Laurea magistrale in Ingegneria per l'ambiente e il territorio Rischi naturali e Protezione Civile



POLITECNICO DI TORINO

Modellazione delle dinamiche di allagamento dovute a fenomeni gravitativi che generano sbarramento in alveo.

Relatore

Daniele Ganora

Candidato Giovanna Ferraro

Anno accademico 2019-2020

Sommario

| Int | roduzione. | | 9 | | |
|-----|---|--|----|--|--|
| 1. | Inquadra | mento | 12 | | |
| 1 | .0. | Inquadramento territoriale | 12 | | |
| 1 | .1. | Inquadramento idrografico ed idrologico | 13 | | |
| 1 | .2. | Inquadramento geomorfologico e litologico | 16 | | |
| | 1.2.1. | Formazioni litoidi massicce | 16 | | |
| | 1.2.2. | Depositi | 16 | | |
| | 1.2.3. | Depositi glaciali | 16 | | |
| | 1.2.4. | Depositi alluvionali | 17 | | |
| | 1.2.5. | Trasporto solido | 17 | | |
| 1 | .3. | Excursus eventi storici | 18 | | |
| 2. | Software | GeoHECRAS 2D ⁶ | 21 | | |
| 2 | 2.0. | Equazioni di De Saint Venant | 22 | | |
| 2 | 2.1. | Metodo diffusivo | 23 | | |
| 2 | 2.2. | Algoritmo implicito di soluzione di volume finito | 23 | | |
| 2 | 2.3. | Assunzioni implicite del software | 24 | | |
| 3. | Costruzio | one del modello | 25 | | |
| 3 | 3.0. | Tratto di Aosta oggetto di modellazione | 25 | | |
| 3 | 3.1. | Dati disponibili | 26 | | |
| | Modello digitale del terreno | | | | |
| | Sezioni trasversali con indicazione di livello lungo il corso d'acqua ed in corrispondenza di opere | | | | |
| 3 | 3.2. | Misurazioni batimetriche sezioni tratto di interesse | 27 | | |
| | Sezione 9 | 96 | 28 | | |
| | Sezione : | 58 | 29 | | |
| 3 | 3.3. | Correzione Modello Digitale del Terreno | 30 | | |
| 3 | 3.4. | Definizione Flow area | 30 | | |
| | Scelta de | lla tipologia Mesh | 30 | | |
| | Breaklines | | | | |
| | Censime | nto ed inserimento opere e manufatti | 32 | | |
| 3 | 3.5. | Taratura del modello | 43 | | |
| | Evento a | lluvionale ottobre 2000 ⁸ | 43 | | |
| | Condizio | ni al contorno esterne: monte e valle | 46 | | |
| | Condizio | ni al contorno interne: contributo affluenti | 48 | | |

| | Affluente | Buthier | 50 |
|----|---|---|------|
| | Affluente | Marmore | 50 |
| | Affluente | Evancon | 51 |
| | Affluente | Ayasse | 51 |
| | Affluente | Lys | 52 |
| | Contribut | o bacini residui | 52 |
| | Classi di o | copertura del suolo | 53 |
| | Definizio | ne delle scabrezze di primo tentativo e taratura del modello | 53 |
| | Inserimen | to il Geo HECRAS | 57 |
| 3 | 3.6. | Lancio simulazione | 58 |
| 3 | 3.7. | Risultati simulazioni | 59 |
| | Simulazio | one 1 | . 59 |
| | Simulazio | one 2 | 66 |
| 4. | Interazior | e fenomeni idrologici e idrogeologici | 67 |
| 2 | 4.0. | Quadro dei dissesti | 68 |
| 2 | 4.1. | Interazione sistema fluviale e dei dissesti in Valle d'Aosta | 71 |
| 2 | 4.2. Settori omogenei in funzione dei processi di instabilità prevalenti e conseguer alveo¹⁶ 73 | | |
| Z | 4.3. | Focus del tratto di interesse | 75 |
| | Condizion | ni al contorno tratto di interesse | 76 |
| 2 | 1.4. | Caratterizzazione dei dissesti | 77 |
| Z | 4.5. | Movimenti di massa | 79 |
| | Frane per | scivolamento o scorrimento | 79 |
| | Frane per | crollo/ ribaltamento | 80 |
| | Colament | i (Flow) | 80 |
| Z | 4.6. | Come tenerne conto in fase di modellazione | 81 |
| | Frane che | possono creare interferenza al corso d'acqua | 81 |
| | Quantific | azione dei volumi interessati dai fenomeni | 84 |
| 5. | Modellaz | ione frane in alveo | 88 |
| 4 | 5.0. | Definizione parametri ed inserimento nel modello [²⁶] [²⁷][²⁸] | 93 |
| | Altezza d | iga frana | 94 |
| | Geometri | a della breccia e tempo | 95 |
| | Tempo di | formazione della breccia T _f | 97 |
| 6. | Presentaz | ione caso studio e discussione risultati | 98 |
| 6 | 5.0. | Caso studio | 99 |

| (| 6.1. Risultati | 102 | | | |
|----|---|-----|--|--|--|
| | 13 ottobre ore 02:00 | 105 | | | |
| | 13 ottobre alle ore 03:00 | 108 | | | |
| | 13 ottobre ore 18:00 | 111 | | | |
| | 13 ottobre alle 22:00 | 114 | | | |
| | 14 ottobre ore 12:00 | 117 | | | |
| | 15 ottobre ore 08:00 | 118 | | | |
| | Idrogrammi | 123 | | | |
| 7. | Confronto mediante curve ROC e sintetizzazione | 125 | | | |
| | Porzione di area allagata aggiuntiva | 129 | | | |
| 8. | Valutazione parametri area allagata dovuta all'amplificazione | 134 | | | |
| : | 8.0. Valutazione complessiva | 140 | | | |
| 9. | Conclusioni | 143 | | | |
| Ci | tazioni e bibliografia145 | | | | |

ABSTRACT

Esiste una forte correlazione tra le dinamiche di squilibrio in alveo e quelle di instabilità dei versanti: portate elevate in alveo producono forti fenomeni erosivi al piede del versante, che possono provocare instabilità. Inoltre, entrambi i fenomeni possono essere innescati dagli stessi fattori scatenanti, quali precipitazioni o processi di fusione nivale. Il bacino, come qualunque altro sistema, risente di eventuali avvenimenti che ne alterano l'equilibrio, provocando conseguenze di cui si risente sia a monte che a valle dell'interferenza. Le interferenze possono essere molteplici, quella analizzata nel seguente lavoro è data dalla presenza della frana nel corso d'acqua.

Lo scopo del lavoro è quello di determinare quanto un evento di dissesto con zona di deposito in alveo possa interferire ed amplificare un evento di piena.

Il corso d'acqua oggetto di studio è la Dora Baltea valdostana, in particolare il tratto compreso tra Aymavilles e Point San Martin. Quantificare gli effetti dovuti ad interferenze o amplificazioni richiede un confronto delle condizioni di allagamento senza e con l'interferenza, motivo per cui è stato necessario implementare un modello idraulico mediante il software **GeoHECRAS 2D** (**Geo**spatial data for use with the **H**ydrologic Engineering Center's **R**iver Analysus System). L'evento alluvionale di riferimento utilizzato è quello che, nei giorni compresi tra il 13-16 ottobre del 2000, ha violentemente colpito la Valle d'Aosta. Servendosi dei dati presenti all'interno del Rapporto di Evento è stato possibile conoscere l'idrologia dell'evento, mentre per la definizione delle scabrezze è stata necessaria una calibrazione. Con la calibrazione e l'ottimizzazione del modello si conclude la prima parte del lavoro.

Nella seconda parte del lavoro è stata elaborata un'analisi volta a quantificare l'interferenza data dalla presenza di un evento gravitativo nel canale durante un fenomeno alluvionale.

Le tipologie di fenomeni gravitativi individuati in tale tratto sono crolli, scorrimenti e colate. Per valutare l'amplificazione data dalla presenza di tale fenomeno è stato necessario cercare delle relazioni che legassero le informazioni reperibili dalle schede descrittive con l'entità dei volumi coinvolti. Tale operazione è stata possibile utilizzando formule empiriche e osservazioni degli eventi passati. Esistono diverse problematiche legate alla modellistica della frana nel fiume: un fenomeno gravitativo è caratterizzato da materiale eterogeneo, anisotropo, poco compattato e con geometria dello sbarramento irregolare. Approssimare l'interferenza ad una diga frana è l'operazione che consente di simulare la condizione nel nodo più reale. In seguito, il processo di sbarramento e successivo collasso è stato simulato utilizzando i modelli di Dam Break forniti dal software.

Per la definizione dei parametri della diga e dell'apertura a cui è soggetta, sono stati utilizzati modelli basati su regressioni multi-parametriche.

L'ultima parte del lavoro consiste nel confronto tra le aree allagate e i parametri idraulici corrispondenti con e senza la presenza dell'interferenza. In primis è stato effettuato un confronto qualitativo e successivamente si è cercato di quantificare la variazione creata dall'interferenza mediante la definizione di grafici e soglie in grado di rappresentare e sintetizzare questa informazione il più possibile.

ABSTRACT IN INGLESE

There is a strong correlation between the dynamics of imbalance in the riverbed and those of instability in slopes: high flow rates in the riverbed produce strong erosive phenomena at the foot of the slope, which can cause instability. Moreover, both phenomena can be triggered by the same trigger factors, such as rainfall or snowmelt process. The drainage basin, just as in any other system, is affected by potential events that could alter its balance, causing consequences that affect both upstream and downstream of the interference. The interferences may be multiple: in this work the interference is given by the presence of the landslide in the stream.

The aim of this thesis work is to determine how much an instability event with a deposit area in the riverbed can interfere and amplify a flood event.

The object of this study is the Dora Baltea River, situated in the Aosta Valley, particularly the stretch between Aymavilles and Point San Martin. To quantify the effects due to interference or amplification, it is necessary a comparison of the flooding conditions with and without the interference. Therefore, it was crucial to implement a two-dimensional hydraulic model using **GeoHECRAS** (Geospatial data for use with the Hydrologic Engineering Center's River Analysus System).

The reference flood event considered is the one by which Aosta Valley was violently affected in the days between 13th-16th of October in 2000. The data service present in the Event Report made it possible to know the hydrology of the event, while for the definition of the roughness it was necessary a calibration. The calibration and the optimization of the model are the final points of the first part of this work.

In the second part of this work, it has been analysed the interdependence and the interference given by the presence of a gravitational event in the canal during a flood phenomenon.

The gravitational phenomena identified in this section are topples, slides and flows. To evaluate the amplification given by the presence of this phenomenon, it was necessary to find several relations that would link the information available from the descriptive sheets with the size of the volumes involved. This operation was made possible by using empirical formulas deriving from previous studies and observations of past events. There are several issues related to the modelling of the landslide in the river: a gravitative phenomenon is characterized by heterogeneous, anisotropic, not very compact material, which has also an irregular barrage geometry. To approximate the barrier to a landslide dam is the operation that allows us to simulate the real condition. After the approximation, the barrage and subsequent collapse process was simulated by using the Dam Break models provided

by the software. Models based on multi-parametric regressions were used for the definition of the dam parameters and for the data concerning the breach to which the dam is subject.

The last part of the work consists in the comparison between the flooded areas and the hydraulic parameters connected with and without the presence of the interference. First of all, a qualitative comparison has been set up, and later we tried to quantify the variation of the interference by using charts and thresholds able to represent and synthesize this information as much as possible.

Introduzione

Esiste una forte correlazione tra le dinamiche di squilibrio in alveo e quelle di instabilità dei versanti, perché portate elevate in alveo producono forti fenomeni erosivi al piede del versante che possono provocare instabilità e perché entrambi i fenomeni possono innescati da gli stessi fattori scatenanti, quali precipitazioni o processi di fusione nivale.

Come un qualunque altro sistema, anche un bacino risente di eventuali avvenimenti che vanno ad alterarne l'equilibrio e questo provoca delle conseguenze di cui si risente sia monte che a valle dell'interferenza. L'interferenza può essere causata da molteplici fenomeni, nel seguente lavoro sono stati analizzati gli effetti dovuti alla presenza di una frana con zona di accumulo nel corso d'acqua. Lo scopo della tesi è infatti quello di determinare quanto un evento di questo tipo possa interferire ed amplificare un evento di piena.

La tesi si divide in due parti: la prima parte, che comprende i capitoli da uno a tre e la seconda che include i restanti, ovvero da quattro a otto.

Lo scopo della prima parte del lavoro è stato quello di implementare un modello idraulico bidimensionale del tratto di Dora Baltea valdostano, in particolare da Aymavilles al confine regionale, utilizzando il software GeoHECRAS.

Il primo capitolo è prettamente introduttivo, viene esposto l'inquadramento territoriale, orografico, idrologico, litologico e geologico e viene presentato un excursus di eventi storici che negli anni hanno colpito la zona oggetto di studio. Tra gli eventi storici riportati viene posta particolare attenzione ai fenomeni durante i quali cinematismi gravitativi hanno amplificato o interferito con l'evento alluvionale.

Nel secondo capitolo viene fatta una presentazione del software utilizzato per la costruzione del modello, vengono esposte le equazioni utilizzate e le approssimazioni fatte in caso di modellazione.

All'interno del terzo capitolo vengono esposte le assunzioni e le metodologie utilizzate per l'implementazione del modello idraulico bidimensionale. Vi è una prima parte nella quale vengono censite le opere presenti e vengono descritti i tool che permettono la modellazione di tali strutture. Tale fase ha permesso di mettere in luce i punti di forza e di debolezza del software utilizzato per la costruzione del modello. Segue poi la descrizione dell'"Evento zero" di riferimento utilizzato per la calibrazione e la taratura che, nel caso in esame è l'evento alluvionale che dal 13 al 16 ottobre 2000 ha colpito la Valle d'Aosta. Servendosi dei dati presenti all'interno del Rapporto di Evento è stato possibile conoscere l'idrologia dell'evento. Per la definizione delle scabrezze è stata necessaria invece una calibrazione al fine di far coincidere il più possibile l'estensione le aree allagate e i valori dei tiranti idraulici ottenuti con quelli relative all'evento di riferimento.

Con l'implementazione e successiva taratura e ottimizzazione del modello termina la prima parte del parte del seguente lavoro.

Nella seconda parte del lavoro è stata fatta un'analisi volta a definire il diverso impatto di un evento alluvionale se si verifica un'interferenza dovuta alla presenza di un evento gravitativo con zona di accumulo nel canale. In tal caso è stato ritenuto opportuno concentrarsi su un tratto di Dora Baltea caratterizzato da minore estensione ma comunque sufficientemente rappresentativo. Il tratto di bacino scelto è caratterizzato dalla presenza di un affluente, ovvero il torrente Marmore ed attraversa sei comuni: Chambave, Saint Denis, Pontey, Chatillon, Saint Vincent e Montjovet. Il tratto è stato ritenuto sufficientemente rappresentativo per svariate motivazioni, alcune delle quali vengono riportate:

- In questa porzione di asta fluviale la calibrazione ha fornito risultati ottimali;
- È presente un affluente;
- È presente almeno un fenomeno per ognuna delle tipologie di dissesto oggetto di approfondimento;
- I fenomeni di dissesto individuati, in caso di instabilità, interferiscono con il corso d'acqua.

All'interno del quarto capitolo vengono infatti esposte alcune delle problematiche, quali ostruzione parziale o totale, dovute alla presenza di masse derivanti da eventi gravitativi che si depositano all'interno corso d'acqua. Segue una descrizione della tipologia di fenomeni gravitativi individuati in tale tratto, ovvero crolli, scorrimenti e colate e dei cinematismi che li caratterizzano. Vengono anche esposte le metodologie utilizzate per la quantificazione dei volumi che potenzialmente potrebbero sbarrare l'alveo.

Nel quinto capitolo viene affrontata la problematica relativa alla modellazione della frana in alveo. Approssimare un fenomeno gravitativo caratterizzato da materiale eterogeneo, anisotropo, poco compattato e con geometria dello sbarramento irregolare ad una struttura fittizia che il software è in grado di considerare in fase di modellazione è stato tutt'altro che semplice. Tale fenomeno è stato approssimato ad una diga frana caratterizzata da una geometria della breccia calcolata mediante regressioni multiple che tengono conto delle molteplici differenze tra una diga in calcestruzzo o in terra e una diga costituita da materiale di frana.

Fatta questa approssimazione il processo di sbarramento e successiva creazione della breccia è stato simulato utilizzando i modelli di Dam Break forniti dal software. In particolare, è stata simulata la creazione di una breccia all'interno del volume che si genera per effetto di un fenomeno noto come overtopping. Il software simula la formazione della breccia in modo istantaneo, tale breccia non rimane invariata nel tempo ma subisce un'amplificazione, la legge di amplificazione è stata definita in fase di modellazione del fenomeno.

Nel sento capitolo viene presentato il caso studio più emblematico e vengono discussi i risultati ottenuti sia in termini di esenzione dell'area allagata che in termini di variazione dei parametri idraulici. La metodologia utilizzata per eseguire tale confronto ha previsto l'analisi dei punti significativi del canale mediante l'estrazione di sezioni dal software.

Stabilito che la configurazione di piena standard rappresenta il golden test, nel settimo capitolo è stato valutato il potere predittivo di quest'ultimo utilizzando la metodologia delle curve ROC.

Nell'ottavo capitolo viene proposta una metodologia grafica che permette di valutale in modo semplice e veloce il valore medio di velocità, tiranti e tempo di permanenza dell'allagamento nella porzione di area allagata aggiuntiva che si crea per effetto della presenza della frana in alveo.

Il lavoro termina con delle considerazioni circa la variazione delle dinamiche di allagamento dovute a fenomeni gravitativi che generano sbarramento. Vengono esposti vantaggi e limiti legati alla modellazione del fenomeno utilizzando le metodologie di cui sopra e ci si chiede quanto analizzare un fenomeno di questo tipo possa mettere in luce la presenza di aree che altrimenti sarebbero caratterizzate da vulnerabilità pari a zero.

1. Inquadramento

1.0. Inquadramento territoriale

Il seguente lavoro di tesi verte sullo studio del tratto della Dora Baltea che attraversa la Valle d'Aosta. Tale regione confina con Svizzera, Francia e Piemonte ed è caratterizzata dalla presenza di importanti catene montuose delle Alpi Occidentali quali Monte Bianco, Cervino, Monte Rosa, Gran Paradiso, Grivola e Rutor. Proprio per questo il 5% dell'intero territorio (237km²) è caratterizzato dalla presenza di ghiacciai, tutti collocati prossimità di tali rilievi.

La Valle d'Aosta conta 74 comuni, 37 dei quali sono attraversati dalla Dora Baltea. L'intera area è caratterizzata da valli molto incise, alcune delle quai antropizzate, la maggior parte delle zone antropizzate si colloca comunque nel fondovalle.

Nel tratto tra la confluenza della Grand Eyva e e Pont-Saint-Marten sono presenti i principali servizi di collegamento, quali Atostrada SA5, S.S 26 e viabilità locale.



Figura 1 Valle d'Aosta

L'intera regione può essere divisa in tre grandi macro-zone, tutte interessate dalla presenza della Dora Baltea: alta, media e bassa valle.

L'alta valle si estende da Courmayeur a Villeneuve ed è caratterizzata da una limitata ampiezza dell'incisione valliva, segue la media valle che si estende da Villeneuve a Montjovet e infine si trova la bassa valle che prosegue fino a Pont-Saint-Martin.¹

La prima parte del lavoro di tesi riguarda media e bassa valle, ovvero il tratto compreso tra Aymavilles e Pont-Saint-Martin, all'interno del quale ricadono 29 comuni: Aosta, Arnand, Aymavilles, Bras, Brissogne, Chambave, Champdepraz, Charvensod, Chatillon, Donnas, Fenis, Gressan, Hone, Issogne, Jovencan, Monjovet, Nus, Pollein, Pontey, Pont Saint Martin, Quart, Saint Cristophe, Saint Denis, Saint Marcel, Saint Pierre, Saint Vincent, Sarre, Verrayes e Verres.

Nella seconda parte del lavoro di tesi ci si è focalizzati sul tratto di bacino ricadente nella media valle che attraversa i comuni di Chambave, Saint Denis, Pontey, Chatillon, Saint Vincent e Montjovet.

1.1.Inquadramento idrografico ed idrologico

Il bacino della Dora Baltea nasce dai ghiacciai del Monte Bianco, in particolare nel comune di Entrèves dalla confluenza tra i rami Dora di Veny e Dora di Ferret. Si colloca nell'Italia nordoccidentale e il 90% del suo bacino ricade in ambito montano. È caratterizzato da una lunghezza di 152km e da una superficie di circa 3930 Km², l'estensione del sottobacino valdostano da solo è pari a 802km².

La Dora Baltea attraversa tutta la Valle d'Aosta e parte del Piemonte fino alla confluenza nel Po presso Crescentino (VC), del quale da sola rappresenta il 6% della superficie del bacino essendo uno dei suoi più rilevanti tributari. In termini di portata la Dora Baltea con un valore di portata media annua pari a 95.9m³/s.



Figura 2 Bacino della Dora Baltea: ambito fisiografico.²

Come si osserva in *Figura 2* il bacino della Dora Baltea è caratterizzato da dieci sottobacini secondari, la cui superficie viene di seguito riportata:

| Sottobacino Montano | Superficie (Km ²) |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| Evancon-Marmore | 454 |
| Lys | 284 |
| Dora di Vemey e Dora di | 301 |
| Valgrisenche | |
| Dora di Rhemes, Savara, Grand | 534 |
| Eyvia | |
| Dora Baltea, Tratto Valdostano | 802 |
| Dora Baltea, Tratto Piemontese | 111 |
| Buthier- Artanavaz | 454 |
| Chiusella | 155 |
| Saint Marcel, Clavalite, Chalamy, | 241 |
| Ayasse | |
| Dora di Ferret e Dora di Veny | 191 |
| Totale bacino montano | 3525 |
| Totale bacino alla confluenza in Po | 3930 |

Tabella 1 Classificazione dei sottobacini secondari²

Il sottobacino oggetto di studio è quello della Dora Baltea valdostana a partire dal comune di Aymavilles, in questo tratto il fiume si evolve in direzione ovest-est fino a Saint Vincent, da questo punto prosegue in direzione sud-est.

Alla Dora Baltea giunge un rilevante quantità di apporto idrico dovuto agli scarichi della Valle d'Aosta ma il contributo più cospicuo è sicuramente quello dato dai numerosi affluenti che giungono sia dal versante destro che sinistro: i tributari provenienti dalle valli della destra orografica del fiume sono Dora di Veny, Dora di Verney, Dora di Velgrisenche, Dora di Rhemes, Savara, Grand Eyvia, Saint Marcel, Clavatè, Chalamay, Aysse; invece quelli provenienti dalla sinistra orografica sono Dora di Ferret, Vertosan, Buthier, Marmore, Evacon, Lys. [*Figura 3*]

Gli affluenti del versante destro discendono dal massiccio del Gran Paradiso, quelli del versante sinistro da Monte Cervino e Monte Rosa.



Figura 3 Affluenti che giungono sull'asta principale

Il fatto che la maggior parte dei tributari abbia origine da rilievi in cui sono presenti neve e ghiacciai, rende l'analisi dei parametri neve e ghiaccio fondamentali per la caratterizzazione del regime di flusso. Vengono infatti individuati due tipi di regime: glaciale e nivo-glaciale.

Il regime di flusso glaciale è presente nelle zone a quota più elevata, in tali zone il processo di fusione nivale fa sì che la Dora sia caratterizzata da portate abbastanza elevate soprattutto nei periodi estivi. Quello nivo-glaciale è proprio delle aree collocate a quote più basse. Il periodo maggiormente critico ricade in un lasso temporale compreso tra fine primavera e inizio autunno, ovvero quando le precipitazioni non sono solide e quando si verificano fenomeni di fusione nivale.

In tale conteso, infatti, gli eventi di piena sono dovuti ad un insieme di fattori negativi quali elevata intensità delle precipitazioni, rialzi termici anomali e fusione nivale.

Le precipitazioni risultano essere contenute, poiché il bacino della Dora Baltea è riparato dall'aria umida proveniente dall'Adriatico dalla presenza delle catene montuose. I bacini secondari sono invece interessati da precipitazioni di elevata intensità ma piccola estensione e ciò provoca sovente, in tali tratti, delle piene. Tale differenza porta ad un sostanziale sfasamento tra i valori lungo l'asta principale e i tributari in termini di picchi di portate durante l'evento alluvionale.

