenante nei confronti dell'acqua di scorrimento superficiale, che nel suo spostamento verso valle incontra gli ostacoli della base dei fusti, dei ceppi e di altre asperità (rami caduti, lettiera grossolana ecc....) per questo motivo riesce raramente a formare lame o rivoli di una certa consistenza. La ritardata o impedita confluenza di questi rivoli in rigagnoli riesce a prolungare i tempi di corrivazione delle acque di afflusso meteorico, cioè del tempo necessario per raggiungere la sezione di sbocco di un bacino partendo dai punti più remoti dello stesso.

5) Ingabbiamento: questa azione viene esplicita dall'insieme dei tronchi e degli arbusti, della vegetazione morta e dalle radici.

La vegetazione è in grado di interagire anche con la temperatura, influenzando le variazioni di temperatura sia dell'aria che del suolo rendendole meno accentuate, questo effetto di mitigazione del clima è possibile in quanto la copertura vegetale riduce l'incidenza dei 2 principali fattori che regolano il clima: l'irraggiamento solare e i movimenti della massa d'aria. Questo fenomeno permette una maggiore stabilità meccanica dei versanti, perché un'attenuazione degli sbalzi termici (i quali sono alla base dei fenomeni di rottura delle rocce) riduce di conseguenza la produzione di materiale trasportabile al verificarsi di situazioni di piogge intense o prolungate. E' necessario fare una precisazione, perché non sempre la copertura vegetale contribuisce ad una maggiore stabilità dei versanti, è questo il caso in cui la superficie di scorrimento del versante instabile si trova ad una profondità superiore di quella raggiungibile dalle radici delle piante. In questo caso l'azione prodotta dalle piante produce un effetto destabilizzante in quanto non fa altro che aumentare le forze di taglio responsabili dello scivolamento verso valle del materiale. Da queste considerazioni si comprende il perché è di basilare importanza possedere dei riferimenti cartografici in grado di fornirci informazioni sulle caratteristiche del bacino, quali la mappa d'uso del suolo, carta altimetrica e delle pendenze, per poter svolgere una stima realistica dei deflussi e delle portate di picco. (Mario Panizza,2007)

4.4 Coefficiente di forma del bacino.

La forma planimetrica del bacino condiziona alcuni fenomeni idrologici che in esso si verificano come, ad esempio, i tempi di trasferimento delle gocce di pioggia cadute sul bacino. Per caratterizzare la forma di un bacino sono stati proposti diversi indici di forma, tra questi uno di

quelli maggiormente utilizzati è quello di Gravelius che viene più comunemente denominato indice di compattezza del bacino:

$$R_K = \frac{0.28 \cdot P}{\sqrt{A}}$$

Dove:

- P = perimetro del bacino in esame (km)
- A = Area del bacino in esame (km²)

Tanto più questo valore si avvicina ad 1 e tanto più il bacino possiede una forma arrotondata, tanto più il coefficiente di Gravelius si allontana da 1 e tanto più il bacino possederà una forma allungata. L'indice di compattezza del bacino può essere utilizzato per farsi una prima idea di come il bacino in questione risponderà ad eventi pluviometrici. Dato che come sappiamo la natura della precipitazione è caratterizzata da una distribuzione concentrica, tanto più il bacino sarà piccolo e con coefficiente di Gravelius vicino a 1 e tanto maggiori saranno le probabilità che il centro di scroscio della perturbazione (cioè la componente della perturbazione che si distingue per una maggiore intensità di pioggia) si scarichi interamente sulla superficie del bacino idrografico, con la conseguenza che si genereranno ondate di picchi di piena più elevati, e dunque un aumento della capacità di trasporto solido, che può trasformarsi in colata detritica in presenza di elevate quantità di materiale erodibile e trasportabile verso valle.

4.5 Effetto dell'orografia sulle precipitazioni

Per comprendere le dinamiche essenziali di una perturbazione è necessario l'utilizzo di uno strumento in grado di misurare l'intensità di una precipitazione cioè la quantità di pioggia caduta (mm), in un intervallo di tempo breve qualche decina di minuti, questo strumento è il pluviografo in grado di fornire dati di registrazione puntuale di altezza di pioggia. Da questi dati si può compiere una ricostruzione afflussi-deflussi che ci permette di stimare le portate al colmo di picco di piena.

Le registrazioni di dati pluviometrici possono portare a 2 tipologie d'errore dovute alla presenza di forte vento durante la precipitazione:

A) Il pluviometro che quasi sempre è posizionato orizzontalmente, parallelo al terreno in caso di forti inclinazioni della pioggia tende a sottostimare l'intensità dell'evento.

B) Quando la pioggia cade verticalmente l'afflusso meteorico coincide rigorosamente con la quantità d'acqua che cade sulla proiezione orizzontale della superficie del bacino.

In alcuni casi è possibile che le dimensioni verticali del bacino non siano più trascurabili rispetto a quelle orizzontali (tipico dei bacini poco estesi con ipotesi di direzione dei venti costante durante i temporali e dirette verso le pareti rocciose), in questo caso accade che la quantità di pioggia raccolta dalla superficie risulta maggiore della quantità di pioggia della sua proiezione orizzontale per l'area di porzione considerata. Questo si verifica se l'inclinazione della pioggia e l'inclinazione dei versanti sono discordi, mentre se l'inclinazione dei versanti e della pioggia sono concordi invece accadrà che saranno minori.

In questi casi l'afflusso meteorico alla porzione di superficie considerata non è più uguale al prodotto dell'area per l'altezza di pioggia registrata dal pluviometro. In alcuni casi la presenza di forte vento durante la precipitazione può far variare fino al 30% i valori di altezza di pioggia stimata per un bacino. (Mosiello, 1998)

4.6 Stima della portata

La portata può essere definita come il volume che transita in una sezione trasversale di una corrente nell'unità di tempo (Bischetti, 2005), la sua stima può essere effettuata attraverso diverse relazioni.

4.6.1 Formule empiriche

Sin dai primi studi di tipo idrologico si notò che la portata è legata all'area del bacino contribuente, la crescita tra portata ed area non è di tipo lineare. Se si analizzano i fenomeni di piena in termini di portata specifica ($m^3/s \cdot km^2$) anziché di portata assoluta emerge che in bacini molto piccoli la portata specifica è molto elevata. Questo fenomeno può essere spiegato ragionando sui processi di formazione delle precipitazioni, un bacino di dimensioni ridotte ad esempio pochi km^2 può essere investito per tutta la sua estensione da una sola cella temporalesca caratterizzata da un'intensità estremamente elevata. Nel momento in cui aumenta l'area del bacino data l'estensione della cella temporalesca, limitata a qualche km, l'altezza media di pioggia riversata sull'intero bacino risulta inferiore. Dall'osservazione che aumentando la superficie del bacino la portata specifica diminuisce sono state sviluppate delle relazioni che consentono la stima di una portata di piena della quale però i diversi autori non hanno precisato la frequenza probabile. Dalla loro applicazione si perviene pertanto ad una portata massima la cui eccezionalità differisce da formulazione a formulazione. (Vito Ferro, 2002).

Formule empiriche maggiormente utilizzate:

$$\text{Kresnik-Valentini: } q_{\max} = \frac{27}{\sqrt{S}}$$

$$\text{Scimemi: } q_{\max} = \frac{600}{S+10} + 1$$

$$\text{Pagliaro: } q_{\max} = \frac{2900}{S+90}$$

$$\text{Giandotti: } q_{\max} = \frac{532,5}{S+16,2}$$

$$\text{Esaf: } q_{\max} = \frac{42}{\sqrt{S}}$$

$$\text{Tournoun: } q_{\max} = \frac{1500}{S+40} + 3$$

In tutte queste formule empiriche con S si indica la superficie del bacino.

4.6.2 Metodo razionale

Il metodo razionale è un metodo analitico che consente di valutare la portata che transita in una determinata sezione di bacino idrografico, in funzione all'area del bacino, di un coefficiente di deflusso, e di una precipitazione (di durata pari al tempo di corrivazione del bacino) di assegnato tempo di ritorno. Il valore relativo all'altezza di pioggia rilasciabile da un nubifragio in un determinato intervallo di tempo per una determinata località viene legato ad un tempo di ritorno, cioè il periodo espresso in anni in cui un determinato valore di precipitazione viene superato una volta sola. Questo tipo di approccio statistico si basa sull'analisi dei dati raccolti dai pluviografi, tanto maggiore sarà la serie di dati tanto più attendibili saranno i valori.

Il valore della portata al picco di dato tempo di ritorno è espresso come:

$$Qt = \frac{c * Ic * A}{3,6}$$

Dove:

- C = Coefficiente di deflusso (in base alle caratteristiche dei terreni di cui è costituito il bacino)
- Ic = Intensità critica è l'intensità pari al tempo di corrivazione (mm/h)
- A = area del bacino (km²)
- 3,6 = Fattore di conversione

La stima del tempo di corrivazione cioè la durata della precipitazione che è critica per il bacino, in grado di mettere in crisi la rete idrografica, perché per essa si raggiunge il valore più elevato di portata (perché tutta l'area per almeno un istante contribuisce al deflusso), dipende dall'estensione planimetrica e dalla quota. Il tempo di corrivazione viene definito come il tempo necessario alla goccia di pioggia che cade nel punto più distante per raggiungere la sezione di chiusura del bacino.

Formule per la stima del tempo di corrivazione:

Formula di Giandotti

$$tc = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8 + \sqrt{Hm}}$$

Formula di Aronica: In sostanza modifica la formula di Giandotti inserendo due coefficienti in funzione dell'uso del suolo del bacino. Questa formula è specifica per bacini montani con estensioni inferiori ai 10km²

$$tc = \frac{\frac{1}{m\bar{d}}\sqrt{A} + 1,5L}{0,8 + \sqrt{Hm}}$$

- M= Costante in base al tipo di copertura.

- d = Costante in base alla Permeabilità dei terreni.
- L = Lunghezza asta principale del corso d'acqua in km.
- H_m = Altitudine media bacino(m).

Formula di Puglisi:

$$t_c = \frac{6 * L^{0,67}}{(h_{max \text{ bacino}} - \text{altezza min bacino})^{0,33}}$$

5 LA DIFESA E LA MITIGAZIONE DELLE COLATE

5.1 Le sistemazioni idraulico forestali (opere strutturali)

Le sistemazioni idraulico-forestali sono una disciplina trasversale, la quale studia le opere, le regola per progettare e il modo di impiegarle per contrastare le inondazioni, i processi erosivi e franosi, le colate detritiche e fangose, il distacco di massi e la caduta di valanghe che avvengono nei bacini torrentizi. Questa materia indaga altresì i criteri di ricostruzione morfologica degli alvei e le condizioni per il ritorno della vegetazione spontanea e, promuove l'impiego, ove compatibile con l'entità e la natura del dissesto idrogeologico da fronteggiare, di tecniche costruttive a basso impatto ambientale (Puglisi, 2006). Gli obiettivi delle SIF sono i seguenti:

1. Riequilibrio e riordino dei bacini dissestati verso il consolidamento dei versanti e delle aste torrentizie. (esempio il rimboscamento ha effetti sull'idrologia delle piene)
2. Conservazione dei territori montani dai fenomeni di dissesto accelerato. Sistemare le sistemazioni a monte dei centri abitati è importante perché è lì dove si sviluppa il deflusso liquido ma soprattutto quello solido. La sistemazione di un bacino richiede decenni, bisogna cercare di costruire opere che vanno a risolvere il problema all'origine e nei casi più rilevanti intervenire anche localmente.
3. Riduzioni dei colmi di piena: con l'azione regimante della vegetazione. Ricordandosi però che il bosco non ha una capacità di regimazione infinita dunque con eventi eccezionali più di tanto non si può fare.
4. Consolidare sponde, correggere i versanti e gli alvei perché ciò permette l'abbassamento della quantità di materiale solido che finisce a valle e questo ci consente di proteggere gli insediamenti di valle.

Solitamente le SIF vengono suddivise in due tipologie di opere: opere che cercano di sanare i fenomeni d'alveo ed opere che mirano a stabilizzare i versanti. In ambito montano esiste uno stretto legame tra fenomeni di rete e fenomeni di versante, questo è dovuto alle caratteristiche dei piccoli bacini nei quali solitamente un dissesto di versante incide immediatamente sull'alveo, versante e rete in questo caso hanno una correlazione molto stretta perché un'erosione di sponda o un abbassamento del corso d'acqua possono togliere il piede al versante causandone il cedimento. Allo stesso tempo il materiale franato dal versante e che si è riversato nell'alveo può essere trasportato a valle, se le tensioni esercitate dalla corrente sono sufficienti, provocando così trasporto solido o fenomeni di debris flow. Le sistemazioni idraulico forestali sono la risposta specifica studiata per intervenire su quei meccanismi che creano questa tipologia di problemi. È importante sottolineare come per progettare interventi d'alveo bisogna conoscere le dinamiche geomorfologico-fluviali del corso d'acqua e in particolare il processo di trasporto solido che caratterizza il torrente, ciò significa capire se il materiale presente sulle sponde e sul fondo tende ad essere trasportato dalla corrente (tratto in erosione) e stimare l'entità delle dimensioni dei sedimenti trasportati, oppure tende ad essere depositato (tratto in deposito).

5.1.1 Briglie di trattenuta

La correzione del tratto montano di un torrente si consegue, principalmente, con l'inserimento in alveo di briglie. Nei torrenti in trasporto la loro funzione è quella di consentire la formazione a

monte di esse di piazze di deposito in cui la corrente, rallentando, deposita parte del materiale solido trasportato. (Ferro, 2006). Oggi è molto utilizzata nella sistemazione dei torrenti montani la tipologia di briglia di tipo aperta figura (15). Queste sono state inizialmente concepite con l'obiettivo di ottenere una trattenuta solo parziale del materiale trasportato da un torrente montano. Questa variante presenta dei vantaggi rispetto ad un'opera classica come la briglia tradizionale a corpo pieno:

- Permette di frangere le colate detritiche.
- Consente un'alimentazione solida della corrente con sedimenti e questo permette di evitare la conseguenza che il tratto a valle vada in erosione.
- Auto svuotamento del sedimento più fine intrappolato dalla briglia.

Inoltre presenta due ulteriori vantaggi: un minore costo dell'opera dato in sostanza dalla minore quantità di materiale utilizzata per la sua costruzione e una minore spinta a cui è sottoposta la briglia stessa in casi di piene, quest'ultimo aspetto rende la briglia più stabile. Queste opere per funzionare correttamente necessitano di verifiche al dimensionamento sia per quanto riguarda l'aspetto statico sia per quanto riguarda le caratteristiche idraulico-sedimentologiche, quest'ultima verifica è molto spesso tralasciata nella progettazione di briglie selettive e ciò comporta sovente un mal funzionamento delle strutture.

Le opere realizzate per intercettare e controllare i flussi ad alta concentrazione solida devono esplicare la funzione di diminuire il volume complessivo del sedimento che transita a valle e di laminare il picco di portata solida. Vi sono tre modalità con cui le briglie selettive possono controllare i flussi iperconcentrati:

1. Azione meccanica: il materiale solido viene bloccato da un filtro che agisce come setaccio
2. Azione di sedimentazione: è un meccanismo di trattenuta dovuto al rigurgito della corrente indotto dall'opera (aspetto idraulico).
3. Azione che instaura un meccanismo di collisione tra le particelle i solidi convergendo verso le aperture del filtro urtano reciprocamente e subiscono un processo di rallentamento che induce un parziale deposito dei sedimenti.

Molto importante è il dimensionamento corretto delle aperture che va stabilito in funzione al diametro rappresentativo delle dimensioni del materiale. Per consentire un corretto funzionamento dell'opera non dovrebbero mai ostruirsi oltre il 30%-50%. (ferro, 2006.). Parametro di cui è necessario tener conto nella progettazione di un'opera e che la briglia selettiva dovrebbe essere in grado di contenere volumi solidi comparabili al volume potenziale atteso (non inferiori al 35%).(Bischetti, D'Agostino, 2010).



Figura 15 : briglia selettiva (Bischetti, 2006).

Un criterio utilizzato per la progettazione delle aperture è quello del ricercatore giapponese Ikeya che suggerisce un criterio che fa riferimento al rapporto tra la minima larghezza delle aperture (b_{min}) e un diametro rappresentativo delle dimensioni del materiale. Secondo tale criterio gli obiettivi di progetto possono essere conseguiti rispettando le condizioni per assicurare un buon funzionamento futuro dell' opera.

$$R1 = B_{min}/D1 \leq 1,5$$

$$R2 = B_{min}/D2 \geq 3,0$$

Dove:

B_{min} = minima larghezza dell'apertura

$D1$ = massimo diametro dei massi durante il trasporto di colata detritica

$D2$ = massimo diametro dei massi trasportati durante una piena di media scala

Il maggior inconveniente nella costruzione di briglie semi permeabili risiede nel fatto che la capacità di accumulo di materiale a monte della struttura può risultare drasticamente ridotta a causa dei depositi indotti da eventi di piena ordinari, determinandone una funzionalità solo parziale in occasione dell'evento significativo per la mitigazione del rischio (V.Ferro,2006). Nella progettazione delle briglie selettive sono essenziali due tipologie di dimensionamento, uno classico di tipo meccanico ed uno di tipo idraulico, il primo per soddisfare le condizioni di equilibrio e stabilità globale della briglia in relazione alle forze esterne di progetto quali la spinta idrostatica e la spinta solida, il secondo per soddisfare la funzionalità idraulica dell'opera in funzione della quantità di acqua e della tipologia di sedimento.

5.1.2 Opere di difesa spondale

La tipologia di opera di difesa spondale maggiormente utilizzata in ambito montano è la scogliera (figura 16) si tratta di un rivestimento delle sponde con dei massi, tra i quali è possibile l'inserimento di vegetazione per mitigare l'impatto ambientale, la scogliera mira alla difesa della sponda dall'erosione. Per un'adeguata progettazione è necessario combinare gli studi idraulici che forniscono i valori di tensione che la corrente esercita sulla costruzione a studi idrologici in grado di fornire la portata di progetto.



Figura 16 : scogliera (Bischetti 2006)

5.1.3 Cunettoni

Sono opere che trovano applicazione generalmente quando un corso d'acqua attraversa un centro abitato. I cunettoni sono formati da materiali caratterizzati da bassa scabrezza al fine di favorire il rapido deflusso della portata (figura 17), aumentando la velocità si provoca a parità di portata un abbassamento del tirante idrico ed in questo modo diminuisce la possibilità di esondazione. Inoltre i cunettoni devono essere dimensionati per resistere ad elevati sforzi tangenziali sul fondo, se correttamente dimensionati risultano molto utili nella protezione dalle colate detritiche.



Figura 17: esempio di cunettone (Bischetti ,2006).

5.2 Sistemi d'allerta per colate detritiche (opere non strutturali)

I dati pluviometrici associati alle testimonianze dirette sul momento di innesco dei fenomeni di dissesto sono di fondamentale importanza per stabilire le condizioni innescanti per i fenomeni stessi. I dati relativi alle precipitazioni possono essere interpretati in chiave di pioggia totale, intensità di pioggia (medie e di picco), durata dell'evento, durata dei singoli scrosci, piogge antecedenti all'evento. Questa stretta correlazione tra precipitazioni e dissesti permette di stabilire delle soglie pluviometriche, le quali, se superate durante un evento meteorologico intenso o prolungato inducono l'attivazione di un sistema d'allerta in grado di avvertire le popolazioni dei comuni a rischio colata detritica.

