

**Politecnico di Milano**

**Polo territoriale di Lecco**

**M. Sc. in Civil Engineering for Risk Mitigation**

A.A. 2015-2016

**Scenario di rischio alluvionale per la città di Sondrio**

Relatore: Prof. Ing. Alessio Radice

Co-relatore: Prof. Ing. Daniela Molinari

Tesi di:

Alessandro Bettiga

Matr. 835949



**Politecnico di Milano**

**Polo territoriale di Lecco**

**M. Sc. in Civil Engineering for Risk Mitigation**

A.A. 2015-2016

**Scenario di rischio alluvionale per la città di Sondrio**

Relatore: Prof. Ing. Alessio Radice

Co-relatore: Prof. Ing. Daniela Molinari

Tesi di:

Alessandro Bettiga

Matr. 835949

## ABSTRACT (Italiano)

Le alluvioni sono tra le calamità naturali più frequenti, nonché più estesamente distribuite su tutto il territorio mondiale. Tra i vari tipi di alluvione quelle in area urbana sono quelle che generalmente conducono alle perdite economiche più elevate a causa della concentrazione di beni e infrastrutture, inoltre ulteriori danni economici sono indotti dal fermo delle attività. I cambiamenti climatici lasciano presagire che gli eventi alluvionali in aree urbane siano destinati ad aumentare in frequenza nei prossimi anni.

Questa tesi è volta allo studio di un possibile scenario di pericolo (hazard) e di rischio idrogeologico in una città, Sondrio, situata ai piedi delle Alpi e attraversata da un corso d'acqua, il Mallero, che discende dalla Valmalenco per poi sfociare nel fiume Adda. La città di Sondrio si trova nel nord della Lombardia, in Italia settentrionale. E' il capoluogo dell'omonima provincia ed è il centro abitato più grande della Valtellina. Essa sorge su un conoide alluvionale generato nel corso degli anni dallo stesso torrente Mallero.

Nella tesi è modellato uno scenario di rischio per la città, considerando un evento meteorico con tempo di ritorno di 100 anni. A causa di esso la portata del torrente Mallero a diventa molto grande e, di conseguenza, è in grado di trasportare grande una quantità sedimenti, molti dei quali tendono ad accumularsi nel tratto di torrente che scorre all'interno di Sondrio. A causa dell'aumento della quota del fondo del letto del Mallero dovuta al deposito dei sedimenti e quindi della quota della superficie dell'acqua del torrente, dovuta anche alla grossa portata di quest'ultimo, avviene un'esondazione con conseguente riversamento dell'acqua in città. Viene modellata l'alluvione all'interno della città valutando quindi la pericolosità dell'evento.

Prima di procedere a uno studio dettagliato dell'allagamento della città di Sondrio si studia un caso sintetico, ovvero un allagamento su un terreno che richiama quello dell'area urbana studiata, ma molto più semplice da un punto di vista geometrico. Questo permette di eseguire in maniera rapida molte analisi, di ottenere risultati di facile lettura e di scegliere il modo migliore per studiare l'allagamento in un'area urbana pedemontana come quella di Sondrio.

Si studia per ultima cosa il danno causato dall'alluvione su un campione di edifici valutando quindi il rischio; per fare ciò è utilizzato un modello denominato INSYDE, tuttora in corso di sviluppo, che, partendo dai parametri di hazard, esposizione e vulnerabilità di un edificio stima il danno relativo e il danno assoluto in Euro causati dall'allagamento su quest'ultimo.

Nella tesi si utilizza spesso il termine "hazard" anziché tradurlo in italiano con il termine "pericolo". Ciò è fatto volutamente per mantenere la sfumatura del termine inglese che racchiude il senso di aleatorietà che si ha nello studio di un evento come questo, ricco di incertezze, nel quale si cerca di modellare un processo che parte dalla goccia di pioggia che cade in alta Valmalenco fino all'altezza d'acqua ai piedi dell'edificio nel centro storico della città di Sondrio.

Parole chiave: scenario, rischio alluvionale, modellazione idraulica, stima dei danni.

## ABSTRACT (Inglese)

Floods are among the most frequent natural disasters, as well as more widely distributed throughout numerous terrains of the world. Among the various types of flood those in urban areas are generally the ones leading to higher economic losses due to the high concentration of assets and infrastructure, while further economic damages are induced by time of the stop of activities. Climate change is an anticipated sign that the floods in urban areas are expected to increase in frequency in the upcoming years.

This thesis is devoted to the study of a possible hydrogeological hazard and risk scenario for the city of Sondrio, located at the foot of the Alps and crossed by a stream called Mallero descending from Valmalenco and flowing into River Adda. The city of Sondrio is located in Northern Lombardy in Northern Italy and it is the capital of the province and it is the largest town of Valtellina. It stands on an alluvial fan generated over the years by the same Mallero stream.

In the thesis a risk scenario for the city is modeled by considering a rain event with a 100 year return period due to which the discharge of Mallero stream becomes very large and consequently, it is able to transport large quantity sediments, many of which tend to accumulate in the portion of the stream flowing inside of Sondrio. Due to the increase of the altitude of the bottom of the bed of the Mallero stream caused by the deposition of sediments and therefore the increase in altitude of the surface of the stream and also due to the large discharge of the latter, an outflow with the consequent release of water occurs in the city. The flood within the city is modeled by a hazard scenario.

Before proceeding to a detailed study of the flood in the city of Sondrio, a synthetic case is studied with a flood on a site that recalls the one of the considered urban area, but much simpler from a geometrical point of view. This allows to perform many analyses quickly, to obtain results easy to be evaluated and to choose the best way to study the flood event in an urban area close to mountains as in Sondrio case.