Questo fattore, unito al fatto che il tratto in pianura della Dora concorre alla laminazione, fa sì che ad eventi straordinari ad Aosta equivalgano fenomeni normali ad Ivrea e che ad avvenimenti non eclatanti ad Aosta corrispondano conseguenze significative ad Ivrea.²

1.2.Inquadramento geomorfologico e litologico

I litotipi dominanti nell'area oggetto di studio sono litoidi metamorfici fratturati, litoidi massicci, formazioni sedimentarie fratturate, depositi glaciali, depositi alluvionale e lacustri.² Vengono descritti principalmente i litotipi caratterizzati da grande erodibilità e predisposizione ad instabilità, questo perché in seguito ci si soffermerà sulla sinergia di fenomeni di dissesto e alluvionali e si cercherà di capire quanto il primo aspetto possa amplificare ed influenzare il secondo.

1.2.1. Formazioni litoidi massicce

Tali formazioni si distinguono in litoidi ignei massivi e litoidi metamorfici massivi. I litoidi ignei massivi si collocano: nella parte frontale del bacino del complesso di montagne del Monte Bianco, nel bacino del torrente Buthier e nella media Val di Cogne. I litoidi metamorfici massivi si trovano invece in Valpelline e nella vallata di Gressoney. In questo caso, le rocce cristalline sono alle volte interessate da crolli anche di grandi dimensioni.²

1.2.2. Depositi

I depositi che principalmente costituiscono il settore di interesse, ovvero quello montano della Dora Baltea, sono di origine quaternaria. Si fa riferimento in particolare all'ultimo episodio glaciale del Pleistocene superiore. È possibile distinguere depositi glaciali e depositi alluvionali e lacustri.² Meritano un approfondimento quelli glaciali e alluvionali in quanto sono quelli che maggiormente caratterizzano i sottobacini secondari.

1.2.3. Depositi glaciali

La genesi dei depositi glaciali è dovuta ad episodi di espansione glaciale avvenuti durante l'ultimo periodo del quaternario. A questo fenomeno è imputabile l'avanzamento del fronte della Dora Baltea, che si spinge fin oltre la Valle d'Aosta. Tali deposi poggiano inoltre su versanti che, a causa del modellamento glaciale, sono caratterizzati da bruschi cambi di pendenza. La presenza dei depositi glaciali interessa anche il fondovalle, in tal caso però essi si trovano al di sotto di depositi alluvionali più attuali. Si tratta di una struttura a calanchi con strato a matrice sabbiosa fine e ciottoli prevalentemente di calcescisti e di marmi grigio-azzurri su cui sono posate ghiaie sabbiose inclinate e a più livelli³. A questo tipo di deposito vengono associate frane di scivolamento, quest'ultimo avviene poiché l'acqua a contatto con la parte limosa presenta caratteristiche geotecniche inferiori.²

1.2.4. Depositi alluvionali

Tali depositi si collocano proprio in prossimità dell'alveo della Dora Baltea, dei suoi tributari le nelle aree in cui sono presenti conoidi.

La composizione dei depositi alluvionali della Dora Baltea è caratterizzata dalla presenza di ghiaie sabbiose a blocchi a più livelli con tessitura a supporto dei clasti, i quali sono invece caratterizzati da una litologia eterogenea che rispecchia quella del bacino.³

Molto diffusi sono anche ciottoli e blocchi di graniti che giungono dal Monte Bianco. Anche i depositi alluvionali presenti lungo gli affluenti sono formati da ghiaie sabbiose che sono con una disposizione degli strati ben definita in loco e meno definita in corrispondenza del conoide.²

1.2.5. Trasporto solido

Il trasporto solido non è stato considerato durante l'implementazione del modello nonostante tale fenomeno interessi l'asta principale. La scelta di modellare con alveo a fondo fisso è stata dettata dal fatto che è stato ampliamente dimostrato che il software non riesce a fornire, nel caso in cui tale aspetto venga considerato, risultati attendibili.

La capacità di trasporto solido totale risulta essere pari a 119.4 $*10^3$ m³/anno, di cui 109.8 $*10^3$ m³/anno rappresentano il trasporto solido di fondo, mentre il 9.6 $*10^3$ m³/anno quello in sospensione.²

1.3. Excursus eventi storici

La Dora Baltea è stata storicamente soggetta ad eventi alluvionali, le prime informazioni a riguardo risalgono infatti all'Ottocento, tra le più recenti e disastrose si annoverano quella del dell'ottobre 2000 e del settembre 1993, altri meno recenti ma altrettanto critici furono quelli del 1957, 1948 e 1920. Tali eventi alluvionali sono stati in molti casi caratterizzati dalla concomitanza di altri fenomeni che hanno influenzato in maniera diretta il deflusso delle acque e amplificato le conseguenze dell'alluvione stessa.

Segue una breve descrizione degli eventi più significativi che hanno interessato l'area oggetto di studio [⁴], [⁵], [Rapporti di evento]:

- Nell'autunno del 1640 un'orme inondazione ha provocato l'inondazione di tutta la valle di Lys. Nella zone di Saint Pierre si staccano numerose frane e molto di questo materiale venne trasportato verso valle distruggendo abitazioni a Vergnond e Charrère provocando la morte di numerose persone.
- Nei giorni 16-17 maggio 1846 violente piogge hanno fatto sì che si verificasse un notevole evento alluvionale, durante il quale sono state travolte la valle e Champorcher, la Valtournenche e i comuni di Courmayeur, Pré-Saint-Didier, Morgex, Cogne, Aymavilles, Issogne, Champdepraz e Verres. Durante l'evoluzione dell'evento si sono inoltre innescate frane, colate detritiche e fenomeni di erosione spondale. Il bilancio delle vittime è stato di 30 persone.
- Il 13 ottobre 1910 si è verificato un evento alluvionale che ha coinvolto principalmente i comuni di Donnaz, Hône e Bard. In una frazione di quest'ultimo comune, San Giovanni di Bard, un fenomeno di dissesto ha provocato uno sbarramento in alveo della Dora Baltea, tale sbarramento ha provocato una deviazione del flusso del fiume sulla sponda sinistra provocando danni alla strada provinciale per circa 300m e alla linea ferroviaria per circa 200m.
- Il 1920 è stato un anno particolarmente caratterizzato da eventi alluvionali e di dissesto che hanno coinvolto molti dei comuni della Valle d'Aosta. in particolare si ricordano gli eventi avvenuti tra il 22-24 settembre quando piogge considerevoli hanno provocato una piena della

Dora Baltea e di alcuni dei suoi tributari. Gli allagamenti e i dissesti hanno provocato inagibilità in molti comuni e momentanei sbarramenti in alveo.

- Il 4 settembre del 1948 un importante evento alluvionale ha colpito la valle di Lys, si sono verificati allagamenti a Gressoney e molti eventi franosi ad Issime. Una persona ha perso la vita.
- L'otto giugno 1952 un crollo in roccia e detrito verificatosi a Bionaz provoca una sbarramento del torrente Buthier, tale sbarramento ha portato alla creazione di un lago temporaneo di più di 300.000 m³. Nei giorni successivi nello sbarramento si è creata un'apertura e si è propagata verso valle un'onda che ha travolto due abitazioni a Poullaye.
- Nei giorni compresi tra il 12 e il 15 giugno del 1957 si è verificata un'alluvione dagli effetti rilevanti. Tale alluvione ha avuto esito tanto devastante poiché non è stata solo dovuta ad eventi meteorici intesi ma ha subito amplificazioni dovute a fenomeni di fusione nivale, frane ed erosioni di sponda nelle valli laterali. Sono stati convolti comuni sia in Piemonte che in Valle d'Aosta, come le valli di Gressoney, Rhemes-Notre-Dame, Rhemes-Saint-Georges, Valsavaranche, comuni di Pont-Saint-Martin, Villeneuve, Champoluc, Gressan e Montjovet.
- Nell'agosto 1972, in seguito a precipitazioni brevi ed intense, le aree della valle di Ollomont, Valle di Rhemes e Valnontey sono state interessate da un evento alluvionale e da fenomeni di frana che hanno provocato sbarramenti in alveo.
- Nell'ottobre del 1977 l'evento alluvionale ha provocato nella media e bassa della Dora Baltea e in alcune delle valli tributarie numerosi e sparsi fenomeni di dissesto idrogeologico.
- L'evento alluvionale del 23-24 settembre del 1993 ha provocato numerosi danni sia in Valle d'Aosta che in Piemonte. In valle d'Aosta i danni hanno riguardato Val di Cogne (torrente Grand Eyvia), Valsavarenche, alta Valle del Lys, valle di Bionaz (torrente Buthier), valle di Champorcher (torrente Ayasse) e il tratto da Monjovet a Point Saint Martin, in Piemonte la statuizione è stata particolarmente critica nel tratto tra Ivrea e Crema. Si sono verificati fenomeni di trasporto solido, erosione spondale e frane che hanno provocato danni a infrastrutture viarie, ponti e acquedotti.
- L'alluvione della Dora Baltea del 13-16 ottobre del 2000 ha causato 17 vittime ed ha avuto devastanti soprattutto nel tratto da Monjovet a Port Saint Martin. Le portate stimate sono state associate ad un tempo di ritorno duecentennale, si sono verificate colate detritiche, fenomeni

trasporto solido, erosione spondale e fenomeni di sbarramento in alveo (la frana di Champlong ha provocato lo sbarramento del torrente Buthier).

[Per una descrizione più accurata dell'evento si rimanda al paragrafo Evento Alluvionale 2000, Capitolo 3 "Costruzione del modello"]

Dalla sintetica descrizione degli eventi di cui sopra emerge chiaramente quanto l'esito dell'evento all'alluvionale sia strettamente influenzato dalla presenta di eventuali fenomeni di dissesto. Tale aspetto viene affrontato in modo approfondito nella seconda parte del seguente lavoro di tesi, la prima parte ha previsto invece l'implementazione di un modello idraulico bidimensionale dell'intero tratto compreso tra Aymavilles e Pont Saint Martin mediante l'utilizzo del software GeoHECRAS 2D.

2. Software GeoHECRAS 2D⁶

Il software utilizzato per la costruzione del modello è **GeoHECRAS 2D** (**Geo**spatial data for use with the Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), un programma a pagamento che permette non solo di modellare in 2D in condizioni di moto vario ma anche di visualizzare i risultati della modellazione in tridimensionalità.

Rispetto alle precedenti versioni free di HECRAS garantisce minori tempi di l'implementazione e maggiore stabilità del modello, nonostante ciò presenta delle problematiche che sono emerse in fase di elaborazione che verranno messe in luce nel capitolo relativo alla costruzione del modello.

Uno dei vantaggi del suddetto programma consiste nel format con cui si presenta l'interfaccia grafica, che permette un confronto diretto con quella di altri software quali AutoCAD e ESRI ArcGIS. L'interfaccia è inoltre di tipo Multiple Document Interface (MDI), consente cioè di poter opere anche sull'implementazione di più modelli nello stesso momento.

Ci si può avvalere dell'utilizzo di GeoHECRAS 2D in svariate circostanze, quali implementazione del modello di canali in2D, concomitanza di flusso monodimensionale nel canale e bidimensionale nelle golene, studi di fenomeni di cedimento dighe, etc. Al termine della simulazione il software fornisce delle vere e proprie mappe animate, nelle quali è possibile osservare l'evoluzione del fenomeno nel tempo in termini di estensione delle aree allagate, valori di portate, velocità e tiranti.

La cella di calcolo è caratterizzata da una base che non è statica ma che segue le reali quote del terreno, questo è uno dei vantaggi della modellazione mediante GeoHECRAS2D, che permette di ottenere output forniti sulla base dei dati morfologici del Modello Digitale del Terreno (questi modelli vengono definiti Modelli subgrid).

Per la modellazione il software consente di poter scegliere tra due sistemi di equazioni 2D: le equazioni di De Saint Venant e il modello diffusivo. Per selezionare una delle due opzioni bisogna seguire le seguire operazioni: *Analysis->Unsteady Flow Computational Option->2D Flow Option-> Computational Equation-> si effettua la scelta tra Diffusion Wave o Full Momentum*. All'interno del manuale vengono illustrate le situazioni in cui è preferibile utilizzare delle equazioni piuttosto di altre.

2.0.Equazioni di De Saint Venant

L'impiego di queste equazioni permette di tenere conto di svariati fattori, quali le turbolenze e Coriolis, inoltre tale metodo è più preciso. Di contro, tale metodo rende il modello molto meno stabile e sono richiesti tempi di calcolo molto più estesi.

Le equazioni di De Saint Venant si ricavano imponendo lungo x e lungo y le equazioni di continuità e di conservazione della massa. Sono proprio le suddette equazioni quelle che vengono risolte dai modelli completi.

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (h\overline{u})}{\partial x} + \frac{\partial (h\overline{v})}{\partial y} + q = \mathbf{0} \ [1.0]$$

In cui:

- h altezza acqua;
- t tempo;
- *u,v* rappresentano le componenti lungo x e y della velocità;
- q differenza portate localizzate in ingresso e in uscita

Equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad [1.1]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad [1.2]$$

In cui:

- *u v* rappresentano le componenti lungo x e y della velocità;
- g è accelerazione di gravità;
- v_t è il coefficiente di viscosità turbolenta;
- c_f è il coefficiente di attrito del fondo adimensionale;
- *f* è il parametro di Coriolis.

È consigliabile utilizzare tale approccio in caso in cui si vogliano conoscere i paramenti idraulici localmente e in modo estremamente preciso, nel caso di cambiamenti improvvisi di alte velocità o condizioni di flusso misto.

2.1.Metodo diffusivo

Sono le equazioni utilizzate per la taratura del modello, tali equazioni garantiscono tempi di elaborazione meno lunghi e una stabilità superiore. Per queste equazioni vengono richieste delle condizioni al contorno piuttosto semplici e questo rappresenta un enorme vantaggio. Inoltre, proprio all'interno del manuale, viene suggerito l'utilizzo di tale approccio nel caso in cui si voglia stimare l'ampiezza delle aree allagate. La stima di tale estensione è stata fondamentale poiché, per la calibrazione del modello, tale perimetro è stato confrontato con quello dell'evento alluvionale di rifermento (come si vedrà in seguito quello dell'Ottobre 2000).

Le equazioni del modello diffusivo, semplificazione delle equazioni di De Saint Venant vengono di seguito riportate:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} + q = 0 \quad [1.3]$$
$$c_f u = g \frac{\partial H}{\partial x} \quad [1.4]$$
$$c_f v = g \frac{\partial H}{\partial y} \quad [1.5]$$

Qualunque sia il sistema di equazioni scelto, il software utilizza un unico sistema di elaborazione dei dati definito come *Algoritmo implicito di soluzione di volume finito*.

2.2.Algoritmo implicito di soluzione di volume finito

Tale algoritmo garantisce maggiore stabilità e significatività dei risultati. Si tratta di un sistema iterativo che permette, a partire da un valore di profondità iniziale, di ricalcolare il valore di profondità associato ad ogni cella. Ognuna delle celle considerate non ha una singola profondità o un fondo tutto alla stessa quota, ciò garantisce che ogni singola cella può essere completamente, non o parzialmente bagnata e tale condizione può mutare durante l'evento (ovvero una cella può non essere bagnata all'inizio e poi può esserlo improvvisamente).

L'intera cella viene però rappresentata da un'unica curva volume-tirante e questo, nel caso in cui ci si trova in corrispondenza di brusche variazioni, può fornire risultati poco rappresentativi. In tal caso la mesh va infittita mediante l'inserimento delle Breaklines (per la spiegazione delle quali si rimanda al Capitolo 3 *Costruzione del modello*). Il vantaggio di questo tipo di approccio consiste nel fatto che, in questo modo, il software riesce a garantire condizioni di stabilità anche in zone in cui si verificano brusche variazioni (regimi di flusso sub critico, super critico e misto).

Al fine di comprendere a pieno i risultati ottenuti utilizzando GeoHECRAS è importante esporre le assunzioni su cui è basato il software in fare di elaborazione dei dati.

2.3.Assunzioni implicite del software

Segue un elenco delle ipotesi su cui si basa il software, va precisato che alcune di queste assunzioni riguardano le celle di calcolo, ovvero l'unità del reticolo computazionale utilizzato dal software (per la spiegazione del quale si rimanda al paragrafo Scelta tipologia di mesh, Capitolo 3 "Costruzione del Modello"):

- Viene considerato poco rilevante e il moto verticale della corrente;
- Il valore di velocità viene calcolato attraverso una media dei valori che vengono riscontrati perpendicolarmente a partire dal centro della cella;
- I valori dei coefficienti di scabrezza vengono attribuiti nel punto di mezzo della cella anche se sono stati forniti lungo uno dei lati;
- Il valore di coefficiente di scabrezza può essere specifico per ogni unità della mesh ma all'interno di tale unità è costante;
- La maglia di calcolo deve contenere perlomeno una condizione al contorno;
- Si tiene conto di eventuali precipitazioni andando a definire valori aggiuntivi in modo omogeneo su tutte le celle;
- Lo step temporale con cui la simulazione procede è correlato all'estensione della cella.

Segue il capitolo di costruzione del modello all'interno del quale verranno esposti, particolarizzandoli per il tratto oggetto di studio, i diversi tools che il programma permette di utilizzare.

3. Costruzione del modello

3.0.Tratto di Aosta oggetto di modellazione

La prima parte del lavoro di tesi ha previsto la costrizione e la calibrazione di un modello nella parte di Dora Baltea valdostana nel tratto compreso da Aymavilles fino al confine regionale, ovvero Point-Saint-Martin, che è lungo 62.8 km.



Figura 4 Tratto oggetto di modellazione

Come si osserva in *Figura 4* il tratto che si estende da Aymavilles a Saint-Vincent si evolve con trend serpeggiante e sub-rettilineo caratterizzato, sia sulla destra che sulla sinistra orografica, da versanti molto acclivi. Segue poi il tratto in direzione Sud Est: da Saint-Vincent e Verres permane l'andamento serpeggiante e il fondovalle ha un'ampiezza più rivelante, da Verres in poi il fondovalle diminuisce nuovamente la sua ampiezza, fino a diventare ancora più ristretto tra i versanti rocciosi di Hone-Bard e Pont-Saint-Martin.

3.1.Dati disponibili

L'implementazione del modello presuppone la conoscenza di una serie di parametri che permettono la caratterizzazione del sistema e che, nel caso in esame, sono stati forniti dall'Autorità di Bacino.

La documentazione e i dati forniti sono:

- Modello digitale del terreno (DTM);
- Studio idraulico
 - o sezioni trasversali con indicazione dei livelli di pelo libero lungo il corso d'acqua;
 - sezioni trasversali con indicazione dei livelli di pelo libero a monte e a valle di elementi strutturali in grado di perturbare la corrente, ovvero ponti;
 - o misurazioni topografico-batimetriche relative alla quota del terreno.

Modello digitale del terreno

Le informazioni relative al DTM, scaricato dalla piattaforma in condivisione con l'Autorità di Bacino, riguardano la data, la risoluzione e il sistema di riferimento. Si tratta di un Modello Digitale del Terreno datato 2002, con una risoluzione di 5metri e fornito in sistema di riferimento ED-50 (European Datum 1950). Il Modello Digitale del Terreno è stato successivamente riproiettato in WGS-84 (World Geodedic System 1984).



Figura 5 Modello digitale del terreno, risoluzione 5m

Sezioni trasversali con indicazione di livello lungo il corso d'acqua ed in corrispondenza di opere

Tali informazioni sono state reperite in forma tabellare all'interno del Piano per la valutazione e Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), nella sezione Profili di Piena dei corsi d'acqua del reticolo principale. In tale documento vengono forniti le informazioni relative a tutte le sezioni del tratto dell'asta principale della Dora Baltea e per ogni sezione, è possibile conoscere la progressiva della sezione stessa e le quote idriche associate ai tempi di ritorno T_{20} , T_{200} e T_{500} . Le sezioni che ricadono nel tratto di interesse sono quelle che vanno dalla 118 a 51, tali sezioni sono state fornite in formato shapefile e con sistema di riferimento WGS-84 dall'Autorità di Bacino.



Figura 6 Sezioni trasversali lungo il tratto oggetto di studio

3.2. Misurazioni batimetriche sezioni tratto di interesse

L'Autorità di bacino ha inoltre fornito in formato Excel le misurazioni batimetriche delle sezioni. Questi dati sono stati fondamentali per la correzione del DTM effettuata successivamente. Oltre alle informazioni relative alla quota del terreno, nei suddetti file formato Excel sono tate fornite informazioni circa rilievo, corso d'acqua, progressiva chilometrica, coordinate sull'asse (Gauss-Boaga), coordinate sull'asse (WGS 84-UTM 32), caposaldi sezione nome, coordinate caposaldi sezione (Gauss-Boaga), coordinate caposaldi sezione (WGS 84-UTM 32), sistema di riferimento sezioni e strumentazione rilievo sezione. Seguono a titolo di esempio alcune delle sezioni comprese tra quelle oggetto di studio.

Sezione 96 Tabella 2 Informazioni relative al rilievo della sezione 96

| | | | ott. 2001 - | |
|-----------------------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| Rilievo | DB2001 | 2001 | mar. 2002 | AdBPO |
| Corso d'acqua | 001032 | Dora Baltea | | |
| Progressiva chilometrica | 62510.3157 | CTR 1:25.000 | | |
| Coord. sull'Asse (Gauss-Boaga) | 1380615.832 | 5065789.236 | | |
| Coord. sull'Asse (WGS 84-UTM 32) | 380,589.2258 | 5,065,775.2396 | | |
| Coord. Vertici Sezione (Gauss- | | | | |
| Boaga) | 1380603.4170 | 5065863.0280 | 1380623.0222 | 5065746.5028 |
| Coord. Vertici Sezione (WGS 84- | | | | |
| UTM 32) | 380577.6570 | 5065844.0010 | 380597.2619 | 5065727.4757 |
| Caposaldi Sezione Nome | 96A | 96B | 0 | 0 |
| Coord. Caposaldi Sezione (Gauss- | | | | |
| Boaga) | 1380603.4170 | 5065863.0280 | 1380619.9880 | 5065764.5370 |
| Coord. Caposaldi Sezione (WGS 84- | | | | |
| UTM 32) | 380577.6570 | 5065844.0010 | 380594.2277 | 5065745.5100 |
| Sistema Riferimento Sezioni | WGS 84 | m s.m. | | |
| Strumentazione Rilievo Sezione | GPS | STAZ. TOT. | 0 | |



Figura 7 Rappresentazione quota del terreno sezione 96

Sezione 58 Tabella 3 Informazioni relative al rilievo della sezione 58

| | | | ott. 2001 - | |
|-----------------------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| Rilievo | DB2001 | 2001 | mar. 2002 | AdBPO |
| Corso d'acqua | 001032 | Dora Baltea | | |
| Progressiva chilometrica | 96304.8667 | CTR 1:25.000 | | |
| Coord. sull'Asse (Gauss-Boaga) | 1401354.047 | 5053717.155 | | |
| Coord. sull'Asse (WGS 84-UTM 32) | 401,333.1533 | 5,053,699.9311 | | |
| Coord. Vertici Sezione (Gauss- | | | | |
| Boaga) | 1401472.6992 | 5053761.4398 | 1400808.7682 | 5053513.6412 |
| Coord. Vertici Sezione (WGS 84- | | | | |
| UTM 32) | 401446.7685 | 5053742.3351 | 400782.8363 | 5053494.5394 |
| Caposaldi Sezione Nome | 58A | 58B | 0 | 0 |
| Coord. Caposaldi Sezione (Gauss- | | | | |
| Boaga) | 1401444.0744 | 5053750.7562 | 1400994.5646 | 5053582.9861 |
| Coord. Caposaldi Sezione (WGS 84- | | | | |
| UTM 32) | 401418.1432 | 5053731.6514 | 400968.6343 | 5053563.8837 |
| Sistema Riferimento Sezioni | WGS 84 | m s.m. | | |
| Strumentazione Rilievo Sezione | GPS | STAZ. TOT. | 0 | |



Figura 8 Rappresentazione quota terreno sezione 58

3.3.Correzione Modello Digitale del Terreno

I risultati forniti dal Software, come detto in precedenza, vengono elaborati sulla base dei dati morfologici del Modello Digitale del Terreno. Il DTM delinea l'andamento della superficie del suolo senza considerare elementi antropici e vegetazione, inoltre il prossimità di corsi d'acqua il DTM fornisce l'andamento della superficie corrispondente alla superficie del pelo libero, motivo per cui al fine non trascurare la reale geometria dell'alveo inciso è stata effettuata una correzione del modello digitale del terreno. Tale correzione è stata eseguita mediante il software Geo HECRAS, il quale permette di creare un nuovo DTM in cui, all'esterno del canale il DTM rimane invariato mentre al suo interno il canale viene corretto tenendo conto della reale geometria dell'alveo inciso. Ciò è possibile poiché in corrispondenza delle sezioni le misurazioni della quota del terreno sono note (vedi paragrafo precedente) mentre nei tratti di alveo inciso che intercorrono tra una sezione e l'altra, il software interpola i valori delle sezioni antecedente e seguente al fine di restituire un andamento nell'alveo inciso che sia il più realistico possibile. Su GeoHECRAS questa operazione può essere eseguita attraverso il comando *Map Edit-> Interpolate Geometry*.