5.2.1 Definizione di una soglia critica di precipitazione

Il problema della definizione di una soglia critica di precipitazione, da sempre impegna gli studiosi delle colate detritiche (Caine 1980). E' un problema fondamentale per la valutazione del grado di rischio di colata detritica, a cui una certa zona è sottoposta ed è il parametro più importante per la progettazione di un sistema di allarme in grado di fornire un tempo di preavviso utile per eventuali provvedimenti di protezione civile (evacuazioni, chiusura strade, messa in sicurezza cittadini). Per classificare un evento pluviometrico, dal punto di vista della sua capacità di produrre una colata detritica, la maggior parte degli studiosi fanno riferimento ad una coppia di valori di intensità-durata, riconoscendo che sono proprio questi valori a provocare una colata detritica (Irer,2007). L'idea di associare questa coppia di valori, per creare soglie d'innesco, la si deve a Caine (1980); in letteratura molti autori, pur utilizzando formule di medesima struttura, adottano coefficienti differenti, questo è dovuto alle diverse caratteristiche morfologiche e geologiche dei bacini presi in esame, che producono una diversa risposta del bacino alle perturbazioni. Quando, per motivi di difesa, è necessario giungere ad una definizione

di soglia di precipitazione connessa al rischio colata, è indispensabile uno studio specifico sulle condizioni idrogeologiche, morfologiche, pedologiche del bacino, o quantomeno utilizzare quelle formule i cui coefficienti sono stati tarati per bacini con caratteristiche simili a quello soggetto a studio. Esistono alcune problematiche relative a questo metodo, infatti tra intensità-durata di una precipitazione e innesco di una colata detritica non vi è un nesso semplice di causa effetto e conseguentemente si riscontrano delle difficoltà nella quantificazione esatta di parametri che governano l'origine di un evento trasporto di massa. L'evento pluviometrico intenso è necessario ma altre condizioni sono necessarie, la più importante di tutte è la disponibilità di sedimento nella zona d'innesco. In conclusione possiamo affermare che una precipitazione che supera la soglia d'innesco è potenzialmente pericolosa perché vi sono buone probabilità che sia in grado di scatenare una colata, dunque l'utilizzo delle soglie pluviometriche è un'arma utile nella prevenzione di possibili catastrofi.

5.2.2 Sensori in grado di segnalare il passaggio di una colata detritica:

In alcuni casi è possibile installare dei sensori all'interno dell'alveo (figura 18), in grado di percepire il passaggio di una colata ed inviare un segnale d'allarme. Alcune tipologie di sensori sono in grado di fornire diversi dati riguardo alla colata tra cui la velocità e l'altezza. Esistono differenti tipologie di sensori tra i quali troviamo i sistemi a pendolo da posizionare sull'alveo, e i sistemi basati sulla trazione di una zavorra in grado se mossa di attivare una cella di carico.



Figura 18: esempio di sensore, tipologia cavi a strappo in grado di segnalare il passaggio di una colata.

6 IL BACINO DI STUDIO

6.1 Ubicazione val Rabbia

La Val Rabbia è situata nel comune di Sonico in provincia di Brescia nell'alta Vallecamonica (figura 19), essa è una stretta valle alpina facente parte del gruppo dell'Adamello. Questa valle è percorsa dal torrente Rabbia un affluente in sinistra idrografica del fiume Oglio, la confluenza con quest'ultimo è posta a circa 595m s.l.m. In prossimità del punto di congiunzione tra il torrente Rabbia e il fiume Oglio transita la statale 42 che porta al passo del Tonale che congiunge la bassa Vallecamonica all'alta valle.



Figura 19: mappa della Vallecamonica, nella quale si evidenzia la posizione della Val Rabbia.

6.2 Aspetti geologici

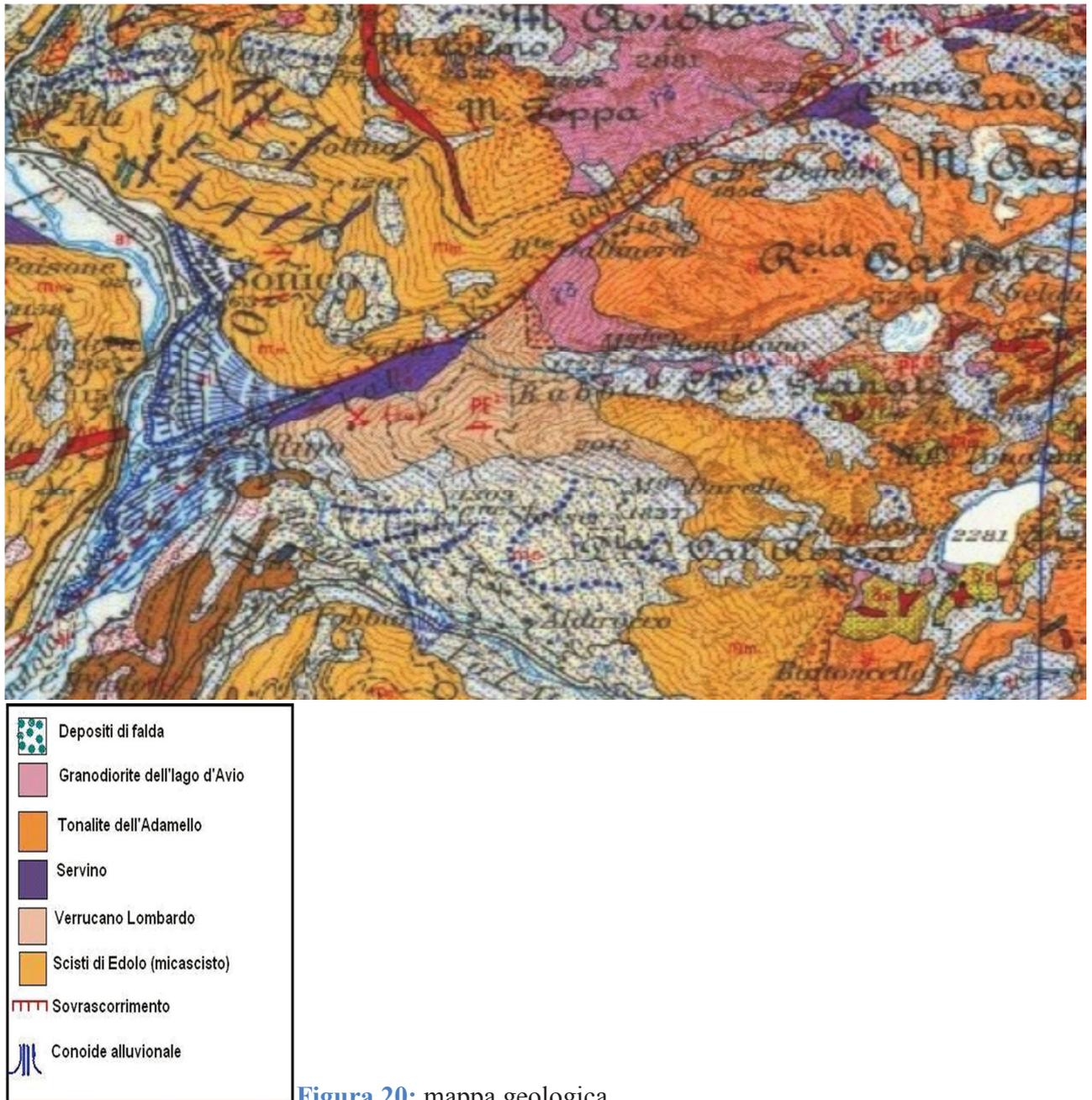


Figura 20: mappa geologica.

Il bacino idrografico del Torrente Rabbia è impostato nel substrato roccioso rappresentato da litotipi metamorfici appartenenti al Basamento Cristallino (*Scisti di Edolo*), alla copertura sedimentaria Subalpina (*Verrucano Lombardo e Servino*) e alle masse intrusive del terziario (*Plutone del gruppo dell'Adamello*) (figura 20).

Di seguito si riporta una breve descrizione delle litologie affioranti:

Copertura sedimentaria

- la *Formazione del Servino* è costituita principalmente da marne arenacee e micacee disposte in strati sottili o fittamente laminate alternate a calcari marnoso-arenacei in strati

di spessore medio o sottile. L'unità è presente lungo la Val Rabbia dal fianco sinistro tra gli 800 e i 1000 m di quota e sulla sponda destra tra 1250 e 1800 m.

- il *Verrucano Lombardo* è rappresentato da arenarie e conglomerati di colore rosso (con clasti di origine vulcanica e subordinatamente metamorfica) ben cementati da silice, disposti in grossi banchi, a volte poco distinti, generalmente di forma lenticolare. L'unità si trova nel settore medio-inferiore del bacino idrografico, tra i 1000 e 1250 m di quota.

2. Basamento metamorfico

Scisti di Edolo: comprende micascisti e filladi di basso grado metamorfico; il litotipo più diffuso è un micascisto grigio verde, con superfici di alterazione rugginose, e con una fitta alternanza di letti micacei e quarzoso feldspatici (bianchi). Gli scisti sono presenti in destra idrografica, nella porzione inferiore della valle dall'apice del conoide (790 m s.l.m.) fino a 1000 m di quota; altri affioramenti sono presenti sulla sponda destra della Valle di Bombiano.

3. Plutonio intrusivo terziario

Quarzodiorite del Lago d'Avio/Tonalite dell'Adamello: è costituito da tonaliti biotitiche-anfibolitiche. Le rocce con struttura olocristallina a grana media affiorano lungo il settore orientale del bacino idrografico corrispondente alle quote più elevate.

Nel bacino idrografico, in particolare nei settori di testata della Val Rabbia e lungo la Valle di Bombiano, è diffusa una coltre detritica superficiale, costituita essenzialmente da terreni di falda e alimentata dalle creste rocciose appartenenti prevalentemente alle litologie intrusive.

non bisogna dimenticare che la val Rabbia scorre lungo la faglia Insubrica, faglia d'importanza regionale, l'azione meccanica compiuta da questa faglia tende a frantumare le rocce e così facendo a creare una maggior quantità di detrito movimentabile durante eventi meteorologici rilevanti/eccezionali (Ghirardi, 2008).

6.3 Aspetti morfologici

Le condizioni di acclività dei versanti e le alte quote delle aree in cresta favoriscono i fenomeni di gelivazione e quindi l'azione di degradazione compiuta dai cicli gelo e disgelo porta ad un'alimentazione delle falde detritiche. Nei settori posti alle quote inferiori, in particolare lungo il versante sinistro della Val Rabbia, è presente una copertura eluvio-colluviale. A tratti la copertura risulta discontinua lasciando affiorare le porzioni rocciose.

Gli aspetti litologici e strutturali del bacino idrografico del Torrente Rabbia sono definiti dalla presenza della Linea della Gallinera, un lineamento tettonico d'importanza regionale rappresentato da un sovrascorrimento con immersione verso nord ed inclinazione sub-verticale. Il sovrascorrimento definisce il contatto fra le unità metamorfiche su quelle terrigene ed intrusive. Il lineamento tettonico, orientato in direzione NE-SW, segue il tracciato dell'asta torrentizia. (Giovanni Ghirardi,2008).



Figura 21: Foto della val Rabbia dove si evidenzia la frana di Pal.

Un fenomeno di deformazione gravitativa interessa la porzione di versante compresa tra la confluenza Rabbia-Bombiano e la quota di 1300 m s.l.m., allungandosi fin quasi allo spartiacque (a quota 1700 m circa). Tale deformazione gravitativa è conosciuta come la frana di PAL (figura 21) che coinvolge complessivamente 14.000.000 m³ di roccia e detriti, ed è da collegare alle scarse proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso. In passato il collasso del corpo di frana ha temporaneamente sbarrato il corso d'acqua (figura 22), con fenomeni di piena conseguenti alla rottura dello sbarramento, il restringimento vallivo prodotto dall'avanzamento del corpo di frana ed il successivo innalzamento del fondo (con forte diminuzione nella pendenza) favorisce la deposizione del materiale trasportato dal Torrente Rabbia nei settori più a monte. Nel settore di confluenza la sponda destra del Fiume Oglio è impostata nel substrato roccioso, mentre quella sinistra, nei terreni dell'ampia conoide alluvionale. La strada statale 42 si trova ad una quota di circa 8. m superiore rispetto all'alveo, sulla sponda destra idrografica del Fiume Oglio.



Figura 22: L'immagine mostra come il piede della frana di Pal si estenda per lunghi tratti sull'alveo potenziando il rischio di colata.

L'analisi della curva di fondo dell'alveo del Torrente Rabbia (figura 23), permette di suddividere il tracciato dell'asta torrentizia in 4 settori con differente acclività:

1. Testata del bacino idrografico: con pendenza di 22°;
2. tratto mediano: sul tratto insiste il corpo della frana di Pal (sponda destra idrografica) per una lunghezza di 400 m circa. In tale settore si ha un rialzo anomalo della quota del fondo dell'alveo ed una brusca restrizione della sezione di deflusso. La pendenza media del fondo dell'alveo è di 14-15°;
3. Tratto inferiore: corrisponde al settore terminale dell'asta all'interno del bacino idrografico caratterizzato da pendenze di 7-8°;

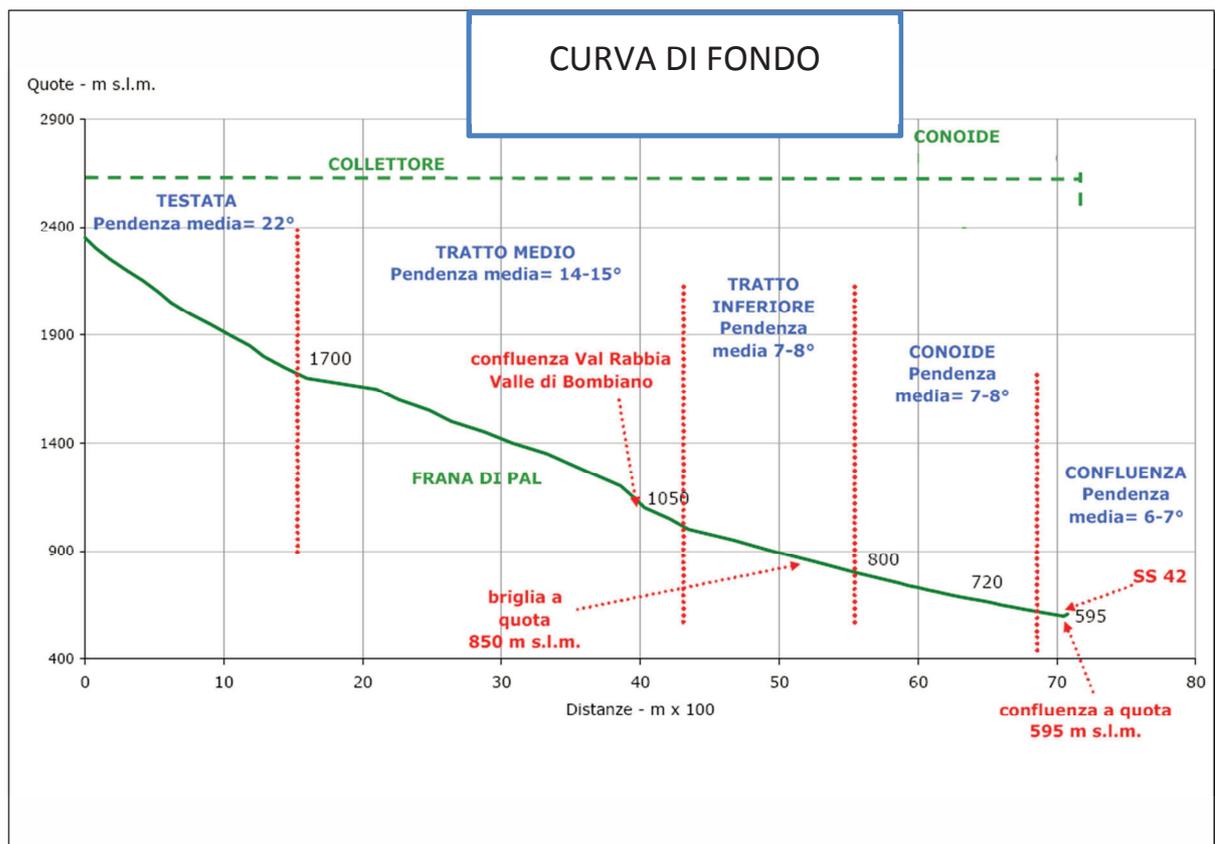


Figura 23 : curva di fondo del bacino, (Ghirardi, 2008).

6.4 Caratteristiche del bacino idrografico

Il bacino idrografico è la porzione di territorio dalla quale le acque si raccolgono in uno stesso corso d'acqua, mentre per bacino topografico s'intende quella superficie racchiusa entro due linee di displuvio che si congiungono in un certo punto (sezione di chiusura del bacino). In alcuni casi queste due superfici possono non equivalersi, questo perché può accadere che anche l'acqua che s'infiltra esternamente al bacino topografico poi la possiamo trovare nella sezione di chiusura. Nell'ambito montano quasi sempre le due superfici coincidono. Importante sottolineare il fatto che i confini di bacino sono definiti dalla topografia, per questo è importante l'utilizzo della carta topografica per ricostruire i contorni dell'impluvio.

Il bacino idrografico della Val Rabbia sotteso al Ponte di Rino a quota 670 m s.l.m., si estende con una forma a ventaglio piuttosto allungata su una superficie complessiva di 13.25 km² se si considera il ponte di Rino come punto di chiusura della sezione, mentre di 13,4 km² se si considera la confluenza con il fiume Oglio (tabella 3 -4).

Il limite superiore del bacino idrografico segue la linea di cresta che collega le cime occidentali del Gruppo dell'Adamello lo spartiacque del bacino, muovendosi in senso orario e delimitato dai seguenti principali rilievi: Monte Foppa 2493 m.s.l.m. Monte Aviolo 2880 m.s.l.m., Corno di Gallinera 2453 m.s.l.m. Cima dei laghi gelati 3254 m.s.l.m. Roccia Baitone 3263 m.s.l.m, il Castelletto 3164 m.s.l.m, Corno delle Granate 3104 m.s.l.m. Monte Bombiano 2855 m.s.l.m, raggiungendo la quota massima di 3259.3 m.s.l.m con la Roccia Baitone. Il torrente Rabbia possiede diversi affluenti in particolar modo sulla destra idrografica del bacino con testate che superano i 2000 m.s.l.m. di altezza, il più importante dei quali è il torrente Bombiano che possiede un bacino che copre una superficie di circa 3 km².

Due rami principali:	Confluenza Rabbia-Bombiano Val Rabbia-Gallinera	5.4 km
	Valle di Bombiano	3.1 km
Pendenza reticolo idrografico		supera sempre il 20% tranne nel tratto terminale in prossimità dell'abitato dove acquista valori intorno al 13-15%.
Quota confluenza Rabbia-Oglio	(località Bilichetto)	595m s.l.m

Tabella 3: dati alveo (Ghirardi, 2008.)

Area del bacino sotteso	13,25km ²
Lunghezza dell'asta,(sezione di chiusura il ponte di Rino)	6,3 Km
Altezza minima	595m.s.l.m (confluenza con il fiume Oglio).
Altezza massima	3260 m s.l.m.
Altezza media assoluta	1929 m s.l.m.
Altezza media relativa	1331 m s.l.m.
Area bacino	13,25km ² (sezione di chiusura ponte di Rino) 13,4km ² (sezione di chiusura confluenza con l'Oglio).
Perimetro bacino	19 Km
Area glaciale	3%

Tabella 4 : Parametri morfometrici alla sezione di riferimento (Ghirardi, 2008).