As a final point, the damage caused by the flood on a sample of buildings is studied by assessing the risk. A still under development model called INSYDE is used in order to perform this analysis. The process starts from the parameters of hazard, exposure and vulnerability of a building and extends to the evaluation of the relative damage and absolute damage in Euros caused by the flood.

The thesis often uses the term "hazard" rather than translating it into Italian as "pericolo". This choice is made deliberately to keep the English term that better encompasses the sense of uncertainty for a study of an event like this including full of uncertainties. The uncertainty driven process tries to model the event starting from the raindrop falling in high Valmalenco till the estimation of elevation of water within buildings in the historic center of Sondrio.

Keywords: scenario, flood risk, hydraulic modeling, damage estimation.



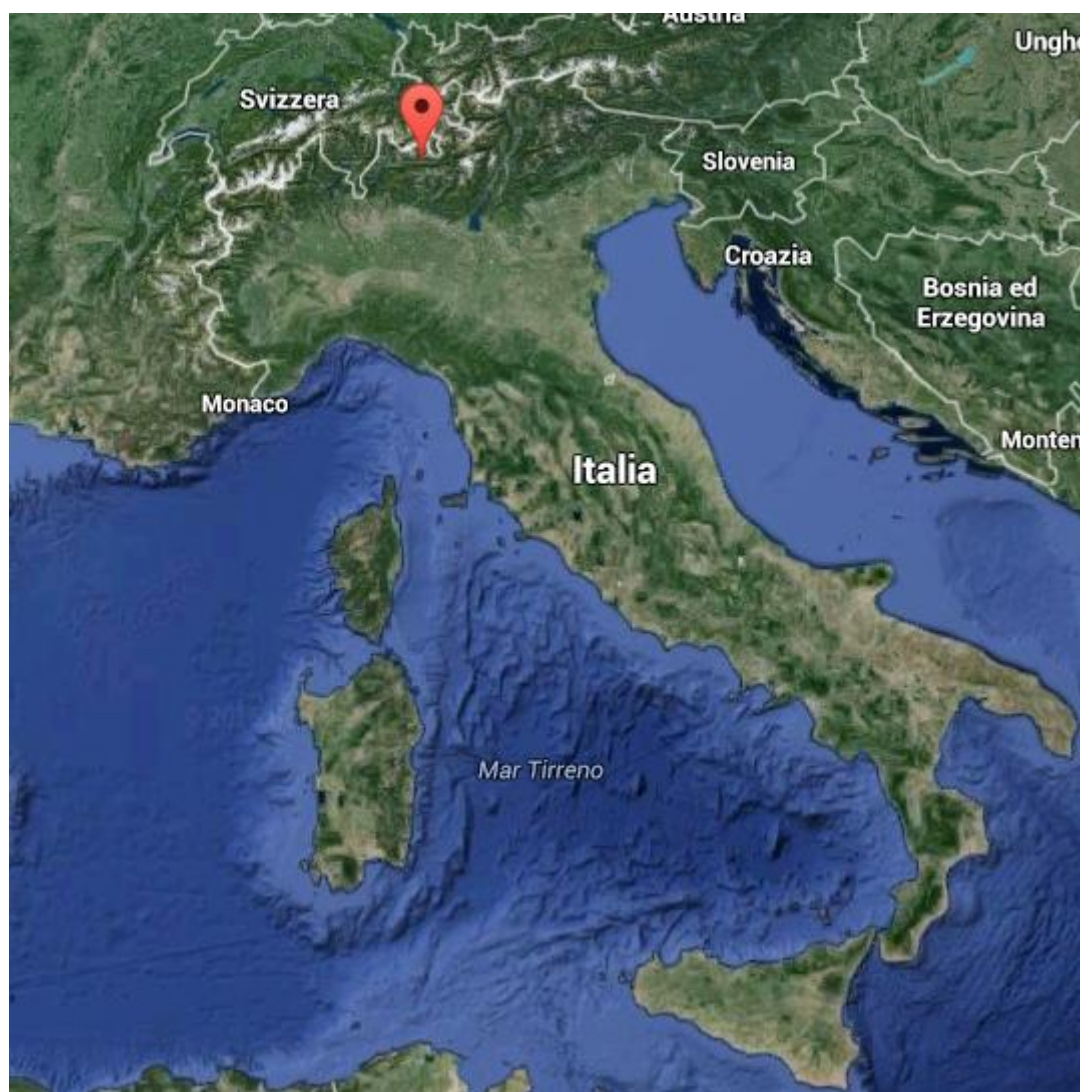
# INDICE

<b>1 INTRODUZIONE</b>	<b>2</b>
1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE	2
1.2 MOTIVAZIONE E OBIETTIVI DEL LAVORO	8
<b>2 MODELLAZIONE IDRAULICO-MORFOLOGICA DEL TORRENTE MALLERO</b>	<b>12</b>
2.1 INTRODUZIONE	12
2.2 MODELLAZIONE DELL'EROSIONE NEL BACINO DELLA VALMALENCO	14
2.3 MODELLAZIONE IDRAULICA MONODIMENSIONALE (1D)	21
2.4 SFIORO A SONDRIO	46
2.5 CONFRONTO CON TESI PRECEDENTE	51
<b>3 CASO SINTETICO</b>	<b>56</b>
3.1 INTRODUZIONE	56
3.2 MODELLI DEL CASO SINTETICO	57
3.3 ANALISI E RISULTATI	66
3.4 CONCLUSIONI	111
<b>4 ALLAGAMENTO DI SONDRIO</b>	<b>112</b>
4.1 INTRODUZIONE	112
4.2 MODELLAZIONE DELL'ALLAGAMENTO	113
4.3 MAPPE DI HAZARD E CONCLUSIONI SUI MODELLI PROPOSTI	144
4.4 CONFRONTO CON TESI PRECEDENTE	149
<b>5 DANNI PROVOCATI DALL'ALLUVIONE AGLI EDIFICI</b>	<b>154</b>
5.1 INTRODUZIONE	154
5.2 MODELLO PER LA STIMA DEL DANNO	156
5.3 DANNI CALCOLATI	163
5.4 CONCLUSIONI RIGUARDANTI LA MODELLAZIONE DEL DANNO E CONFRONTO CON TESI PRECEDENTE	183
<b>6 CONCLUSIONE</b>	<b>186</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>191</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>194</b>