3.4.Definizione Flow area

La definizione dell'area di flusso 2D è fondamentale in quanto rappresenta il dominio all'interno del quale avviene la modellazione. Tutte le condizioni al contorno, le infrastrutture, le scabrezze, le linee di discontinuità e le eventuali interferenze al flusso vengono infatti inserite all'interno o lungo il perimetro della Flow area. Per la definizione di tale dominio in GeoHECRAS le operazioni da eseguire sono le seguenti: Input->2D Flow Areas->Draw 2D Flow Areas->si traccia il perimetro dell'area all'interno della quale si vuole costruire il modello che, nel caso in esame, si estende da Aymavilles fino al confine regionale della Valle d'Aosta. In seguito a tale operazione il software richiede informazioni circa le dimensioni e la tipologia di reticolo computazionale, ovvero quella che il programma definisce Mesh.

Scelta della tipologia Mesh

L'insieme delle singole celle su cu il programma applica le equazioni ed effettua dei calcoli definiscono la mesh e la forma di tali unità del reticolo definiscono la tipologia di mesh. Tale reticolo può essere omogeneo e quindi caratterizzato da celle con dimensioni uguali e ben definite oppure può essere caratterizzato da celle che all'interno del dominio presentano forme e dimensioni diverse. Nel primo caso si parla di mesh strutturale, dunque rete con maglie tutte triangoli, quadrate, rettangolari e così via, nel secondo caso la mesh viene definita non strutturale (Adaptive Mesh).

Il termine "Adaptive", che tradotto significa adattativa, permette di capire come funziona tale tipologia di mesh: si adatta agli elementi presenti all'interno dell'area di flusso, ovvero si infittisce dove è richiesto un livello di dettaglio maggiore (per esempio dove sono presenti maggiori variazioni, discontinuità e bruschi cambiamenti nell'elevazione del terreno) mentre è meno fitta dove non sono presenti elementi di discontinuità e l'area è più omogenea ed è dunque sufficiente un livello di approfondimento minore.

Questa tipologia di mesh richiede tempi maggiori per essere generata dal software ma in fase di simulazione garantisce maggiore accuratezza e stabilità. La tipologia di rete computazionale scelta per il l'implementazione del modello è quella di tipo non strutturale, tale reticolo è stato rigenerato più volte durante la fase di inserimento di nuovi elementi e affinamento del modello, unica condizione che deve essere sempre soddisfatta è quella di garantire che ogni cella della maglia non abbia un numero di lati superiore ad 8, il che renderebbe la mesh poco rappresentativa e il software non consentirebbe l'avvio della simulazione.



Figura 9 Esempio di Adaptive Mesh più fitta dove è richiesto un livello di dettaglio maggiore e più ampia dove questo non è richiesto

Breaklines

Le Breaklines sono le linee di discontinuità e rappresentano le irregolarità all'interno della flow area che vanno ad alterare o impedire in modo brusco il movimento dell'acqua. La presenza delle Breaklines garantisce che l'acqua transiti intorno e non oltre una determinata area solo fino a quando non vengono uguagliate e superate le quote in corrispondenza della Breaklines stessa. Sono inoltre indispensabili se si vuole ottenere una maglia di calcolo il più possibile precisa e rappresentativa, infatti l'inserimento di tali linee garantisce che in prossimità di esse il reticolo della mesh si infittisca e il livello di dettaglio risulta essere maggiore. L'inserimento delle linee di discontinuità sul software viene fatto attraverso il comando 2D Breaklines-> Draw 2D Flow Area Breaklines.

Tra quelle inserite nel modello le principali sono:

- sponda destra e sinistra del canale, in modo da garantire che l'acqua transiti all'interno dell'alveo fino al momento in cui non vengono uguagliate e superate le quote delle sponde;
- linea centrale alveo inciso;
- brusche variazioni di quota;
- strade sopraelevate;
- argini;
- pile dei ponti;
- pennelli;
- soglie.

Altre linee di discontinuità sono state aggiunte durante l'affinamento del modello e di conseguenza anche la struttura della mesh è stata, di volta in volta, rigenerata ed infittita.

Censimento ed inserimento opere e manufatti

Nel tratto oggetto di studio, ovvero quello da Aymavilles al confine regionale sono presenti numerose opere di attraversamento, di stabilizzazione del fondo e trasversali all'alveo. Integrando le informazioni fornite dall'Autorità di Bacino con le ricerche effettuate è stato possibile censire e successivamente inserire all'interno del modello:

- 57 ponti;
- 51 soglie;
- 5 pennelli.

Ponti

All'interno dello Studio di Fattibilità si trovano le progressive riferite all'asse del ponte e i nomi di tutti gli attraversamenti che si trovano all'interno del tratto lungo il quale è stata eseguita l'implementazione del modello, fatta eccezione per quei tratti di autostrada Torino-Aosta caratterizzati da quote che neanche nelle situazioni più critiche vengono eguagliate o superate.

Segue l'elenco delle infrastrutture ricadenti nel tratto di interesse [Studio di Fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Dora Baltea nel tratto da Aymavilles alla confluenza Po]:

- Progr.42078.75, manufatto 117.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 43059.47, manufatto 116.2A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 43315.7, manufatto 115.1A, Aymavilles;
- Progr. 43681.9, manufatto 110A, Strada comunale;
- Progr. 50011.9, manufatto 107.1A, Pt.Suaz;
- Progr. 51856.4, manufatto 105.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 53307, manufatto 104.2A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 53619.6, manufatto 104.1A, Pollein;
- Progr. 564174, manufatto 101.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 58383.2, manufatto 99.2A, Quart;
- Progr. 60180.9, manufatto 97.3A, Ferrovia Aosta-Chivasso;
- Progr. 60217, manufatto 97.2A, Nuovo ponte per St. Marcel;
- Progr. 60325.9, manufatto 97.1A, Vecchio ponte per St. Marcel;
- Progr. 61467.6, manufatto 96.4A, Ferrovia Aosta-Chivasso;
- Progr. 61517.1 manufatto 96.3A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 64242.2, manufatto 93.4A, Nuovo ponte per Fenis;
- Progr. 64261, manufatto 93.3A, Vecchio ponte per Fenis;
- Progr. 64349, manufatto 93.2A, Ferrovia Aosta-Chivasso;
- Progr. 64630.5, manufatto 93.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr 67679.6, manufatto 89.2A, Ferrovia Aosta-Torino;
- Progr. 68655, manufatto 89A, Ferrovia Aosta-Torino;
- Progr. 70405.9, manufatto 86.3A, Località Moulin;
- Progr. 70781.5. manufatto 86.2A, Ferrovia Aosta-Chivasso;
- Progr. 72629.4 manufatto 84.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 73498.6, manufatto 83.1A, Pontey;
- Progr. 76761.4, manufatto 78.1A, St. Clair monte;

- Progr. 77556.2, manufatto 77.1A, St. Clair valle;
- Progr. 80213.4, manufatto 73.3A, Località Pont des Chevres;
- Progr.80346.4, manufatto 73.2A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 81029.4, manufatto 73.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 82478.6, manufatto 70.3A, Montjovet;
- Progr. 82639.4, manufatto 70.2A, Montjovet;
- Progr. 82933.5, manufatto 70.1A, Montjovet valle traversa;
- Progr. 83818.8, manufatto 69.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 84617.9, manufatto 68.2A, Berriaz;
- Progr. 85249.3, manufatto 68.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 85954.5, manufatto 67.1A, Autostrada Aosta-Torino;
- Progr. 87828.6, manufatto 65A, Località Villa Agosti;
- Progr. 88354.2, manufatto 64.1A, Ferrovia Aosta-Chivasso;
- Progr. 90239.1, manufatto 62.1 A, Verres;
- Progr. 91273.2, manufatto 61.1 A, Issogne;
- Progr. 94239.3, manufatto 59.2 A, Arnand;
- Progr. 94814.5, manufatto 59.1 A, Località ville;
- Progr. 95819.7, manufatto 58.1 A, Ferrovia Aosta-Torino;
- Progr. 97889.7, manufatto 56.2 A, Hone;
- Progr. 98612.3, manufatto 56.1 A, Hone;
- Progr. 98808.5, manufatto 55.1 A, Brad;
- Progr. 101585.8, manufatto 53.1 A bis, Blame.

L'Autorità di Bacino ha fornito, oltre ad una documentazione in formato Excel relativa ai rilievi e alla geometria dei ponti, anche una documentazione fotografica. Nei dati presenti nei documenti Excel oltre al profilo longitudinale della sezione dei ponti vengono fornite, per ogni ponte, delle tabelle con informazioni aggiuntive circa strumentazioni di rilievo e geometria. Segue, a titolo di esempio, la documentazione fornita per il ponte che si trova in corrispondenza della sezione di rilievo 84.1A.

Tabella 4 Dati forniti sezione di rilievo 84.1A.

| Rilievo | DB2001 | 2001 | 11/13/2001 | AdBPO |
|----------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| Corso d'acqua | 001032 | Dora Baltea | | |
| Progressiva chilometrica | 72.6293883 | CTR 1:25.000 | | |
| Coord. Intersezione Asse | | | | |
| Fluviale (Gauss-Boaga) | 1388793.721 | 5066676.613 | | |
| Coord. Intersezione Asse | | | | |
| Fluviale (WGS 84-UTM | | | | |
| 32) | 388,765.5758 | 5,066,662.5623 | | |
| Coord. Asse Spalle | | | | |
| Manufatto (SX-DX) | | | | 5,066,662.537 |
| (WGS 84-UTM32) | 388,656.8812 | 5,066,658.8607 | 388,880.6084 | 3 |
| Coord. Asse Spalle | | | | |
| Manufatto (SX-DX) | 1,388,685.025 | | 1,388,908.754 | 5,066,676.588 |
| (Gauss-Boaga) | 1 | 5,066,672.9113 | 1 | 1 |
| Sistema Riferimento | | | | |
| Rilievo Manufatto | WGS 84 | m s.m. | | |
| Strumentazione Rilievo | | | | |
| Manufatto | STAZ. TOT. | | | |
| Toll. altimetrica punti | • • | | | |
| (cm) | ± 30 | | | |
| Larghezza impalcato (m) | 22.5 | | | |
| Angolo rispetto direzione | | | | |
| principale di deflusso (°) | 151° | | | |
| Larghezza plinto (m) | - | | | |
| Forma plinto | - | | | |
| Larghezza pila (m) | 3.0 | | | |
| Forma pila | CIRCOLARE | | | |
| Numero pile | 10 | | | |



Figura 10 Sezione longitudinale della 84.1A



Figura 11 Documentazione fotografica 84.1°

In seguito, è stato dunque possibile proseguire con l'inserimento dei ponti all'interno del modello. L'inserimento dei ponti in GeoHECRAS è molto più semplice (il che rende il modello più stabile) anche se meno preciso rispetto a quello disponibile nelle precedenti versioni di HECRAS.
Il software, attraverso il comando 2DFlow Areas->Bridge piers, consente di inserire la geometria e il numero di pile di ogni ponte andando ad estrudere la pila direttamente dal DTM ed andando dunque ad infittire automaticamente la mesh. Le forme delle pile che il software propone sono: pile circolari, pile rettangolari arrotondate, pile rettangolari a spigolo vivo e pile rettangolari squadrate.

Il meccanismo di estrusione delle pile dal Modello Digitale dl Terreno rende il processo di inserimento dei ponti molto rapido ma poiché è possibile eliminare, spostare o modificare le pile inserite in qualsiasi momento, il software salva in memoria contemporaneamente il DTM con e senza pile e se, come nel caso in esame, il tratto su cui eseguire l'implementazione ha un'estensione elevata e un considerevole numero di ponti, il programma non riesce a gestire la grande quantità di dati in memoria e non consente di proseguire.

Per ovviare a questo problema è stato necessario (il DTM iniziale su cui vengono eseguite le operazioni viene chiamato per facilitare la comprensione DTM₀):

- 1. Inserire su GeoHECRAS, attraverso il comando Bridge piers, la metà dei ponti recensiti;
- verificare che il DTM₀ si sia effettivamente modificato corrispondenza delle pile inserite (verifica eseguita esportando la geometria del progetto ed aprendola il HECRAS 5.0.7);
- 3. verificato il punto 2 si ha dunque un DTM1 modificato in prossimità della pile inserite;
- esportare il DTM₁ da HECRAS 5.0.7 ed aggiungerlo come nuovo DMT di lavoro su GeoHECRAS;
- 5. eliminare DTM_{0;}
- 6. eliminare la metà dei ponti precedentemente inserita;
- 7. inserire, lavorando su DTM1 l'altra metà dei ponti;
- 8. esportare la geometria del progetto ed aprirla in HECRAS 5.0.7;
- si osserva un DTM₂ che in aggiunta alle prime pile inserite contiene anche le modifiche dovute alle nuove pile inserite;
- 10. esportare da HECRAS 5.0.7 DTM₂;
- 11. caricare DTM₂ su GeoHECRAS;
- 12. eliminare la seconda metà de ponti;
- 13. rimuovere DTM₁;
- DTM₂ sarà il nuovo DTM su cui si lavorerà e si continuerà la costruzione del modello su GeoHECRAS.

Questa operazione ha reso il modello molto meno pesante e meno instabile, in quando si lavora direttamente sul DMT modificato.

Poiché il software non percepisce le pile in quanto tali, la mesh non subisce modifiche, motivo per cui ai fini di una corretta modellazione, è stato necessario inserire in corrispondenza delle pile delle Breaklines. Sempre in riferimento al ponte che ti trova in corrispondenza della sezione 84.1 A seguono tre figure in cui si può vedere cosa succede al DTM prima e dopo l'inserimento delle pile.



Figura 12 Modello Digitale del Terreno prima dell'inserimento del ponte 84.1A



Figura 13 Modello Digitale del Terreno dopo l'inserimento del ponte 84.1A. Estrusione pile.



Figura 14 Visualizzazione 3D dell'estrusione delle pile dl DTM. Ponte 84.1°

Soglie

Queste opere di sistemazione fluviale ricadono tra quelle classificate come opere per la stabilizzazione del fondo e la loro finalità è quella di mitigare l'effetto erosivo della corrente, garantendo che il fondo alveo rimanga ad una quota sempre costante. Infatti, la loro presenza lungo il corso d'acqua va ad agire sull'inclinazione del fondo e quindi anche sui valori di velocità della corrente.⁷

Non sono stati forniti dati riguardanti il numero e la collocazione delle soglie, per tale motivo il censimento delle suddette opere è stato fatto basandosi su documentazione fotografica e utilizzando gli strumenti Street View e Google Heart.

Le dimensioni relative alla geometria di tali strutture risultano essere dunque meno accurate rispetto a quelle dei ponti. In particolare, per quanto riguarda l'altezza delle soglie ci si è serviti delle informazioni estraibili dal Modello Digitale prima e dopo la correzione del canale, assumendo che l'altezza della soglia possa essere considerata pari alla differenza tra la quota del DTM non corretto e quello corretto in corrispondenza della medesima. Il che significa assumere che l'acqua transita sulla soglia a pelo libero.

Il percorso che permette l'inserimento si queste strutture nel modello è il seguente: *Select SA/2D Connection->Connection Data->Overflow Weir*. La soglia viene inserita come un muro che deve necessariamente seguire il profilo della sezione e che, nella parte in cui l'alveo è inciso ha quota costante pari a quella della soglia stessa.

Il software GeoHECRAS da dei problemi relativi alla visualizzazione del reale profilo dell'alveo inciso, ragion per cui per la definizione di Station ed Elevation, è stato necessario servirsi del software HECRAS 5.0.7. Utilizzando HECRAS 5.0.7 è stato possibile disegnare in modo più accurato le soglie seguendo il reale profilo della sezione e non avere problemi in fase di lancio della simulazione.

Anche in seguito all'inserimento di tali opere di stabilizzazione del fondo è necessario rigenerare la mesh che, in corrispondenza di tali opere risulta essere più fitta, questo accade perché il software generata automaticamente una Breaklines in corrispondenza dell'elemento.



Figura 15 Rappresentazione soglie in GeoHECRAS



Figura 16 Sezione trasversale soglia in GeoHECRAS.

Pennelli

I pennelli, noti anche con il nome di repellenti, sono delle opere oblique rispetto al fiume che si estendono verso la parte centrale del canale e vanno ad ostacolare la corrente, in tal modo il flusso della corrente rimane al centro dell'alveo mentre in corrispondenza delle sponde si ha la sedimentazione.⁷ Anche in questo caso non sono stati forniti dati circa numero e collocazione dei pennelli e dunque si è ricorso nuovamente a documentazione fotografica e utilizzo degli strumenti Street View e Google Heart.

Il percorso per l'inserimento dei pennelli in GeoHECRAS è il seguente: *2DFlow Areas->Draw 2D Flow Training Structures*. Dopo aver inserito i pennelli occorre editare in prossimità di essi delle Breaklines, per il motivo esposto in precedenza relativo alla mesh.



Figura 17 Rappresentazione pennelli in GeoHECRAS

3.5.Taratura del modello

Come esposto nel paragrafo *Excursus eventi storici*, la Dora Baltea è storicamente soggetta ad eventi alluvionali, tra i quali si ricordano giugno 1957, settembre 1993 e ottobre 2000. Poiché l'implementazione del modello richiede un caso studio di riferimento sul quale effettuare una calibrazione dei parametri e la definizione delle condizioni al contorno di taratura, è stato necessario scegliere un evento di riferimento.

"L'evento zero" utilizzato nel caso oggetto del lavoro di tesi riguarda l'alluvione dell'ottobre 2000. Tutte le informazioni relative a tale evento sono state reperite all'interno dello *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Dora Baltea nel tratto da Aymavilles alla confluenza Po*.

Evento alluvionale ottobre 2000⁸

Tra il 13 -16 ottobre 2000 un'alluvione ha colpito violentemente la Valle d'Aosta e il Piemonte, i bacini maggiormente interessati sono stati Toce, Sesia, Orco, Dora Baltea, Stura di Lanzo, Dora Riparia, Pellice e l'alto Po. Servizi pubblici, nuclei abitati e istallazioni produttive sono state convolte da ampi allagamenti e 17 persone hanno perso la vita.

In Valle d'Aosta l'evento ha presentato caratteri di eccezionalità sia per quanto riguarda l'estensione delle aree colpite che per l'entità delle precipitazioni. Tali precipitazioni hanno coinvolto tutta la regione: maggiormente colpiti sono stati i tributari della destra orografica nel tratto compreso tra valle di Rhemes e di Champorcher, mentre dalla valle del Lys in poi sono stati colpiti maggiormente quelli del versante sinistro. Tale situazione è stata fonte di criticità poiché ha fatto sì che si verificasse un innalzamento quasi simultaneo dei livelli nelle diverse valli laterali. Sul rapporto d'evento viene riportato un valore di precipitazione media areale pari tra i 400 e i 600mm in 60 ore nelle aree di cui sopra.



Figura 18 Distribuzione precipitazioni in VDA e regioni limitrofe⁸

Altro fenomeno aggravante verificatosi durante l'evento riguarda il fenomeno di fusione nivale, che ha dato un apporto aggiuntivo in termini di portata transitante in alveo, ciò è stato dovuto allo zero termico, rimasto tale per tutta la durata dell'evento a quote comprese fra i 3000 e 3500 metri.

In aggiunta a tale avvenimento si sono manifestati, con fenomeni per lo più collegati e dovuti alla conformazione morfologica della Valle d'Aosta, processi di colate detritiche, forte trasporto solido, sovralluvionamento in alveo, erosione al piede dei pendii e innesco di fenomeni franosi con conseguente ostruzione dell'alveo.

L'evento ha provocato infatti degli effetti rilevanti lungo i versanti da Aosta fino a Monjovet, tratto lungo il quale si sono innescati fenomeni di scivolamento lento, in parte evoluti poi in veri e propri debris flow. Tra i danni alle infrastrutture si ricorda il superamento e successivo collasso di un ponte e l'allagamento di un tratto rilevante di ferrovia in prossimità di Clapey (borgo del comune di Donnaz).



Figura 19 Principali frane in Valle d'Aosta 9

Viene riportato anche l'ordine cronologico con cui i diversi fenomeni di dissesto si sono innescati: all'inizio si verificarono frane di tipo superficiale di dimensioni ridotte, in seguito i volumi divennero maggiori (migliaia di m³ fino a milioni di m³) e si verificarono anche fenomeni di colate e crolli.⁹ Da un punto di vista prettamente idrologico durante tale evento l'innalzamento dei livelli che, come detto precedentemente, ha interessato nello stesso intervallo temporale tutti i tributari, ha fatto sì che qualche ora dopo anche la Dora subisse un innalzamento dei del proprio livello e portando alla registrazione di due picchi di piena⁸:

- Primo picco di piena: "Cogne 14 ottobre ore 2.30, 1.9metri e alle ore 12.30, 2.23 metri; Hone 14 ottobre ore 18.30, 5.90metri";
- Secondo picco di piena: "prima mattina di domenica. Massino livello raggiunto a Hone il 15 ottobre alle 14.30 pari a 8.729metri, massimo livello raggiunto a Cogne il 15 ottobre alle 7.30 pari a 2.587metri".

In termini statistici la portata registrata viene considerata corrispondente ad un tempo di ritorno di 200anni, tale assunzione è stata fatta prendendo in considerazione il peso di tale evento sui dati storici a disposizione.¹⁰



Figura 20Foto evento alluvionale ottobre 2000, Valle d'Aosta. Meteolive.it

Noto l'evento di riferimento è ora possibile procedere con la caratterizzazione e successiva taratura del modello, in primis vanno definite le condizioni al contorno. Tali condizioni possono essere interne o esterne.

Condizioni al contorno esterne: monte e valle

Le condizioni al contorno esterne vengono assegnate al limite superiore ed inferiore della Flow Area definita all'inizio, poiché definiscono le diverse peculiarità dell'area di flusso oggetto di studio. Tali condizioni sono fondamentali per l'implementazione del modello e la simulazione di taratura, ovvero quella relativa all'evento del 2000.

Il comando che permette la definizione delle condizioni al contorno su GeoHECRAS si trova nella voce 2D Flow Area->Boundary Condition-> Draw 2D Flow Area Boundary Condition polyline. Sono state tracciate due linee, una a monte a una a valle, che hanno permesso l'assegnazione di tali condizioni. I restanti contorni della flow area su cui non vengono indicati condizioni al contorno vengono definiti limiti di scorrimento. Tali limiti fungono da recipiente ma privo di attrito, ovvero se l'acqua dovesse raggiungerli non andrebbe scuramente oltre.⁶



Figura 21 Polilinee sulla flow area per la definizione delle condizione di monte e valle

La condizione di monte consiste nella definizione dell'idrogramma di progetto e della pendenza di tale tratto. L'idrogramma di riferimento utilizzato è quello stimato a monte della località Aymavilles durante l'evento alluvionale dell'ottobre 2000 il quale è disponibile all'interno dello Studio di Fattibilità ed è stato digitalizzato mediante il software Get Data, al fine di poter essere impiegato per la simulazione di taratura.

L'idrogramma viene di seguito riportato:



Figura 22 Idrogramma di portata Aymavilles¹¹. Condizione di monte.