6.5 Caratteri morfologici del bacino che lo predispongono ad eventi di colata

Il bacino della val Rabbia Possiede alcune caratteristiche che lo predispongono alla formazione di picchi di colata considerevoli:

- 1) Possiede piccole dimensioni inferiori ai 20 km². Questa caratteristica permette al bacino in caso di fenomeni temporaleschi di ricevere interamente il centro di scroscio della perturbazione, ciò provoca portate caratterizzate da un picco di piena molto elevato anche decine di volte superiore al valore di portata che normalmente transita in alveo, di conseguenza aumentano notevolmente anche le tensioni esercitate dalla corrente sul materiale presente in alveo andando così a generare trasporto solido.
- 2) Il coefficiente di forma stimabile attraverso la formula di Gravelius, per la Val Rabbia ha un Valore pari a 1,46.

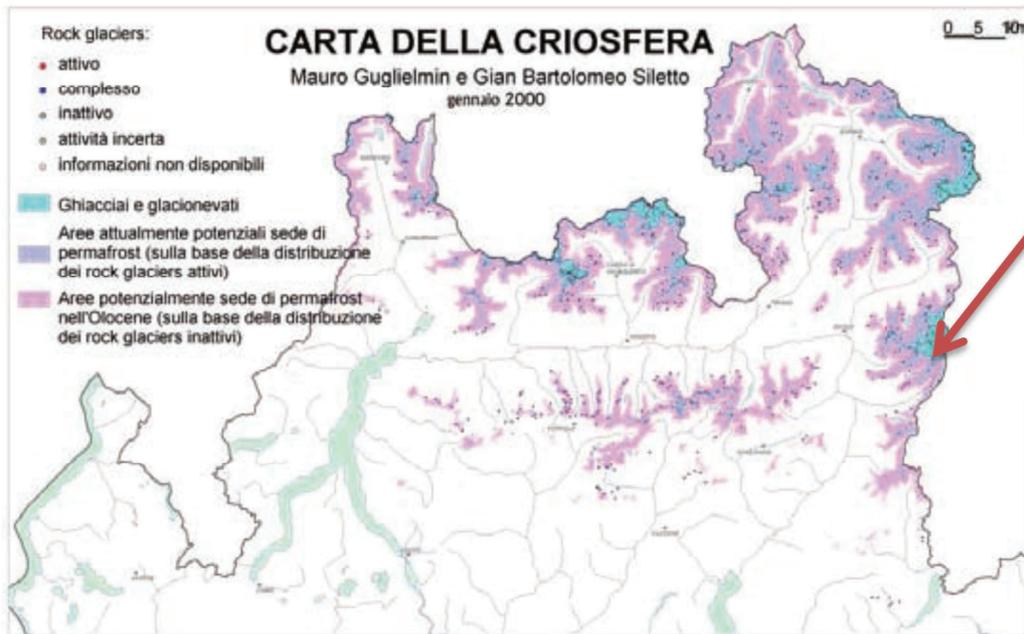
$$R_K = \frac{0.28 \cdot P}{\sqrt{A}} = \frac{0.28 \cdot 19 \text{km}}{\sqrt{13.25 \text{km}^2}}$$

- 3) Oltre la metà della superficie del bacino è collocata al di sopra dei 2000 m.s.l.m, (figura 28), a queste quote vi è scarsa presenza di vegetazione arborea, dunque viene meno l'azione di regimazione delle acque meteoriche da parte del bosco, lo strato di terreno è caratterizzato da spessori sottili ed è costituito per lo più da componenti grossolane quali ghiaia, sabbia che possiedono una scarsa capacità di trattenere acqua ed ostacolare il deflusso superficiale di

quest'ultima, tale aspetto produce l'effetto di diminuire i tempi di corrivazione e causa un aumento nel deflusso superficiale del bacino. Per quanto riguarda il coefficiente di deflusso il SIBCA (sistema informativo bacini e corsi d'acqua) attribuisce un valore estremamente elevato, pari a 0,6841.

4) Ghiaia e sabbia Inoltre hanno scarso potere coesivo è ciò comporta una maggiore instabilità dei versanti che collassando producono enormi quantità di materiale più o meno fine che può alimentare un fenomeno di colata, in presenza di picchi di piena elevati.

5) Presenza di permafrost nelle testate del bacino in particolar modo alle quote superiori della valle di Bompiano (figura 24 e 25), dove resistono anche in stagione estiva piccoli ghiacciai, ciò è dovuto principalmente alle caratteristiche morfologiche di questo sottobacino, molto stretto e profondo, con zone che per buoni periodi dell'anno non ricevono l'irraggiamento solare diretto. A causa del forte irraggiamento solare e delle elevate temperature che si manifestano nel periodo estivo lo strato di permafrost può sciogliersi con pesanti conseguenze sulla stabilità dei versanti in quota.



Testata di Bombiano e di Gallinera

Figura 24: Carta della criosfera della regione Lombardia (Guglielmin e Siletto; 2000) ottenuta con modello empirico, nella quale viene evidenziata la presenza di permafrost nella testata del bacino del torrente Rabbia.



Figura 25: Foto scattata dall'elicottero la quale documenta la presenza di copertura glaciale a quota 2800 m.s.l.m circa, nella testata di Bompiano.

6) Elevate pendenze del bacino e dell'asta torrentizia dei torrente Gallinera e Bompiano. La maggior parte del bacino è caratterizzata da pendenze comprese tra i 30° e 40° (figura 26 e 27), questo aspetto influenza molto i tempi di corrivazione del bacino i quali si riducono notevolmente, provocando picchi di piena in prossimità della sezione di chiusura del bacino estremamente elevati. La forte pendenza provoca ripercussioni anche sulla stabilità dei versanti andando ad aumentare le forze di taglio a cui sono soggetti.

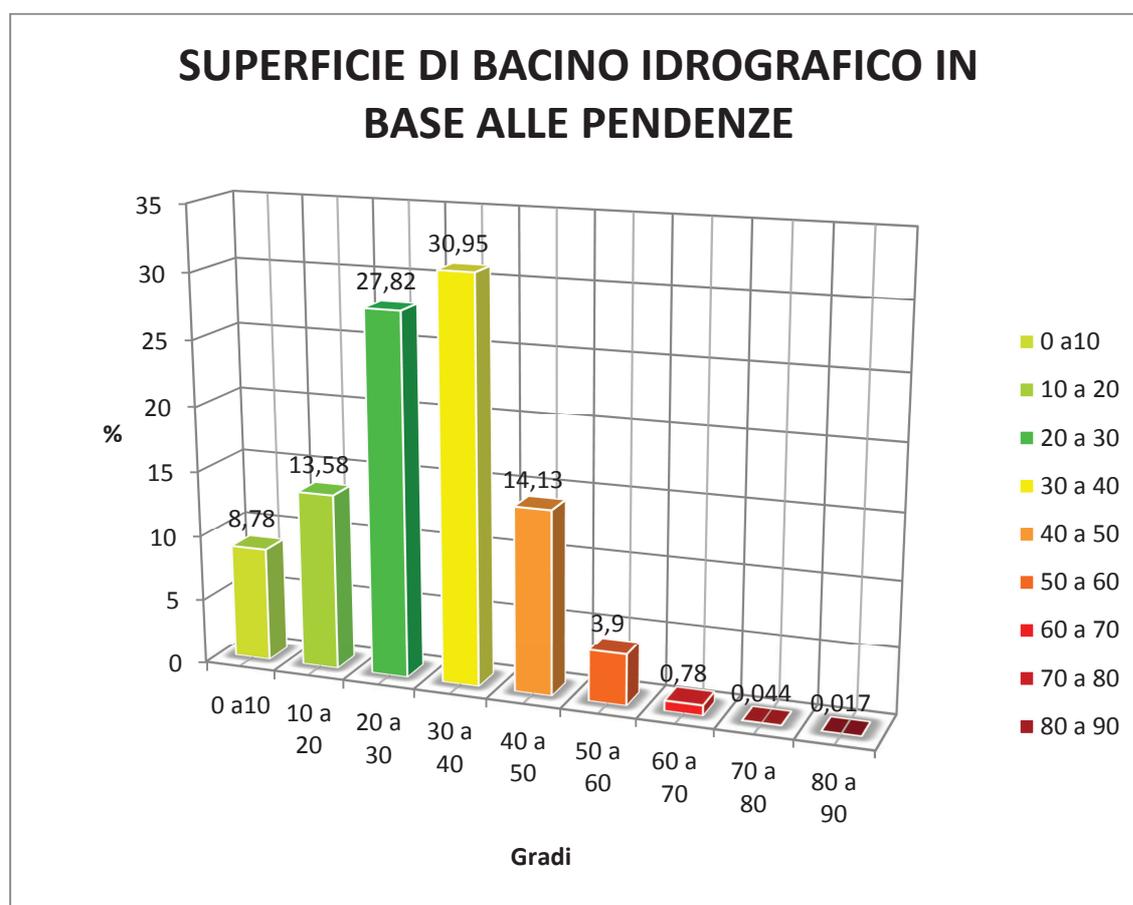


Figura 26 : Istogramma relativo alla percentuale di superficie del bacino in base alla pendenza.

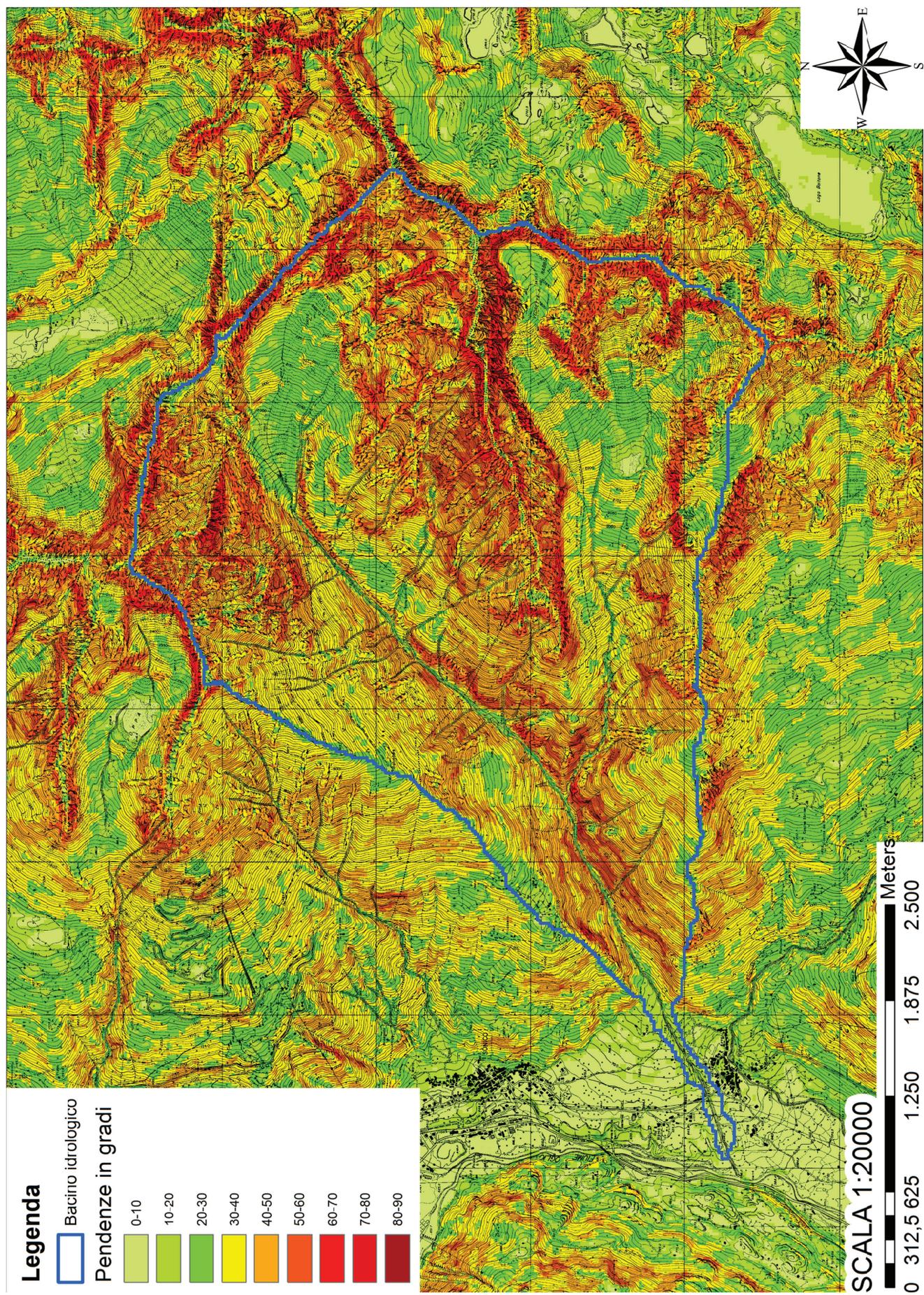


Figura 27: mappa delle pendenze del bacino idrografico del torrente Rabbia.

Legenda



Bacino idrografico



Curva di livello dei 2000m.s.l.m

Uso del suolo



Accumuli detritici e affioramenti litoidi privi di vegetazione



Boschi



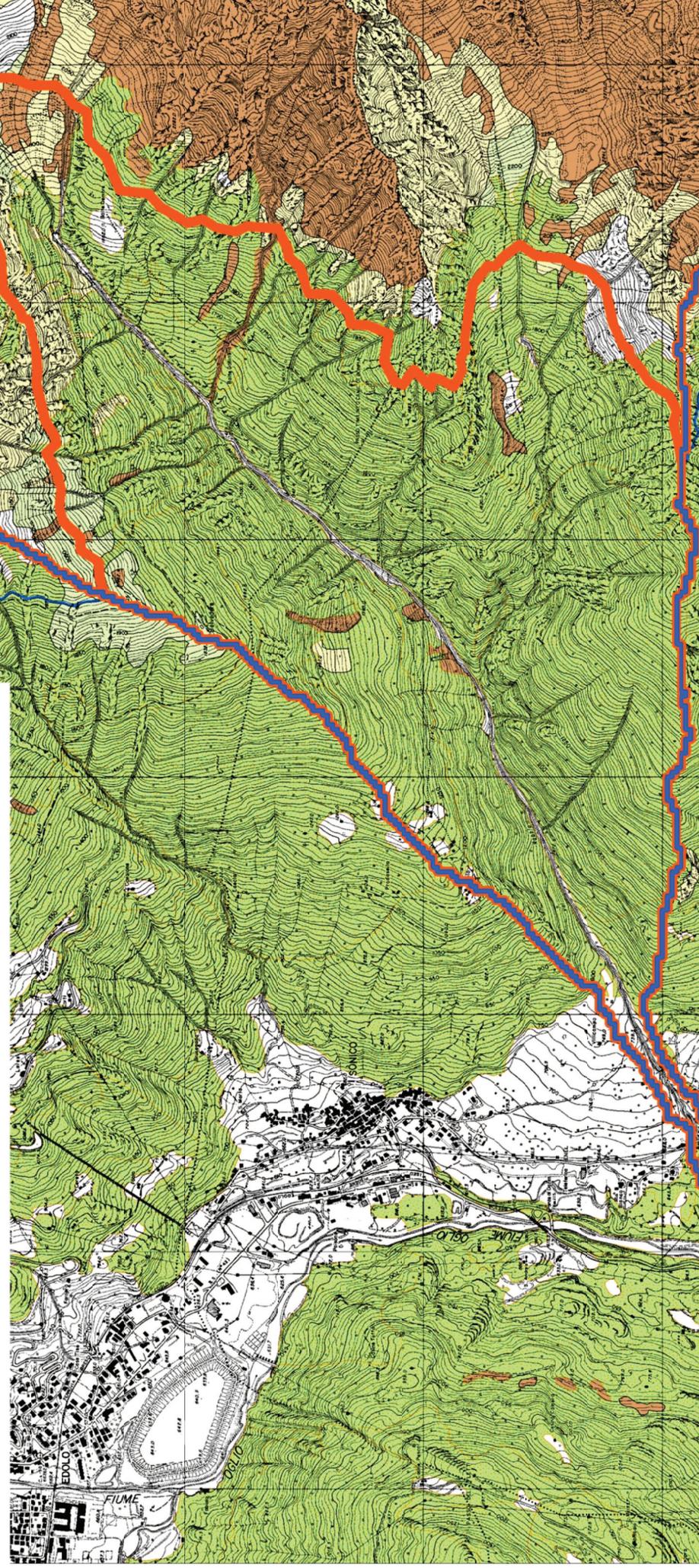
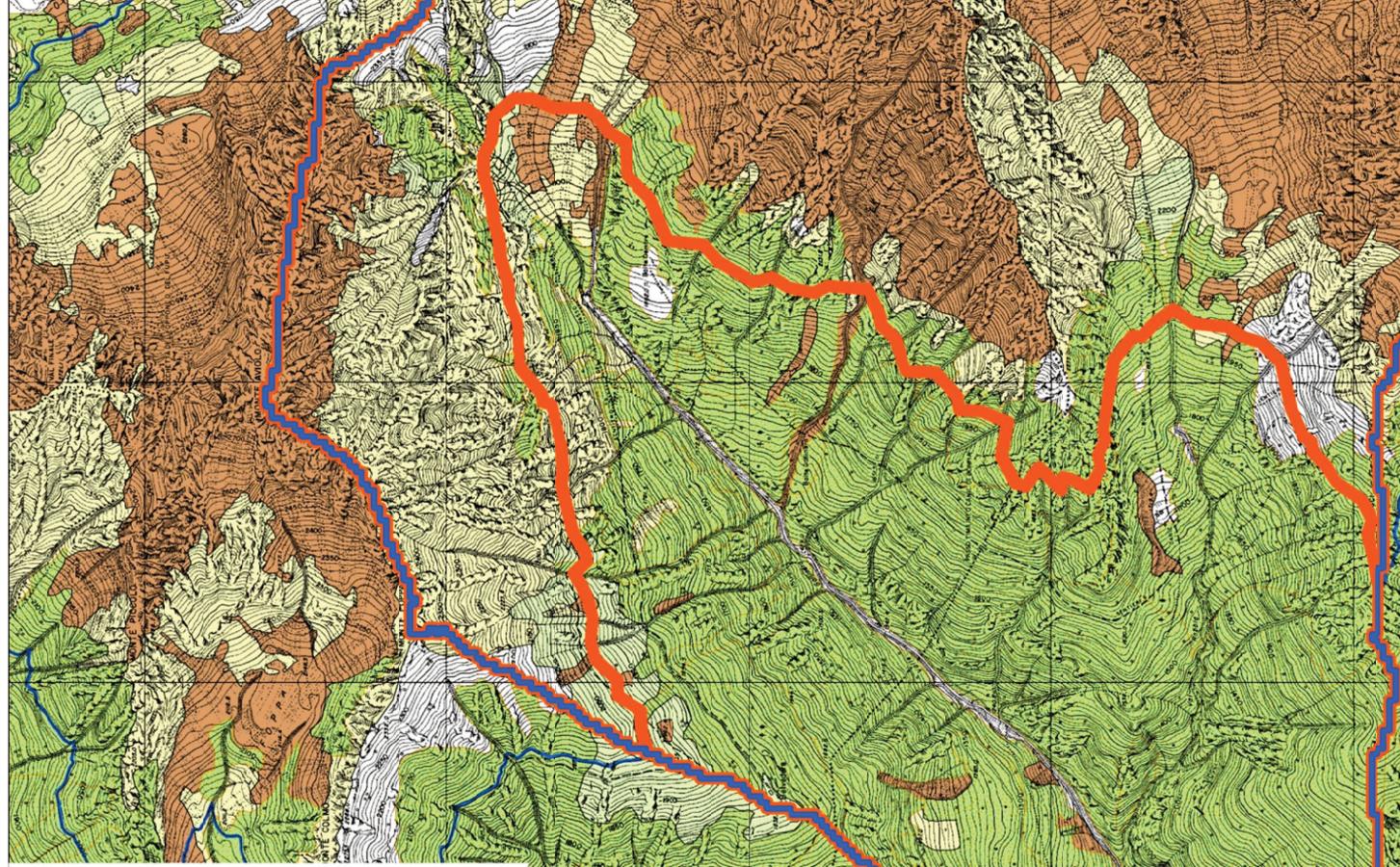
Ghiacciai e nevi perenni



Praterie naturali d'alta quota con presenza di specie arboree ed arbustive sparse



Vegetazione rada



6.6 Dati storici

Siccome gran parte dei fenomeni franosi presentano delle riattivazioni nel tempo, risulta di grande importanza la raccolta e l'analisi delle informazioni sugli eventi del passato, in particolar modo questo vale per le colate che solitamente si manifestano con tempi di ritorno superiori ai 50 anni.