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

La città di Sondrio, comune di circa 22000 abitanti, si trova in Nord Italia, nella regione Lombardia, è il capoluogo dell'omonima provincia. Con un territorio comunale di 20 km<sup>2</sup> circa è il meno esteso fra i capoluoghi di provincia italiani. Sorge nella media Valtellina, la valle principale nella provincia di Sondrio, alle porte della Valmalenco, sotto il massiccio della Corna Mara. La città è il principale centro abitato della zona.



*Fig. 1.1.1 Posizione di Sondrio in Italia.*



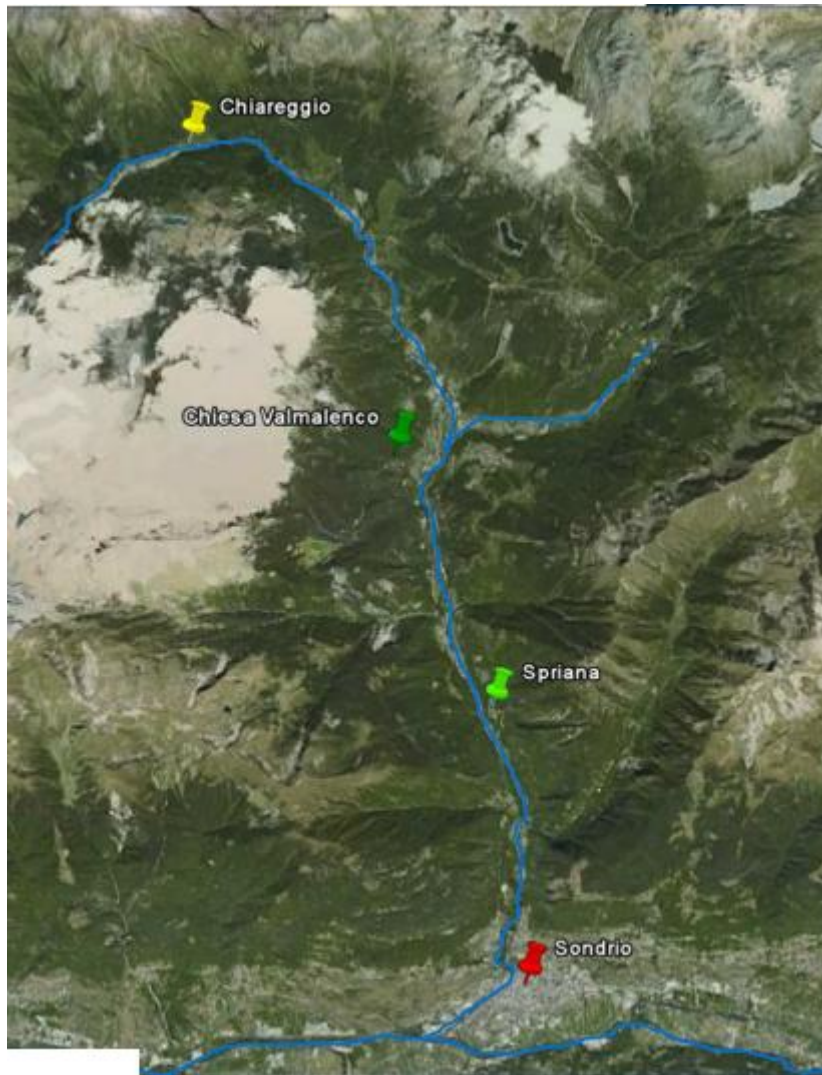


Fig. 1.1.2 Provincia di Sondrio in Lombardia.



Fig. 1.1.3 Posizione di Sondrio nel territorio provinciale.

Sondrio sorge su un conoide alluvionale generato nel corso degli anni dal torrente Mallero. La città è per la sua quasi totalità costruita su un territorio in pendenza, molto accentuata in alcune zone, molto moderata in altre. Il clima della città, come il resto del fondovalle, è continentale, con inverni freddi ed estati mitigate.



*Fig. 1.1.4 Torrente Mallero che scorre tra le Alpi della Valmalenco, attraversa Sondrio e sfocia nell'Adda. Evidenziati i centri abitati maggiori.*



*Fig.1.1.5 Territorio del comune di Sondrio.*



*Fig.1.1.6 Città di Sondrio, vista da Nord.*

In questa tesi si studia uno scenario di hazard e di rischio idrogeologico per la città di Sondrio. Si ipotizza lo scenario sia conseguenza di un evento pluviale estremo, con un tempo di ritorno di 100 anni. Le problematiche idrogeologiche, dovute a questo intenso evento meteorico, incominciano in Valmalenco, valle nella quale scorre il torrente Mallero, che sfocia poi nei pressi di Sondrio nel fiume Adda.

La Valmalenco è una valle laterale della Valtellina. Inizia da Sondrio e si dirige a nord verso il Pizzo Bernina ed è lunga nel fondovalle una quindicina di chilometri. La valle si incunea nelle Alpi Retiche occidentali; più precisamente divide in due le Alpi del Bernina lasciando ad ovest i Monti della Val Bregaglia e ad est il Gruppo dello Scalino ed il Massiccio del Bernina. Comprende cinque comuni: Torre di Santa Maria, Spriana, Chiesa in Valmalenco, Lanzada e Caspoggio. Il clima e la vegetazione di questa valle sono quelli tipici delle valli alpine, e dipendono dalla quota sul livello del mare. E' una valle ricca di corsi d'acqua, in particolare, oltre a Mallero (che è il corso d'acqua principale), si ricordano questi altri torrenti che si gettano in quest'ultimo: Ventina, Sissone, Vazzeda, Valbona, Pirola, Lagazuolo, Nevasco, Forasco, Braciasco, Paluetto, Rovinaio, Sassersa e Giumellini, Torreggio, lo Sfrisigaro, il Valdone, l'Antognasco, infine da Valbrutta il Lanterna, alimentato dai torrenti Scerscen, Cormor, Largone, Acquanegra e Pallino.