Per la definizione della pendenza ci si serve di un comando all'interno del software che consente, tracciando una polilinea che attraversa il centro del corso d'acqua, di misurarne pendenza. Il valore di pendenza del fondo misurata per il tratto di monte risulta essere pari a 0.011.

|) DS | S Hydrograph Data | | | | | |
|---------|---------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------------|-------------|----------|
| ISS fil | le: | | | | | Select |
| ata c | path: | | | | | |
| Tal | bular Hydrograph Data | | | | | |
| Hvd | Irooranh Data Starting Ti | me Reference | | | | |
| () I | Use simulation time | Date: 1 | 30ct2019 | Time: 0800 | | |
| | Thread about the s | Data (| stocazoris (17) | Time Coto | | |
| 0 | rixed start time | Date: 2 | | Time: Enter time | | |
| | Date & Time | Simulation Time (hrs) | Flow (cms) | 1000 - | \wedge | |
| 1 | 13Oct2019 0800 | 00:00 | 73.58 | | 7Λ | \wedge |
| 2 | 13Oct2019 0900 | 01:00 | 73.58 | | $< \lambda$ | / N $-$ |
| 3 | 13Oct2019 1000 | 02:00 | 73.58 | ۲ ۲ | \sim | |
| 4 | 13Oct2019 1100 | 03:00 | 73.58 | 8 500 | | <u>\</u> |
| 5 | 13Oct2019 1200 | 04:00 | 73.58 | <i>□</i> · · · <i>(</i> | | · · · · |
| 6 | 13Oct2019 1300 | 05:00 | 77.26 | | | |
| 7 | 13Oct2019 1400 | 06:00 | 77.26 | / | | - Flow |
| 8 | 13Oct2019 1500 | 07:00 | 80.94 | | | |
| 9 | 13Oct2019 1600 | 08:00 | 84.62 | 0:00 | 64:00 | 128:00 |
| 10 | 13Oct2019 1700 | 09:00 | 91.97 | ~ | Time [hrs] | |
| ate t | ime interval: 1 Hour | ▼ Inse | rt Row Delete Row(| s) Interpolate Missing Data | | |
| lydro | graph Data Adjustment | | | | | |
| linim | um flow (override): | | cms | | | |
| | nultipler (ccale factor) | | | | | |
| iow n | numper (scale factor): | | | | | |
| ther | Data | | | | | |
| D BC | line flow distribution en | ergy slope: 0.0 | 11105 Measure m/ | m | | |
| | | | | | | |

Figura 23Definizione condizioni al contorno di monte GeoHECRAS

La condizione assegnata a valle è quella di Normal Depth, anche in questo viene richiesto il valore della pendenza che può essere nuovamente misurata come nel caso precedente e, nel caso in esame, risulta essere pari a 0.006.

| | Reach Data | | | | | | | | [0 River Statio |
|------------------------|--|---------------|----------|---|--------------------|---------------|---|------------------|---|
| Bo | undary Conditions elect interior locatio | Initial Flo | w & St | age Conditions | | | | | |
| Ri | iver name: each name: | | | • | | | | | |
| In | terior river station: | | | - | Pick | Add B | oundary Cond | lition Location | |
| | River 1 | Reach | 7 | River Station | Bounda | ary Condition | n 🌾 | Boundary Details | 76 |
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | |
| ora | ge Area, 2D Flow A | rea & Connect | ion Da | ta | | | | | [7 SA/2D BC Lin |
| | OD Flau Arres | SA/2D BC Li | nes | SA/2D Connectio | on Gates | Initial Sta | ge Elevations | | |
| SA | /20 Flow Areas | 01920 00 20 | | | | | | | |
| SA, | Boundary Condition | on Line ID | 74 | Boundary Condit | ion | Ti | Boundary De | tails | The second se |
| SA. | Boundary Conditio | on Line ID | W | Boundary Condit | ion 1 | * | Boundary De | tails | Defined |
| SA, 3 | Boundary Condition Evancon Lys | on Line ID | 74 | Boundary Condit Flow Hydrograph Flow Hydrograph | ion n | ¥ • • | Boundary De Define | tails | Defined Defined |
| SA 3 4 5 | Boundary Condition Evancon Lys Marmore | on Line ID | T. | Boundary Condit Flow Hydrograph Flow Hydrograph Flow Hydrograph | ion 1 1 | * * | Boundary De Define Define | tails | Defined Defined Defined |
| SA 3 4 5 6 | Boundary Condition Evancon Lys Marmore monte | on Line ID | 1 | Boundary Condit Flow Hydrograph Flow Hydrograph Flow Hydrograph Flow Hydrograph | ion 1 1 1 | * * * | Boundary De Define Define Define | tails | Defined Defined Defined Defined Defined |

Figura 24Definizione condizioni al contorno di valle GeoHECRAS

Condizioni al contorno interne: contributo affluenti

Tali condizioni al contorno, definite internamente all'area di flusso, permetto di tener conto all'interno della modellazione del contributo dato dagli affluenti e delle aree di bacino parziali. Tener conto di questi contributi aggiuntivi è fondamentale affinché il modello rispecchi il più possibile la realtà. Attraverso l'impiego di un modello idrologico basato sui mm di pioggia rilevati, lo Studio di Fattibilità fornisce per il tratto in esame gli idrogrammi residui in corrispondenza diversi punti dell'asta principale e quelli dei tributari Buthier, Mormore, Evancon, Ayasse e Lys.



Figura 25 Affluenti

Gli affluenti e i residui sono stati inseriti nel modello attraverso la definizione di una condizione al contorno interna in prossimità della confluenza o della progressiva fornita e questo è stato possibile poiché i valori degli idrogrammi sono stati forniti lungo l'asta principale.

L'assegnazione di una condizione al contorno interna alla flow area deve essere eseguita con un comando differente rispetto a quella esterna, ovvero *S/2D Elements-> draw SA/2D Boundary Condition Lines-> Flow Hydrograph*. Segue la digitalizzazione degli idrogrammi inseriti nel modello.

Affluente Buthier

La digitalizzazione dell'idrogramma registrato durante l'evento alluvionale di riferimento lungo l'asta principale del torrente Buthier, tributario del versante sinistro che si immette nella Dora Baltea in prossimità di Aosta, viene di seguito riportato:



Idrogramma evento alluvionale 2000 Buthier

Affluente Marmore

La digitalizzazione dell'idrogramma registrato durante l'evento alluvionale di riferimento lungo l'asta principale del torrente Marmore, tributario del versante sinistro che si immette nella Dora Baltea in prossimità di Chatillon viene di seguito riportato:



Idrogramma evento alluvionale 2000 Marmore

Figura 27 Idrogramma di portata Marmore¹¹

Figura 26 Idrogramma di portata Buthier¹¹

Affluente Evancon

La digitalizzazione dell'idrogramma registrato durante l'evento alluvionale di riferimento lungo l'asta principale del torrente Evancon, tributario del versante sinistro che si immette nella Dora Baltea in prossimità di Verrès viene di seguito riportato:



Idrogramma evento alluvionale 2000 Evancon

Figura 28 Idrogramma di portata Evancon¹¹

Affluente Ayasse

La digitalizzazione dell'idrogramma registrato durante l'evento alluvionale di riferimento lungo l'asta principale del fiume Ayasse, tributario del versante destro che si immette nella Dora Baltea in prossimità di Hone viene di seguito riportato:



Idrogramma evento alluvionale 2000 Ayasse

Figura 29Idrogramma di portata Ayasse¹¹

Affluente Lys

La digitalizzazione dell'idrogramma registrato durante l'evento alluvionale di riferimento lungo l'asta principale del torrente Lys, tributario del versante sinistro che si immette nella Dora Baltea in prossimità di Pont Saint Martin, viene di seguito riportato:



Idrogramma evento alluvionale 2000 Lys

Contributo bacini residui

La digitalizzazione degli idrogrammi relativi al contributo dei bacini residui dell'evento alluvionale di riferimento lungo l'asta principale viene di seguito riportata:



Idrogrammi contriubuto bacini residui

Figura 31 Idrogrammi contributo bacini residui¹¹

Figura 30 Idrogramma di portata Lys¹¹

Classi di copertura del suolo

Prima di procedere con l'assegnazione dei coefficienti di scabrezza, risulta necessario definire delle classi di uso del suolo che siano il più possibile rappresentative della realtà.

Il reperimento di tali dati è stato possibile usufruendo dei dati Cornie Land Cover (CLC) del programma Copernicus. Tale programma, finanziato dall'Agenzia Europea per l'Ambiente e a cui hanno partecipato ARPA Campania, ARPA Calabria, ARPA Emilia-Romagna, ARPA Friuli-Venezia Giulia, ARPA Piemonte, ARPA Sicilia, ARPA Toscana, ARPA Veneto, <u>ARPA Valle D'Aosta</u> e Università del Molise, garantisce di avere dati sulla copertura del suolo, sull'uso del suolo e sul cambiamento tra le diverse categorie.¹²

Lo scopo di tale progetto è il monitoraggio dell'evoluzione della copertura e dell'uso del suolo, motivo per cui le classi vengono definite in modo molto dettagliato (vengono definite più di 40 classi). Per lo scopo da perseguire all'interno del lavoro di tesi, questo livello di dettaglio non è richiesto, motivo per cui sono state identificate solo le classi ritenute rappresentative e performanti. Al termine dell'analisi sono state dunque identificate quattro classi: alveo inciso, vegetazione rada, vegetazione fitta e urbano.

Definizione delle scabrezze di primo tentativo e taratura del modello

L'assegnazione delle scabrezze di primo tentativo necessarie per la taratura del modello è stata fatta basandosi sugli studi e i rilievi riportati nello **Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Dora Baltea nel tratto da Aymavilles alla confluenza Po**.¹¹ All'interno di quest'ultimo le classi di uso del suolo sono più numerose e dettagliate (vengono definite 16 classi di uso del suolo) ma, come definito per paragrafo precedente, per il caso oggetto di studio è stato ritenuto sufficiente definirne solo quattro: alveo inciso, vegetazione rada, vegetazione fitta e urbano.

I valori di scabrezza di primo tentativo assegnati sono stati successivamente calibrati in modo da rendere ottimale la taratura del modello, cercando di riprodurre il più possibile livelli e aree di esondazione dell'evento di riferimento, ovvero quello del 2000.

Alveo inciso

La definizione della scabrezza di primo tentativo può essere fatta considerando le caratteristiche granulometriche dell'alveo inciso, utilizzando la metodologia USGS "George J. Arcement, Verne R. Schneider- Guide for Selecting Manning's Rougness Coefficints for Natural Channels and Flood Plains- U.S. Geological Servery, Paper 2339,1989", oppure utilizzando una formula definita nella Direttiva dell'Autorità di Bacino "Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B".

Nel lavoro oggetto di tesi si è deciso di utilizzare entrambi gli approcci e valutare a posteriori quale delle due metodologie si adatta meglio al caso studio.

METODOLOGIA USGS¹¹

Le formulazioni tratte dalla pubblicazione dell'USGS sono di seguito riportate:

$$c = 1/n \quad \text{[1.6]}$$

$$n = (n_b + n_1 + n_3 + n_4) \cdot m \quad \text{[1.7]}$$

$$n_b = \frac{0,076 \cdot R^{1/6}}{1,16+2,0 \cdot \log(\frac{R}{d_{B4}})} \quad \text{[1.8]}$$

In cui:

c= coefficiente di scabrezza di Strickler $(m^{1/3}/s)$;

n= coefficiente di scabrezza di Manning $(s/m^{1/3})$;

 n_b = coefficiente di scabrezza base per alveo naturale rettilineo, uniforme e regolare (s/m^{1/3});

 n_1 = fattore correttivo degli effetti di irregolarità superficiali (s/m^{1/3});

 n_2 = fattore correttivo delle variazioni di dimensione e forma della sezione trasversale d'alveo (s/m^{1/3});

 n_3 = fattore correttivo della presenza di ostacoli e ostruzioni (s/m^{1/3});

n₄= fattore correttivo della presenza di vegetazione e delle condizioni di flusso (s/m^{1/3});

m= fattore moltiplicativo per l'effetto di meandrizzazione dell'alveo (-);

R= raggio idraulico (m);

 d_{84} = diametro caratteristico del materiale di fondo alveo cui corrisponde un passante dpari al 84% (m).

I valori dei fattori estrapolati dalla pubblicazione dell'USGS, considerando R=3m, vengono di seguito riportati:

n₁= 0,005 (piccole irregolarità sulle sponde);

n₂= 0,000 (variazioni di sezione sufficientemente regolari);

n₂= 0,005 (occasionali variazioni brusche di sezione);

n₃=0,005 (presenza discontinua di ostacoli e ostruzioni);

n₄=0.002 presenza modesta di vegetazione nell'alveo inciso);

m=1,150 (rapporto tra lunghezza dell'alveo e lunghezza della valle conpreso tra 1,2 e 1,5).

Vengono forniti inoltre i valori di d_{84} medio del materiale presente in alveo lungo l'estensione longitudinale del tratto di Dora Baltea di interesse (sezioni di rilievo dalla 117.1 alla 51.0). I valori vengono riportati nella tabella seguente.

| Sezione di rilievo | D84 -medio (mm) | Strickler (m ^{1/3} /s) | Manning (s/m ^{1/3}) |
|--------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 117.1 | 109.2 | 23 | 0.043 |
| 115.0 | 140.8 | 23 | 0.043 |
| 112.0 | 189.3 | 22 | 0.045 |
| 105.0 | 112.0 | 23 | 0.043 |
| 103.0 | 79.4 | 25 | 0.04 |
| 99.1 | 31.5 | 25 | 0.04 |
| 90.0 | 80.5 | 25 | 0.04 |
| 88.0 | 238.8 | 22 | 0.045 |
| 83.0 | 88.7 | 24 | 0.042 |
| 75.0 | 97.3 | 24 | 0.042 |
| 68.1 | 112.5 | 23 | 0.043 |
| 63.0 | 72.7 | 25 | 0.04 |
| 61.0 | 189.6 | 22 | 0.045 |
| 58.0 | 126.3 | 23 | 0.043 |
| 55.0 | 180.0 | 22 | 0.045 |
| 53.0 | 153.7 | 22 | 0.045 |
| 51.0 | 173.6 | 22 | 0.045 |

Tabella 5 Coefficienti di scabrezza di primo tentativo con metodologia USGS

Per l'implementazione del modello, poiché i valori non sono molto differenti, si è deciso di prendere un valore medio di scabrezza e utilizzarla come valore di primo tentativo.

Il valore ottenuto è un Manning pari a 0.043 s/m^{1/3}.

*FORMULA RIPORTATA NELLA DIRETTIVA DELL'AUTORITÀ DI BACINO*¹¹ La formula proposta è la seguente:

$$K_s = 26/d_{90}^{1/6}$$
 [1.9]

In cui:

 K_s = coefficiente di scabrezza di Strickler (m^{1/3}/s);

 d_{90} = diametro caratteristico del materiale di fondo alveo cui corrisponde un passante del 90%(m).

Anche in questo caso vengono forniti di valori di d₉₀ medio in corrispondenza delle sezioni ricadenti nel tratto di interesse. Naturalmente, in entrambi i casi, si fa riferimento a campioni rappresentativi. I valori vengono riportati nella seguente tabella:

| Sezione di rilievo | D90 -medio (mm) | Manning (s/m ^{1/3}) |
|--------------------|-----------------|-------------------------------|
| 117.1 | 124.7 | 0.027 |
| 115.0 | 158.7 | 0.028 |
| 112.0 | 202.0 | 0.029 |
| 105.0 | 120.5 | 0.027 |
| 103.0 | 86.7 | 0.026 |
| 99.1 | 38.7 | 0.022 |
| 90.0 | 88.4 | 0.026 |
| 88.0 | 265.1 | 0.031 |
| 83.0 | 98.4 | 0.026 |
| 75.0 | 112.6 | 0.027 |
| 68.1 | 137.7 | 0.028 |
| 63.0 | 81.5 | 0.025 |
| 61.0 | 210.0 | 0.03 |
| 58.0 | 136.7 | 0.028 |
| 55.0 | 195.3 | 0.029 |
| 53.0 | 171.3 | 0.029 |
| 51.0 | 196.3 | 0.029 |

Tabella 6 Coefficienti di scabrezza primo tentativo con formula direttiva Autorità di Bacino

È stato nuovamente considerato un valore medio di scabrezza da assegnare a questa classe di copertura del suolo, il valore ottenuto è un Manning pari a $0.027 \text{ s/m}^{1/3}$.

Vegetazione rada

Il valore di scabrezza di primo tentativo da assegnare a questa classe di uso del suolo risulta essere pari a $0.067 \text{ s/m}^{1/3}$. Anche in questo caso, per la definizione del coefficiente di Manning da utilizzare, si è fatto riferimento a quanto riportato nello Studio di Fattibilità, all'interno del quale tale valore è stato definito confrontando le foto aree delle aree di vegetazione rada con i coefficienti di scabrezza ricavati dalla pubblicazione dell'USGS.¹¹

Vegetazione fitta

Per la definizione del Manning medio da assegnare a questa classe di uso del suolo, è stata utilizzata l'informazione derivante dalla densità della componente arborea e arbustiva presente lungo il tratto oggetto di studio (informazione reperibile sempre all'interno dello Studio di Fattibilità). Trattandosi di vegetazione fitta, sono stati considerati gli intervalli associati alla densità di vegetazione medio-alta.

Tali intervalli sono stati assegnati in funzione della caratterizzazione desumibile dalle schede di rilevamento nelle sezioni ricadenti nel di interesse:

- Intervallo valori di Strickler associato a densità componente arborea e arbustiva media [6 -9] m^{1/3}/s;
- Intervallo valori di Strickler associato a densità componente arborea e arbustiva alta [5-7] m^{1/3}/s.

A questo punto, per il suolo a densità media è stato scelto un valore pari a 8, contestualmente, per il suolo a densità alta è stato scelto il valore 6. Il valore di Strickler medio ottenuto risulta essere pari a 7 m^{1/3}/s, cui corrisponde un Manning pari a **0.14 s/m^{1/3}**. Tale approccio permette di trasformare le informazioni contenute nelle schede di rilevamento in una quantificazione quanto più oggettiva e rappresentativa della condizione reale.

Urbano

In questa classe di uso del suolo ricadono sia il tessuto urbano continuo che discontinuo. Il coefficiente di Manning associato a tale categoria risulta essere pari a $0.2 \text{ s/m}^{1/3}$.

Gli edifici, scaricati in formato shapefile dal Geoportale val d'Aosta - Piano Paesaggistico Territoriale (PTP), sono stati inoltre inseriti all'interno nel modello come ostruzione al flusso utilizzando il comando *Assign 2D conveyance obstrutcion*.

Inserimento il Geo HECRAS

I valori dei coefficienti utilizzati come scabrezze di primo tentativo vengono riportati nella tabella seguente:

| CLASSE USO DEL SUOLO | COEFFICIENTE MANNING (s/m ^{1/3}) | | |
|----------------------|--|----------------------------|--|
| | | Formula direttiva Autorità | |
| | USGS | bacino | |
| Alveo inciso | 0.043 | 0.027 | |
| Vegetazione rada | 0. | 067 | |
| Vegetazione fitta | 0 | .14 | |
| Urbano | 0.2 | | |

Tabella 7 Valori dei coefficienti di scabrezza di primo tentativo

L'implementazione del modello su Geo HECRAS richiede che venga creato un Land Cover con i valori delle relative scabrezze. Per fare ciò ci si serve del comando *Manning Roughess-> create 2D Land cover*.

I valori sono stati associati alle classi di copertura del suolo andando a modificare la tabella degli attributi dello shapefile poligonale creato attraverso il software ArcGis, tale shapefile è stato poi utilizzato come input per la creazione del Land Cover delle scabrezze elaborato dal software.

3.6.Lancio simulazione

Terminata la costruzione del modello è possibile partire con la simulazione di taratura che, come detto precedentemente, richiede dei tempi di elaborazione piuttosto lunghi. I tempi di calcolo dipendono da molteplici fattori, quali numero e dimensione delle unità della maglia di calcolo, passo temporale con cui viene eseguito il calcolo e tipo di equazione scelta.

Per il caso in esame i dati inseriti per l'avvio della simulazione sono:

- Data di inizio e fine dell'evento che si vuole simulare, nel caso in esame 13-16 Ottobre 2000, poiché si fa riferimento alla simulazione di taratura;
- Intervallo di calcolo, pari a 0.5 secondi;
- Intervallo con cui devonono essere mappati i diversi output che elabererà il software, ovvero idrogrammi e mappe di allagamento.

| Scenario Data | | | | | |
|--|--------------------|-------|----------------|----------|---|
| Scenario (plan): | Test | | | | • |
| Geometry: | Test | | | | |
| Unsteady flow: | Test | | | | |
| Disregard following Elements during Analysis | | | | | |
| Lateral Structu | res | | | | |
| 🔲 Storage Area (| Connections | | | | |
| Inline and Late | ral Structure Brea | aches | | | |
| Pumping | | | | | |
| Execute Processes | 5 | | | | |
| Geometric pre | processor | | | | |
| Unsteady flow | simulation | | | | |
| Output postpr | ocessor | | | | |
| Simulation Time \ | Window | | | | |
| Starting date: | 13Oct2000 | 12 | Starting time: | 0800 | Ø |
| Ending date: | 16Oct2000 | 12 | Ending time: | 0800 | Ø |
| Total time: | 3 days | | | | |
| Simulation Time 9 | Settings | | | | |
| Computational tin | ne step interval: | 0.5 | Second 🔻 | Advanced | d |
| Hydrograph outpu | ut interval: | 10 | Minutes 🔻 |] | |
| Detailed output in | terval: | 10 | Minutes 🔹 |] | |
| betanea output in | | | | 1 | |
| Mapping output in | nterval: | 10 | Minutes 🔻 | | |

Figura 32 Definizione intervalli temporali su GeoHECRAS

Si osserva che l'intervallo di calcolo risulta essere molto piccolo, ciò è necessario al fine di garantire la stabilità del modello.

3.7.Risultati simulazioni

Per verificare l'efficacia del modello, ovvero per la taratura, i risultati delle simulazioni dovrebbero essere confrontate con il perimetro delle aree allagate dell'evento del 2000. I dati relati a tali aree allagate per la Valle d'Aosta non sono però disponibili, motivo pe cui il confronto è stato fatto con il perimetro fornito in formato shapefile dall'Autorità di Bacino derivante da elaborazioni 1D. Naturalmente si tratta di un'approssimazione ma poiché la definizione di tali aree allegabili è stata fatta integrando le informazioni relative alle aree allagabili dello Studio di Fattibilità e le informazioni derivanti dagli studi in loco eseguiti dei singoli Comuni, tale approssimazione viene ritenuta accettabile e rappresentativa.

Ci si aspetta comunque che, poiché i valori di scabrezze di primo tentativo sono stati dedotti dallo studio di fattibilità, le simulazioni forniscano risultati abbastanza realistici anche se probabilmente andrà fatta una calibrazione, in particolare per l'alveo inciso.

Simulazione 1

I valori di Manning utilizzati per questa prima simulazione sono quelli precedentemente definiti per le classi di copertura del suolo di vegetazione rada, vegetazione fitta e urbano. Per quanto riguarda invece il valore relativo all'alveo inciso è stato deciso di utilizzare per primo il valore di scabrezza ottenuto mediante l'applicazione della metodologia USGS. I valori risultano dunque essere:

| CLASSE USO DEL SUOLO | COEFFICIENTE MANNING (s/m ^{1/3}) |
|----------------------|--|
| Alveo inciso USGS | 0.043 |
| Vegetazione rada | 0.067 |
| Vegetazione fitta | 0.14 |
| Urbano | 0.2 |

Tabella 8 Coefficienti di Manning_Simulazione1

Va precisato che tempi necessari per la simulazione del tratto di Dora Baltea da Aymavilles al limite del confine regionale sono considerevoli, motivo per cui per la seconda parte del lavoro ci si è soffermati solo un tratto di estensione più ridotta.





Figura 33 Risultato Simulazione1

In Figura si osservano (con colori che vanno dall'azzurro il blu) i valori di tiranti e le aree soggette ad allagamento durante l'evento simulato, in tonalità dal giallo al rosso si osserva invece il perimetro di calibrazione. Si evince che nel tratto che va dal comune di Chambave le aree allagate lungo l'asta principale di adattano quasi perfettamente al perimetro delimitato dall'area allagabile. Il modello sembra invece riprodurre in modo meno efficace la realtà nel primo tratto, ovvero quello compreso tra Aymavilles e Fenis.

Vengono di seguito riportati una serie di focus dei tratti in cui la calibrazione risulta essere poco rappresentativa. Va comunque ribadito che, i valori dei coefficienti di Manning ottenuti applicando la metodologia USGS, risultano essere piuttosto elevati sia rispetto all'altro valore ottenuto mediante la formula fornita dall'Autorità di Bacino, sia in generale per la granulometria che caratterizza l'asta oggetto di studio. Per l'analisi di questa prima simulazione di taratura va dunque tenuto presente che alcune aree potrebbero essere caratterizzate da un'estensione maggiore anche perché i valori di scabrezza utilizzati sono elevati.

In alcuni punti in cui i perimetri si discostano di molto vanno però ricercate delle motivazioni più consistenti.



Figura 34 Focus tratto compreso tra Aymavilles e Grand Brissogne

Nel focus che comprende il tratto di Dora Baltea da Aymavilles e Grand Brissogne, ovvero quello in cui la taratura risulta meno precisa, è possibile individuare tre macro-zone in cui il perimetro ottenuto dalla simulazione e quello di taratura si discostano maggiormente:



Figura 35 Macro-zone in cui i due perimetri si discostano maggiormente

Macro-zona1: in questo caso in modello non si adatta bene alla realtà. Si afferma questo in quanto, oltre alla motivazione precedentemente esposta circa i valori di scabrezza, non è stata trovata altra motivazione per cui in questo tratto i due perimetri debbano discostarsi. Dalle ricerche effettuate non è stata trovata nessuna nuova infrastruttura di cui non è tenuto conto in fase di implementazione del modello né informazioni riguardanti l'evento alluvionale del 2000 che testimoniano che tale area durante l'evento è stata allagata. Si vedrà che con valori di scabrezza minori (vedi simulazione 2) in tale tratto il modello diventerà più rappresentativo.