In estrema sintesi si riportano alcune testimonianze storiche riguardanti eventi alluvionali e dissesti registrati nel tratto inferiore della Val Rabbia: le informazioni sono state raccolte in archivi storici e su pubblicazioni tematiche recuperate presso enti e biblioteche.

1766

Una colata detritica deposita lungo la Val Rabbia detrito a grandi blocchi contro la sponda destra dell'Oglio, dove sarà realizzata nel 1828 la Regia strada.

Un documento notarile dell'Archivio di Stato di Brescia, redatto in Sonico il 27 luglio 1769, riferisce che “ da questa comunità si sono absentate nove famiglie, ed andate ad abitare in altri paesi nel decennio scaduto per causa delle inondazioni, e rovine, ed altre disgrazie”.

5 agosto 1825

Una straordinaria piena della Val Rabbia distrugge il ponticello di Rino e altri due ponti posti più a valle. I grossi blocchi depositati alla confluenza con il Fiume Oglio ne hanno causato un temporaneo sbarramento con formazione di un laghetto che arrivava quasi a ponte Dassa. (Documento inviato da Edolo all'I.R. Delegazione provinciale di Bergamo, 30 novembre 1825).

13-14 settembre 1828 Nuova colata lungo la Val Rabbia

Settembre 1829

Il tratto dalla Cascina Calvi allo scoglio Dazza ... è stato molto danneggiato dalle ultime piene del Fiume Oglio e dalle irruzioni del Torrente Rabbia ... Il ponte detto di Dazza in due archi è quasi ostruito nelle sue luci a causa del deposito di assai grossi macigni che la Valle Rabbia fece nel Fiume Oglio al disotto del ponte medesimo, per cui si fa ora di tutta necessità il togliere cotale ingombro con l'opera della mina, e prolungare l'ala sinistra all'imbocco fin contro la Regia Strada nel tratto superiore al ponte dopo la Cappelletta di Sonico, costruendola a guisa di arca onde resistere possa all'urto delle piene (Relazione diretta all' I.R. Delegazione Prov.le di Bergamo).

Fine agosto – inizio settembre 1839

“Le dirotte piogge cadute allo spirare di agosto ed ai primi del corrente settembre nella Valle Camonica superiore hanno straordinariamente ingrossato il fiume Oglio ed i torrenti che in essi confluiscono, portando in molte comunità spavento, terrore e desolazione. Una nuova colata lungo la Val Rabbia ostruisce quasi completamente il ponte Dazza per deposizione di grossi blocchi scesi dalla Val Rabbia e deposti nell'Oglio sotto al ponte (Ingegnere di delegazione riferisce all'I.R. Uff. Provinciale della Pubbliche Costruzioni).

Settembre 1869

Il Torrente Rabbia a Sonico nell'11 Settembre 1869, ostruendo l'Oglio con immensa piena generò un lago, che poi venne empito (Rosa G. 1881 – La Valle Camonica nella storia di Gabriele Rosa, edita per cura del Giornale Camuno, Tipografia Venturini, Breno).

Autunno 1882

La natura stessa ... distrusse in Valcamonica un bellissimo ornamento per darci una cosa utile; essa coll'improvviso riversamento del gran cumulo di materiali della Val Rabbia aveva fatto rigurgitar l'Oglio, tra Edolo e Sonico un pittoresco laghetto... Le acque del laghetto, tracimando lì poco al di sotto di S. Andrea, andarono man mano approfondendo il loro corso ed abbassando perciò il livello del lago. (COZZAGLIO,1895)

1893

In questi ultimi anni la Val Rabbia manda di nuovo materie, e tante, che nel settembre 1869 si ritornò alla fase di laghetto, il quale fu ben più piccolo dell'antico e lungo ½ chilometro elevandosi a 6 metri sul livello del fiume prima della piena. Ad onta dei lavori del Genio Civile che si fanno per tenere sgombro il letto del fiume, la pendenza dell'Oglio a monte del confluente è mitissima, ed in breve tempo il piccolo lago fu colmato di ghiaia, sotterrando completamente i due ponti che si fecero uno sopra l'altro per passare il fiume e tuttora prosegue l'interrimento a segno che il nuovo ponte Dassa, ben più alto dei due vecchi, è ostruito fino quasi alle imposte degli archi. L'antico laghetto di Edolo avrà avuto una lunghezza massima di 4 km ed una larghezza media di 500 m. Alcuni vecchi di Sonico e di Edolo narrano di esso e gli assegnano limiti che all'incirca coinciderebbero colle livellazioni da me fatte, per cui non riterrei tanto lontana la sua scomparsa (Club Alpino Italiano,1893).

Estate 1895

La val Rabbia distrugge nuovamente il ponte in costruzione imponendo la necessità di ricostruirlo con l'accortezza, di elevarlo ad un'altezza sufficiente, tale da permettere il passaggio del materiale trasportabile dal torrente (Relazione di progetto per la costruzione di un nuovo ponte in legname sul torrente Rabbia in sostituzione dell'attuale cadente).

Estate 1911

Piena straordinaria del Torrente Rabbia che distrugge il ponte di Rino e le relative spalle non essendo questo protetto da nessuna difesa, la struttura presentava una luce di 12 m (le spalle sono nell'ampio alveo) e altezza di 3.0 m. Il ponte sarà ricostruito con la medesima luce ma con un metro in più di altezza, sarà provvisto di due spalle con buona fondazione in calcestruzzo e superiore muratura di sassi spaccati e malta di calce idraulica (Perizia delle opere occorrenti per la ricostruzione del Ponte in legname sul torrente Rabbia)

26 ottobre 1952 e luglio 1953

La popolazione di Rino e Sonico è preoccupata per le acque limacciose del Torrente Rabbia, buona parte del paese è in pericolo e se si dovesse ripetere la piena dell'ottobre scorso i danni e le vittime sarebbero incalcolabili. (*Comune di Sonico ed enti vari*, 12 agosto 1953)

Settembre 1960

Interruzione della SS 42 ed isolamento dell'Alta Valle Camonica, il torrente Valle Rabbia deve essere prontamente sistemato. Le acque hanno portato a valle ingenti quantità di materiale facendo salire notevolmente il livello dell'alveo; è necessaria, pertanto, la pulitura del medio e basso corso

per 5000 m³ di materiale e una sistemazione delle sponde per una lunghezza complessiva di 4 Km. (Relazione sui danni alluvionali, 1° febbraio 1964)

Agosto 1985

In seguito alla piena, l'alveo del Torrente Rabbia si rende sovraccarico di detriti, per cui viene disposta la rimozione di 500 m³ di materiale a monte del ponte di Rino. (Regione Lombardia, 2 dicembre 1985 ad enti vari) .

Luglio 1987

Intensi fenomeni di trasporto solido hanno interessato il tratto inferiore dell'asta torrentizia. In un tratto più a monte il torrente ha esondato nel territorio comunale e nell'agglomerato in località Dane, provocando gravi danni alle infrastrutture ed alla campagna.

Sul versante destro della Valle si è registrata la mobilitazione della porzione inferiore della Frana di Pal, il dissesto è caratterizzato da una serie di erosioni al piede del versante, si è inoltre osservato l'esistenza di una serie di fratture di ampiezza varia con ribassamenti di terreno dell'ordine di 1-2 m, in continua evoluzione.

Settembre 1999

Importante evento di piena, il torrente Rabbia oltre ad asportare in più tratti le difese spondali, ha trasportato e depositato lungo l'alveo una notevole quantità di materiale lapideo in grande parte proveniente dalla frana di Pal.

Sulla base di questa raccolta di dati storici è possibile affermare che la dinamica morfologica della Val Rabbia si manifesta principalmente con colate detritiche, le quali si verificano con diversi intervalli di tempo e con diverse magnitudo.

Luglio 2006

A seguito d'intensi eventi meteorologici, nel luglio 2006 lungo il bacino della val rabbia, si sono sviluppate due colate detritiche coinvolgenti oltre 300.000 m³ di materiale dei quali 106.000 m³ hanno raggiunto le aree di conoide (figura29), arrestandosi lungo la zona di confluenza col fiume Oglio e percorrendo per un breve tratto quest'ultimo.

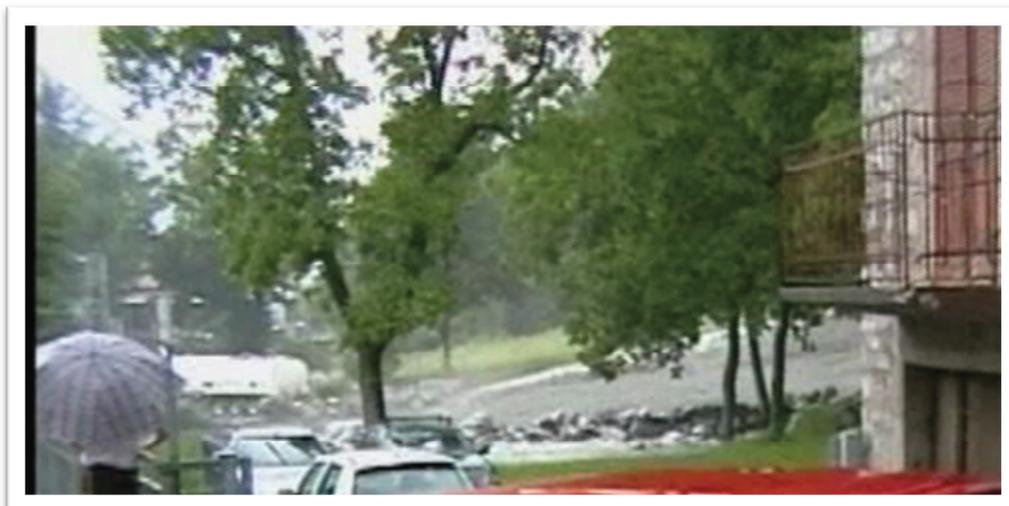


Figura 29 : istantanea in cui è possibile stimare l'altezza raggiunta dalla colata in prossimità del ponte di Rino nell'evento del luglio 2006. Si può osservare come la testa della colata occupi interamente la sezione dell'alveo, con fuoriuscita di materiale lungo le sponde.

1766	1911(estate)
1825(agosto)	1952(ottobre)
1828(settembre)	1953(luglio)
1829	1960(settembre)
1839 (agosto)	1985(agosto)
1869 (settembre)	1987(luglio)
1882(autunno)	1999(settembre)
1893	2006(luglio)
1895(estate)	2012 (luglio)

Tabella 5 : tabella riassuntiva degli anni in cui è stata registrato il manifestarsi di Debris flow o trasporto solido intenso nel bacino della val Rabbia.

Da un'analisi dei dati storici si capisce come sia difficile stimare un tempo di ritorno dei fenomeni, poiché con ogni probabilità, si tratta di eventi causati da una serie di condizioni che non sono legate esclusivamente alle piogge. Ciò che appare evidente è un aumento della frequenza dei fenomeni negli ultimi 25 anni, infatti dal 1985 al 2012 si è verificata una maggiore attività del bacino dove si contano ben 5 eventi significativi di colata con una frequenza media di una colata ogni 5 anni . Un particolare da tenere in forte considerazione è la stagione in cui si sono manifestati i fenomeni la maggior parte dei quali in estate (tabella 5).

Da questi dati è possibile desumere che:

-Non è possibile definire un tempo di ritorno rappresentativo degli eventi e pertanto è difficile fare considerazioni circa il tempo di ricarica dei sedimenti nel bacino.

-Gli eventi coprono una arco temporale ben preciso tra luglio e ottobre, dunque mesi estivi caratterizzati da alte temperature, fenomeni temporaleschi che possono mettere in crisi il bacino.

6.6.1 Tracce di precedenti colate storiche nel conoide del bacino

Da una breve indagine sul territorio situato nella conoide di deiezione del bacino è stato possibile rintracciare segni di precedenti colate detritiche che negli anni si sono depositate nelle zone pianeggianti a valle dell'abitato di Rino (figura 30 e 31).



Figura 30: Immagine che documenta presenza di antiche colate detritiche depositatesi sul cono di deiezione del bacino a valle dell'abitato di Rino.



Figura 31: massi ciclopici presenti nell'alveo trasportati da fenomeni di debris flow caratterizzati da magnitudo elevata.

7 STIME DI PORTATA LIQUIDA E SOLIDA PER IL BACINO DEL TORRENTE RABBIA

7.1 Portate di massima del bacino della Val Rabbia calcolate con metodi empirici

Dalla stima della portata di massima piena effettuate attraverso diversi metodi empirici emerge una notevole eterogeneità di risultati (figura 32), considerando il posizionamento geografico del bacino del torrente Rabbia, poco distante dalla Svizzera, possiamo considerare come maggiormente affidabili i risultati forniti dalla formule di Kresnik e ESAF.

KRESNIK= $98,05 \text{ m}^3/\text{s}$

ESAF = $152,8 \text{ m}^3/\text{s}$

SCIMEMI= $474,4 \text{ m}^3/\text{s}$

TOURNON= $412,9 \text{ m}^3/\text{s}$

GIANDOTTI= $305,8 \text{ m}^3/\text{s}$

FORTI= $119,2 \text{ m}^3/\text{s}$

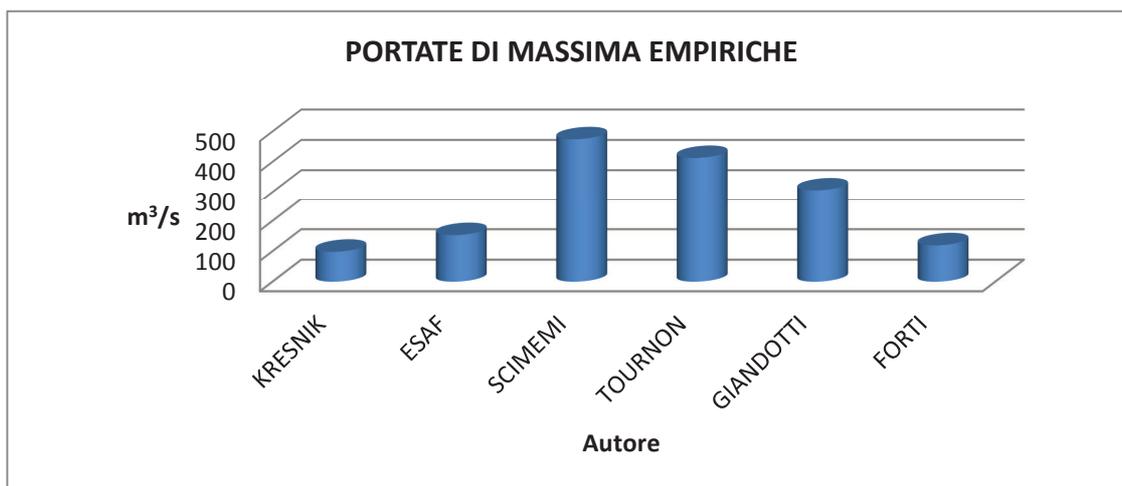


Figura 32: Istogramma relativo alle portate di massima della Val Rabbia calcolate con metodi empirici.

7.2 Stima della portata di colata partendo dalla portata liquida

Per la valutazione della portata relativa alla colata si è utilizzata la stima della portata liquida stimata attraverso il metodo razionale. Questo prevede l'utilizzo delle LSPP le quali forniscono altezza di pioggia di una precipitazione in base alla durata e al tempo di ritorno, in questo modo si può stimare la portata liquida in funzione della quale è possibile stimare la portata solida di colata attraverso la formula di Takahashi.

Per la stima del tempo di corrivazione del bacino è stato utilizzato il metodo Giandotti, sia nella sua formulazione originale, sia quella modificato da Aronica per i bacini inferiori ai 10 km² :

-Formula Giandotti :

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8 + \sqrt{Hm}}$$

-Formula di Aronica :

$$t_c = \frac{\frac{1}{Md}\sqrt{A} + 1,5L}{0,8 + \sqrt{Hm}}$$

M = Costante in base al tipo di copertura

d = Costante in base alla Permeabilità dei terreni

L = Lunghezza asta principale del corso d'acqua in km

Hm = Altitudine media bacino

Nel caso del bacino della Val Rabbia è stato deciso di suddividere il bacino in 2 porzioni di pari dimensioni:

Parte A: porzione di bacino più elevata

d = 0,667(terreno nudo)

M = 1,270 (Semi-impermeabile)

Parte B: terreni coperti da bosco

d = (terreni mediamente permeabili)0,810

M = terreni coperti da bosco = 0,200

I valori ottenuti con le due relazioni sono, rispettivamente 0,82 h e 0,78 h e si è deciso di utilizzare quest'ultimo in quanto la relazione è maggiormente idonea alle caratteristiche del bacino in esame.

Attraverso le LSPP è stato quindi possibile stimare la precipitazione critica per i diversi tempi di ritorno (T) in termini d'intensità.

- T₂₀= 32,40 mm/h
- T₁₀₀= 41,42 mm/h
- T₂₀₀= 45,23 mm/h
- T₅₀₀= 50,32 mm/h

Il valore d'intensità puntuale deve poi essere ragguagliato sull'intero bacino attraverso l'utilizzo dei coefficienti di riduzione dell'altezza di pioggia puntuale che tiene conto del fatto che le precipitazioni così stimate si riferiscono al centro di scroscio e data la natura concentrica delle

precipitazioni, man mano che ci si allontana dal centro di scroscio diminuisce l'intensità di pioggia. Tali coefficienti di riduzione sono definiti in funzione della durata della precipitazione e dell'estensione del bacino (tabella 5).

durata	Area [km ²]				
	1	5	10	30	100
1'	0,76	0,61	0,52	0,40	0,27
2'	0,84	0,72	0,65	0,53	0,39
5'	0,90	0,82	0,76	0,65	0,51
10'	0,93	0,87	0,83	0,73	0,59
15'	0,94	0,89	0,85	0,77	0,64
30'	0,95	0,91	0,89	0,82	0,72
60'	0,96	0,93	0,91	0,86	0,79
2 ^h	0,97	0,95	0,93	0,90	0,84
3 ^h	0,97	0,96	0,94	0,91	0,87
6 ^h	0,98	0,97	0,96	0,93	0,90
24 ^h	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94
48 ^h		0,99	0,98	0,97	0,96

Tabella 6: Coefficienti di ragguaglio in funzione della durata di pioggia e dell'estensione del bacino.

Nel caso del bacino del torrente Rabbia sembra idoneo l'utilizzo di un coefficiente di ragguaglio pari a 0,91.