*Fig.1.1.7 Chiesa in Valmalenco, il maggior centro abitato della valle, vista da Nord.*



*Fig.1.1.8 Valmalenco e montagne circostanti.*

Il torrente Mallero nasce da tre bracci distinti che si uniscono in località Chiareggio, due di origine glaciale (Ghiacciaio del Ventina, Monte del Forno) e uno di origine sorgiva (Val Muretto). Convenzionalmente la nascita del torrente Mallero è considerata sul monte del Forno a un'altitudine di circa 2000 m sul livello del mare. Scorre in Valmalenco, dove diversi altri torrenti affluiscono in esso, attraversa i comuni di Chiesa in Valmalenco, Caspoggio, Torre di Santa Maria, Spriana e Sondrio. Il Mallero confluisce da destra nel fiume Adda dopo aver attraversato il centro abitato della città di Sondrio. Esso presenta le caratteristiche salienti di un tipico torrente di queste dimensioni di zona alpina, come una portata molto variabile nel corso dell'anno, un fondo prevalentemente in roccia e sedimenti di grosse dimensioni, soprattutto nei tratti più a monte, dove si notano anche notevoli pendenze e un flusso dell'acqua relativamente rapido.

Torrente Mallero	
Lunghezza	30 km
Portata media	12 mc/s
Sorgente	Monte del Forno 46°20'29.85"N 9°43'54.69"E
Altitudine sorgente	2000 m.s.l.m
Affluenti	Antognasco, Lanterna, Torreggio, Entovasco, Nevasco, Forasco, Pirola, Braciasco, Giumellini, Arcoglio, Dagua, Valdone
Sbocco	Adda a Sondrio 46°09'39.95"N 9°50'58.96"E

Tab. 1.1.1 Tabella di sintesi delle principali caratteristiche del torrente Mallero.

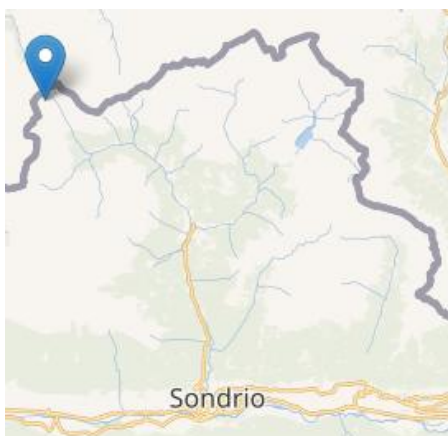


Fig. 1.1.9 Sorgente sul Monte del Forno

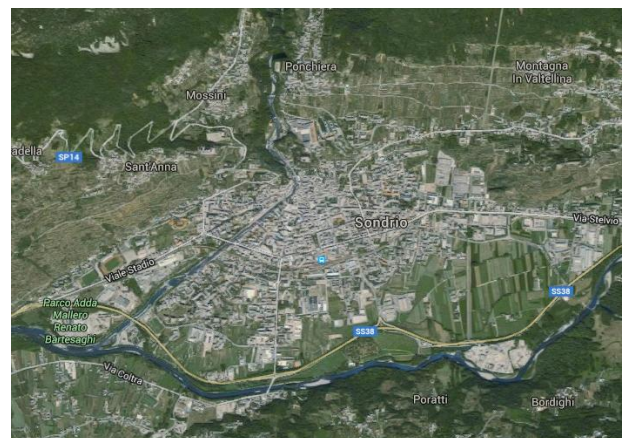


Fig. 1.1.10 Sbocco nell'Adda presso Sondrio

## 1.2 MOTIVAZIONE E OBIETTIVI DEL LAVORO

Nel 1987 è avvenuta a Sondrio un'esondazione del torrente Mallero. L'evidenza storica indica chiaramente la presenza e rilevanza del problema, ovvero la possibile alluvione del Mallero. Un fenomeno come questo è legato, oltre a portate d'acqua molto elevate, a un notevole trasporto solido, come confermato dall'osservazione dell'evento passato. Inoltre l'evidenza storica mostra che l'esondazione del Mallero può avvenire anche per fenomeni meteorici con tempi di ritorno non esagerati, quello del 1987 aveva un tempo di ritorno stimato di circa 60 anni. Questo evento ha provocato ingenti danni alla città e grosse perdite economiche. La presenza e assoluta rilevanza di questo problema costituisce la motivazione degli studi su questo argomento e per la quale è stata scritta questa tesi.

Nel 1987 non vi è stato un significativo allagamento del centro della città di Sondrio, perché la gran parte del volume dei sedimenti trasportati sono giunti nel tratto di torrente in prossimità di Sondrio solo in coda all'evento. E' avvenuto straripamento del Mallero, ma solo negli istanti conclusivi dell'evento, e questo ha limitato il volume d'acqua fuoriuscito (in gran parte sfiorato in un tratto a valle del centro città, quasi in prossimità dell'Adda) e di conseguenza i danni, che comunque da un punto di vista economico sono stati considerevoli (per esempio la distruzione di un ponte).