Macro-zona2: anche in questo caso non è stata trovata nessuna documentazione che attesti che tale zona durante l'evento di riferimento era stata allagata né che ci sono opere di cui è stata trascurata la presenza. In questo caso, però, ci si trova di fronte ad un perimetro che è davvero difficile da uguagliare perfettamente, in quanto è caratterizzato da una protuberanza che sicuramente è frutto non solo di modellazioni ma di integrazioni derivanti dagli studi eseguiti in loco. Inoltre, non è da trascurare che tali aree allagabili sono il risultato di una simulazione 1D, mentre nel caso in esame si tratta di una simulazione 2D. Per quanto sia impossibile riprodurre esattamente lo stesso andamento, si cercherà si ridurre comunque l'estensione della discrepanza tra le zone allagate riducendo i valori di scabrezza in alveo.

Macro-zona3: in questo tratto le aree hanno un'estensione che è di tanto più ampia rispetto al perimetro dell'area allagata di taratura. Questo accade poiché, in questo caso, in fase di implementazione è stata trascurata la presenza di un'infrastruttura.

Il Modello Digitale del Terreno fornito dall'Autorità di Bacino è datato 2002, il perimetro di calibrazione è invece datato 2016, motivo per cui il DTM non tiene conto di eventuali opere di protezione idraulica costruite successivamente.

Utilizzando lo strumento Street View di Google Maps, il località Croix Noire è stata rilevata la presenza di un argine che costeggia per tutto il tratto indicato in figura il fiume e che è stato costruito nel 2008, ciò implica che nel DTM non se ne tenga conto.



Figura 36 Zona in cui è stata rilevata la presenza dell'argine



Figura 37 Zona in cui è stata rilevata la presenza dell'argine

Seguono una serie di immagini relative agli anni 2008, 2011 e 2018 del medesimo tratto [Fonte immagini: Google Maps -Street View]:



Figura 38 Località Croix Noire. Anno 2008. Argine in costruzione



Figura 39 Località Croix Noire. Anno 2001 Argine completato



Figura 40 Località Croix Noire. Anno 2018

A partire dal comune di Champagne, fino ad arrivare a Soint Sanit- Marten, i due perimetri sono presschè concidenti. Ci si aspetta che concidano perfettamante utilizzando valori di scabrezze ridotti.



Figura 41 Tratto compreso tra Champagne e Champdepraz



Figura 42 Tratto da Monjovet a Mont-Saint_-Martin

Simulazione 2

Nella seconda simulazione sono stati cambiati i valori di scabrezza solo dell'alveo inciso, il valore utilizzato risulta essere quello ottenuto utilizzando la formula suggerita dall'Autorità di bacino:

| Tabella | 9 | Manning | utilizzati | nella | Simul | lazione | 2 |
|---------|---|---------|------------|-------|-------|---------|---|
|---------|---|---------|------------|-------|-------|---------|---|

| CLASSE USO DEL SUOLO | COEFFICIENTE MANNING (s/m ^{1/3}) |
|----------------------|--|
| Alveo inciso | 0.027 |
| Vegetazione rada | 0.067 |
| Vegetazione fitta | 0.14 |
| Urbano | 0.2 |

In tal caso la simulazione ha fornito risultati ottimali, fatta eccezione per la zona in cui è stata trascurata la presenza dell'argine. Tale configurazione è stata ritenuta quella ottimale.

Oltre al perimetro delle aree allagate, sono stati analizzati anche i livelli idrici in corrispondenza delle sezioni e delle infrastrutture e dall'analisi è emerso che, con questi valori di scabrezza, i valori sono quasi sempre coincidenti e nei punti in cui si discostano il delta non supera mai i 50 cm.

4. Interazione fenomeni idrologici e idrogeologici

Esiste una forte correlazione tre le condizioni di instabilità dei versanti e quelle di squilibrio in alveo. Possono verificarsi fenomeni di frana all'interno del corso d'acqua che generano deviazioni del flusso o sbarramenti ma può anche accadere che siano le portate elevate in alveo che, producendo forti fenomeni erosivi al piede, possono provocare instabilità del versante.

In questa seconda parte del lavoro di tesi ci si soffermerà sulla valutazione di quanto un fenomeno che si verifica lungo i versanti e abbia zona di deposito in alveo possa influenzare ed eventualmente amplificare un evento alluvionale. Come un qualunque altro sistema, anche un bacino risente di eventuali avvenimenti che ne vanno ad alterare l'equilibrio e questo provoca delle conseguenze di cui si risente sia monte che a valle dell'interferenza.

Possono verificarsi principalmente due tipologie di eventi:

- Occlusione parziale con ammassamento di materiale roccioso o detritico che rendono l'andamento del flusso più serpeggiante;
- Occlusione totale dell'alveo con deviazione del flusso o formazione di un lago a monte, a cui seguono fenomeni di rigurgito o repentini scarichi verso valle. In quest'ultimo caso se la conseguenza è la formazione del lago a monte il lago viene denominato di sbarramento. La massa responsabile dell'ingombro può essere assimilata ad una vera e propria diga che può collassare in tempi ragionevolmente brevi (giorni o settimane) oppure rimanere in alveo per alcuni anni e far sì che si crei un vero invaso naturale (per esempio Lago di Alleghe in Veneto).

Le ripercussioni dovute ad una frana per sbarramento si registrano dunque:

- A monte dello sbarramento, poiché per effetto di quest'ultimo possono verificarsi fenomeni di rigurgito e poiché, per effetto dell'innalzamento dei livelli, le aree allagate subiscono allargamenti in termini di estensione;
- A valle dello sbarramento poiché, in caso di sormonto e collasso della massa, si propagano onde di piena.

In uno studio effettuato nel 1991, Costa e Schuster hanno studiato 463 eventi di questo tipo ed hanno invidiato quali sono i fenomeni di dissesto che più spesso hanno provocato fenomeni di occlusione in alveo:



Figura 43 immagine tratta Crosta e Schuster (1991). Percentuali dei fenomeni che hanno provocato occlusione dell'alveo.

Altro fattore da non sottovalutare è l'estensione del solco vallivo e dimensione dell'alveo: solchi vallivi molto ristretti e inclinati in un alveo di notevoli dimensioni posso provocare uno sbarramento parziale ma la stesse condizioni in un alveo ridotto possono provocare occlusione totale e accumulo di cospicue quantità di acqua a monte [¹³] [¹⁴].

4.0.Quadro dei dissesti

In primis va definito il grado di pericolosità di frana in Valle d'Aosta. Per fare ciò ci si è serviti del Rapporto di Dissesto Idrogeologico ISPRA, all'interno del quale vengono riportati per l'intero territorio nazionale le zone a pericolosità di frana secondo quanto definito dal Piano di Assetto Idrogeologico (PAI). Tali zone sono rappresentative di zone in cui i fenomeni franosi sono già avvenuti, zone in cui è verosimile che si sviluppino e zone presumibilmente coinvolte.¹⁵

Vengono definite 5 categorie di pericolosità: molto elevata P4, elevata P3, media P2, moderata P1, aree di attenzione AA. È importante sottolineare che il mezzo di cui il PAI si serve per tale classificazione è il Progetto IFFI (Inventario Fenomeno Franosi in Italia). Segue un'immagine con la rappresentazione a scala regionale ma relativa a tutto il territorio nazionale delle zone interessate da classe di pericolosità P3 e P4 con allegata tabella contenente la percentuale di area coinvolta in relazione all'intera regione di riferimento. Immagine e tabella sono state reperite all'interno del Rapporto di Dissesto Idrogeologico ISPRA 2018¹⁵.



Figura 22 Mosaicatura, a livello regionale, delle zone interessate da pericolosità elevata e molto elevata.

| Tabella 10 Zone interessate da pe | ericolosità elevata e molto elevata |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
|-----------------------------------|-------------------------------------|

| Regione | Area regione | Aree di classe P3+P4 | | |
|-----------------------|--------------|----------------------|-------|--|
| | [km²] | [km ²] | % | |
| Piemonte | 25.387 | 1.230,8 | 4.8% | |
| Valle d'Aosta | 3.261 | 2.671,7 | 81.9% | |
| Lombardia | 23.863 | 1.538,2 | 6.4% | |
| Trentino-Alto Adige | 13.605 | 1.476,7 | 10.9% | |
| Veneto | 18.407 | 105,6 | 0.6% | |
| Friuli-Venezia Giulia | 7.862 | 190,5 | 2.4% | |
| Liguria | 5.416 | 751,9 | 13.9% | |
| Emilia-Romagna | 22.452 | 3.277,7 | 14.6% | |
| Toscana | 22.987 | 3.367,6 | 14.7% | |
| Umbria | 8.464 | 492,9 | 5.8% | |
| Marche | 9.401 | 735,5 | 7.8% | |
| Lazio | 17.232 | 953,3 | 5.5% | |
| Abbruzzo | 10.831 | 1.678,2 | 15.5% | |
| Molise | 4.460 | 716,9 | 16.1% | |
| Campania | 13.671 | 2.678,2 | 19.6% | |
| Puglia | 19.541 | 594,8 | 3.0% | |
| Basilicata | 10.073 | 511,6 | 5.1% | |
| Calabria | 15.222 | 545,6 | 3.6% | |
| Sicilia | 25.832 | 394,6 | 1.5% | |
| Sardegna | 24.100 | 1.497,6 | 6.2% | |
| Totale Italia | 302.066 | 25.410 | 8.4% | |

Emerge dunque che la Valle d'Aosta è la regione con la percentuale più alta di settori interessanti da valori di pericolosità per frana elevata e molto elevata.

Per il seguente lavoro di tesi sono stati analizzati i fenomeni di dissesto di tipo gravitativo, ovvero quelli riguardanti i versanti, mentre sono stati trascurati quelli quelli fluvio-torrentizi riguardanti i corsi d'acqua. Tra i fenomeni gravitativi individuati e considerati come interferenti al flusso sono state prese in considerazione le frane per scivolamento, crollo/ribaltamento e colamento.

Tale scelta è stata dettata principalmente dal fatto che tali cinematismi sono quelli maggirmente presenti nel tratto oggtto di studio:

- Frane per crollo collocate principalemente lungo i versanti sinistri e lungo il fondovalle;
- Scorrimenti e colamenti interessano principalmente lo strato di detriti e i depositi glaciali.

Inoltre, secondo quanto riportato nel Progetto IFFI, circa un terzo di tutti i fenomeni franosi in territorio Italiano sono di questo tipo.

4.1.Interazione sistema fluviale e dei dissesti in Valle d'Aosta

Nel Rapporto di Dissesto Idrogeologico ISPRA 2018¹⁵ sopracitato è possibile reperire informazioni circa la concomitanza di frane e alluvioni, in Figura si osservano le aree a pericolosità di frana secondo quanto stabilito nel PAI e le aree a pericolosità idraulica secondo il D. Lsg.49/2010.



Figura 21 Rappresentazione area a pericolosità idraulica e aree a pericolosità da frana. Datata 2017.

All'interno dello stesso documento viene riportato, per ogni regione:

- La percentuale del rapporto tra il numero di comuni della regione fratto il numero di comuni che sono caratterizzati da area a pericolosità P4 di frana e P2 idraulica;
- Estensione in termini di Km² delle aree a pericolosità idraulica media e di frana media ed elevata;
- Estensione in termini percentuali delle aree a pericolosità idraulica media e di frana media ed elevata.

| Regione | Numero di comuni/numero di | Aree di classe idraulica P | 2 a da frana P3 e P4 |
|-----------------------|--|----------------------------|----------------------|
| | comuni con area a pericolosità da frana elevata e pericolosità idraulica media | [km ²] | % |
| Piemonte | 94.3% | 3.217,8 | 12.7% |
| Valle d'Aosta | 100% | 2.713,2 | 83.2% |
| Lombardia | 84.4% | 3.815,6 | 16% |
| Trentino-Alto Adige | 91.5% | 1.547,7 | 11.4% |
| Veneto | 64.6% | 1.818,9 | 9.9% |
| Friuli-Venezia Giulia | 84.7% | 800,6 | 10.2% |
| Liguria | 100% | 902,2 | 16.7% |
| Emilia-Romagna | 100% | 13.496,4 | 60.1% |
| Toscana | 100% | 5.985,9 | 26% |
| Umbria | 100% | 829,2 | 9.8% |
| Marche | 100% | 975.6 | 10.4% |
| Lazio | 98.7% | 1.523,6 | 8.8% |
| Abbruzzo | 99.7% | 1.826,9 | 16.9% |
| Molise | 100% | 851.9 | 19.1% |
| Campania | 93.1% | 3.351,4 | 24.5% |
| Puglia | 89.1% | 1.485,6 | 7.6% |
| Basilicata | 100% | 786,4 | 7.8% |
| Calabria | 100% | 1.106,3 | 7.3% |
| Sicilia | 92.3% | 747,5 | 2.9% |
| Sardegna | 89.7% | 2.343,4 | 9.7% |

| T 1 11 1 | 10 . | . 1 | . 1 1 . | . 1 | 1 - | 1 | . 1 | |
|-----------|-------------------------------------|----------|-------------|-------------|--------|----------|-----------|----|
| ταπριια τ | $I \left(On COm II an 7 a \right)$ | nericolo | Inrologico | e iarnoen | INGIRA | su scala | regionale | , |
| I HOCHH I | 1 Conconnuanza | | inivitation | c ini ogcoi | ingico | Su scau | regionaic | ٠. |
| | | | | | | | | |
Dalla Tabella traspare che tutti in i 74 comuni della Valle d'Aosta sono presenti aree a pericolosità di frana elevata e pericolosità idraulica media, questo spiega perché la percentuale di aree di classe idraulica P2 e da frana P3 e P4 è la più alta tra quelle di tutte le regioni d'Italia con un valore pari all'83.2%.

Guardando i dati della documentazione di cui sopra è evidente che nella regione oggetto di studio, ai fini di una corretta valutazione dell'impatto che un evento alluvionale può avere, si deve necessariamente tenere conto dell'influenza che su di questo può avere un eventuale fenomeno di dissesto, soprattutto se tale fenomeno è caratterizzato dall'avere la zona in accumulo in alveo.

4.2. Settori omogenei in funzione dei processi di instabilità prevalenti e conseguenze in alveo¹⁶

L'analisi dei fenomeni di dissesto è strettamente correlata alla conformazione intrinseca della struttura, in accordo a quanto riportato nel Capitolo quarto della Relazione Generale redatta dall'Autorità di Bacino è possibile considerare una serie di aree uniformi all'interno delle quali ricadono particolari situazioni di rischio idraulico e idrogeologico.



Aree omogenee in funzione dei processi di instabilità prevalenti

Figura 44 Aree omogenee in funzione dei processi di dissesto

Per la divisione in queste omogenee l'Autorità di Bacino ha utilizzato diverse fonti quali studi specifici, piani di bacino e dati ISTAT; per ognuna di queste otto aree vengono inoltre definite le condizioni di eventuale dissesto idrogeologico.

Dalla Figura 35 emerge che la Dora Baltea valdostana ricade nel settore omogeneo montano alpino, il quale ha la peculiarità di coinvolgere, durante i fenomeni di dissesto, elevati volumi che spesso provocano sbarramento e occlusione dell'alveo.

I bacini ricadenti nel settore omogeneo montano alpino vengono ulteriormente divisi in *alti bacini montani*, *alti e medi bacini montati* e *medi e bassi bacini montani*¹⁷:

- Gli alti bacini montani sono di estrazione fluvio-glaciale, morfologicamente si presentano come piccole zone di depressione o ripiani di fondovalle. In questo caso ci si trova di fronte a grandi delta di pendenza nelle curve di fondo dei torrenti e questo rende anche una piena di piccola entità responsabile di un'elevata sedimentazione di materiale di origine alluvionale, che di solito è dovuto all'affluente. Spesso lo scenario può essere peggiorato da occlusioni d'alveo dovuti a frane o da fenomeni di occlusione dei ponti, ciò potrebbe provocare amplificazioni nella propagazione dll'onda di piena.
- Gli alti e medi bacini montani hanno la peculiarità di essere caratterizzate da valli poco larghe e versanti con pendenze elevate. Tali versanti sono composte da rocce cristalline caratterizzate da elevata resistenza, solo zone più circoscritte sono costituite da terreno e detriti.
- I medi e bassi bacini montani sono costituiti da estese valli di modellazione glaciale e da importanti affluenti. Tali affluenti sono, nella maggior parte dei casi, collegati all'asta principale mediante estesi coni di deiezione. La litologia è ben diversa nei fondovalle e lungo i versanti. Infatti nel fondovalle si trovano depositi alluvionali e fluvio-glaciali di sveriate dimensioni, i versanti sono costituiti di rocce cristalline ben stabili e rifinite nel caso in cui si tratti di versanti molto acclivi, mentre nel caso di quelli meno erti si trovano terreni morenici e detritici.

4.3. Focus del tratto di interesse

Per la seconda parte del seguente lavoro è stato ritenuto opportuno concentrarsi un tratto di Dora Baltea caratterizzato da minore estensione ma comunque sufficientemente rappresentativo. Questa scelta è stata dovuta a motivazioni di carattere puramente pratico. I tempi di simulazione richiesti per il tratto compreso da Aymavilles a Pont Saint Martin risultano essere infatti eccessivamente dilatati e, poiché per la seconda parte del lavoro si vogliono analizzare diversi scenari, sono preferibili tempi di simulazione più brevi. Il tratto di bacino scelto è caratterizzato dalla presenza di un affluente, ovvero il torrente Marmore ed attraversa sei comuni: Chambave, Saint Denis, Pontey, Chatillon, Saint Vincent e Montjovet.



Figura 45 Focus sul tratto di interesse per la seconda parte del lavoro di tesi

Le progressive di inizio e fine del ritaglio che si osserva in figura sono: 68432 km e 84607km, la sue estensione è dunque pari a circa 16km. Il tratto scelto è stato ritenuto sufficientemente rappresentativo per le seguenti motivazioni:

- In questa porzione di asta fluviale la calibrazione ha fornito risultati ottimali;
- È presente un affluente;
- È presente almeno un fenomeno per ognuna delle tipologie di dissesto oggetto di approfondimento;
- I fenomeni di dissesto di cui sopra, in caso di instabilità, interferiscono con il corso d'acqua.

Condizioni al contorno tratto di interesse

Il modello idraulico di cui ci si è serviti in questa seconda parte del lavoro è quello che è stato implementato e calibrato nella prima parte, ciò che cambia è l'estensione della flow area e dunque le condizioni al contorno da assegnare al dominio.

Condizioni al contorno esterne: monte e valle

Per la definizione dell'idrogramma in ingresso nel tratto di interesse, non si può prescindere dal fatto che gli idrogrammi per poter essere rappresentativi nel punto di ingresso del nuovo dominio devono essere traslati nel tempo e devono includere il contributo dato delle aree di bacino parziali. Essendo noti gli idrogrammi residui in corrispondenza diversi punti dell'asta principale ed essendo note le progressive di inizio e fine del tratto di interesse è stato sufficiente sommare i diversi contributi senza dover eseguire ulteriori operazioni e traslazioni.



Figura 46 Somma idrogrammi per la definizione dell'idrogramma in ingresso nel tratto di interesse

Le condizioni al contorno esterne risultano essere dunque le seguenti:

- condizione di monte definita come Flow Hydrograph inserendo l'idrogramma ottenuto considerando tutti i contributi di cui sopra e la pendenza, nel caso in esame pari a 0.007;
- condizione di valle definita come Normal Depth misurando la pendenza, in questo caso pari a 0.0012.

Condizioni al contorno interne: contributo affluenti interni al dominio

Come esposto precedentemente, tali condizioni vengono definite internamente all'area di flusso e permetto di tener conto del contributo dato dagli affluenti. Nel tratto di interesse vanno tenuti in considerazione i contributi dati del torrente Mormore e dell'idrogramma residuo fornito in prossimità dello stesso. L'idrogramma ottenuto e inserito come condizione al contorno interna in corrispondenza dell'affluente viene di seguito riportato.



Figura 47 Somma idrogrammi per la definizione della condizione al contorno interna

A questo punto, avendo particolarizzato il modello precedentemente implementato per il tratto su cui si vogliono approfondire le interazioni del corso d'acqua in caso di evento alluvionale con i fenomeni di dissesto, si procede con la caratterizzazione questi 'ultimi.

4.4.Caratterizzazione dei dissesti

Il settore sul quale si vuole effettuare l'approfondimento è caratterizzato principalmente da tre tipologie di dissesto: frane per scivolamento, crolli/ribaltamenti e colamenti. Tali fenomeni sono stati recensiti e catalogati all'interno del Progetto IFFI e la loro digitalizzazione è disponibile sul sito ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). Tale portale fornisce, per ogni fenomeno dissesto, una scheda descrittiva all'interno della quale vengono forniti i dati relativi al tipo di cinematismo, allo stato di attività, alla metodologia utilizzata per il rilevamento della frana, alla data di reperimento dati e all'estensione areale.



ISPRA-Servizio Geologico d'Italia

Figura 48 Mappa dei fenomeni di dissesto recensiti e catalogati nel progetto IFFI per il tratto di interesse [<u>http://sgi2.isprambiente.it/viewersgi2/</u>¹⁸_Sezione Progetto IFFI WMS_public].



Figura 49 Esempio scheda descrittiva consultable

Tra i fenomeni presenti, vengono considerati solo quelli classificati come movimenti di massa, ovvero quelli che si verificano per effetto della gravità e che riguardano propriamente i versanti. Inoltre, come si vedrà, in fase di modellazione i fenomeni di dissesto non verranno considerati in quanto tali ma come semplici interferenze al flusso, motivo per cui non verranno analizzati tutti i fenomeni presenti nella Figura 48 ma solo quelli che sono collocati in una posizione tale per cui, in caso di collasso, si riversano all'interno del canale. Nonostante i fenomeni di dissesto non vengano valutati in quanto tali risulta comunque necessario definire quali caratteristiche hanno le tipologie di dissesto individuate.

4.5. Movimenti di massa

Frane per scivolamento o scorrimento

Secondo quanto riportato nella classificazione di Cruden & Varnes 1996, le frane per scivolamento possono coinvolgere terreno, roccia e detrito e, in funzione della forma della superficie di scorrimento possono essere suddivise in¹⁹:

- Scivolamento rotazionale, ovvero il movimento avviene lungo una superficie di scorrimento curva con rientranza verso l'alto. Tra i fattori scatenanti di questi cinematismi rientrano le forti precipitazioni, infiltrazioni, rimozione di volumi alla base delle sponde dei versanti, fenomeni pulsatori naturali o artificiali. Tale fenomeno può manifestarsi con velocità estremamente lente (ordine di grandezza di cm/anno) oppure veloce (ordine di grandezza di m/s);
- Scivolamento traslazionale, in questo caso la superficie di scorrimento può essere di tipo planare, a cuneo o a gradino, solitamente con giacitura disposta a franapoggio. Nella maggior parte dei casi tali superfici coincidono con aree di adiacenza tra settori con diverse proprietà geomeccaniche o piani di faglia. I fattori che determinano l'avvio del cinematismo sono uguali a quelli definiti per gli scivolamenti rotazionali, valgono le considerazioni precedenti anche per quanto riguarda le velocità di movimento.

Ai fini del lavoro di tesi non si tiene conto di tale classificazione ed entrambe le classi vengono inglobate in un'unica categoria denominata scivolamento.

Frane per crollo/ ribaltamento

Le frane per crollo avvengono lungo pendii molto erti e coinvolgono principalmente roccia e detrito, quasi mai terreni. Si tratta di fenomeni rapidi la cui evoluzione avviene in pochi secondi e che si verificano per effetto della gravità, ovvero quando la resistenza al taglio lungo le fratture è inferiore rispetto alla forza peso che agisce sul blocco stesso.

Tale tipologia di fenomeno è caratterizzata, in seguito alla fase di distacco, da un tratto in caduta libera e, infine, da fenomeni di rimbalzo e rotolamento, i blocchi quindi possono muoversi per grandi distanze. È sempre ben riconoscibile una zona di accumulo dei blocchi, la forma e la dimensione di tali blocchi è strettamente legata alle discontinuità dell'ammasso. I crolli più frequenti sono quelli in roccia, il volume dei blocchi può andare da 0.5m³ fino a dimensioni maggiori di 100m³. Nel caso in cui si tratti di grandi volumi coinvolti, può succedere che il volume si suddivida in una serie di blocchi più piccoli interagenti tra loro. I ribaltamenti avvengono principalmente in roccia lungo discontinuità sono di tipo subverticale o subverticale e sono caratterizzati da un movimento rotatorio intorno a punto fisso posto più in basso rispetto al centro di massa. Tale fenomeno è caratterizzato dal fatto che nella maggior parte dei casi determina in un crollo o uno scivolamento. Crolli e ribaltamenti vengono si annoverano tra i fenomeni estremamente veloci, si manifertano infatti in pochi secondi.¹⁹

Colamenti (Flow)

Le colate o colamenti si distinguono, in funzione della velocità di propagazione del fenomeno, in colamenti lenti e colamenti veloci. I colamenti lenti come suggerisce lo stesso nome, sono caratterizzati da basse velocità di trasmissione del fenomeno. Tale velocità di propagazione è comunque in stretta relazione con l'acclività del versante e la presenza di acqua (nella maggior parte dei casi fattore scatenante per l'innesco del movimento). Le velocità risultano essere comunque variabili all'interno del volume in transito, le velocità presentano valori più elevati al centro e i/n superficie, in analogia a quanto accade ad un fluido viscoso. A differenza dei cinematismi analizzati in precedenza, in questo caso non si ha una superficie di scorrimento ben definita ma si hanno molteplici e istantanee superfici di scorrimento. Questi cinematismi compromettono prevalentemente terre e detriti. I colamenti veloci sono caratterizzati da velocità che raggiungono i 20m/s e, in base al materiale che viene convolto durante il fenomeno, si distinguono in colate di fango (mud flow) e colate di detrito (debris flow). Il fattore scatenante è dovuto al conferimento di considerevoli quantità di acqua proveniente da precipitazioni meteoriche o fusione nivale, anche in questo caso è particolarmente importante il fattore acclività del pendio.