- $0,91 \cdot 32,40 \text{ mm/h} = 29,48 \text{ mm/h}$
- $0,91 \cdot 41,41 \text{ mm/h} = 37,68 \text{ mm/h}$
- $0,91 \cdot 45,23 \text{ mm/h} = 41,15 \text{ mm/h}$
- $0,91 \cdot 50,32 \text{ mm/h} = 45,79 \text{ mm/h}$

Applico il metodo razionale:

Per l'applicazione del metodo razionale è stato Utilizzato un valore del coefficiente di deflusso ricavato dal SIBCA in cui per il bacino della Val Rabbia il valore stimato è pari a 0,6841. L'area del bacino alla sezione di chiusura del ponte di Rino è invece di $13,25 \text{ km}^2$.

$$Q = \frac{A \cdot c \cdot Ic}{3,6}$$

I valori così calcolati ed incrementati del 30% (arbitrariamente) per tenere conto del possibile effetto dei venti e dell'orografia sono riportati in tabella 7

Tabella 7 : confronto tra le portate in funzione dei tempi di ritorno in assenza e in presenza di venti

T di ritorno	Q in assenza di vento (m ³ /s)	Q in presenza di vento (m ³ /s)
20 anni	74,22	96,48
100 anni	94,87	123,33
200 anni	103,61	134,96
500 anni	115,29	149,87

La portata di colata al picco può essere stimata attraverso la stima della portata liquida attraverso diversi modi, tra questi la formula di Takahashi

$$Q_m = \frac{c^*}{c^* - c} \cdot Q_l$$

Dove:

$c^* = 1 - n$ (concentrazione solida di massimo impaccamento) dove per ammassi naturali solitamente si assume c^* pari a 0,65.

$n = 0,35$ (porosità)

$c = 0,9 \cdot (C^*)$ è la concentrazione di volume della fase solida e cioè il 90% della concentrazione massima, per cui nel seguente caso è fissata a 0,59.

Q_l = portata liquida di picco.

Q_m = portata di picco della colata detritica.

Risulta che il valore massimo di portata di una colata è circa 10 volte maggiore di quella liquida (tabella 8).

Tabella 8: confronto tra le portate di colata in funzione dei tempi di ritorno in assenza e in presenza di venti

T di ritorno	Q colata in assenza di vento (m ³ /s)	Q colata in presenza di vento (m ³ /s)
20 anni	803,80	1044,87
100 anni	1027,44	1335,66
200 anni	1122,09	1458,69
500 anni	1248,59	1623,09

Per la stima della velocità della colata è stata utilizzata la formula di Rickenmann (1998), basata sulla geometria dell'alveo si può ricavare la velocità di deflusso tramite la formula:

$$V = 10 \cdot R^{0,67} \cdot j^{0,5}$$

Dove:

V = è la velocità media della colata (m/s).

10 = Il fattore corrispondente al coefficiente di Strickler ($m^{1/3}/s$).

R = raggio idraulico.

J = è la pendenza della porzione di alveo considerata.

Se si considera la sezione dell'alveo come rettangolare di altezza pari a 6 m, e lunghezza pari a 22 e pendenze del 14%

Si ottiene una velocità pari a:

$$V = 10 m^{1/3}/s \cdot 3,8823 m^{0,67} \cdot 0,14^{0,5} = 9,28 \text{ m/s.}$$

Sulla base della lunghezza del percorso effettuato dal debris flow dal loro punto d'innescamento sino alla briglia selettiva, dove il sensore presente in alveo ha registrato il passaggio della colata, è stato possibile compiere una stima alternativa della velocità. La lunghezza del percorso effettuato dalla colata innescata in località malga Bompiano sino alla briglia selettiva è di circa 4540 m, mentre il percorso effettuato dalla colata scesa dai versanti del bacino Gallinera sino alla briglia è stimabile attorno ai 4800 m. Considerando il segnale d'allerta inviato dal pluviometro (codice 2) è stato inviato alle ore 19.55 e il segnale di passaggio della colata sulla briglia avvenuto alle ore 20.07 (Albertelli com. per.), si ottiene un intervallo di tempo pari a 12 minuti che permette di stimare la velocità media dei flussi di colata in:

- $V_{\text{media}}(\text{Bompiano}) = L/t = 6,30 \text{ m/s}$
- $V_{\text{media}}(\text{Gallinera}) = L/t = 6,66 \text{ m/s}$

Ovviamente non è detto che l'innescamento sia avvenuto nel momento dell'allerta, ma più probabilmente nei minuti successivi. In effetti considerando come attendibile il valore di velocità di 9,28 m/s, il tempo intercorso tra il distacco e il passaggio sulla briglia sarebbe poco più di 8 minuti (contro i 12 trascorsi tra allarme e passaggio sulla briglia). E' inoltre vero che le pendenze delle aste torrentizie nei tratti a monte sono di molto superiori rispetto ai tratti d'alveo lungo la conoide (i versanti delle zone d'innescamento sono caratterizzati da pendenze superiori ai 30 gradi mentre le aste torrentizie presentano pendenze sui 15° per il torrente Gallinera e ancora maggiori per il torrente Bompiano ed è dunque plausibile ritenere che l'innescamento della colata sia avvenuto qualche minuto dopo le 19.55. Ipotizzando che la colata abbia percorso il tratto più breve (asta di Bompiano) ad una velocità pari a 20 m/s (valore riportato in letteratura per questo tipo di fenomeni) si ottiene un tempo di percorrenza inferiore ai 4 minuti. In definitiva è possibile restringere l'intervallo di tempo in cui è avvenuto il distacco della colata in un orario compreso tra le 19.55 e le 20.03. Un' ulteriore stima può essere effettuata utilizzando il tempo impiegato dall'onda di piena per raggiungere l'abitato di Rino dalla briglia selettiva, che dista circa 1250 m. Considerando la velocità di percorrenza di questo tratto pari a quella stimata per il tratto più a valle pari a 9,28 m/s, si ottiene un tempo di percorrenza, pari a circa due minuti.

Se ora si considerare la sezione dell'alveo in corrispondenza del ponte, che è pari a circa 132 m² e si tiene conto della velocità della colata, nel momento in cui transita in prossimità del ponte di Rino, stimata attraverso la formula di Rickenmann, si nota che la sezione necessaria a far transitare la colata si avvicina molto a quella superficie necessaria per raggiungere l'altezza del ponte e in caso di collisione provocarne il cedimento strutturale.

Tabella 9: confronto tra le portate di colata in funzione del tempo di ritorno in assenze e presenza di vento e la sezione del ponte

(T) DI RITORNO	SEZIONE COLATE m ² ASSENZA DI VENTI	CONFRONTO	SEZIONE PONTE m ²
20 anni	86,61	<	132
100 anni	110,71	<	132
200 anni	120,91	<	132
500 anni	134,54	>	132
	SEZIONE COLATE m ² PRESENZA DI VENTI		
20 anni	112,59	<	132
100 anni	143,92	>	132
200 anni	157,18	>	132
500 anni	174,90	>	132

Dall'analisi emerge quindi come la sezione del ponte risulti non sufficiente a contenere ondate di colata particolarmente intense, in particolar modo se l'evento meteorologico è accompagnato da forte vento con direzione opposta all'orientamento dei versanti.

7.3 Stima della magnitudo

Anche per i valori di stima della magnitudo, così come per le stime di portata liquida effettuate con i metodi empirici è possibile notare una significativa eterogeneità dei risultati ottenuti. Se si eliminano i due valori estremi e si esegue una media si ottiene un valore pari a $484155,25\text{m}^3$, questo valore è superiore alle stime effettuate dallo studio COGEO a riguardo dell'evento del 27 luglio, la cui stima si aggira attorno ai 300000m^3 dunque bisogna ritenere che il torrente Rabbia sia in grado di provocare colate con magnitudo ben superiore a quella del luglio 2012, con potenziali effetti distruttivi ben maggiori.

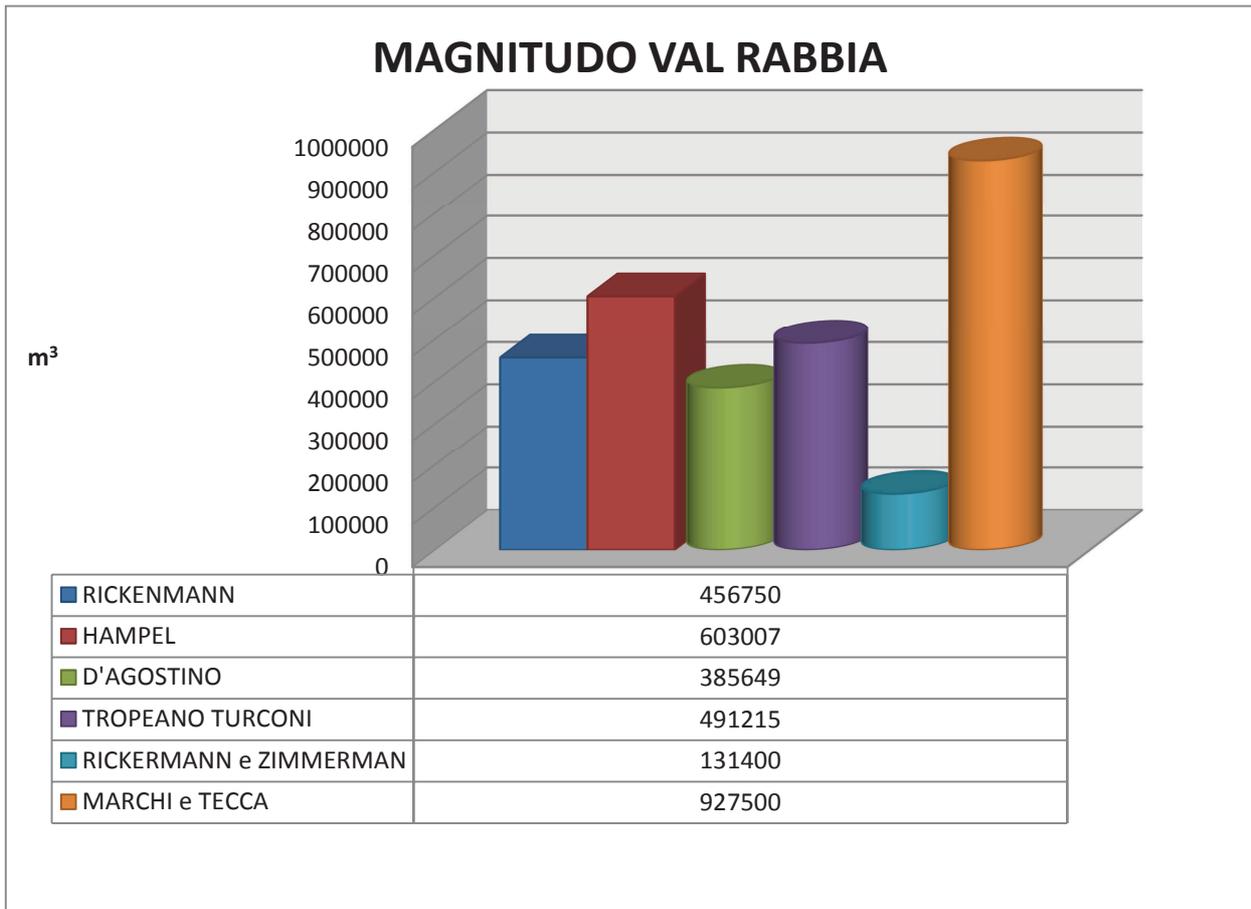


Figura 33: valori di magnitudo relativi al Torrente Rabbia. (Geotec,2007)

8 EVENTO DEL 27 LUGLIO 2012

8.1 Descrizione

I fenomeni della colata detritica presa in esame nelle aree hanno avuto origine nelle aree a quota elevata poste nei sottobacini di Gallinera e di Bompiano (figura 36). Il fenomeno si è verificato il giorno 27 luglio 2012 intorno alle ore 20, in conseguenza di un intenso e localizzato evento temporalesco. Il materiale mobilizzato ha percorso le aste torrentizie dei due sottobacini (figura 34) sino a raggiungere la confluenza con il fiume Oglio, dove la colata ha proseguito il suo percorso all'interno dell'alveo per diverse centinaia di metri sino al suo completo arresto dovuto alle bassa pendenza del tratto di fiume e alla larghezza dell'alveo, caratteristiche queste che hanno favorito il dissipamento energetico della colata e dunque il suo arresto, depositando una quantità di materiale stimabile attorno ai 300000m^3 (figura 42). In relazione a testimonianze dirette, sembra che la colata abbia raggiunto le aree di conoide intorno alle ore 20.10. Sulla base delle modifiche che il fenomeno ha provocato nel bacino e delle testimonianze è stato possibile ricostruire la dinamica degli eventi ed il percorso della colata dividendolo in tre settori:

- Area d'innescò (testate dei bacini), da considerarsi la zona d'origine della colata.
- Zona mediana, zona di percorso della colata lungo le aste del torrente Gallinera e Bompiano (figura 35, 37 e 38)
- Zona di confluenza, comprende le aree di conoide dove la colata si è per la maggior parte depositata.

L'area d'innescò è caratterizzata da forti pendenze soprattutto per quanto riguarda il bacino di Bompiano dove i detriti raggiungono pendenze superiori ai 30° - 40° , questo fattore sommato alla bassa capacità coesiva di questi materiali li rende fortemente instabili. In queste aree in seguito all'evento del 27 luglio sono ben riconoscibili i segni dell'innescò di colate, in particolar modo in malga Bompiano è visibile un solco profondo diversi metri che si estende per una lunghezza di oltre un centinaio di metri, sino all'origine dell'asta torrentizia del torrente Bompiano (figura 36).

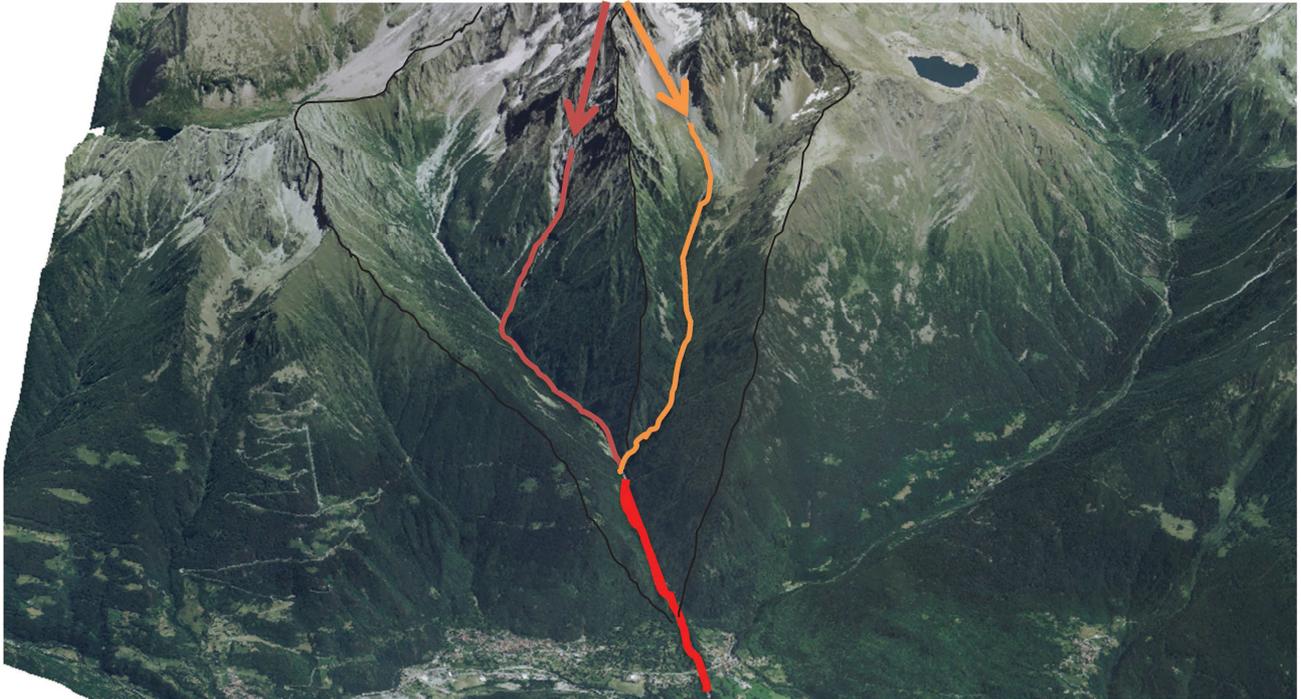


Figura 34 : ortofoto 3D in cui si evidenzia la zona d'innescò delle colate. La freccia rossa indica il punto d'innescò della colata nella testata di Gallinera, mentre la freccia arancione indica il punto d'innescò nella testata di Bompiano.

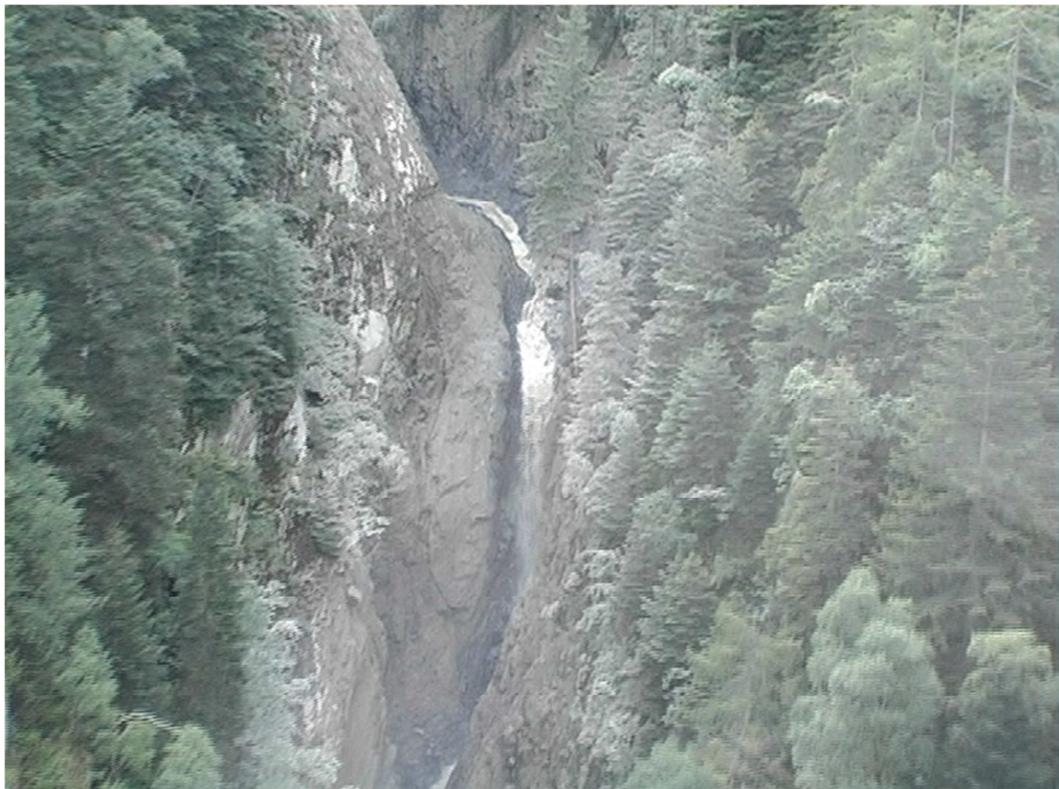


Figura 35: Tratto del Torrente Bombiano in seguito al passaggio della colata.



Figura36: Innesco della colata nella testata di Bompiano a quota 2700m. s.l.m.