Il problema studiato è molto complesso, così come gli strumenti modellistici utilizzabili lo sono. Per modellare uno scenario di questo tipo è necessario utilizzare conoscenze provenienti da vari ambiti e avere a disposizione dei dati. In seguito all'alluvione del 1987 diversi dati sono stati raccolti per studiare questo tipo di fenomeno. La presenza di dati permette la costruzione dello scenario proposto in questa tesi, senza di essi sarebbe stato impossibile eseguire la modellazione numerica.



*Fig. 2.1.1 Alluvione del 1987, Sondrio. Mallero in piena.*



*Fig. 2.1.2 Alluvione del 1987, Sondrio. Argine di contenimento provvisorio dopo straripamento.*



*Fig. 2.1.3 Alluvione del 1987, Sondrio. Lavori di rimozione sedimenti dal letto del torrente.*



*Fig. 2.1.4 Alluvione del 1987, Valmalenco. Piena del Mallero.*

Alcuni studi sono già stati eseguiti su questo argomento, in particolare: Mauri e Spagnolatti (2009), Colombo e Giuriani (2011), Filippetti e Zoppi (2012), Radice e Rosatti (2012), Elsayed (2013), Radice et al. (2013), Ivanov (2014), Radice e Elsayed (2014) hanno trattato la modellazione idraulico-morfologica del torrente Mallero, mentre Izadifar e Babae (2015) hanno trattato l'allagamento della città di Sondrio e proposto un possibile scenario di danno.

Lo studio e la modellazione idraulico morfologica del torrente Mallero sono stati eseguiti diverse volte, mentre l'allagamento della città di Sondrio e i possibili danni conseguenti sono stati studiati molto meno. Per questa ragione nella presente tesi la modellazione idraulico morfologica avrà uno spazio relativamente ridotto, mentre grande peso sarà dato alla modellazione dell'allagamento e alla stima del danno atteso.

Seguendo questa linea guida, la tesi si sviluppa su 3 filoni principali:

- Modellazione dello scenario di piena del torrente Mallero (hazard);
- Modellazione scenario di allagamento di Sondrio (hazard);
- Stima del danno economico su alcuni edifici (rischio).

Fissato come riferimento l'evento con tempo di ritorno di 100 anni, per prima cosa si procede alla modellazione geologica dell'erosione in Valmalenco e idraulico-morfologica del torrente Mallero, finalizzate all'identificazione della posizione della fuoriuscita dell'acqua nella città di Sondrio e al relativo idrogramma di sfioro.



Dopo ciò, anziché procedere subito a uno studio dettagliato dell'allagamento della città di Sondrio, si studia un caso sintetico. Nel caso sintetico si modella un allagamento su un terreno che permette la creazione di un modello semplice da un punto di vista geometrico. Questo rende possibile eseguire molte analisi in tempi relativamente ridotti, di ottenere risultati di facile lettura e di ottenere indicazioni utili per studiare l'allagamento in un'area urbana pedemontana come quella di Sondrio, nonché di comprendere al meglio la fisica del processo e poter affrontare con consapevolezza la modellazione della città.

Si procede quindi alla modellazione dell'allagamento della città, sfruttando le indicazioni ottenute dal caso sintetico, e alla costruzione delle mappe di hazard.

Per ultima cosa si modella il danno causato dall'alluvione su un campione di edifici valutando quindi il rischio; per fare ciò si utilizza il modello INSYDE, un modello, tuttora in corso di sviluppo, che, partendo dai parametri di pericolosità, esposizione e vulnerabilità dell'edificio in oggetto si possono stimare il danno relativo e il danno assoluto (in Euro) causato dall'allagamento su quest'ultimo.

Nella tesi si utilizza spesso il termine "hazard" anziché tradurlo in italiano con il termine "pericolo". Ciò è fatto volutamente per mantenere la sfumatura del termine inglese che racchiude il senso di aleatorietà che si ha nello studio di un evento come questo ricco di incertezze.

In due tesi precedenti scritte di recente (Ivanov, 2014 e Izadifar e Babae, 2015) è stato modellato parte dello scenario considerato e posta grande attenzione alla teoria alla base dei modelli usati. In particolare: Ivanov (2014) ha modellato il processo idrogeologico di erosione e trasporto di sedimenti che avviene nel bacino della Valmalenco con conseguente esondazione del Mallero a Sondrio, mentre Izadifar e Babae (2015) hanno modellato l'allagamento della città di Sondrio e valutato in maniera preliminare un possibile scenario di rischio. In questa tesi si eseguono entrambe le modellazioni, sia del processo idrogeologico in Valmalenco che dell'allagamento di Sondrio, utilizzando modelli diversi, confrontando i risultati con quelli ottenuti nelle due tesi precedenti e proponendo una stima del danno su alcuni edifici con un modello innovativo tuttora in via di sviluppo. In questo modo si costruisce una catena logica che permette lo studio e la modellazione di uno scenario, nella sua interezza, dalla goccia di pioggia che cade sul monte Bernina, versante Valmalenco, all'altezza dell'acqua sul marciapiede di fronte alla porta della villa in Via Alessi 39 a Sondrio, fino a stimare il danno subito da tale edificio.