Il volume in movimento è un composto di aria, acqua e sedimenti di dimensioni variabili e la dinamica del processo prevede:

- disgregazione puntuale che provoca l'innesco;
- fluidificazione del volume in movimento che si incanala nelle valli;
- esaltazione del processo e aumento dei volumi convolti dovuto a forte potere erosivo;
- blocco e deposito nelle aree dei conoidi alluvionali.

Quest'ultima fase si verifica in tali zone per effetto del notevole calo di pendenza e poiché si ha un allargamento della sezione del canale. È proprio in tali zone di deposito che si registrano le conseguenze più devastanti in quanto, durante tale fase, si ha la completa invasione zone che nella maggior parte dei casi sono antropizzate. La classificazione IFFI prevede anche la categoria dei fenomeni complessi, tali fenomi sono quelli noti come soil slip, ovvero eventi che si verificano per imbibizione degli strati superficiali e che si innescano come un movimento traslativo ma successivamente mutano in fenomeni di colamento rapido o flusso detritico torrentizio. Va specificato che il fenomeno di colata rapida di detrito è ben diverso dal flusso detritico torrentizio, in quanto la colata rapida di detrito viene classificata da Cruden & Varnes come fenomeno gravitavo, viceversa il flusso detritico torrentizio è definito un fenomeno fluvio-torrentizio che riguarda il corso d'acqua e agisce sull'incremento del traspoto solido. ¹⁹ Poiché nel seguente lavoro tale fattore viene trascurato, verrà considerato solo il possibile mutamento in colata.

4.6.Come tenerne conto in fase di modellazione

Più volte nei paragrafi precedenti è stato ribadito che, ai fini del lavoro, i fenomeni di dissesto sopracitati non vengono considerati in quanto tali ma come fenomeni interferenti ed amplificatori dell'evento di piena. Per considerarli tali e inserirli all'interno del modello risulta necessario:

- Stabilire quali, tra tutti i fenomeni gravitativi recensiti nel progetto IFFI, depositano volume e creano interferenza al corso d'acqua;
- Cercare una relazione che leghi le informazioni reperibili dalle schede descrittive con l'entità dei volumi coinvolti nel fenomeno.

Frane che possono creare interferenza al corso d'acqua

La carta geologica disponibile sul portale ISPRA ha permesso di definire quanti e quali fenomeni gravitativi sono presenti nel tratto di interesse. Tuttavia, si deve tenere in considerazione che non tutti gli eventi di disseto rappresentati in Figura 38 provocano delle interferenze al corso d'acqua, da un'analisi che valuta tale aspetto sono state identificate cinque aree caratterizzate da colamenti, due da crolli e due da scivolamenti.

Sono state individuate, nel comune di Chambave, aree interessate da colamenti e scivolamenti lungo il versante destro.



Figura 50 Fenomeni comune di Chambave

La scheda identificativa consultabile dal sito ISPRA consente di identificare i movimenti attraverso il codice ID frana, quello degli elementi riportato in Figura 41 viene di seguito riportato:

- 0073031600 Colamento rapido;
- 0073031700 Colamento rapido;
- 0075001700 Scivolamento rotazionale/traslativo;
- 0073058600 Colamento
- 0073032000 Colamento rapido.

Un'area interessata da crolli è stata individuata lungo il versante sinistro del comune di Saint Denis, ID frana 0075001400.



Figura 51 Crolli nel comune di Saint Denis

Il comune di Saint Vincent è interessato da un ampio colamento rapito collocato sul versante sinistro, ID frana 0076201600.



Figura 52Colamento comune di Saint Vincent

Nel comune di Monjovet è stato indentificato un ampio perimentro interessato da fenomeni di crollo/ribaltamento che interessanto i versanti destro e sinistro e da fenomeni di colamento rapido e scorrimenti lungo il versante sinistro.



Figura 53 Movimenti di massa comune di Monjovet

Segue l'ID frane che si collocano nel comune di Monjovet:

- 0075006802 Crollo/Ribaltamento;
- 0076006300 Scivolamento rotazionale/traslativo;
- 0073033100 Colamento rapido.

Individuati i movimenti di versante che possono creare interferenze lungo il fiume, occorre cercare delle relazioni che permettano di quantificare il volume che effettivamente viene riversato nel corso d'acqua. Tale argomento che viene affrontato sul paragrafo successivo.

Quantificazione dei volumi interessati dai fenomeni

In letteratura sono state trovate formule empiriche e pubblicazioni che hanno permesso di calcolare, a partire da informazioni reperibili dalle schede descrittive, i volumi coinvolti che possono potenzialmente riversarsi nel corso d'acqua e creare un'interferenza.

Frane per scivolamento

Gli studi riguardanti questo tipo di fenomeno di dissesto permettono di legare l'estensione areale interessata dal fenomeno (in m²) ai volumi che potenzialmente potrebbe convogliare il fenomeno stesso (in m³), in particolare ci si riferisce ad uno studio di 676 frane per scivolamento, dovute a diversi fattori scatenanti, distribuite in modo omogeneo e collocate in Umbria. È stato fatto uno studio su una serie di eventi accaduti in un periodo di tempo pari a cinque anni, ovvero dal 1937 a 1941.²⁰ La formula empirica ricavata è la seguente:

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.450}$$
 [1.10]

Il volume V_L risulta essere legato all'estensione areale del fenomeno A_L da una legge di tipo esponenziale, in cui l'esponente di scala α è pari a 1.450.²⁰

Nel tratto di interesse, servendosi delle informazioni presenti sul portale ISPRA di cui si è parlato precedentemente, è stato possibile ottenere informazioni relative all'estensione areale di tali fenomeni e in seguito, attraverso l'applicazione della suddetta formula, sono stati calcolati i volumi che possono potenzialmente staccarsi e transitare ostruendo parzialmente o totalmente il corso d'acqua.

Segue una tabella in cui vengono riportati i valori delle aree e dei volumi, questi ultimi calcolati mediante la sopracitata formula empirica.

| Tabella 12 Entità volumi coinvolti mediante l'applicazione della formula empiri | ula empirica |
|---|--------------|
|---|--------------|

| ID IFFI frane | Comune | Area [m ²] | Volume [m ³] |
|---------------|-----------|------------------------|--------------------------|
| 75001700 | Chambave | 33656.77 | 271323.09 |
| 76006300 | Montjovet | 6889.2 | 27200.47 |

Frane per crolli

Questo tipo di fenomeno avviene principalmente in roccia e detrito. In questo caso, pur avendo a disposizione i dati relativi all'estensione areale che è interessata da tele fenomeno è piuttosto difficile stabilire i volumi dei singoli blocchi coinvolti perché, per fare ciò, bisognerebbe essere a conoscenza delle discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso e delle peculiarità di tali discontinuità, quali persistenza, giacitura e spaziatura.Per la conoscenza del numero e della dimensione dei blocchi di un ammasso si può procedere in diversi modi:

- Rilievo in situ;

-Tecniche di laser scanner e rilievi fotografici per la costruzione della curva IBSD (InSitu Block Size Distribution);

-Modelli numerici.

Quelle appena elencate sono solo alcune delle tecniche disponibili, si tratta però di approcci che richiedono studi specifici e un numero di parametri rilevante, motivo per cui per il seguente lavoro di tesi si è fatto affidamento agli eventi avvenuti in passo e ai volumi che mediamente interessano il tratto oggetto di studio.

È possibile distinguere le aree di crollo di medie e grandi dimensioni in funzione del diametro medio dei blocchi e dei volumi coinvolti²¹: vengono definite aree di crollo di medie dimensioni quelle che coinvolgono volumi tra 100 e alcune centinaia di migliaia di m³; vengono definite aree di crollo di grandi dimensioni quelle che coinvolgono volumi di almeno 1.000.000m³.

È stata fatta una ricerca sui vari eventi di crolli che hanno coinvolto il tratto di interesse e da tale ricerca è emerso che i volumi coinvolti variano da centinaia a migliaia di m³, si hanno quindi crolli di medie dimensioni. Per l'inserimento in fase di modellazione verranno definiti una serie di scenari determinati come segue: si prenderanno dei volumi tra quelli trovati dalla documentazione relativa ad eventi avvenuti in passato e, sulla base di questi, si ipotizzeranno il numero, la forma (per esempio cubo, ottaedro, dodecaedro) e i volumi dei singoli blocchi coinvolti. Poiché per l'inserimento di tali volumi il solido geometrico dovrà essere digegnato su GeoHECRAS, risulta più semplice e preiso ipotizzare che tutti i blocchi abbiano forma cubica.

Le informazioni derivanti dal progetto IFFI saranno comunque utili per la collocazione speziale in prossimità del quale verrà inserito in alveo il volume distaccato.

Se si considera un volume che si stacca dalla parete pari a 2000m³, tale volume può essere inserito come:

- Un unico blocco di forma cubica con *L* pari a 13m;
- Due blocchi cubici da $1000m^3$, con L pari a 10m;
- Due blocchi, uno di volume 1500 m³, con L pari 11m, e un blocco di volume 500m³ con L 8m.

Se si considera un volume che si stacca dalla parete pari a 5000m³, tale volume può essere inserito come:

- Due blocchi, uno di volume $3000m^3$, con L 14m, e uno di volume $2000m^3$ con L 13m.
- Cinque blocchi con volume di 1000m³ e latto 10m;
- Sette blocchi, cinque con volume $500m^3 e L 8m e due blocchi di volume <math>1250m^3 e L 11m$.

Se si considera un volumeche si stacca dalla parete pari 600m³, tale volume può essere inserito come:

- Unico blocco da $600m^3 e L 8m;$
- Due blocchi, uno di $400\text{m}^3 \text{ con } L$ 7m e uno di $200\text{m}^3 \text{ con } L$ 6m.

Colamenti (Flow)

La quantificazione dei volumi convolti durante tale fenomeno di dissesto è tutt'altro che semplice, motivo per cui all'interno del seguente lavoro ci si è serviti di approcci e metodologie reperiti in letteratura. Vengono fornite differenti strategie che prevedono utilizzo di formule empiriche, semiempiriche oppure il metodo geomorfologico. Per il seguente lavoro è stato utilizzato l'approccio semi-empirico proposto da Takei (1984), attraverso il quale è possibile stimare il volume atteso di sedimenti depositati. La formula proposta da Takei è frutto di uno studio eseguito in Giappone all'interno del quale sono stati analizzati 551 fenomeni avvenuti tra il 1973 e il 1977 e viene di seguito riportata²².

$$V_d = 0.914 \cdot V_s^{0.838}$$
 [1.11]

Nella quale:

- V_d è il volume dei sedimenti depositati;
- V_s è il volume della frana, per il quale si fa riferimento a quanto riportato nel DRM (1990), all'interno del quale per ogni tipologia di frana viene definito il volume spostato che, per i colamenti ricade in un intervallo che va da 10⁴ m³ a 10⁶ m³.

Noto il volume depositato è anche possibile definire l'estensione dell'area inondata da tali sedimenti, per fare ciò si ricorre agli studi effettuati da Hungr et al. nel 1987 in Canada Occidentale²³, attraverso i quali è possibile andare a calcolare l'area inondata dai sedimenti, ovvero quelle che Hungr et al. hanno definito "limite della zona di deposito".

$$A = k * V_d^{\frac{2}{3}} [1.12]$$

In cui:

- V_d è il volume di sedimenti depositato;
- A è l'estensione dell'area sopra la quale di distribuiscono i sedimenti;
- K è un parametro definito da diversi autori che varia in funzione di del tipo di materiale in cui avviene il fenomeno e la regione geografica. Nel caso in esame è stato utilizzato quello suggerito da Griswold (2004) pari a 19.9.

Negli studi di Hungr et al. vengono inoltre definiti i valori degli spessori medi che caratterizzano il deposito, tali spessori hanno valori compresi tra 1.0m e 1.5m.²⁴

Tabella 13 Specifiche fenomeni di colamento utilizzando le formule proposte da Takei e Hungr et al.

| ID IFFI frane | Comune | Vs [m ³] | Vd [m³] | A [m] | Spessore [m] | | |
|---------------|---|--|--|--|---|--|--|
| 73031600 | Chambave | 10000 | 2055.6 | 3217.2 | 1.2 | | |
| 73031700 | Chambave | 10000 | 2055.6 | 3217.2 | 1.2 | | |
| 73058600 | Chambave | 10000 | 2055.6 | 3217.2 | 1.2 | | |
| 73032000 | Chambave | 10000 | 2055.6 | 3217.2 | 1.2 | | |
| 76201600 | Saint-Vincent | 100000 | 14156.2 | 11645.3 | 1.5 | | |
| 73033100 | Montjovet | 1000 | 298.5 | 888.8 | 1 | | |
| | ID IFFI frane 73031600 73031700 73058600 73032000 76201600 73033100 | ID IFFI frane Comune 73031600 Chambave 73031700 Chambave 73058600 Chambave 73032000 Chambave 76201600 Saint-Vincent 73033100 Montjovet | ID IFFI franeComuneVs [m³]73031600Chambave1000073031700Chambave1000073058600Chambave1000073032000Chambave1000076201600Saint-Vincent10000073033100Montjovet1000 | ID IFFI franeComuneVs [m³]Vd [m³]73031600Chambave100002055.673031700Chambave100002055.673058600Chambave100002055.673032000Chambave100002055.676201600Saint-Vincent1000014156.273033100Montjovet1000298.5 | ID IFFI franeComuneVs [m³]Vd [m³]A [m]73031600Chambave100002055.63217.273031700Chambave100002055.63217.273058600Chambave100002055.63217.273032000Chambave100002055.63217.276201600Saint-Vincent1000014156.211645.373033100Montjovet1000298.5888.8 | | |

5. Modellazione frane in alveo

A questo punto si vuole valutare l'effetto creato da uno dei fenomeni gravitativi di cui sopra. Nel caso in cui ci si trova di fronte a piccoli volumi che non creano sbarramenti parziali o totali è possibile inserire tali elementi nel modello come ostruzione al flusso (Conveyance Obstruction). Il manuale consiglia di utilizzare tale tool proprio quando si vogliono evidenziare degli elementi che vanno ad impedire e ad ostacolare il flusso. Anche in questo caso, in seguito all'inserimento risulta fondamentale la rigenerazione della maglia di calcolo che, in corrispondenza di tali strutture, dovrà avere un livello di dettaglio maggiore. In tal caso, l'ostacolo viene aggirato dal flusso, il che provoca dissipazioni energetiche ed un affetto cui si risente poco e a livello strettamente locale o addirittura non si risente affatto. Quando si vuole a valutare l'effetto creato da uno sbarramento dell'alveo si presentano diverse problematiche legate alla modellazione della frana nel fiume. Spesso tale fenomeno viene approssimato ad una diga in terra, per il caso in esame tale approssimazione non è stata ritenuta accettabile in quanto una diga in terra è caratterizzata da una geometria ben definita, è costituita da materiale ben compattato ed omogeneo ed è impermeabile. Un fenomeno gravitativo è invece caratterizzato da materiale eterogeneo, anisotropo, poco compattato e con geometria dello sbarramento irregolare. L'operazione che consente di simulare tali condizioni nel nodo più reale consiste nell'approssimare l'interferenza ad una fenomeno noto come diga frana.

Viene definito tale un accumulo di materiale in alveo dovuto ad un fenomeno gravitativo innescatosi a causa di precipitazioni o processi di fusione nivale²⁵.

Le dighe frana rientrano, insieme alle glaciali e a quelle moreniche di età tardo neoglaciale, tra le dighe naturali, ovvero quelle che determinano sbarramento e formazione di laghi di invaso ma che derivano da processi di dinamica ambientale e dunque non sono costruite o progettate dall'uomo. Questa particolare tipologia di diga naturale è maggiormente presente nei bacini montuosi e alpini, nei quali la morfologia del territorio è caratterizzata dalla presenza di vallate molto strette con versanti acclivi. Tale approccio è stato considerato il migliore perché è quello che più si avvicina alla simulazione dell'evento reale, tenendo conto sia dell'effetto dello sbarramento sia del fatto che tale sbarramento sia costituito da materiale proveniente da un fenomeno gravitativo e quindi, come detto precedentemente, è eterogeneo, anisotropo, poco compattato e con geometria dello sbarramento che è irregolare. Di tale aspetto si riesce a tener conto valutando correttamente le dinamiche di ampliamento della breccia, non si riesce comunque a valutare il contributo dovuto all'acqua che attraversa la diga in quanto utilizzando tale approccio la diga è impermeabile. L'approssimazione viene comunque ritenuta ragionevole perché, oltre alle motivazioni di cui precedentemente, le dighe frane possono essere causate da tutti i fenomeni gravitativi identificati nel tratto oggetto di studio, quindi da scivolamenti, crolli e colate.



Figura 54 Tipi di frane che generano diga frana ²⁶

Secondo quanto riportato in Costa e Schuster le cause scatenanti di tali fenomeni sono, nella maggior parte dei casi, pioggia o fenomeni di fusione nivale (42%). Poiché precipitazioni e fusione nivale concorrono anche alla formazione di onde di piena nel tratto di interesse, è verosimile analizzare l'evento alluvionale con l'interferenza dovuta a tale sbarramento. L'ipotesi di lavoro prevede che lo sbarramento si crei prima dell'inizio della propagazione dell'onda di piena e che venga coinvolto dal flusso e interferisca con esso non appena venga simulata la propagazione.

Normalmente le dighe frane si presentano come strutture basse, costituite da materiale non coeso ed eterogeneo e tendono a collassare rapidamente. In letteratura sono presenti studi effettuati su un campione di 184 dighe frane di tutto il mondo che hanno portato ad una classificazione di tali strutture in funzione della configurazione che assumono rispetto al fondovalle²⁵:

 Le dighe di tipo I, che rappresentano solo l'11% delle dighe frane, sono quelle che comportano solo una parziale ostruzione dell'alveo. Questa tipologia di diga frana determina la formazione di laghi a monte poco pericolosi, in quanto caratterizzati da ridotta estensione e profondità.



Figura 55 Diga frana di tipo I²⁶

 Le dighe di tipo II provocano una totale ostruzione dell'alveo e, frequentemente, versano anche nella parte opposta della valle, in questo caso la percentuale di incidenza è pari al 44%. In tal caso la pericolosità è maggiore perché si creano laghi ampi.



Figura 56 Diga frana di tipo II²⁶

- Le dighe di tipo III sono quelle in grado di percorrere tratti, anche di notevole estensione, a monte e a valle della frana, rappresentano il 41%.



Figura 57 Diga frana di tipo III²⁶

Le dighe di tipo IV e di tipo V si verificano sporadicamente (<1%) e avvengono quando cadono elementi da ambedue i versanti della valle (tipo IV) oppure quando un singolo distacco provoca due o più sbarramenti lungo il fiume (tipo V). Questa tipologia è particolarmente pericolosa quando si presenta in valli molto strette.



Figura 58 Diga frana di tipo IV e V²⁶

 Le dighe di tipo VI, con una percentuale di incidenza pari al 3%, hanno la peculiarità di propagarsi al di sotto della valle ed affiorare sulla sponda prospiciente.



Figura 59 Diga frana di tipo VI²⁶

Le dighe frana, qualunque sia la categoria di riferimento sono soggette, in tempi che si estendono da qualche minuto/ora a decine di giorni o anni, a fenomeni di collasso [*Figura 61*]. È proprio tale aspetto che rende maggiormente critico il fenomeno in quanto possono verificarsi alluvioni sia a monte della struttura a causa dello sbarramento, sia allagamenti e propagazione di un'onda di piena verso valle dovuti al collasso della diga frana. Le conseguenze dovute al collasso della diga sono molto più devastanti di quelle dovute alla formazione del lago di monte, in quanto la formazione di quest'ultimo avviene molto lentamente e dunque sono a disposizione tempi sufficienti per l'eventuale messa in sicurezza degli elementi esposti.



Figura 60 Durata pre-collasso dighe frana. caso studio 184 dighe frana in tutto il mondo.²⁶

Non tutte le modalità di fallimento di una diga artificiale interessano anche una diga naturale, per quest'ultima il collasso di verifica principalmente per l'effetto di superamento della diga (in *Figura 62* si osserva come l'overtopping per dighe frana è causa di fallimento nel 91% dei casi).



Figura 61 modalità di fallimento dighe frana e dighe artificiali²⁶

Tale fenomeno può essere schematizzato come segue:

- Superamento, si verifica quando i livelli del lago a monte superano l'altezza della diga. L'acqua inizia

 a defluire dall'estremità superiore dello sbarramento ma all'inizio si verifica semplicemente un
 processo erosivo a valle dello sbarramento.
- *Creazione della breccia*, si verifica per l'effetto dato dell'acqua che continua a defluire sulla parte superiore della diga e da inizio al processo di erosione anche della parte centrale della cresta, dando origine al una breccia nella struttura.
- *Ampliamento breccia,* il fenomeno erosivo continua e la breccia si allarga fino a quando non viene raggiunto il livello del letto del canale.

La modellazione della frana in alveo nel seguente lavoro viene modellata ipotizzando che la violazione avvenga seguendo la dinamica di overtopping. Il software permette di simulare tale dinamica mediante la definizione dei parametri della breccia e della legge con cui essa si amplia.

5.0. Definizione parametri ed inserimento nel modello $[2^{6}]$ $[2^{7}]$ $[2^{8}]$

Stabilito dunque che è possibile valutare l'interferenza e l'amplificazione di un evento alluvionale data dai fenomeni di dissesto approssimando la frana ad una diga frana, bisogna definire quali siano le geometrie della diga e soprattutto quali siano le dimensioni della frattura.

GeoHECRAS consente di modellare il fenomeno all'interno del dominio di flusso bidimensionale definito attraverso il tool *Dam Break* (posto tra le opzioni interne delle aree che consentono di collegare due aree di flusso bidimensionale, ovvero il comando *SA/2D Connention*). L'approssimazione fatta dal software per simulare il fenomeno prevede la definizione di un muro di una certa altezza (che sarà l'altezza della diga frana) sul quale ad un certo punto si creerà e continuerà ad ampliarsi una breccia. È importante sottolineare dunque che il modello non simula i processi di formazione dell'apertura ma considera che la rottura nella parte sommitale avvenga istantaneamente dopo un certo intervallo temporale e in corrispondenza di un certo tirante al sopra della diga e che poi, l'estensione di questa apertura, aumenti con una certa legge fino al raggiungimento del fondo dell'alveo.

Le grandezze richieste dal software per simulare il Dam Break:

- Altezza della diga frana Hd;
- Geometria della breccia Hb, Wb e Z ovvero altezza, larghezza base e pendenza;
- Tempo di formazione della breccia Tf;
- Elevazione al di sopra della diga necessaria per la formazione della breccia, pari a 0,5m;
- Legge che definisca ampliamento nel tempo della breccia.



Figura 62 Sezione trasversale con parametri di controllo

L'unico dato input per la determinazione delle suddette grandezze è il volume della diga frana, che equivale al valore di volume che potenzialmente può staccarsi dal versante o comunque ad una sua percentuale.

Altezza diga frana

Per la determinazione dell'altezza della diga frana si è fatto riferimento a studi e pubblicazioni scientifiche in cui sono stati analizzati numerosi casi di dighe frane. Da un'analisi quantitativa derivata da 182 casi di diga frana in tutto il mondo e da 232 casi in Nuova Zelanda è stato proposto un grafico che consente, noti i volumi della diga frana, di ottenere un odine di grandezza dei volumi dei laghi che si creano a monte dello sbarramento.



Figura 63 Volume diga frana e volume del lago a monte dello sbarramento

Noto il volume del lago che può essere generato dallo sbarramento è stato possibile determinare l'altezza della diga frana utilizzando il seguente grafico, ottenuto studiando 52 casi di dighe frane violate.



Figura 64 Relazione volume lago e altezza diga frana

A questo punto, nota l'altezza dello sbarramento naturale, ci si chiede come sia possibile simulare tale struttura. Nella fase di inserimento nel modello viene fatta una grossa approssimazione, in quanto si assimila la diga frana ad un vero e proprio muro di altezza Hd. Durante la modellazione non si riuscirà dunque a tener conto dell'infiltrazione e del deflusso di acqua che nella realtà attraversano la massa eterogenea e non compatta della frana.