Il tratto mediano percorso dalle colate è costituito dagli alvei di due torrenti Bompiano e Gallinera che congiungono le rispettive testate all'area di conoide. L'asta del torrente Bompiano è quasi interamente incisa nella roccia (figura 35), mentre quella di Gallinera a causa della paleofrana che insiste sui suoi versanti consente una continua alimentazione solida della corrente intensificando i fenomeni di colata (figura37), dinamica che ha interessato anche l'evento del 27-luglio-2012.



Figura37 : Instabilità del versante in prossimità della frana di Pal.



Figura 38: Tracce del passaggio della colata lungo le sponde dell'alveo del Torrente Rabbia. Nell'immagine viene messa in risalto l'altezza raggiunta dagli sbuffi della colata.

Il passaggio della colata sulle zone di conoide urbanizzate ha provocato la distruzione del ponte che collega la frazione di Rino all'abitato di Sonico (figure 39, 40, 41), della passerella pedonale in legno posizionata qualche centinaia di metri a monte del paese, rottura delle condutture del metano, per poi terminare la sua corsa impattando contro la strada statale provinciale 42 del tonale, provocando lo sbarramento del fiume Oglio (figura 43). L'ondata di detriti che hanno raggiunto la strada statale ha causato enormi danni distruggendo completamente il guard rail e coinvolgendo alcune automobili che in quel momento stavano transitando (figura 44). Questa dinamica non solo ha colpito il comune di Sonico, ma ha anche messo in forte pericolo l'abitato di Malonno, dato che in caso di cedimento improvviso dello sbarramento provocato dalla colata sull'Oglio si sarebbe potuto verificare l'allagamento della piana del paese. Questa dinamica non è nuova in quanto diverse fonti storiche presso comuni, Club Alpino Italiano, giornali locali, riportano documentazione di una formazione di un lago che si estendeva verso Edolo per diverse centinaia di metri in seguito a sbarramenti prodotti dal trasporto solido eccezionale del torrente Rabbia.



Figura 39: ponte che collegava la frazione di Rino al paese di Sonico.



Figura 40: passaggio della coda della colata in prossimità del centro di Rino.



Figura 41: foto di quel che rimane del ponte in seguito al passaggio del debris flow.



Figura 42: Foto scattata dall'elicottero, in cui si può notare come il materiale depositato dalla colata nell'alveo abbia colmato il dislivello che il fiume Oglio possedeva nei confronti della strada, circa 8 m.



Figura43: sbarramento sul corso del fiume Oglio.

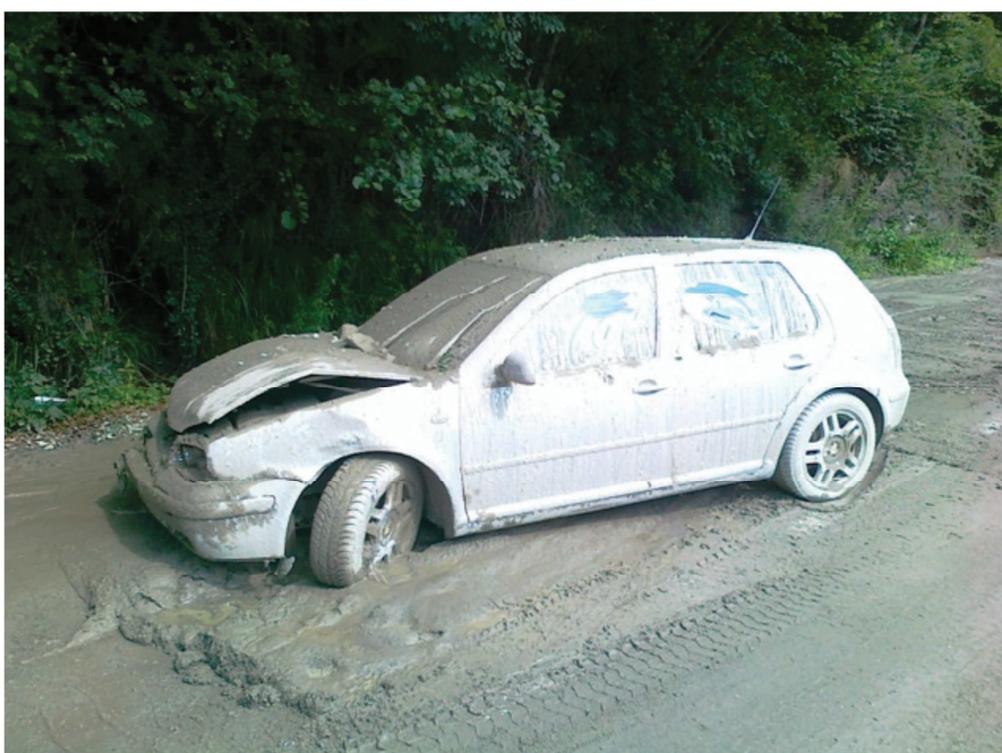


Figura 44: Automobile travolta dall'ondata di lava torrentizia che ha raggiunto la statale.

8.2 Analisi del fenomeno di colata

8.2.1 Analisi delle precipitazioni

Dalle registrazioni, si rileva come la perturbazione del 27 luglio abbia avuto una durata complessiva di 6 ore, dalle 19.00 alle 1.00, durante le quali è stato registrato un valore di altezza di pioggia pari a 56,4mm. Non tutta l'altezza di pioggia registrata in tale intervallo, tuttavia ha contribuito all'innescò della colata detritica, ma solo la precipitazione avvenuta prima delle ore 20. Si ritiene che il picco di pioggia che ha innescato la colata sia stato quello terminato alle 19.55, ora in cui è scattato il segnale d'allerta; purtroppo a causa del mal funzionamento della bilancia del pluviografo non è stato possibile definire con certezza l'intervallo di tempo, ma è possibile stimare che lo scroscio temporalesco, responsabile dell'innescò abbia avuto una durata molto inferiore a quella registrata (55 minuti), e dunque l'intensità di pioggia sia stata molto maggiore (Albertelli, com. pers.). Il picco di pioggia ha fatto scattare il sistema di allerta alle ore 19.55, mentre il passaggio della colata in prossimità della briglia è stato segnalato grazie ad un sensore a strappo alle ore 20.07.

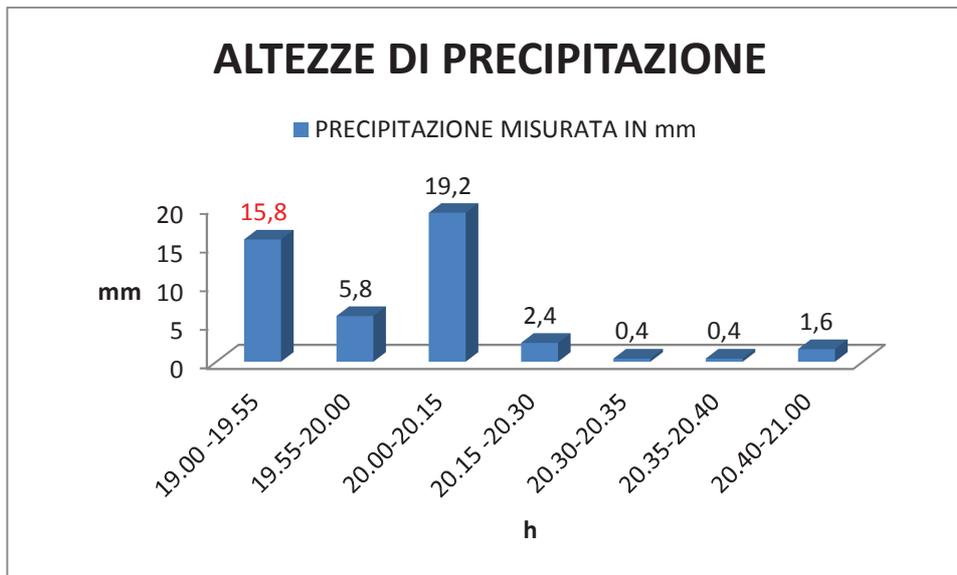


Figura 45: istogramma relativo all'altezza di pioggia. In rosso il picco di pioggia che si ritiene abbia innescato la colata, questa altezza di pioggia probabilmente è caduta in un tempo molto inferiore ai 55 minuti riportati in figura in quanto il pluviografo non ha registrato l'ora precisa dell'inizio della perturbazione a causa di un mal funzionamento.

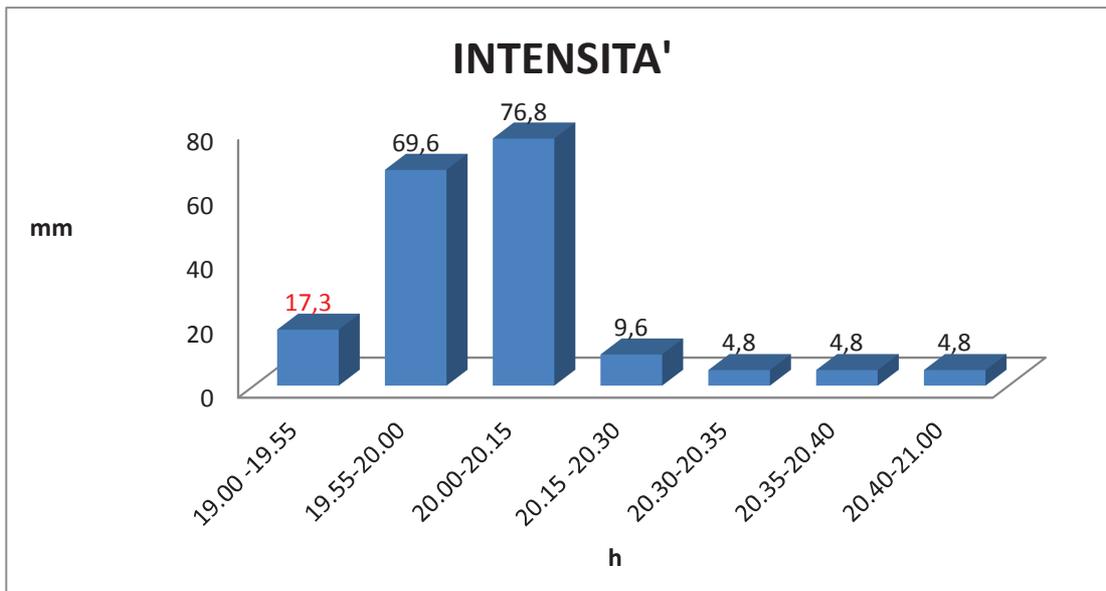


Figura 46: istogramma relativo all'intensità di pioggia. In rosso l'intensità di pioggia che si ritiene sia stata in realtà molto maggiore, almeno pari a 32mm/h in quanto a fatto scattare il codice 2 del sistema d'allerta.

Dalle figure (45 e 46) risulta come l'intensità massima dell'evento abbia raggiunto valori di 76,8 mm/ora per una durata di 15 minuti, oltre i quali l'intensità della precipitazione ha iniziato a diminuire.

Un altro aspetto molto importante da tenere in considerazione nell'analisi dei dati pluviometrici è il dato relativo all'altezza di pioggia registrata nei giorni precedenti il 27 luglio,

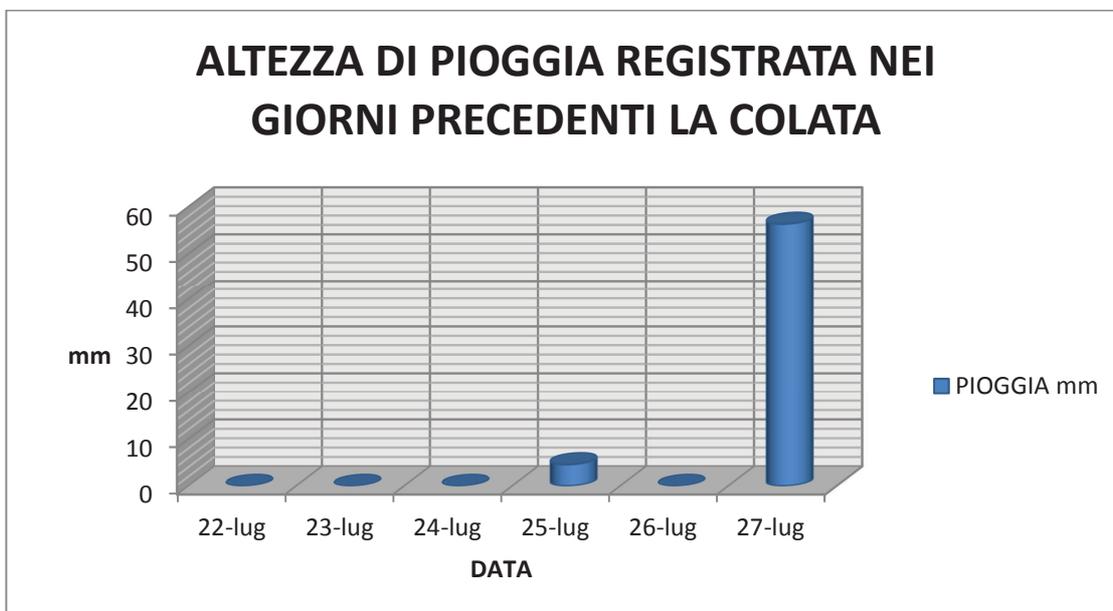


Figura 47: istogramma relativo all'altezza di pioggia registrata nei giorni precedenti la colata del 27 luglio 2012.

Come si può facilmente intuire dall'istogramma riportato in figura (47), le piogge cadute che hanno preceduto il 27 luglio sono trascurabili in quanto a partire dal giorno 22 luglio si sono registrate precipitazioni solo in occasione della giornata del 25 luglio e peraltro di modesta entità (4,6 mm).

8.2.2 Confronto tra le precipitazioni del 27 luglio e le LSPP

Per valutare l'importanza dell'evento meteorico, si è fatto un confronto tra le piogge registrate dal pluviometro e i valori relativi alle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica LSPP. Per svolgere un confronto attendibile si sarebbe dovuto procedere andando ad analizzare i dati di altezza di pioggia massima registrati che hanno innescato la colata ma ciò non è stato possibile a causa delle imprecise registrazioni effettuate dal pluviometro, il quale non ha indicato l'inizio dello scroscio di pioggia e dunque il dato ricavabile d'intensità di pioggia risulterebbe sfalsato, per questo motivo si è preso in esame l'intervallo di tempo che va dalle 19.55 alle 20.15 per il quale il pluviometro può fornirci dati più precisi.

Da un'analisi dei dati pluviometrici registrati dal pluviometro della stazione Gallinera per il giorno 27 luglio 2012 è emerso che:

Il pluviometro della stazione di Gallinera è localizzato nella cella EY43 (Tabelle del bacino del fiume Po), per la quale vengono forniti i seguenti coefficienti necessari per la creazione delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni.

Tr in anni	a	n
20	28,03	0,416
100	35,72	0,404
200	38,98	0,401
500	43,32	0,397

Tabella 10: relativa ai valori di a ed n stimati per il bacino della Val Rabbia in funzione del tempo di ritorno.

La tabella 10 permette di risalire all'altezza di pioggia puntuale applicando la seguente formula:

$$h = at^n$$

Dove:

h = Altezza di pioggia puntuale.

a ed n = Sono due coefficienti che variano in funzione del bacino e del tempo di ritorno.

t = E' il periodo di tempo che si considera nella valutazione della massima altezza di pioggia attesa per un dato bacino in ore, solitamente questo valore corrisponde al tempo di corrivazione del bacino in considerazione.

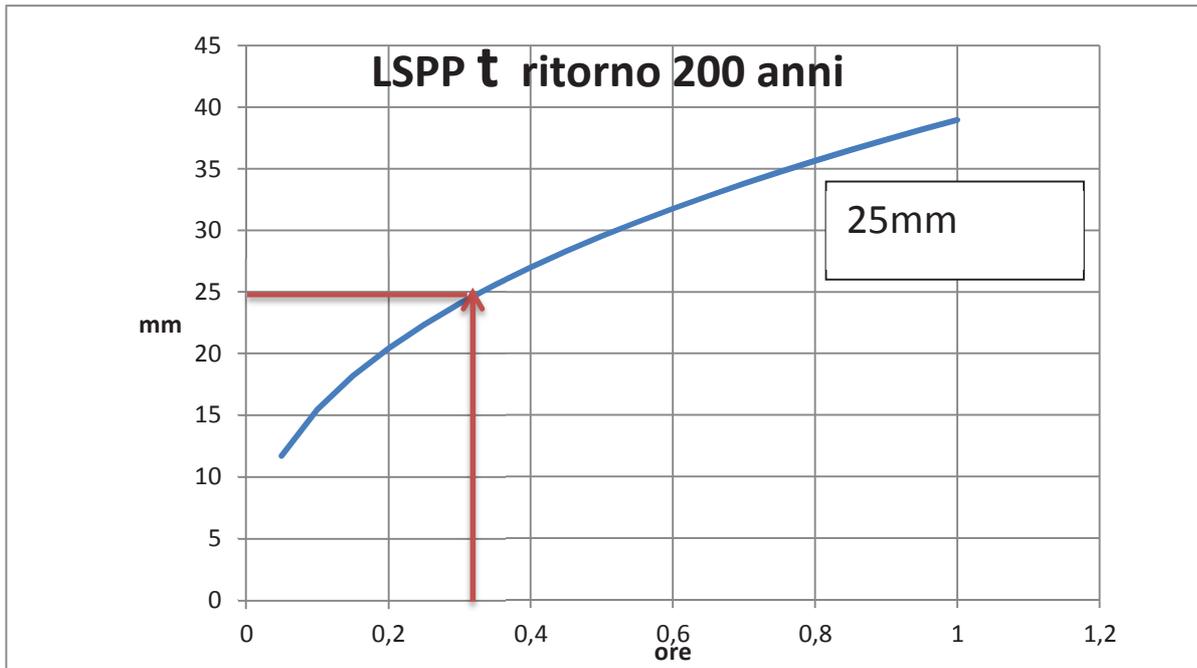


Figura 48: Linea segnalatrici di possibilità pluviometrica di tempo di ritorno pari a 200 anni per il bacino della val Rabbia, confrontata con l'altezza di pioggia registrata dalle 19.55 alle 20.15.

Confrontando il valore registrato dal pluviometro nell'intervallo di tempo dalle 19.55 alle 20.15, pari a 25 mm, con quelli ricavabili dalle LSPP si capisce come l'altezza di pioggia registrata il 27/07/2012 presa in esame coincida con l'altezza di pioggia calcolata attraverso le LSPP per un intervallo di tempo di 20 minuti con tempo di ritorno di 200 anni, che ha un valore di 25,08mm. Dunque non possiamo affermare che la colata detritica sotto esame ha avuto come fattore scatenante una perturbazione caratterizzata da un tempo di ritorno stimabile intorno ai 200 anni, ma possiamo affermare con sicurezza che dai dati in nostro possesso è emerso che la cella temporalesca che ha colpito il bacino del torrente Rabbia il 27-luglio ha raggiunto intensità di pioggia elevate con tempi di ritorno stimabili intorno ai 200 anni, o superiori.

8.2.3 Effetto dell'orografia sulla precipitazione

Dall'analisi dei dati registrati di intensità e direzione del vento è emerso che nell'intervallo di tempo compreso tra le 19.55 e le 20.15 (intervallo di tempo in cui si è registrata l'intensità media della perturbazione intorno ai 75mm/h) la precipitazione è stata accompagnata da forti venti che hanno soffiato ad una velocità calcolata intorno ai 46 km/h hanno mantenuto direzione costante (22° nord), opposta all'orientamento del bacino (figura 49).