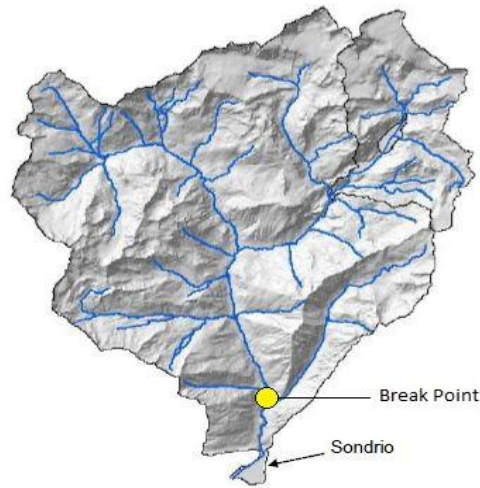
## 2 MODELLAZIONE IDRAULICO-MORFOLOGICA DEL TORRENTE MALLERO

### 2.1 INTRODUZIONE

Per modellare un eventuale allagamento della città di Sondrio, così come spesso accade per alluvioni in zona montana, si deve riconoscere l'importanza della componente solida, ovvero dei sedimenti erosi e trasportati in seguito all'evento. E' quindi necessario iniziare la modellazione dell'evento da lontano, a monte della città, nel bacino della Valmalenco. I processi di produzione e trasporto di sedimenti vengono separati. Infatti la modellazione di un così ampio bacino montano, come quello della Valmalenco, non può essere affrontata solamente con un approccio idraulico. Per questo motivo si è deciso di suddividere il bacino in due parti, separate da un breakpoint. Per quanto riguarda la parte a monte di tale punto sarà stimato il volume di sedimenti che, a seguito di erosione e trasporto, potranno raggiungere il breakpoint durante un evento meteorico estremo con tempo di ritorno di 100 anni, evento preso come riferimento per la modellazione dello scenario. In tale parte del bacino è considerata più importante la componente di erosione rispetto a quella di trasporto, quindi tale stima sarà effettuata utilizzando il modello di Gavrilovic. Il tratto di torrente a valle del breakpoint, nel quale si ritiene di maggiore importanza il trasporto di sedimenti rispetto all'erosione, sarà modellato idraulicamente con un modello monodimensionale. Viste le problematiche descritte in questo capitolo e nel precedente, la strategia modellistica di dividere il bacino in due parti pare essere appropriata e permette l'utilizzo dei modelli a disposizione, ma ovviamente non è l'unica scelta possibile.



*Fig. 2.1.1 Posizione del breakpoint rispetto alla Valmalenco e alla città di Sondrio.*



*Fig. 2.1.2 Posizione del breakpoint rispetto alla Valmalenco e alla città di Sondrio.*

Lo scopo ultimo di questo capitolo è, fissato l'evento con tempo di ritorno di 100 anni come scenario di riferimento, stimare dove può avvenire la fuoriuscita di acqua dal torrente Mallero nella città di Sondrio e un possibile idrogramma di sfioro.

Per fare ciò è necessario utilizzare diversi modelli in successione: dopo la stima, almeno di un ordine di grandezza, del volume di sedimenti che può superare il breakpoint nel corso dell'evento (modello geologico) e la modellazione idraulico-morfologica del tratto di torrente a valle del breakpoint (con analisi di sensibilità iniziale finalizzata alla parametrizzazione del modello) è possibile l'identificazione della sezione di sfioro e la modellazione dello straripamento. Il risultato ultimo della modellazione della fuoriuscita è la stima di un possibile idrogramma di sfioro.

Solo dopo aver stimato:

- 1) dove avviene la fuoriuscita dell'acqua dal torrente alla città di Sondrio;
- 2) un possibile idrogramma di sfioro.

Si potrà procedere alla modellazione dell'allagamento della città e dei danni che essa può causare ad alcuni edifici

## 2.2 MODELLAZIONE DELL'EROSIONE NEL BACINO DELLA VALMALENCO

Lo scopo di questo studio è modellare l'erosione in Valmalenco per avere una stima del volume di sedimenti che, in seguito a un evento meteorico estremo, con tempo di ritorno di 100 anni, può superare il breakpoint e quindi essere usato come input per la modellazione idraulico-morfologica del torrente Mallero. Per fare ciò si esegue prima un'analisi sul lungo termine per valutare quale può essere il volume di sedimenti eroso e trasportato al breakpoint in un anno in cui non ci sono eventi meteorici estremamente critici. Tale stima viene poi utilizzata come punto di partenza per cercare di quantificare, con un'analisi a breve termine, il volume di sedimenti che può essere trasportato al breakpoint durante l'evento modellato nello scenario. La modellazione dell'erosione nel bacino della Valmalenco, per lo scenario considerato, è mostrata in dettaglio in Bettiga et al. (2016).

### *Il modello di Gavrilovic*

L'erosione nel bacino della Valmalenco è stata modellata utilizzando la relazione di Gavrilovic. Essa è la formula più usata e ritenuta più affidabile nello studio dell'erosione in bacini montani, specialmente sulle Alpi, perché è stata ricavata da osservazioni in bacini montani del sud della Jugoslavia, considerati simili a quelli alpini. Si tratta di un modello empirico, creato partendo da diverse osservazioni sui volumi erosi e trasportati e cercando a posteriori di ricostruire una formula che mettesse in relazione i principali parametri che determinano l'erosione e il trasporto dando risultati ben approssimanti i valori osservati.

Nel modello di Gavrilovic il volume di sedimenti  $G$  che in un anno passa dalla sezione di chiusura di un bacino è ottenuto come prodotto del volume di sedimenti eroso durante l'anno  $W$  e del coefficiente di convogliamento  $R$  che rappresenta in maniera semplificata la capacità del bacino di trasportare i sedimenti alla sezione sua di chiusura.

$$G = W \cdot R \quad (2.2.1)$$

Il volume totale di sedimenti  $W$  eroso durante l'anno dipende principalmente dalle caratteristiche ambientali e climatiche e dalla morfologia del bacino:

$$W = T \cdot H \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \quad (2.2.2)$$

Dove:

$T$  = coefficiente di temperatura, dipendente dalla temperatura media annua del bacino;

$H$  = pioggia media annua;

$Z$  = coefficiente di erosione, dipendente dal tipo di suolo, dalla vegetazione, dalla pendenza e dal tipo di erosione nel bacino;

$F$  = area del bacino.