Geometria della breccia e tempo

Come già detto precedentemente, il modello di Dam Break non consente di simulare il processo di formazione dell'apertura nell'ammasso ma considera che la rottura avvenga istantaneamente e che successivamente sia soggetta ad un ampliamento (viene richiesta la definizione della legge che definisce l'ampliamento nel tempo dell'apertura). In letteratura vengono proposte diverse forme della frattura ma per le dighe frana viene proposto un varco di forma trapezoidale. Questo perché è rilevante il fattore erosione e quindi anche una breccia con una forma inziale triangolare o rettangolare viene erosa ai lati e assume tale forma. Le pendenze dei lati destro e sinistro del trapezio nella realtà possono essere diverse, possono inoltre variare durante l'ampliamento della breccia. In fase di modellazione non si può tener conto di tale aspetto, motivo per cui si considera una pendenza costante per tutta la durata del pari 1:1.

I parametri da determinare per definire in modo completo la geometria dell'apertura sono:

- Hb, ovvero l'altezza della breccia;
- Wb, ovvero la larghezza della parte più bassa della frattura (base minore del trapezio).

In letteratura sono disponibili numerose formule e approcci grafici per la determinazione di tali parametri ma nella maggior parte dei casi, tali metodologie vengono fornite basandosi sulla considerazione che è possibile assimilare una diga frana ad una diga in terra. Da altre pubblicazioni emerge però che nonostante tale approccio sia quello più spesso utilizzato, fornisce nella maggior parte dei casi dei risultati che non corrispondono alla realtà. Per tale motivazione la stima dei suddetti parametri nel seguente lavoro è stata fatta utilizzando modelli empirici, basati su regressioni multi-parametriche, ottenute studiando 1239 fenomeni di diga frana che, come si osserva in figura, comprendono dighe frane da tutto il mondo.²⁶



Figura 65 Dighe frana utilizzate per l'analisi

Le formule utilizzate nel seguente lavoro sono state ricavate definendo delle variali di controllo, quelle utili per la determinazione dei parametri di interesse sono:

- 1. Fattore di altezza della diga $(\frac{H_d}{H_r})$;
- 2. Coefficiente di forma del lago $(\frac{V_l^{\frac{1}{3}}}{H_d});$
- Erodibilità (α), si fa riferimento a Briaud 2008 e dunque tale parametro viene assimilato ad una variabile discreta che può assumere tre valori: alta, media e bassa.

H_r e T_r sono pari ad 1 e rappresentano altezza e tempo di riferimento.

Nel lavoro di tesi, per la determinazione dei paramenti Hb e Wb sono state utilizzate le seguenti equazioni (al coefficiente di erodibilità è stato già sostituito il valore corrispondente ad erodibilità media):

$$\frac{H_b}{H_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.923} \cdot \left(\frac{V_l^{1/3}}{H_d}\right)^{0.118} \cdot e^{-0.673} \quad [1.12]$$

$$\frac{W_b}{H_d} = 0.003 \left(\frac{H_d}{H_r}\right) + 0.070 \left(\frac{V_l^{1/3}}{H_d}\right) + 0.344$$
 [1.13]

Tempo di formazione della breccia T_f

Lo studio di cui ci si è serviti per il calcolo dell'altezza e della base inferiore della breccia fornisce una formula anche per il calcolo del tempo di formazione della frattura iniziale. Viene però specificato che, per tale parametro, vengono restituiti risultati meno attendibili, motivo per cui la stima di T_f è stata fatta utilizzando il grafico di seguito riportato. Per la definizione di T_f viene utilizzato come dato di input il valore del lago che potrebbe potenzialmente crearsi a monte dello sbarramento e si fa riferimento alla retta relativa alla diga frana.



Figura 66 Legame volume lago di sbarramento e tempo di formazione della breccia

6. Presentazione caso studio e discussione risultati

La dinamica di allagamento è strettamente legata alla conformazione morfologica dell'area analizzata. Già nel capitolo precedente è stato detto che tale fenomeno più avvenire in diverse condizioni, ovvero alveo in corrispondenza di una forte incisione valliva oppure zona più pianeggiante. La risposta di un fenomeno di questo tipo in corrispondenza di una forte incisione valliva dovrebbe teoricamente essere analoga a quella classica di Dam Break, ovvero formazione del lago a monte, iniziale laminazione e successivo collasso con propagazione di un'onda di piena potenzialmente più disastrosa. In realtà, poiché la geometria della diga frana si presenta sempre con altezze non molto elevate nel lago di monte non si accumuleranno mai volumi tali per cui l'onda di piena transitante verso valle sia particolarmente disastrosa. Tale dinamica è stata confermata analizzando il fenomeno gravitativo del comune di Monjovet, ciò che è emerso è che le dinamiche di allagamento e l'estensione delle aree allagate non subiscono variazioni mentre si registra una variazione dei parametri idraulici (velocità e tiranti) a monte e a valle dello sbarramento. Non si verifica una variazione del perimetro di allagamento in quanto la forte incisione valliva è interamente occupata dall'acqua già in condizioni di piena standard.



Figura 67 Caso studio comune di Monjovet

Una frana può creare un'ostruzione in alveo anche in corrispondenza di una zona pianeggiante, in tal caso la dinamica di allagamento può risentirne enormemente, in particolare in termini di estensione delle aree allagate. Per studiare questo fenomeno è stato scelto un fenomeno gravitativo collocato del comune di Chambave. Nel seguente capitolo si è deciso di analizzare proprio tale caso studio, il quale presenta maggiori particolarità e criticità in quanto, in caso di presenza di fenomeno gravitativo, le dinamiche di allagamento subiscono rilevanti mutazioni rispetto alla dinamica di allagamento in condizioni di evento alluvionale di riferimento.

6.0.Caso studio

Per la valutazione del delta di variazione dell'estensione delle are allagate e delle dinamiche di allagamento è stato analizzato lo scorrimento collocato nel comune di Chambave.



Figura 68 Scivolamento che è stato identificato per essere modellato come una diga frana

La scelta di questo fenomeno è stata dettata dalle seguenti motivazioni:

- Entità dei volumi potenzialmente coinvolti;
- Possibilità di valutare se gli elementi esposti a cui, in condizioni di piena standard, viene attribuita una vulnerabilità pari a zero presentino, in presenza di inferenza, valore di vulnerabilità pari ad uno.

L'ipotesi di lavoro prevede che tutto il volume potenzialmente instabile si depositi in alveo e provochi un'ostruzione totale. Inoltre, si considera che la zona di accumulo del materiale inizi dal piede del versante, interessi tutto l'alveo inciso e continui oltre le sponde. Il che implica che si considera una diga frana di Tipo II. Si ricorda che si tratta di un modello teorico che vuole riprodurre condizioni semplificate che non necessariamente devono essere realistiche, inoltre trattandosi di un'ipotesi per eccesso si è sicuramente a favore di sicurezza.

A questo punto, noti i volumi di materiale coinvolto è possibile, utilizzando le relazioni definite nel paragrafo precedente, ottenere la geometria della diga frana e i parametri caratteristici della breccia.

Segue il flowchart delle operazioni eseguite e dei valori ottenuti:

V diga=V frana= $2.7*10^5$ m³

Da figura 55

V lago che potenzialmente potrebbe crearsi a monte $=6*10^4 \text{ m}^3$

Da figura 58 T_f=0.68h *Da figura 56* Hd=5.8m *Da formule 1.6 e 1.7* Hb =3.2m Wb=4.8m.

I paramenti caratteristici della breccia di cui sopra sono quelli riferiti all'apertura istantanea della breccia, tale apertura viene simulata dal software in corrispondenza di un tempo pari a 0.68 ore, ovvero 20 minuti circa. Come detto precedentemente, la breccia poi continuerà ad ampliarsi fino a raggiungere la quota del canale e per simulare tale evoluzione dell'apertura è stato necessario definire ed inserire all'interno del software una legge di apertura della breccia. La legge che definisce l'amplificazione dell'apertura nel tempo viene ipotizzata di tipo lineare: il contributo delle grandezze in termini percentuali è stato calcolato normalizzando la configurazione corrispondete alle 0.68h rispetto alla configurazione finale (*Figura 70*).



Figura 69 Configurazione finale della Breach structure su GeoHECRAS



Figura 70 Legge di apertura della breccia definita per il caso in esame

6.1. Risultati

Al termine della simulazione si distinguono dunque due configurazioni: configurazione standard e configurazione con interferenza (le considerazioni vengono fatte solo su tale porzione in quanto da precedenti simulazioni è emerso che, considerando un'estensione di circa 4.3km, si riescono a valutare tutte le discrepanze e gli effetti dovuti dallo sbarramento).



Figura 71 Perimetri aree allagabili con e senza l'interferenza

Da una prima analisi prettamente qualitativa si osserva che, come ci si aspettava, la presenza di uno sbarramento provoca un'amplificazione dell'evento alluvionale considerato.

Una dinamica di allagamento di questo tipo è dovuta ad una serie di criticità che, sommate al contributo dello sbarramento, portano all'allagamento del nucleo abitato del comune di Chambave e di alcune aree collocate di là dell'autostrada, tra le quali si annoverano una zona riservata al campeggio e altre infrastrutture. Nel caso oggetto di approfondimento la Dora non è incanalata tra versanti acclivi ma ci si trova di fronte ad una configurazione in cui le quote in zona golenale presentano andamento pressoché costante. Tale configurazione fa sì che si verifichino allagamenti già in condizioni di evento alluvionale standard.



Figura 72 Zoom DTM in prossimità dell'interferenza



Figura 73 modellazione interferenza su GEOHECRAS

Il fenomeno gravitativo che crea lo sbarramento è uno scivolamento, la zona di accumulo dunque parte dal piede del versante. Questo spiega perché lo sbarramento viene tracciato a partire dal versante acclive posto sulla sponda destra del fiume. Tale configurazione fa sì che il flusso d'acqua non possa essere soggetta a separazione o eccessivo accumulo ma che venga deviata verso la parte sinistra del fiume la quale, come detto precedentemente non presenta particolari variazioni in termini di quote.

Il flusso viene dunque deviato e provoca l'allagamento di zone che altrimenti non verrebbero coinvolte dal fenomeno.

Per comprendere bene i fenomeni che si presentano è necessario eseguire un'analisi quantitativa misurando la variazione dei parametri idraulici in gioco con e senza la presenza dell'interferenza.

La presenza di un ostacolo all'interno del corso d'acqua genera un'alterazione dell'assetto idrometrico e una dissipazione di energia che è funzione delle caratteristiche idrauliche e geometriche specifiche del caso.

Uno sbarramento provoca un'interruzione della continuità del flusso, motivo per cui nel canale è possibile valutare l'interazione della corrente con l'ostruzione e monitorare la variazione dei parametri idraulici dovuti da tale fenomeno a monte e a valle dello sbarramento.

L'evento alluvionale analizzato è caratterizzato da tre picchi di piena:

- Il primo, il più basso, che avviene alle ore 22:00 del giorno 13 ottobre con un valore pari a 791.5 m³/s;
- Il secondo, che avviene alle ore 12:00 del giorno 14 ottobre con un valore pari 1364.87 m³/s;
- Il terzo, che avviene alle 04:00 del giorno 15 ottobre con un valore pari a 1654.29 m³/s.



Figura 74 Idrogramma evento alluvionale con identificazione dei picchi

L'analisi della risposta del corso d'acqua e della variazione dei parametri è stata possibile grazie ad un tool presente su GeoHECRAS che consente di tracciare delle sezioni e di osservare in prossimità di esse la variazione delle grandezze. Sono state tracciate due sezioni, una a monte e una a valle dell'interferenza ed è stata fatta un'analisi critica delle grandezze in prossimità di tali zone.

13 ottobre ore 02:00



Figura 75 Mappa di allagamento 13 ottobre ore 02:00

Come si osserva in figura, in tale istante il flusso viene fermato dalla presenza dello sbarramento dovuto alla presenza della frana. Questo implica che la breccia non si è ancora formata e che dovrebbe iniziare l'accumulo di volumi a monte dello sbarramento. Segue un'analisi dell'evoluzione delle grandezze:



Figura 76 Flood depth a monte e a valle della frana. ore 02:00 del giorno 13 ottobre

Il flusso a valle dell'interferenza è nullo questo perché, come affermato precedentemente, la breccia non si è ancora formata. A monte si registra invece un livello massimo pari a 5.48m. Rispetto alla configurazione standard di allagamento, quello che si registra è un aumento dei tiranti a monte dell'interferenza, tale aumento è dovuto alla presenza dello sbarramento che fa sì che si verifichi un rialzo idraulico, di circa 4m. I tiranti passano infatti da un valore di 1.41m senza la frana a 5.48m con la presenza della frana.

Si risente dell'incremento del livello anche in corrispondenza del ponte che si trova immediatamente a monte dello sbarramento:



Figura 77 Livelli in corrispondenza del ponte

Rispetto al livello raggiunto in condizioni di piena standard, pari a 471.65 m s.l.m., ovvero 5.43m, in caso di interferenza si verifica un amento a monte del ponte pari a 64 cm. In tal caso è comunque garantito il metro e mezzo di franco rispetto all'apertura dell'arco e il ponte non viene allagato.

La presenza dello sbarramento genera una riduzione della velocità della corrente a monte, il vettore velocità diventa sempre più piccolo e inizia a vedersi l'effetto di deviazione del flusso.



Figura 78 Mappa delle velocita 13 ottobre ore 02:00

I valori di velocità passano da 2.82m/s in condizioni di allagamento standard a 0.04m/s quando è presente l'interferenza. A valle le velocità sono nulle in quanto la breccia non si è formata e il flusso è assente.



Figura 79 Velocità monte e valle interferenza ore 02:00 giorno 13 ottobre

13 ottobre alle ore 03:00

Come affermato precedentemente, i fenomeni franosi che generano sbarramento sono caratterizzati da altezze limitate e grande estensione. Nel caso in esame infatti l'altezza dello sbarramento che si crea è di 5.8m. Il sopralzo necessario sulla diga frana necessario per l'innesco della breccia è stato posto, sulla base di osservazioni relative al fenomeno di overtopping per sbarramenti creati da scivolamenti di questo tipo, pari a 0.5m.

Alle ore 03:00 del 13 ottobre, tale condizione viene raggiunta e si verifica l'apertura della breccia, tale fenomeno viene simulato dal software in modo istantaneo.

L'apertura della breccia permette di registrare valori non nulli a valle dello sbarramento, naturalmente i tiranti a valle presentano valori inferiori rispetto a quelli di monte.

I tiranti di monte presentano, nonostante sia avvenuta l'apertura, dei valori maggiori rispetto a quelli registrati nell'ora precedente, questo perché la breccia non è ancora completamente formata (la sua apertura è solo pari al 43%) e dunque la frana continua a produrre l'effetto di sbarramento.


Figura 80 Mappa di allagamento 13 ottobre ore 03



Figura 81 Flood depth ore 03:00 giorno 13 ottobre. Apertura breccia

Dalla mappa della velocità si nota in modo evidente la formazione della breccia e come, in prossimità di questa ci sia un brusco aumento delle velocità. Le velocità a valle dello sbarramento subiscono passando da 0.52m/s a monte a 1.78 m/s a valle.



Figura 82 Mappa di allagamento 13 ottobre ore 03:00

13 ottobre ore 18:00

Come esposto precedentemente, la breccia non è ancora completamente formata e questo fa sì che il flusso continui ad essere deviato. Inoltre, nonostante la legge precedentemente descritta permetta di simulare il processo di ampliamento a cui dovrebbe essere soggetta la breccia, una parte di ostruzione rimarrà comunque il loco e ridurrà la sezione dell'alveo. Questo è dovuto alla procedura che permette di modellare tale fenomeno, ovvero costruzione di un muro su cui si andrà a generare un'apertura che man mano si amplierà. Il limite risiede proprio nel fatto che la breccia, nonostante si ampli non arriverà mai ad avere una geometria tale per cui venga ristabilita la forma iniziale del canale.

A tutto questo si somma l'effetto dato dalla presenza dell'autostrada e delle pile del ponte: durante l'implementazione del modello su tali strutture sono state tracciate delle Breaklines, motivo per cui la corrente tende ad aggirare tali ostacoli e non a sormontarli, a meno che il livello non venga raggiunta la medesima quota.

La presenza di tali discontinuità genera dunque un'ulteriore interferenza che provoca ancora di più la deviazione del flusso e la propagazione dell'allagamento verso monte. Iniziano dunque ad emergere le dinamiche con cui lo sbarramento va influenzare l'esito dell'allagamento.

In corrispondenza della frana i fenomeni continuano ad essere gli stessi, quindi rispetto alla configurazione di piena standard si registrano tiranti maggiori a monte e velocità maggiori a valle, fatta eccezione per l'ampliamento della breccia che, alle ore 18:00 è passata da un ampliamento del 43% ad uno del 54%. Questo ampliamento spiega perché, nonostante si continui a registrare il fenomeno per cui i tiranti a monte sono maggiori di quelli a valle, i valori registrati a valle sono più altri rispetto a quelli registrati alle 03:00. Quando la breccia si era appena aperta il tirante a valle era infatti pari a 1.79m, mentre adesso ha un valore pari a 5.4m.



Figura 83 Flood depth monte e valle frana 13/10 ore 18:00

Tracciando una sezione trasversale parallela alla direzione del flusso, che intersechi e vada oltre l'autostrada, si ottiene una configurazione di questo tipo:



Figura 84 Sezione parallela alla direzione del flusso



Figura 85 Sezione trasversale 13 ottobre ore 18

Si osserva che si ha la presenza dell'acqua in una zona in cui normalmente non potrebbe presente, in quanto è presente un ostacolo con quota maggiore (l'autostrada). La presenza dello sbarramento in alveo che provoca il rigurgito e la progressiva migrazione della corrente verso monte fanno sì che questo accada in quanto il flusso viene deviato, aggira l'ostacolo e va ad allagare quelle zone che altrimenti non sarebbero soggette ad allagamento. Il tutto è agevolato dalle quote delle zone limitrofe, nessuna delle quali presenta dislivelli tali per cui il flusso viene bloccato.



Figura 86 sezione parallela all'autostrada

In figura infatti si osserva che, superata l'area golenale, le quote sono addirittura più basse. Questo fa sì che il flusso una volta deviato, allaghi tutta la zona a di là dell'autostrada.

Osservano i vettori di velocità si osserva infatti che una parte di flusso continua a fluire verso valle attraversando la breccia e una parte viene rigurgitata e deviate verso monte. Si nota che i vettori velocità sono anche più piccoli, questo perché la corrente subisce appunto un rallentamento e una dissipazione di energia dovuti alla presenza dell'ostacolo.

Si passa infatti da valori nel canale di 2.65m/s a 0.56m/s, fino a 0.22m/s nella parte al di là dell'autostrada. A valle della breccia la velocità è invece pari a 2.78 m/s.

13 ottobre alle 22:00

Alle ore 22:00 del 13 ottobre arriva il primo picco di piena, confrontando le aree allagate senza e con la presenza dello sbarramento in alveo emerge che le dinamiche di allagamento sono completamente differenti.



Figura 87 Mappa di allagamento 13 ottobre ore 22:00, senza frana



Figura 88 Mappa di allagamento 13 ottobre ore 22:00, con frana

Come già visto precedentemente, la configurazione inizia a mutare radicalmente e si osserva una migrazione progressiva della corrente verso monte.



Figura 89 Flood depth ore 22:00 giorno 13 ottobre

Come si osserva in figura, si verifica sempre la configurazione di innalzamento a monte e valore del tirante più basso a valle. Rispetto alla configurazione di flusso in condizioni di piena standard in cui il tirante era pari a 4.48m, a monte si registra un aumento del tirante di 4.5m.

Tale fenomeno si verifica nonostante la breccia si sia formata e l'acqua continui a defluire verso valle, l'apertura si è ampliata raggiungendo un valore di apertura del 63%, questo spiega perché il divario tra livello di monte e di valle continua a diminuire. Il fenomeno di rialzo del tirante e monte continua a generare fenomeni di rigurgito che provocano superamento della sponda e allagamento delle zone limitrofe.

L'allagamento di alcune delle abitazioni del comune di Chambave e delle zone poste a oltre l'autostrada avviene per effetto dello stesso identico fenomeno illustrato nel paragrafo precedente. Naturalmente i valori di portata in arrivo sono sempre maggiori e dunque sarà maggiore la quantità di acqua che verrà deviata e produrrà ulteriori allagamenti.

Anche in tale caso le velocità a monte subiscono un decremento, passando da 5.24 m/s in condizioni di piena standard a 1.72 m/s per effetto dello sbarramento. Tale rallentamento è anche dovuto al fatto che l'acqua deve aggirare l'ostacolo e allungare il suo percorso. A valle si verifica un aumento rispetto alla condizione di monte ma una riduzione rispetto alla condizione di piena standard.

14 ottobre ore 12:00

Durante l'evoluzione del fenomeno di alluvionale, il fenomeno di cui sopra continua a manifestarsi e le aree allagate nel canale a valle dello sbarramento presentano configurazioni che, almeno in termini di estensione, sono pressoché coincidenti con le condizioni di piena standard.

Alle ore 12:00 del 14 ottobre l'allagamento presenta una configurazione di questo tipo:



Figura 90 Mappa di allagamento ore12:00 del girono 14 ottobre



Figura 91 Mappa delle velocità ore 12 giorno 14 ottobre

In figura si osserva che la corrente anche in questo caso viene deviata e, in questo caso, l'effetto di tale variazione va a modificare le condizioni sia a monte che a valle.

A monte si verificano i fenomeni precedentemente esposti nonostante l'ampliamento della breccia sia praticamente terminato. Si registrano però valori dei parametri differenti, il tirante aumenta infatti di un valore pari a 3.58m e la velocità diminuisce di 5m/s rispetto alla configurazione senza frana.

Si registra un generale innalzamento dei livelli rispetto alla condizione di allagamento standard che tende a ridurre man mano che ci si allontana dall'interferenza. In corrispondenza del ponte di Parleaz l'aumento è di circa 60cm e, da questo punto in poi, è sempre più piccolo e le configurazioni standard e con interferenza tendono a coincidere. Questo spiega perché, anche in termini di estensione delle aree allagate da questo momento in poi non ci sono particolari cambiamenti.

15 ottobre ore 08:00

Alle ore 04:00 viene raggiunto l'ultimo e maggiore picco di piena. I valori massimi dei parametri idraulici registrati corrispondono alle ore 06:00 del 15 ottobre, mentre il massimo valore in termini di estensione delle aree allagate viene raggiunto alle ore 08:00 dello stesso giorno.



Figura 92 Mappa di allagamento ore 6 giorno 15 ottobre, senza frana



Figura 93 Mappa di allagamento ore 06:00 15 ottobre, con frana



Figura 94 Mappa di allagamento ore 8 giorno 15 ottobre, senza frana



Figura 95 Mappa di allagamento ore 8 giorno 15 ottobre, con frana

Come si osserva in figura, quando viene raggiunta la massima estensione delle aree allagate, si allagano zone che senza la presenza dell'interferenza non sarebbero esposte a tale pericolo. Tali zone sono le infrastrutture, che ci trovano oltre l'autostrada e l'intero comune di Chambave. La configurazione di allagamento che si genera per effetto dell'interferenza è problematica perché vengono coinvolte porzioni di territorio antropizzate, ciò significa che trascurare tali fenomeni può dunque provocare effetti di non poca rilevanza.



Figura 96tirante massimo in entrambe le configurazioni



Figura 97 velocità massima in entrambe le configurazioni

Come detto precedentemente, il valore massimo delle grandezze si registra calle ore 06:00, in questo caso le grandezze idrauliche sono caratterizzate ancora da un innalzamento a monte dell'interferenza che, rispetto alla configurazione di allagamento standard è pari a 4.89m, a valle è comunque più alto della configurazione senza frana ma di circa 20cm.

Le velocità a monte si riduce di 8 m/s rispetto alla configurazione senza frana mentre a valle aumenta di 2m/s.

Poiché si sta analizzando la condizione di massimo ci si chiede se il ponte, anche in tale condizione non venga allagato. In figura si osserva come il livello aumento rispetto alla configurazione senza frana, non viene raggiunta la quota dell'estradosso ma viene meno il metro e mezzo di franco rispetto alla sommità dell'arco.



Figura 98 Quota livello idrico in corrispondenza del ponte, piena standard e livello massimo

Globalmente, per un tratto di estensione di 4.3km, si osserva una riduzione della velocità media nella configurazione con lo sbarramento rispetto alla configurazione di piena standard.

I tiranti tendono invece ad essere mediamente più alti nella configurazione con la presenza dell'interferenza, soprattutto nelle sezioni di monte.

Mentre localmente, ovvero in corrispondenza dello sbarramento, si verifica la condizione di tirante più alto a monte rispetto che a valle dello sbarramento e tendenza opposta viene registrata per le velocità.