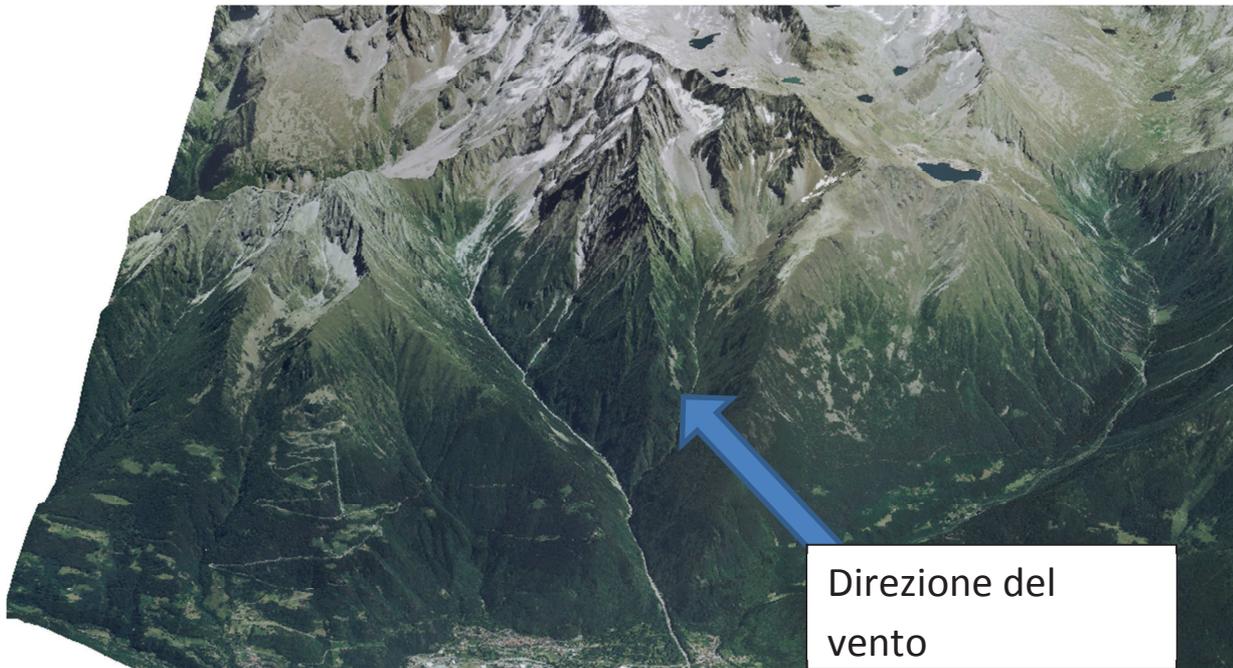


Figura 49: ortofoto 3D che mette in risalto la direzione dei venti durante l'evento Temporalesco.

Dunque possiamo considerare con ottima probabilità che la quantità di acqua caduta realmente sul bacino è stata maggiore rispetto a quella ricavabile dai dati pluviometrici.

Dal punto di vista quantitativo si può considerare un incremento sino a valori del 30% nel caso di piccoli bacini montani (Mosiello, 1998).

8.2.4 Analisi delle temperature:

Le temperature possono avere grosse ripercussioni sui meccanismi d'innescò delle colate detritiche che hanno origine a quote elevate, oltre i 2000 m. In tale ambito occorre tenere presente che la coesione in terreni ghiaiosi e sabbiosi (tipologia tipica dei terreni presenti sulle testate del bacino del Rabbia) è nulla, e che a quote elevate la temperatura è inferiore allo 0° termico per gran parte dell'anno, e dunque l'acqua presente nel terreno congelandosi rende lo strato detritico più aggregato e stabile (permafrost).

Le alte temperature registrate in quei giorni (figura 50) possono quindi aver influito sullo strato del permafrost alterandolo ed esercitando due importanti ripercussioni:

- Diminuzione dell'aggregazione del suolo (maggiormente significativa)
- Produzione di acqua formatasi dallo scioglimento del permafrost e delle lingue glaciali presenti, che si somma all'acqua precipitata in seguito alla perturbazione, e fa aumentare la pressione, e lo scorrimento superficiale con il conseguente aumento delle probabilità d'innescò di movimenti di massa. Tale effetto sembra però esser meno significativo.

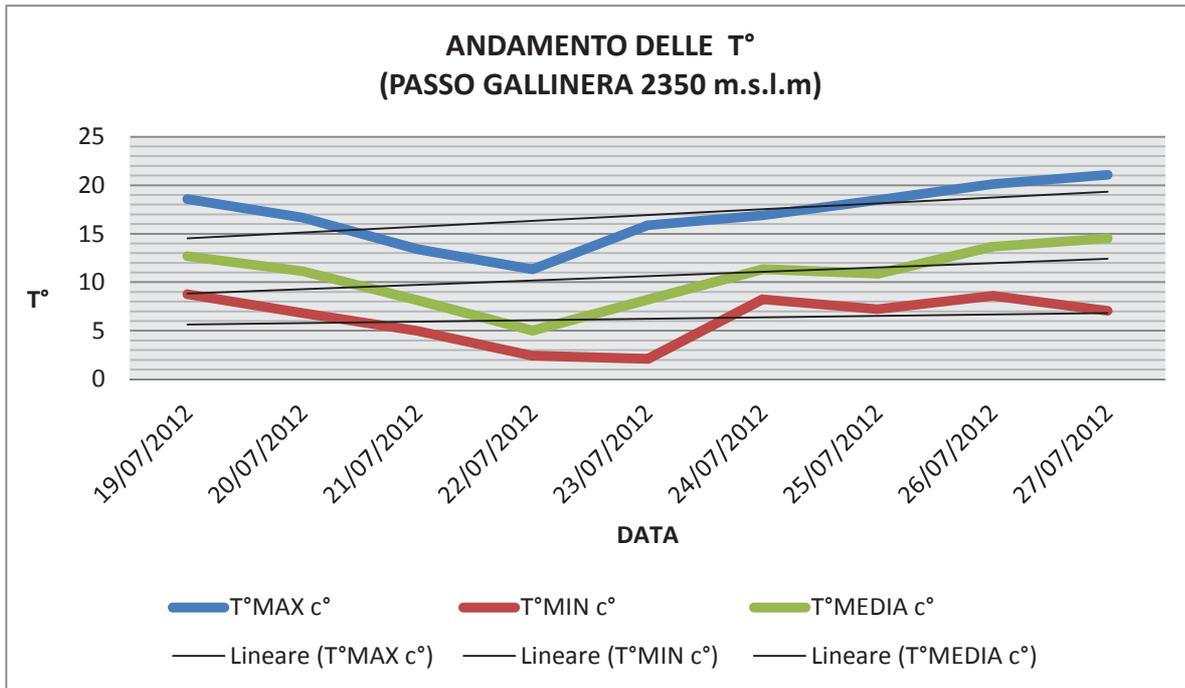


Figura 50: grafico relativo all'andamento delle temperature registrate dalla stazione di Gallinera.

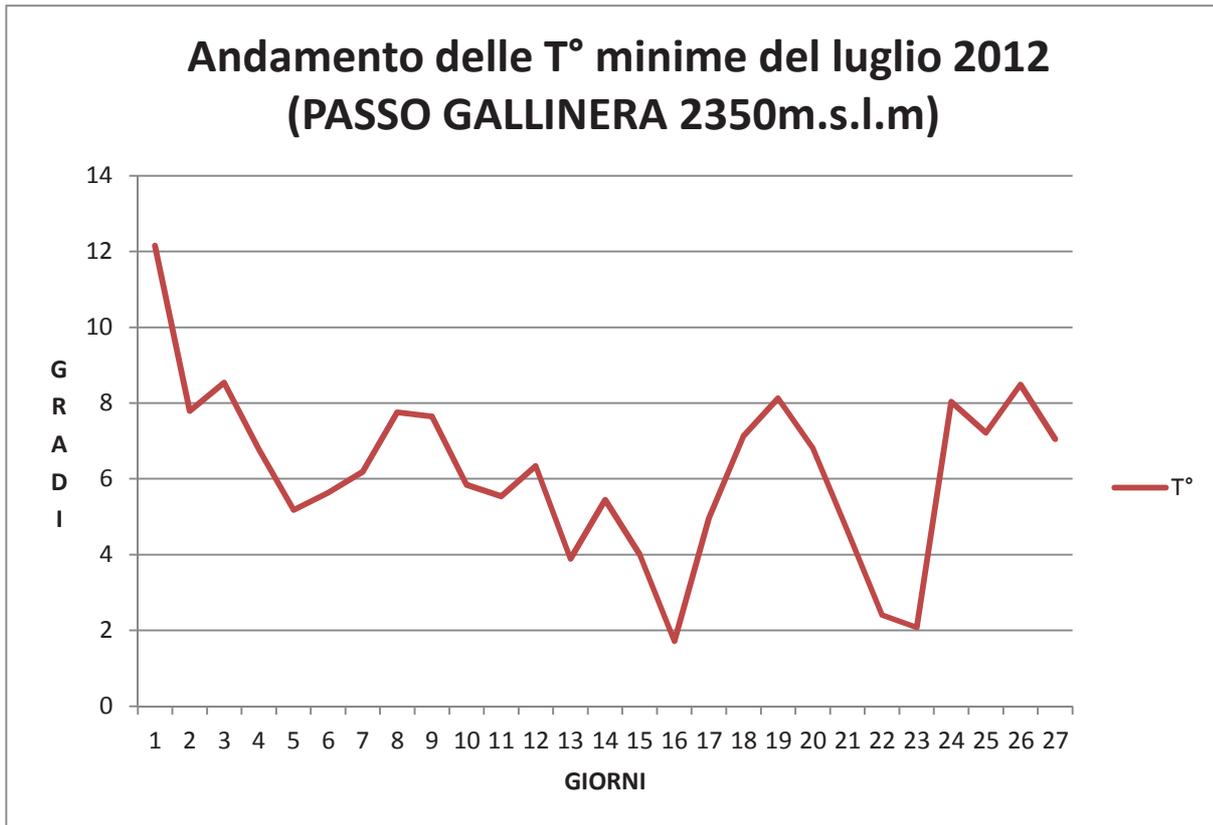


Figura51 : grafico che mostra l'andamento delle temperature minime registrate sul Passo Gallinera.

Le registrazioni relative alle temperature mostrano come le minime non siano mai scese al di sotto dei 2 C° per tutto il mese di luglio (figura 51), inoltre evidenziano un andamento crescente generale dei valori a partire dal giorno 23 sino al giorno 27 (figura 50), dove si sono registrati i picchi massimi di temperatura. L'andamento delle temperature in crescendo costante per i 5 giorni precedenti il temporale del 27 luglio, ci può aiutare a spiegare sia l'intensità dell'evento meteorico, in quanto l'umidità presente nell'aria aumenta con l'aumentare delle temperature che in quei giorni aveva raggiunto valori molto elevati, sia la riduzione delle proprietà stabilizzanti che il permafrost conferisce al suolo.

9 RISPOSTA DELLE OPERE STRUTTURALI

9.1 Verifica del comportamento della briglia selettiva:

L'imponente briglia selettiva (figura 52) localizzata in a quota 850 m.s.l.m, a circa 1 km a monte dell'abitato di Rino, il cui piano di fondazione poggia su roccia, presenta un numero di aperture pari a 7, la maggiore delle quali raggiunge i 5 m di larghezza e i 2,3 m di altezza, presenta uno spessore di 4,5 m, mentre la minore ha larghezza pari a 2 m e altezza di 2,30 m. Il corpo dell'opera ha una larghezza di circa 30 m, ed un'altezza di circa 9,5 m. Dato che l'alveo non si allarga molto a monte la piazza di deposito presenta una possibilità d'invaso di circa 100 m piani. La briglia presenta una tipologia di filtri a finestra disposte su un piano verticale, e sulla sommità dell'opera sono stati inseriti dei pettini in acciaio ad una distanza tra loro di 2 m; onde evitare cedimenti della struttura sono stati posizionati micropali di fondazione.



Figura 52: briglia selettiva, presenta una tipologia di filtro a finestre, con presenza di pettini posizionati sull'estremità superiore.



Figura53: passaggio della coda della colata sulla briglia selettiva.



Figura 54: briglia selettiva in seguito al passaggio della colata detritica del 27 luglio 2012.

La colata detritica scesa a valle il 27 luglio 2012 possedeva una magnitudo di molto superiore alla capacità d'invaso della piazza di deposito a monte della briglia, in quanto ben 300000 m³ di materiale hanno raggiunto il cono di deiezione. Inoltre come ben documentato in figura (54) il comportamento dosante non può essere considerato positivo in quanto il filtro si è ostruito totalmente e ciò non ha permesso all'onda di piena entrata nel bacino di deposito di fuoriuscire in tempi più lunghi e con concentrazioni solide più contenute figura (53). Le finestre risultano totalmente ostruite, ciò è dovuto alla presenza all'interno della colata di blocchi ciclopici di diverse tonnellate, l'origine di questi blocchi è da ritenersi per lo più glaciale, questo aspetto è intuibile dalla forma arrotondata dei massi. Questo aspetto può essere dovuto alla tipologia di briglia filtrante scelta, caratterizzata da finestre orizzontali disposte su un piano verticale le quali in base a studi effettuati in campo risultano particolarmente soggette al pericolo di un'ostruzione completa. (Ferro, V., et. a.l., 2004). Altro particolare messo in evidenza dalla (figura 54) è lo scavo dell'alveo provocato dal passaggio della colata nella zona ai piedi della briglia non ricoperta da selciato.

9.2 Comportamento della scogliera

Le tensioni esercitate dalla colata sul perimetro dell'alveo sono state estremamente intense, nel tratto a valle della briglia selettiva hanno prodotto uno scavo del fondo, approfondendo l'alveo di diversi metri, ma le maggiori tensioni si sono registrate nella zona del piede di sponda le quali erano state rinforzate con scogliera costruita con massi ciclopici. Queste strutture non sono state in grado di resistere alle tensioni esercitate durante il passaggio del debris flow (figura 55e 56).



Figura 55 : nell'immagine si evidenzia il processo di incisione del fondo dell'alveo innescato dalla colata.



Figura 56: erosione del piede di sponda generata dalla colata.

9.3 comportamento del cunettone in selciato

Il cunettone in selciato presente a valle dell'abitato di Rino ha certamente diminuito le resistenze tra il flusso di colata ed il contorno bagnato della sezione, verosimilmente provocato un aumento delle velocità con conseguente aumento dell'energia cinetica che ha permesso al fronte di colata di raggiungere la statale a valle. Il cunettone si è dimostrato in grado di resistere molto bene agli urti e agli effetti erosivi in quanto non è rimasto danneggiato proteggendo in questo modo le sponde ed il fondo dell'alveo (figura 57).



Figura 57: cunettone in seguito al passaggio della colata.

10 OPERE NON STRUTTURALI PRESENTI NEL TORRENTE DEL BACINO RABBIA

In seguito ad un precedente evento di colata detritica accaduto nel luglio 2006, che portò al deposito di un volume di materiale compreso tra i 100.000 e i 150.000 m³, la regione Lombardia, con gli interventi finanziati con i piani di utilizzo delle economie accertate sui fondi ex. L. 102/ aveva stanziato 200.000,00 euro, per la predisposizione del sistema di monitoraggio idrogeologico della frana di Pal in comune di Sonico. In realtà, questo progetto non prevede un sistema di monitoraggio della frana, ma del corso d'acqua, dalla parte più alta di alimentazione sino alla parte bassa di conoide, lungo tutta l'asta, compreso anche il piede della frana di Pal. La decisione di realizzare un sistema di monitoraggio e controllo del corso d'acqua rispetto alla frana di Pal è nato dalle seguenti considerazioni:

- La frana di Pal è una frana complessa il cui scivolamento è già monitorato dalla provincia di Brescia.
- L'eventuale collasso sembra non possa avvenire in un solo movimento ma a seguito di una serie di franamenti al piede sino al distacco del versante.
- Trattandosi di una frana di grandi dimensioni l'eventuale movimento e gli indici di incipiente collasso dovrebbero essere evidenti e facilmente rilevabili (apertura di fratture e progressivo allungamento delle stesse, modifiche nell'emergenza d'acqua ecc..), garantendo in tal senso attività di allerta e di protezione civile a protezione degli abitanti.
- Gli eventi di colata del corso d'acqua sono invece imprevedibili senza un adeguato sistema di monitoraggio, rapidi e molto intensi in termini di volume di materiale trasportato ed energia distruttiva.
- L'eventuale collasso della frana Pal di per sé non costituirebbe un problema diretto per l'abitato, ma rappresenterebbe una fonte di forte rischio per l'effetto diga sul torrente, con l'eventuale formazione di colate detritiche, ma successive al collasso. In tal senso il monitoraggio previsto consente un controllo dei deflussi a monte e a valle della frana e consente l'allertamento per la formazione di colate detritiche anche a valle della frana stessa e si ritiene pertanto più utile rispetto ad un monitoraggio diretto della frana che peraltro era già in atto.

Per la messa in sicurezza del torrente Rabbia si è deciso di basare il sistema di monitoraggio sulla misura delle precipitazioni e delle temperature con l'obiettivo di costruire un modello previsionale di allertamento, per lo più basato su soglie pluviometriche d'innescò. Il modello previsionale ha come fine quello di prevedere l'insorgere dell'evento sulla base delle condizioni di pioggia e temperatura, in modo da attivare i sensori che servono per il modello di emergenza e macchina della protezione civile. Una volta che la colata detritica è stata innescata deve poter essere controllata attraverso quello che viene definito modello di intervento di emergenza, costituito da sensori posti in alveo, che permettono l'invio di un messaggio al passaggio della colata, e poter effettuare un'evacuazione delle zone a rischio e la chiusura della strada a valle. Si tratta quindi di un sistema che lavorerà in due tempi, il primo che coincide con la misura della pioggia ed il secondo con la misura dell'evento o degli eventi di colata. (Albertelli, 2010).

Dapprima si erano presi in considerazione altri sistemi di allertamento, a pendolo, da posizionare sospesi sull'alveo, ma sono stati scartati per la difficoltà di collocare tali sensori su un alveo che raggiunge in molti punti anche i 20 m di larghezza e, con sponde instabili e possibilità di deviazione fuori alveo delle colate. Dunque si è deciso di utilizzare sistemi di attivazione a zavorra (la zavorra è costituita da massi presenti in alveo), ancorati ad una fune che attiva la cella di carico. Il sistema di monitoraggio è previsto per la sola asta del torrente della valle Gallinera, poiché nella val Rabbia è più difficoltoso posizionare alcun tipo di sensore a causa della forte dinamica dei versanti e la presenza di aree valanghive che distruggerebbero i sensori in una sola stagione.

10.1 Soglie d'allarme specifiche per il bacino del torrente Rabbia

Ancora non si ha una documentazione sufficiente in grado di fornire coefficienti specifici per il bacino di val Rabbia, ma oggi si utilizzano soglie pluviometriche d'innescò di fenomeni franosi e debris flow realizzati da Ceriani (1998), queste formule sono equazioni sviluppate dal servizio geologico della Lombardia e ritenute le più affidabili per i bacini montani lombardi. La Giunta Regionale della Lombardia con Delibera n. 7/21205 del 24 marzo 2005, relativa alla "Direttiva Regionale per l'allertamento per il rischio idrogeologico e idraulico e la gestione delle emergenze regionali" (in prima applicazione della Direttiva Presidente del Consiglio dei Ministri del 27/02/04 e della L.R.16/2004), ha ufficialmente adottato il "metodo Ceriani" come metodo regionale per la predisposizione del sistema di allertamento idrometeorologico della Protezione Civile relativamente ai dissesti superficiali. In particolare le equazioni, che individuano le soglie minime considerate per l'innescò dei fenomeni superficiali, sono le seguenti:

$$S_1 = (D^{-0.55}) \cdot 2.01 \cdot PMA/100 \cdot D,$$

$$S_2 = (D^{-0.48}) \cdot 2.80 \cdot PMA/100 \cdot D,$$

Dove:

S1 = Soglia minima d'innescò (<10 debris flow per km²).