Il coefficiente di convogliamento  $R$  può variare tra 0 e 1 dove  $R=0$  indica che nessun sedimento eroso raggiunge nel corso dell'anno la sezione di chiusura del bacino mentre  $R=1$  indica che tutti i sedimenti erosi la raggiungono. Tale coefficiente dipende dalle caratteristiche della rete di drenaggio del bacino:

$$R = \frac{(l+l_i) \cdot \sqrt{O \cdot D}}{(l+10) \cdot F} \quad (2.2.3)$$

Dove:

$l$  = lunghezza torrente principale;

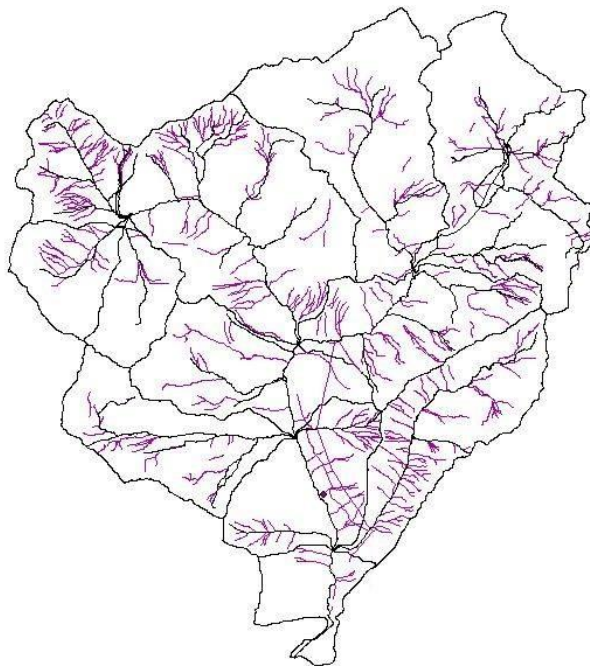
$l_i$  = lunghezza torrenti secondari;

$O$  = perimetro del bacino;

$D$  = altezza media del bacino;

$F$  = area del bacino.

Nella modellazione si sceglie di considerare  $R$  una caratteristica globale del bacino, dunque è calcolato una sola volta per l'intero bacino della Valmalenco. Al contrario per  $W$ , che può sia essere calcolato una sola volta per tutto il bacino, che essere calcolato per ciascun sottobacino scelto, per poi ottenere il volume totale di sedimenti erosi durante l'anno come somma di quelli prodotti dai singoli sottobacini, si sceglie di adottare la seconda possibilità, ovvero un calcolo di maggior dettaglio eseguito su ciascun sottobacino.



*Fig. 2.2.1 Bacino della Valmalenco e suddivisione in sottobacini proposta.*

## Analisi a lungo termine

E' stata eseguita un'analisi a lungo termine per calcolare il volume di sedimenti che mediamente in un anno in cui non ci sono eventi molto critici (con tempi di ritorno molto lunghi) viene eroso e trasportato al breakpoint. Suddividendo il bacino in diversi sottobacini, per cercare di avere una stima più accurata dei volumi erosi  $W$  in ciascuno di essi (dato che essi hanno caratteristiche piuttosto diverse l'uno dall'altro), e poi sommando tali volumi, ne risulta:

$$W = 553949 \text{ m}^3/\text{anno}$$

$$R = 0.12$$

$$G_{\text{anno}} = 64444 \text{ m}^3/\text{anno}$$

Si noti che per il calcolo di tali contributi è stato trascurato il sottobacino a nord-est poiché sbarrato dalle due dighe di Campo Moro.



Fig. 2.2.2 Dighe di Campo Moro

### *Analisi a breve termine*

Calcolato il volume di sedimenti erosi e trasportati in un anno si procede a una stima del volume di sedimenti che supera il breakpoint durante l'evento di riferimento per lo scenario. E' chiaro che ci sono diversi modi per concettualizzare e parametrizzare l'apporto nel breve periodo, qui se ne propone uno dei tanti possibili, di cui poi si discuteranno le ipotesi e i limiti. Il volume in oggetto è calcolato come somma del volume di sedimenti erosi e trasportati nel corso dell'evento più il volume di sedimenti accumulatosi nel corso degli anni nell'alveo del torrente in un tratto prossimo al breakpoint e trasportato fino a tale punto dall'evento:

$$VOLUME_{evento} = G_{evento} + S_{accumulo\ tratto\ 1-2+laterale} \quad (2.2.4)$$

Si è considerato che un evento di tale intensità possa produrre l'erosione che normalmente si ha nel torrente durante un anno senza eventi estremi, dunque:

$$G_{evento} = G_{anno} = 64444 \text{ m}^3$$

Si precisa che questa è un'ipotesi delle tante possibili, volta a stimare l'ordine di grandezza di questo contributo, non è infatti possibile una valutazione accurata di tale valore a causa delle forti incertezze che caratterizzano la quantificazione di questo parametro.

Il volume di sedimenti accumulato in un anno nella rete di drenaggio di un bacino è in generale calcolato come:

$$S_{accumulo\ annuale} = (1 - R) \cdot W \quad (2.2.5)$$

Volendo calcolare l'accumulo annuale nel tratto di torrente, verso monte, prossimo al breakpoint (tratto 1-2) si è calcolata la differenza tra volume accumulato nella rete di drenaggio del bacino a monte del breakpoint (ora contrassegnato come breakpoint 1) meno il volume accumulato nella rete di drenaggio del bacino a monte del breakpoint 2. La distanza scelta tra breakpoint 1 e il breakpoint 2 corrisponde alla distanza tra due punti in cui nel Mallero sfociano due affluenti. La posizione del breakpoint 2 è ipotizzata quindi secondo tale criterio, si noti però che l'apporto totale di sedimenti dipende fortemente dalla scelta della posizione del breakpoint 2. Ovviamente questa non è l'unica scelta possibile ma è ritenuta ragionevole al fine di stimare un ordine di grandezza dell'apporto totale di sedimenti.