Idrogrammi

Ci si chiede in che modo la presenta della frana vada a modificare gli idrogrammi di flusso, per fare ciò è necessario valutare l'idrogramma a monte e a valle dell'ostruzione.

È possibile estrarre l'idrogramma del flusso sulla breccia, tale idrogramma inizia ad essere diverso da zero alle ore 03:00 del 13 ottobre, ovvero quando si forma la breccia. Il picco di portata registrato sulla breccia è pari a 588.05 m³/s. Noto l'idrogramma di flusso sulla breccia è possibile ottenere qual è l'idrogramma totale transistate verso valle in segueto all'apertura della breccia.



Figura 99 Idrogramma sulla breccia

Si osserva un'onda transitante verso valle con picco più basso e leggermente traslato rispetto all'idrogramma di monte, questo significa che la presenza della frana in alveo non va a laminare l'onda di piena (efficiente di laminazione estremamente bassa, pari al 12%).

L'abbattimento del picco con bassissima restituzione del volume differita nel tempo è comprensibile se si pensa alla dinamica di allagamento: la morfologia del territorio fa sì che non si crei un vero e proprio lago a monte dell'interferenza ma provoca una deviazione flusso. Ciò implica che una parte di volume, ovvero quella corrispondente all'abbassamento dell'idrogramma, non venga poi restituita ma transiti e rimanga verso altre zone. Nel caso in esame si osserva un abbattimento de picco dovuto alla porzione di volume che migra verso il comune di Chambave e al di là dell'autostrada.

7. Confronto mediante curve ROC e sintetizzazione

All'interno di questo capitolo si cercherà di quantificare la corrispondenza tra la configurazione di piena standard e quella di piena con presenza dell'interferenza in alveo. Il confronto prevede una prima analisi di dettaglio, ovvero di ogni singolo pixel, utilizzando la metodologia delle curve ROC.

La curva ROC, ovvero Receiver Operating Characteristic curve, è una metodologia utilizzata per la validazione di test diagnostici in molteplici ambiti²⁹. Nel caso in esame si vuole utilizzare tale approccio per valutare la bontà della classificazione delle aree allagate basandosi sulla classificazione ottenuta solo mediante la piena standard, ovvero se non viene considerata la frana in alveo. Per fare ciò bisogna paragonare il risultato ottenuto con quello che viene definito il Golden test, ovvero il test ritenuto maggiormente rappresentativo e affidabile. Nel caso in esame viene considerato Golden Test la configurazione di piena standard, quindi perimetri e parametri delle aree allagate dell'evento del 2000. L'affidabilità del test è stata poi valutata utilizzando l'indice AUC (Area Under Curve) il quale è sinonimo di buona performance tanto più si avvicina all'unità.

Le curve ROC nel seguente lavoro sono state utilizzate per un'analisi di tipo qualitativa, ovvero classificazione binaria [0-1] che nel caso in esame significa "NON SI ALLAGA" - "SI ALLAGA".

Tali metodologie vengono applicate suddividendo il tratto in tre macroaree. Si è scelto di utilizzare tale approccio in base ad una prima osservazione qualitativa delle aree allagate relative al golden test e alla configurazione con la frana. L'estensione delle aree allagate è infatti quasi coincidente nelle zone di monte e valle mentre nella zona centrale si osserva un forte discostamento.

Inoltre, essendo l'analisi relativa ad ogni sinolo pixel, avere tre macroaree più piccole invece di una intera garantisce tempi di calcolo inferiori.



Figura 100 Variazione perimetri allagamento

Per l'implementazione delle curve ROC è necessario estrarre dal software le mappe in formato raster di ciascuna delle grandezze che si vuole analizzare, nel seguente lavoro tiranti e velocità. Dal raster è stato poi possibile, mediante il software free Cloud Compare, estrapolare la nuvola di punti costituente l'immagine. Questa operazione ha consentito di ottenere per ogni pixel costituente l'immagine le coordinate spaziali x, y e il valore della grandezza da analizzare.

I raster sono stati estratti facendo riferimento all'instante in cui viene raggiunta la massima estensione dell'area allagata, ovvero il 15 ottobre alle ore 08:00.

Macroarea 1

La macroarea 1 è quella che si estende dal comune di Champagne fino all'inizio del comune di Chambave. In questo tratto il numero di pixel correttamente classificati come allagati e non allagati rispetto al golden test è cospicuo, l'AUC presenta infatti valori quasi pari al 70% e la curva ROC si colloca, come si osserva in figura, nell'angolo superiore sinistro.



Figura 101 ROC tratto 1 configurazione binaria

In termini quantitativi, come visto precedente, si osserva un progressivo aumento dei tiranti man mano che ci si avvicina all'interferenza, tale configurazione è spiegata dal fatto che la presenza dello sbarramento comporta un generale aumento dei livelli rispetto alla configurazione di allagamento standard. Quando il parametro analizzato è la velocità si osserva invece una globale riduzione, in particolare in questa macroarea i valori sono tutti minori rispetto alla configurazione standard perché si risente del rallentamento dovuto alla presenza dell'ostacolo nel canale.

Macroarea 3

La macroarea 3 si estende da Perleaz in poi, anche in questo tratto si registra una forte corrispondenza in termini di pixel classificati come allagati e non allagati coerente in entrambe le configurazioni. Da ciò deriva una curva ROC relativa alla classificazione binaria soddisfacente, infatti la curva si colloca anche in questo caso nell'angolo superiore sinistro e l'AUC è superiore del 65%.



Figura 102 ROC tratto 3 configurazione binaria

La variazione in termini quantitativi e globali delle grandezze è analoga a quanto riportato precedentemente.

Macroarea 2

La macroarea area 2 è quella in cui si risente maggiormente della presenza della frana nel corso d'acqua, in tale tratto infatti la curva ROC restituisce dei valori poco rappresentativi in termini di corrispondenza di pixel allagati in quanto, come osservato in precedenza, le aree allagate relative alla configurazione con interferenza sono circa il doppio rispetto a quelle di allagamento standard.



Figura 103 ROC tratto 2 configurazione binaria

Data la grande incongruenza, in questa macroarea verranno fatte delle considerazioni circa il cambiamento dei parametri nell'area allagata presente in entrambe le configurazioni e le circa il valore dei parametri nella porzione di area allagata aggiuntiva.



Figura 104 Area allagata e valori dei tiranti senza e con la presenza della frana

Ci si chiede quale cambiamento subiscano i parametri nella porzione di area allagate presente in entrambe le configurazioni, a tale quesito è possibile rispondere andando ad eseguire un'operazione di sottrazione tra raster. La sottrazione viene fatta sottraendo alla configurazione con la frana quella senza la presenza dell'interferenza e i risultati ottenuti confermano ancora una volta ciò di cui si è ampliamente discusso in presenza.

Porzione di area allagata aggiuntiva

Particolare è la condizione delle aree allagate all'esterno dalle aree che si allagano in condizioni standard, in tal caso i valori ottenuti dalla sottrazione tra raster saranno sicuramente positivi in quanto in valore delle grandezze in quei punti quando non è presente l'interferenza è pari a zero.

Anche per tale zona i parametri analizzati sono tiranti e velocità, inoltre è stato ritenuto opportuno anche monitorare tempo di permanenza dell'allagamento. Sono stati estrapolati anche i dati relativi alle tensioni tangenziali ma successivamente non sono state analizzate in quanto, da sole, non permettono di giungere a considerazioni prestanti.

La porzione di aree allagate aggiuntive con la variazione dei valori dei relativi parametri viene di seguito riportata:



Figura 105 Valore dei tiranti nella porzione di area allagata aggiuntiva



Figura 106 Valore delle velocità nella porzione di area allagata aggiuntiva

Le velocità sono tendenzialmente molto basse in prossimità del centro abitato mentre e nella zona al di là dell'autostrada, questo per due ragioni: il flusso devia costringendo l'acqua ad allungare il suo percorso e le aree allagate interessano centri urbani e porzioni di territorio con valori di scabrezze diverse, sicuramente maggiori, ciò costringe la corrente a rallentare ulteriormente. I valori all'inizio della deviazione sono invece paragonabili a quelli nel canale ma comunque riferiti alla configurazione con sbarramento, quindi inferiori rispetto alla condizione di allagamento standard.



Figura 107 Tempo di permanenza della piena nelle aree allagate aggiuntive nella porzione di area allagata aggiuntiva I tempi di permanenza dell'alluvione sono monto bassi, nella maggior parte dei pixel l'allagamento

permane per tempi non superiori ai 24 minuti.

Ci si chiede di quanto aumentino mediamente le aree allagate i valori dei parametri idraulici in tali zone e ci cerca di riassumere tali considerazioni in un'unica rappresentazione grafica e di facile comprensione. Per fare ciò il tratto di fiume in questione è stato suddiviso in tronchi omogenei all'interno dei quali sono state misurate tutte le grandezze relative alla porzione di area allagata aggiuntiva.

Poiché le considerazioni verranno fatte analizzando i valori medi di ogni grandezza per ogni tronco, per non mediare sui valori presenti nel canale che sicuramente avrebbero un peso maggiore, quest'ultimo viene escluso. Vengono esclusi anche i valori dei parametri delle aree allagate in comune ad entrambe le configurazioni. Gli istogrammi rappresentano l'evoluzione di ogni variabile nello spazio. Lungo l'ascissa vengono ripostati i tronchi da 1 a 8, ogni tronco con estensione di circa 200m. Ad ogni tronco corrisponde dunque una progressiva e, lungo le ordinate, viene riportato il parametro oggetto di studio. Lo sbarramento è posto in coordinate 387356.58E-5066329.78N e si colloca nel tronco 3.



Figura 108Variazione perimetri allagamento



Figura 109 Estensione area allagata per ogni singolo tronco

Dalla figura si osserva come tutti i tratti siano caratterizzati da un aumento dell'estensione delle aree allagate. Già nel tronco 1 la variazione inizia ad essere rilevante, in quanto in tale porzione ricade una porzione delle abitazioni di Chambave coinvolte, stessa cosa accade nel tronco 2. Nei tronchi da 3 a 8, ovvero quelli in cui si risente maggiormente della deviazione a cui è soggetto il corso d'acqua per la presenza dello sbarramento, si osserva un notevole aumento dell'estensione dell'area allagata. Nel tronco 9 si osserva una piccola variazione, in quanto i due perimetri tornano ad essere quasi coincidenti.

8. Valutazione parametri area allagata dovuta all'amplificazione

Per comprendere esattamente quali sono le dinamiche fluviali occorre valutare complessivamente in che modo i parametri variano per effetto della presenza dell'interferenza. Da quanto emerge nel capitolo precedente l'acqua presenta parametri decisamente diversi se si considerano i valori nel canale oppure si si considera l'evoluzione dei parametri nelle aree allagate.

L'obbiettivo che ci si pone in questo capitolo è quello di definire quali sono i valori dei paramenti nella porzione di area allagata che si aggiunge per effetto della deviazione del flusso.

Una compattazione e riduzione dei dati è stata già eseguita mediante la suddivisione del dominio in blocchi omogenei. A questo punto si vuole ottenere un'unica rappresentazione che permetta di definire quali siano i valori medi dei parametri nelle zone che si allagano per effetto della presenza della frana.

In questo modo, oltre ad affermare che una porzione di territorio è stata allagata e un'altra no, è possibile definire anche con quali valori di velocità e tiranti questo è avvenuto.

Per prima cosa va definita, per ogni tronco, quanta area in più coinvolta dall'allagamento dovuto all'interferenza. Per fare ciò è stato necessario calcolare la variazione tra le aree corrispondenti alla configurazione con e senza l'interferenza.

Poiché lo scopo è quello di leggere tutte le informazioni su un unico grafico finale, è stata eseguita una normalizzazione rispetto al massimo e i valori sono stati riportati in percentuale.

La massima variazione in termini di crescita dell'area allagata è stata registrata nel tronco 4, con un aggiunta pari a 32775m². Poiché la normalizzazione è stata eseguita in base al valore massimo, al 100% corrisponderà massima variazione, allo 0% corrisponderà variazione nulla rispetto alla configurazione senza frana. Il grafico ottenuto viene di seguito riportato.



Figura 110 percentuale aggiuntiva rispetto alla configurazione senza frana

Solo per la percentuale aggiuntiva, manipolando i Raster di dati su ArcGis, sono stati calcolati i valori di tirante e velocità medi, al fine di poter affermare non solo che si allaga di più ma anche mediante di quanto. Anche in questo caso seguiranno le rappresentazioni dei dati con relativa unità di misura e la successiva normalizzazione con espressione in termini di percentuale, al fine ottenere un unico grafico riassuntivo dal quale è possibile leggere i valori dei parametri.



Figura 111 Tirante medio nelle aree aggiuntive rispetto alla configurazione senza frana



Figura 112 Tiranti medi in % rispetto alla configurazione senza frana

In figura viene rappresentato in valori della variazione dei tiranti in termini percentuali, anche in questo caso al 100% corrisponde il massimo della variazione, che corrisponde al un tirante di 3.35m. Osservando i dati ottenuti è stato possibile ottenere delle soglie attraverso le quali è possibile definire il massimo delta a cui è soggetto il tirante nella porzione di area allagata.

Il grafico riportato in figura può dunque essere letto come segue, individuata la quale porzione di grafico in cui ricadono i punti e a quale percentuale di aumento del tirante medio corrispondono :

se

% = **100**%

Allora si verifica l'aumento massimo, pari a 3.5m.

se

allora

$$h_{medio} \ge 2m$$

30% < % < 60%

Allora

 $1m < h_{medio} < 2m$

Se

15% < % < 30%

Allora

 $0.5m < h_{medio} < 1m$

Se

% < 15%

Allora

 $h_{medio} < 0.50m$

Un approccio analogo è stato utilizzato per le velocità. Segue innanzitutto la rappresentazione delle velocità medie lungo i tronchi non ancora adimensionalizzate:



Figura 113 Velocità media nelle aree aggiuntive rispetto alla configurazione senza frana

In tal caso il massimo valore registrato risulta essere pari al 1m/s, a cui corrisponderà nella rappresentazione il percentuale il 100%. L'andamento e le soglie riportate in questo caso vengono di seguito riportate:



Figura 114 in %Velocità media in % rispetto alla configurazione senza frana

In tal caso:

se

% = **100**%

Allora si verifica l'aumento massimo, pari a 1.m/s

se

40% < % < **100**%

allora

 $0.5m/s < v_{medio} < 1m/s$

se

% < **50**%

allora

 $v_{medio} < 0.5m/s$

È stato ritenuto utile osservare anche il tempo di permanenza dell'allagamento nelle aree che, per effetto della presenza dell'interferenza, vengono investite dalla piena. Nella maggior parte dei tronchi i tempi di permanenza non superano i 15 minuti, nei tronchi 1 e 2 il tempo è compreso tra 30 e 40 minuti e solo il trono 8 è caratterizzato da un tempo di permanenza supera i 50 minuti. Si osserva che comunque nella porzione di aree allagate aggiuntive in tempo di permanenza dell'allagamento non supera mai i 51 minuti.



Figura 115 Tempo di permanenza dell'alluvione nelle porzioni di aree allagate aggiuntive per effetto della presenza dell'interferenza

8.0. Valutazione complessiva

Tutte le informazioni di cui sopra sono state inglobate in un'unica rappresentazione riassuntiva che permette, tronco per tronco, di quantificare la variazione dei parametri caratteristici dell'evento dovuti alla presenza dell'interferenza.

Il grafico di seguito riportato è rappresentativo della condizione dovuta alla presenza dello sbarramento e viene letto come segue:

- Lungo le ascisse vengono riportati i tronchi da 1 a 9, ogni tronco sarà caratterizzato da un valori di coordinate N/E e, ad ogni tronco, corrisponderà un valore medio delle grandezze;
- Lungo le ordinate a sinistra vengono riportate delle percentuali che definiscono il valore medio del parametro analizzato nelle aree aggiuntive che si allagano per effetto dell'interferenza;
- Lungo l'ordinata a destra si leggono i tempi di permanenza dell'evento di piena amplificato, espressi in minuti.



Figura 116 Rappresentazione riassuntiva utile per la definizione dei parametri medi per ogni tronco nella porzione di area allagata aggiuntiva dovuta alla presenza della frana in alveo.

Integrando le informazioni ricavabili dalla rappresentazione riassuntiva in *Figura 117* con la rappresentazione del perimetro delle aree allagate con e senza interferenza e la suddivisione in

tronchi, è possibile valutare nelle aree esterne al perimetro giallo e interne a quello rosso ciò che succede e avere anche un'idea quantitativa del valore dei parametri in tali zone.



Figura 117 Suddivisione in tronchi

Per esempio, se si considera il tronco 4, già visivamente e qualitativamente si osserva che l'aumento delle aeree allagate dovute alla presenza dell'interferenza è notevole. In tale tratto infatti la variazione percentuale rispetto alla condizione priva di interferenza è pari al 100%, ovvero massima. Ci si chiede che valori abbiamo velocità e tiranti in questa zona e quanto permanga l'allagamento.

Dal grafico complessivo si osserva al punto di h_{medio} in tale tratto corrisponda una percentuale compresa tra il 30% e il 60%, motivo per cui in tale tratto il tirante medio avrà valori compresi tra 1m e 2m. Il punto del valore di velocità media ricade invece nell'intervallo di percentuale [50%-100%], dunque v_{media} avrà valori tra 0.5m/s e 1m/s. Il tempo di permanenza corrispondente è di 4 minuti.

Tale metodo risulta dunque veloce ed efficace comprendere la dinamica di allagamento nelle aree allagate aggiuntive. Tale approccio è naturalmente meno preciso rispetto all'approccio delle curve ROC ma le informazioni e le considerazioni relative all'evento risultano essere molto più compatte.

9. Conclusioni

Nel seguente elaborato è stata presentata un'indagine volta a stabilire la variazione delle dinamiche di allagamento dovute ad un fenomeno gravitativo che genera sbarramento in alveo.

Va specializzato che l'estensione delle aree allagate ottenute è frutto di una modellazione basata su ipotesi semplificate.

L'approccio secondo cui si ha la formazione della breccia in seguito al fenomeno di overtopping non consente di tener conto di eventuali fenomeni di infiltrazione e di passaggio dell'acqua attraverso il volume depositato in alveo.

Durante l'implementazione è emerso come il software consenta di simulare l'ampliamento della breccia durante il fenomeno mediante la definizione di una legge di avanzamento. La semplificazione consiste nell'assumere che l'evoluzione avvenga in modo definito, trattandosi però di un evento alluvionale e di materiale franoso tale ampliamento non sarà sicuramente riconducibile ad una legge nota.

La legge di ampliamento prevede inoltre il raggiungimento del fondo dell'alveo ma non prevede che, una volta raggiunto il fondo del canale, l'ostruzione venga interamente rimossa e questo modifica, almeno localmente, la risposta del bacino durante il transito di una determinata portata.

Nonostante tali limitazioni, che comunque sono intrinseche della modellazione emerge che non considerare questo tipo di interferenza, soprattutto quando ci si trova di fronte ad un bacino come quello della Dora Baltea valdostana, può portare ad una differenza della perimetrazione delle aree allagate anche sostanziale.

L'analisi approfondita dello scivolamento nel comune di Chambave permette di affermare che un'interferenza di questo tipo comporta un'amplificazione dell'evento di piena e ha un impatto anche su zone che in condizioni di piena standard non sarebbero colpite dall'alluvione.

Dall'analisi emerge che è possibile distinguere una risposta locale e una riposta globale della corrente: localmente si registrano valori dei tiranti in aumento a monte e in riduzione a valle dello sbarramento, trend opposto si osserva se si fa un'analisi delle velocità.

Lungo tutto il tratto in cui si risente dell'interferenza, pari a 4.3 km, si registra invece un globale aumento dei tiranti, e una riduzione delle velocità.

Un'analoga risposta è stata registrata anche nel caso in cui il fenomeno gravitativo analizzato è quello collocato nel comune di Monjovet. In tal caso si osserva però un'estensione delle aree allagate che, rispetto alla configurazione di piena standard, non ha subito variazioni.

La conclusione a cui si giunge è che la presenza di uno sbarramento in alveo durante un evento alluvionale influenza in maniera diretta il deflusso delle acqua ma l'amplificazione o meno del fenomeno è funzione delle caratteristiche geometriche specifiche del caso e soprattutto è strettamente legata alla morfologia del territorio.
Citazioni e bibliografia

- 1. 6. Analisi del dissesto da frana in Valle d'Aosta.www.sinanet.apat.it/progettoiffi.
- 2. Bacino FIG, Dora D, Fisiografico A. L b d b.
- 3. Tesi di Laurea Magistrale in Scienze Geologiche Applicate "Studio geologico ambientale della Dora Baltea con chiusura a La Salle (AO)".Francesco Ghia.
- Atlante climatico della Valle d'Aosta Regione Autonoma Valle d'Aosta.
 https://www.regione.vda.it/protezione civile/edizioni protezione civile/atlante i.aspx.
- 5. La XII, Margherita S, Rubillys D, Tillier D, Ours S-. STORIA DEGLI EVENTI IDROGEOLOGICI dal'800 al 2002. 2003;800.
- 6. Geohecras U. HEC-RAS 2D Flow Modeling Using GeoHECRAS.
- 7. Ligato D, Anselmo V, Comedini M, Guerrieri L, Pascarella F. *Atlante Delle Opere Di Sistemazione Fluviale.*; 2003.
- Ambiente A, Suolo D, Pubblici L. REGIONE PIEMONTE RAPPORTO SULL'EVENTO ALLUVIONALE DEL 13-16 OTTOBRE 2000 PARTE I L'ATTIVITÀ DI PREVISIONE E MONITORAGGIO METEO-IDROMETRICA A Cura Della Direzione Regionale Servizi Tecnici Di Prevenzione.
- 9. Ramasco M, Troisi C. Eventi Alluvionali in Piemonte CONTRIBUTI SPECIFICI CONTRIBUTI SPECIFICI GRANDI FENOMENI FRANOSI ATTIVATISI A SEGUITO DELL'EVENTO DELL'OTTOBRE 2000.
- 10. Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni IV A . Aree a rischio significativo di alluvione ARS Distrettuali. 2016.
- Del C, Delle C. Studio Di Fattibilità Della Sistemazione Idraulica: Del Fiume Dora Riparia Nel Tratto Da Oulx Alla Confluenza in Po, - Del Fiume Toce Nel Tratto Da Masera Alla Foce.; 2003.
- 12. CORINE Land Cover Copernicus Land Monitoring Service. https://land.copernicus.eu/paneuropean/corine-land-cover.

- 13. Influenza dei movimenti franosi selle caratteristiche morfologiche ed idrauliche degli alvei del fiume Panaro e dei suoi affluenti principali. Giovanna Tosatti- Mauro Soldati.pdf.
- USGS P 1723: Interaction of Dams and Landslides—Case Studies and Mitigation. https://pubs.usgs.gov/pp/2006/1723/.
- Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio Edizione 2018 Italiano. http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/dissesto-idrogeologicoin-italia-pericolosita-e-indicatori-di-rischio-edizione-2018.
- 16. Maccioni S. Problematiche e prospettive. 2007.
- 17. interreg_eventi alluvionali piemonte_liguria_spagna_prima parte.pdf.
- 18. SGI Visualizzatore. http://sgi2.isprambiente.it/viewersgi2/.
- 19. apat. Fenomeni Di Dissesto Geologico Idraulico Sui Versanti. www.apat.it.
- Guzzetti F, Ardizzone F, Cardinali M, Rossi M, Valigi D. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;279(3-4):222-229. doi:10.1016/j.epsl.2009.01.005
- 21. DIRETTIVE PER LA REDAZIONE DEI PIANI DELLE ZONE DI PERICOLO (PZP) E PER LA CLASSIFICAZIONE DEL RISCHIO SPECIFICO (CRS).
- 22. Interpraevent AT-IS, 1984 U. Interdependence of sediment budget between individual torrents and a river-system. *Villach Austria*.
- Hungr O, Morgan GC, Kellerhals R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal*. 1984;21(4):663-677. doi:10.1139/t84-073
- 24. Risk Assessment Methodologies of Soil Threats in Europe. doi:10.2788/47096
- Costa JE, Schuster RL. FORMATION AND FAILURE OF NATURAL DAMS. Bulletin of the Geological Society of America. 1988;100(7):1054-1068. doi:10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2
- Peng M, Zhang LM. Breaching parameters of landslide dams. *Landslides*. 2012;9(1):13-31. doi:10.1007/s10346-011-0271-y

- 27. Korup O. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams. *Engineering Geology*. 2004;73(1-2):13-35. doi:10.1016/j.enggeo.2003.11.003
- Macchione F. Model for Predicting Floods due to Earthen Dam Breaching. I: Formulation and Evaluation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2008;134(12):1688-1696. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1688)
- 29. CON APPLICAZIONE A CASI DI STUDIO PDF Free Download. https://docplayer.it/14444052-Con-applicazione-a-casi-di-studio.html.