D = Durata della precipitazione.

S2 = Soglia minima d'innescò (<20 debris flow per km²).

PMA = Pioggia media annua della stazione di riferimento.

Il valore di PMA della stazione di riferimento è stato attribuito modificando il valore fornito dalla "carta delle precipitazioni medie annue del territorio alpino Lombardo della regione Lombardia" (Ceriani e Carelli, 2000) per l'area in esame, con la finalità di fornire condizioni più cautelative in termini di possibilità di allertamento rispetto ai fenomeni di colata detritica ed in relazione al fatto che la stazione di riferimento, dalla quale sono registrati i dati utilizzati è posta in quota. Le analisi sono state condotte con una PMA pari a 1100 mm, invece che un valore compreso tra 1200 e 1400mm come riportato nella carta delle precipitazioni al fine di creare soglie d'allarme maggiormente cautelative.

Lo schema di funzionamento prevede nella prima fase (modello previsionale) il controllo attraverso la stazione meteo, che si attiva all'insorgere di precipitazioni critiche. Tali precipitazioni sono quelle intense per le quali sono stati previsti i seguenti codici ancor più cautelativi, rispetto a quelli stimabili attraverso il modello di allerta Laffi e Ceriani (1998) di cui la stazione è comunque dotata (tabella 11).

- CODICE 1 > 10-16 mm/ 30'
- CODICE 2 > 16-20 mm/ 30' e temperatura media superiore ai 15°
- CODICE 3 > 20 mm/ 30'

Ore	S1 Intensità mm/h	S1 Altezza di pioggia mm	S2 Intensità mm/h	S2 Altezza di pioggia mm
0,1	78,45	7,84	93,01	9,3
0,2	53,58	10,71	66,69	13,33
0,3	42,87	12,86	54,90	16,47
0,4	36,60	14,64	47,81	19,12
0,5	32,37	16,18	42,95	21,47
0,6	29,28	17,56	39,35	23,61
0,7	26,90	18,83	36,55	25,58
0,8	25,00	20	34,20	27,36
0,9	23,43	21,08	32,4	29,16
1	22,11	22,11	30,80	30,08
2	15,10	30,02	22,08	44,16
3	12,08	36,24	18,17	54,51
4	10,31	41,24	15,83	63,32
5	9,12	45,6	14,2	71,12
6	8,25	49,5	13,03	78,19
7	7,58	53,06	12,10	84,72
8	7,04	56,32	11,35	90,81
9	6,60	59,4	10,72	96,55
10	6,2	62	10,19	101,98

Tabella 11: valori di soglia pluviometrica, stimati attraverso il metodo Ceriani

DATA	ORA	PIOGGIA mm	S1	ALLARME
27/07/2012	19.55	15,8	21,18	Allarme Codice 2
27/07/2012	19.00.00	5,8	7,21	
27/07/2012	19.15.00	19,2	11,84	
27/07/2012	19.30.00	2,4	7,21	
27/07/2012	19.35.00	0,4	7,21	
27/07/2012	19.40.00	0,4	13,42	
27/07/2012				

Tabella 12 relativa alle soglie d'allarme per l'evento del 27 luglio 2012, prende in esame i valori d'intensità.

Dal confronto dei dati pluviometrici registrati il 27 luglio con le soglie pluviometriche d'innescio stimate per il bacino del torrente Rabbia risulta che le precipitazioni registrate dal pluviometro abbiano superato le soglie d'allarme già alle ore 19.55, ora in cui si è attivato il codice 2 del sistema d'allerta dovuto al fatto che il pluviometro ha registrato un'altezza pari a 15,8 mm, approssimata a 16 mm, in un tempo di mezz'ora (tabella 12). Il sistema d'allerta si è attivato alle ore 19,55, ciò ha permesso la messa in funzione del sensore localizzato in prossimità della briglia selettiva, il quale ha registrato il passaggio della colata circa 12 minuti in ritardo rispetto al segnale d'allerta delle 19.55; da quel punto la colata ha raggiunto l'abitato di Rino in un tempo stimato attorno al minuto. Questo risultato mette in risalto l'efficacia di questa metodologia di seguito schematizzata:

- 1) Modello previsionale: si attiva il modello previsionale con il sopraggiungere del bollettino d'allerta da parte della prefettura o della regione Lombardia. E' in questo momento che il sistema di protezione civile deve essere messo in attenzione. Al sopraggiungere della pioggia la stazione meteo invierà in automatico i messaggi di allertamento (Codice 1, Codice 2, Codice 3) e la protezione civile si attiverà con mezzi e uomini attuando quanto contenuto nel piano di emergenza comunale.
- 2) Modello d'intervento / emergenza: al verificarsi di eventuali colate detritiche le stazioni di allertamento in alveo invieranno i messaggi di emergenza dai quali si potrà determinare la posizione della colata, e un successivo suono delle sirene avvertirà che la colata è in prossimità dell'abitato.

11 LA PARTICOLARE SITUAZIONE DELL'ABITATO DI RINO

La frazione di Rino di Sonico conta poche centinaia di abitanti, (275 circa), ed ha la particolarità di essere stata costruita sulla conoide di deiezione di due corsi d'acqua, entrambi i quali possiedono spiccate caratteristiche torrentizie (figura 58). Il torrente Rabbia di cui si è ampiamente parlato nei capitoli precedenti di questo lavoro, ed il torrente Remulo il quale verrà preso brevemente in esame in questo capitolo.



Figura 58: ortofoto nella quale viene messa in risalto la posizione di Rino, situato sul cono di deiezione di due bacini a carattere torrentizio.

Legenda:

-  Torrente Rabbia
-  Torrente Remulo

Dal punto di vista morfologico il Remulo è caratterizzato da una superficie di bacino di molto superiore a quella del torrente Rabbia, pari a circa $40,58 \text{ km}^2$ (SIBCA), e ciò comporta una minore intensità media di pioggia sull'intero bacino. Il bacino idrografico ha una quota minima di 662 m.s.l.m, una quota massima di 3532 m.s.l.m, e una quota media di 2203 m.s.l.m., queste caratteristiche morfologiche gli conferiscono un livello di pericolosità inferiore rispetto alla vicina Val Rabbia, (Albertelli, 2010). La lunghezza del tratto principale è intorno ai 15 km, circa il doppio rispetto al Rabbia, e presenta pendenze molto meno accentuate. L'affluente principale del torrente Remulo è il torrente Baitone, emissario del lago Baitone che si immette nel Remulo a quota 1710 m.s.l.m.. L'area del bacino idrografico in esame ha caratteristiche morfologiche e morfometriche differenti da quelle della Val Rabbia in quanto le maggiori dimensioni del bacino e le minori pendenze influiscono sul comportamento "dinamico" del corso d'acqua rendendolo più difficilmente soggetto a colate di elevata magnitudo in caso di fenomeni di piena. Sfogliando gli annali si nota come il Remulo, abbia al suo attivo molti meno eventi di trasporto solido rispetto al Rabbia, un importante evento che lo vide protagonista fu quello risalente al 27 settembre 1987 dove

in seguito a forti piogge, il pluviometro in località Baitone fece registrare valori di 148 mm di pioggia in 24 ore, si generò un deflusso liquido tale in grado di provocare franamenti di versante con conseguente trasporto solido a valle del materiale che provocò seri danni all'abitato (figura 59).



Figura 59: immagine che documenta i danni provocati all'abitato di Rino dalla colata detritica provocata dal Torrente Remulo nel settembre 1987.

In seguito a questo avvenimento si attuarono degli interventi lungo l'alveo del torrente per garantire la messa in sicurezza del territorio, oltre alla creazione di soglie e scogliere posizionata si optò per la formazione di due briglie filtranti, la prima posizionata più a monte ha una larghezza di testa di sessanta metri per un'altezza di quattro e permette un accumulo di materiale stimato intorno ai 10.000 m^3 . La seconda posizionata più a valle in località Risingul è una briglia a fessura centrale, con larghezza gaveta di 30 m, larghezza in sommità di 54 m, altezza corpo centrale di 7 m, La fessura ha un'apertura di 3 m e, si stima che quest'opera possa trattenere 7.000 m^3 di materiale; inoltre, presenta il vantaggio di esser facilmente raggiungibile con mezzi che possono provvedere allo svuotamento. Anche il torrente Remulo presenta una spiccata pericolosità seppur non ai livelli del vicino Rabbia, testimonianza di ciò è la presenza in alveo di ingenti quantità di materiale solido, costituito anche da blocchi rocciosi che possono raggiungere volumi superiori ai 10 m^3 .

Bacino idrografico	MAGNITUDO (Hampel)	MAGNITUDO D'agostino	MAGNITUDO Crosta,Ceriani,Turconi
RABBIA	600000 m^3	385649 m^3	785760 m^3
REMULO	255253 m^3	327995 m^3	228709 m^3

Tabella 13: Riporta i valori di stima della magnitudo per i due bacini, i dati relativi al torrente Rabbia stimati dallo studio geologico GEotec, mentre i dati relativi al torrente Remulo stimati dallo studio geologico COGEO.

Esaminando i dati riportati in tabella13, si può ritenere che l'abitato di Rino sia soggetto a un ulteriore pericolo sotto forma di trasporto solido, anche se il bacino del Remulo avendo un tempo di corrivazione molto maggiore entrerà in crisi con precipitazioni più prolungate e più difficilmente in seguito allo scroscio di pioggia di un temporale estivo. Un aspetto importante che caratterizza le strutture presenti in questo torrente è che la maggior parte di esse sono state dimensionate per resistere a portate di acqua chiara e non ad eventi di colata i quali a parità di tempi di ritorno possono generare portate molto superiori.

12 CONCLUSIONI

Lo scopo principale di questo lavoro è stato quello di fornire un quadro complessivo sulle cause che hanno provocato all'interno del bacino del torrente Rabbia il giorno 27-luglio-2012 un fenomeno di colata detritica estremamente intenso in grado di trasportare a valle una quantità di materiale stimato intorno ai 300.000 m³, depositatosi poi lungo il cono di deiezione del bacino. Il lavoro è stato svolto in più parti, partendo dallo studio delle caratteristiche che predispongono il bacino ad eventi di debris flow, attraverso il reperimento di dati cartografici e l'utilizzo di software GIS.

In base agli studi effettuati è emerso come i fattori predisponenti siano i seguenti:

- Forte pendenza dei versanti.
- Elevata pendenza delle aste torrentizie.
- Bassi tempi di corrivazione del bacino.
- Presenza di una paleofrana stimata intorno ai 14.000.000 m³ il cui piede è posizionato sull'asta torrentizia del torrente Gallinera,.
- Le piccole dimensioni del bacino circa 13,25 km² e forma arrotondata.
- Massiccia presenza di materiale erodibile, sia sui versanti che in alveo in grado di alimentare la colata.
- Oltre metà del bacino si trova al di sopra del limite della vegetazione arborea e dunque viene meno anche l'azione regimante del bosco.
- Presenza di lingue glaciali e permafrost a quote elevate.

Passando poi all'analisi dei dati registrati dalla stazione meteorologica localizzata sul passo Gallinera si è compreso quali eventi hanno influenzato le dinamiche d'innescò:

- Brevi ed intense precipitazioni che hanno riversato sul bacino una quantità di pioggia in grado di generare una colata capace di asportare il ponte che collega il comune di Sonico all'abitato di Rino.
- Alte temperature registrate nei giorni precedenti il fenomeno, le quali hanno reso possibile il manifestarsi di un evento meteorologico estremamente intenso, caratterizzato da tempi di ritorno dell'ordine dei 200 anni.
- Presenza di forte vento che soffiava in direzione opposta rispetto all'orientamento dei versanti del bacino, ciò può aver comportato un notevole aumento della quantità di pioggia riversatasi sul bacino, dell'ordine del 20-30% maggiore rispetto a quella stimabile in funzione delle registrazioni pluviometriche.

Dalle analisi effettuate si è potuto concludere come il fenomeno di debris flow sia stato generato dall'azione sinergica di più fattori innescanti i quali hanno interagito con diversi fattori predisponenti caratterizzanti il bacino.

Per quanto riguarda la valutazione delle opere strutturali e non strutturali presenti in alveo possiamo affermare:

- Opere strutturali: Dall'esame delle opere di sistemazione montana presenti in alveo è emerso come esse siano risultate per lo più insufficienti alla messa in sicurezza delle zone abitate, e della statale in caso di eventi di magnitudo intensa. Ciò è ancora più importante alla luce del riscaldamento globale in atto negli ultimi anni che renderà inevitabilmente sempre più frequenti ed intensi i fenomeni di debris flow sull'intero arco alpino.
- Opere non strutturali: dall'analisi effettuate è emerso come il sistema d'allerta collegato al pluviografo in località (Passo Gallinera) abbia segnalato l'allarme al superamento della soglia d'intensità critica già alle 19.55, anche se non è stato possibile verificare l'intervallo di tempo in cui l'altezza di pioggia pari a 15,8 mm si è riversata, a causa della mancata registrazione dell'inizio della precipitazione dovuto ad un guasto tecnico; con grande probabilità quest'altezza di pioggia si è riversata sul bacino in un tempo molto inferiore ai 55 minuti riportati dal pluviografo. Questa precipitazione, caratterizzata da una durata inferiore al tempo di corrivazione del bacino, può esser considerata la responsabile principale, insieme alle alte temperature registrate, dell'innescò della colata detritica che ha asportato il ponte che collega Sonico alla frazione di Rino e ha provocato danni alla strada statale ss 42 del Tonale. Dalle 20.00 alle 20.15 il pluviometro ha registrato un'intensità di pioggia estremamente elevata pari a 76 mm/h di molto superiore alle soglie d'allerta stimate, questo secondo picco non ha provocato l'innescò di colate intense in quanto gran parte del materiale erodibile necessario all'alimentazione del fenomeno era stato precedentemente asportato dalla colata generata dal primo picco di pioggia. Anche il sensore a strappo posto in alveo in prossimità della briglia selettiva ha registrato il passaggio della colata con una differenza di 12 minuti rispetto alla partenza del segnale d'allerta inviato dal pluviometro. Possiamo da questo punto di vista ritenere il comportamento delle opere non strutturali soddisfacente.

12.1 Progetti futuri per la messa in sicurezza del cono di deiezione del torrente Rabbia

In seguito all'evento del 27 luglio 2012 i geologi che si occupano della messa in sicurezza della Val Rabbia hanno proposto le seguenti opere per rendere maggiormente attendibile il sistema d'allerta :

- Posizionamento di 2 sensori per il rilevamento di flussi di colata anche nell'asta del sottobacino di Bompiano.
- Posizionamento di una stazione meteorologica in quota anche nel sottobacino di Bompiano, in modo tale da poter rilevare scrosci temporaleschi, caratterizzati da celle di dimensioni ridotte.
- Posizionamento di una serie di sensori per il rilevamento di flussi di colata nell'asta di Gallinera.

- Posizionamento di un semaforo sul nuovo ponte di Rino, collegato ai sensori presenti nelle aste torrentizie, allo scopo di impedire il transito di vetture in caso di distacco di una colata.
- Posizionamento di sirene nell'abitato di Rino in grado di segnalare il passaggio di una colata con qualche minuto di anticipo.
- Ricostruzione del ponte asportato con luce maggiore, alzando la struttura di un metro e spostando le spalle dell'opera esternamente all'alveo.

Bisogna tenere in forte considerazione che questi sistemi sono efficienti nella misurazione del fenomeno, e consentono di acquisire maggiori informazioni sulle cause innescanti e sulle dinamiche che caratterizzano gli eventi nel bacino idrografico della Val Rabbia, ma non forniscono tempi d'allerta sufficienti tra l'istante d'innescamento della colata e il suo passaggio nelle zone urbanizzate per consentire un'evacuazione con la relativa messa in sicurezza degli abitanti. Infatti è stato stimato come dall'istante in cui avviene l'innescamento al tempo in cui viene raggiunto l'abitato trascorrono al massimo 10-15 minuti. Un importante obiettivo che si intende raggiungere attraverso questi sistemi di monitoraggio è quello di acquisire una serie di dati meteorologici in grado di permettere una maggiore comprensione delle variabili che stanno alla base dei meccanismi che provocano l'innescamento di fenomeni di colata detritica nel bacino della Val Rabbia.

BIBLIOGRAFIA

- ARPA Lombardia; (2007). *Rapporto sullo stato dell'ambiente in Lombardia* .
- Bischetti, G.B., (2006). *Appunti del corso di sistemazioni idraulico forestali*,
- Bischetti, G.B., (2010). *Sistemazioni idraulico forestali: indirizzi per gli interventi*.
- Bischetti, G.B. e Vincenzo D'Agostino (2010). *Quaderni della ricerca n°116*
- Club Alpino Italiano;(1893) *Conoidi e bradisismi in Vallecamonica*.
- COGEO. *Revisione degli ambiti soggetti a pericolosità per fenomeni di tracimazione su conoide (comune di Sonico)*.
- COZZAGLIO, A., (1895). *Paesaggi di Val Camonica, impressioni e studi*.
- IFFI,(2012). *Dei dissesti in regione Lombardia sito internet: <http://www.isprambiente.gov.it>*
- Ferro, V.,(2002). *La sistemazione dei bacini idrografici*, McGraw-hill .
- Ferro, V., Dalla Fontana, G., Pagliara, S., Puglisi, S., Scotton, P., (2004). *Opere di sistemazione idraulico- forestale a basso impatto ambientale, Mc Graw-Hill. Pag.383*.
- Geotec, (2007). *Relazione idrologica*.
- Ghirardi Giovanni, (2008). *studio del debris flow avvenuto il 31-luglio-2006 lungo la Val Rabbia nel comune di Sonico*,
- Guglielmin Mauro, *Clima e ghiacciai. L'evoluzione delle risorse glaciali in Lombardia*.
- Irer,(2007.) *Definizione delle soglie pluviometriche d'innescio di frane superficiali e colate detritiche*,
- Mario Panizza, (2007). *manuale di geomorfologia applicata*
- Mosiello Ugo, (1998). *Idrologia Tecnica*, La Goliardica Pavese
- Regione Lombardia, (2009). *Progetto definitivo sistema sperimentale di monitoraggio delle colate detritiche della Val Rabbia*
- Regione Lombardia, (2012). *sito internet: www.cartografia.regione.lombardia.it*
- Regione Lombardia. *Scheda regionale di individuazione dell'intervento VR/02/06 conoide T. Rabbia a confl. Oglio 2^ fase*.
- Salveti A. *Condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati*.
- Salveti A., (2003). *Colate detritiche torrentizie: tipologia, modellistica e opere di difesa* .
- SIBCA, *sistema informativo bacini e corsi d'acqua; www.territorio.regione.lombardia.it*

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Prof. Gian Battista Bischetti per la professionalità e la competenza, il Dott. Luca Albertelli per il tempo dedicatomi, il Dott. Gilberto Zaina per la passione con la quale mi ha mostrato i suoi lavori riguardanti i fenomeni di colata, ed il Dott. Giovanni Ghirardi per il materiale fornitomi.