Perciò ne risulta:

$$S_{\text{accumulo annuale tratto 1-2}} = S_{\text{accumulo annuale 1}} - S_{\text{accumulo annuale 2}} \quad (2.2.5)$$

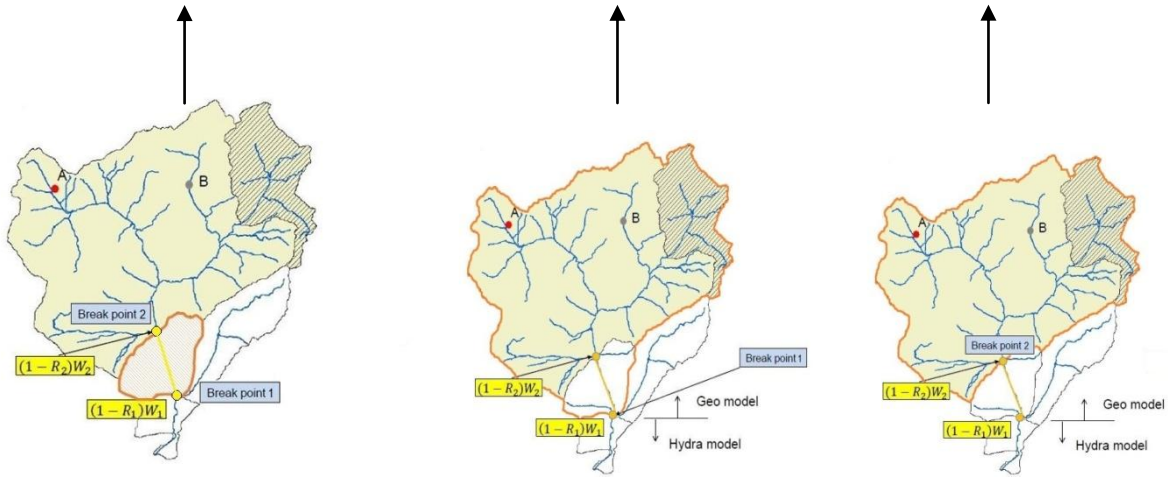


Fig. 2.2.3 Aree ipotizzate per il calcolo dell'accumulo nel tratto 1-2

A tali contributi va poi aggiunto quello del sottobacino laterale a sud-est, tale sottobacino ha infatti una grande capacità di trasporto e quindi si ipotizza che tutti i sedimenti accumulati nel corso degli anni nella sua rete di drenaggio ci si aspetta vengano portati a valle durante l'evento. Dunque risulta:

$$S_{\text{accumulo annuale 1-2+laterale}} = S_{\text{accumulo annuale tratto 1-2}} + S_{\text{accumulo annuale bacino laterale}} \quad (2.2.6)$$

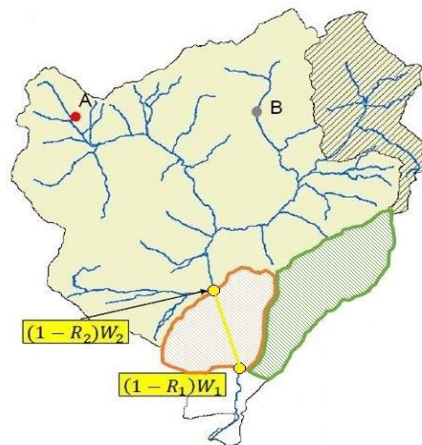


Fig. 2.2.4 Sottobacini considerati nel calcolo. Bacino laterale in verde, tratto 1-2 in giallo e relativo bacino in arancione.



Si moltiplica infine il volume di accumulo annuale per 40 anni, ovvero il tempo che mediamente intercorre tra due eventi in grado di portare a valle gran parte del volume di sedimenti accumulati nel corso degli anni dall'erosione. Anche questa è un'ipotesi piuttosto forte che influenza fortemente l'apporto totale di sedimenti, ma appare ragionevole al fine di una stima dell'apporto totale di sedimenti. Quindi si ha:

$$S_{accumulo\ 1-2+laterale} = S_{accumulo\ annuale\ 1-2+laterale} \cdot 40\ anni \quad (2.2.7)$$

Ne risulta dunque:

$$\begin{aligned} S_{accumulo\ annuale\ tratto\ 1-2} &= S_{accumulo\ annuale\ 1} - S_{accumulo\ annuale\ 2} \\ &= 443290\ m^3/anno + 429656\ m^3/anno = 13634\ m^3/anno \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{accumulo\ annuale\ 1-2+laterale} &= S_{accumulo\ annuale\ tratto\ 1-2} + S_{accumulo\ annuale\ bacino\ laterale} \\ &= 13634\ m^3/anno + 12209\ m^3/anno = 25843\ m^3/anno \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{accumulo\ 1-2+laterale} &= S_{accumulo\ annuale\ 1-2+laterale} \cdot 40\ anni \\ &= 25843\ m^3/anno \cdot 40\ anni = 1033727\ m^3 \end{aligned}$$

Dunque il volume totale di sedimenti che superano il breakpoint durante l'evento è stato stimato come:

$$\begin{aligned} VOLUME_{evento} &= G_{evento} + S_{accumulo\ tratto\ 1-2+laterale} \\ &= 64444\ m^3 + 1033727\ m^3 = 1098171\ m^3 \end{aligned}$$

A seguito di un'analisi di sensitività in cui sono proposte diverse calibrazioni dei parametri del bacino si è concluso che il volume totale eroso e trasportato al breakpoint nel corso dell'evento può variare in un intervallo piuttosto ampio, cioè tra mezzo milione di metri cubi e un milione e mezzo di metri cubi. Si consideri dunque che il valore proposto è da ritenersi rappresentativo di un ordine di grandezza del fenomeno, ma l'incertezza è inevitabilmente elevata.

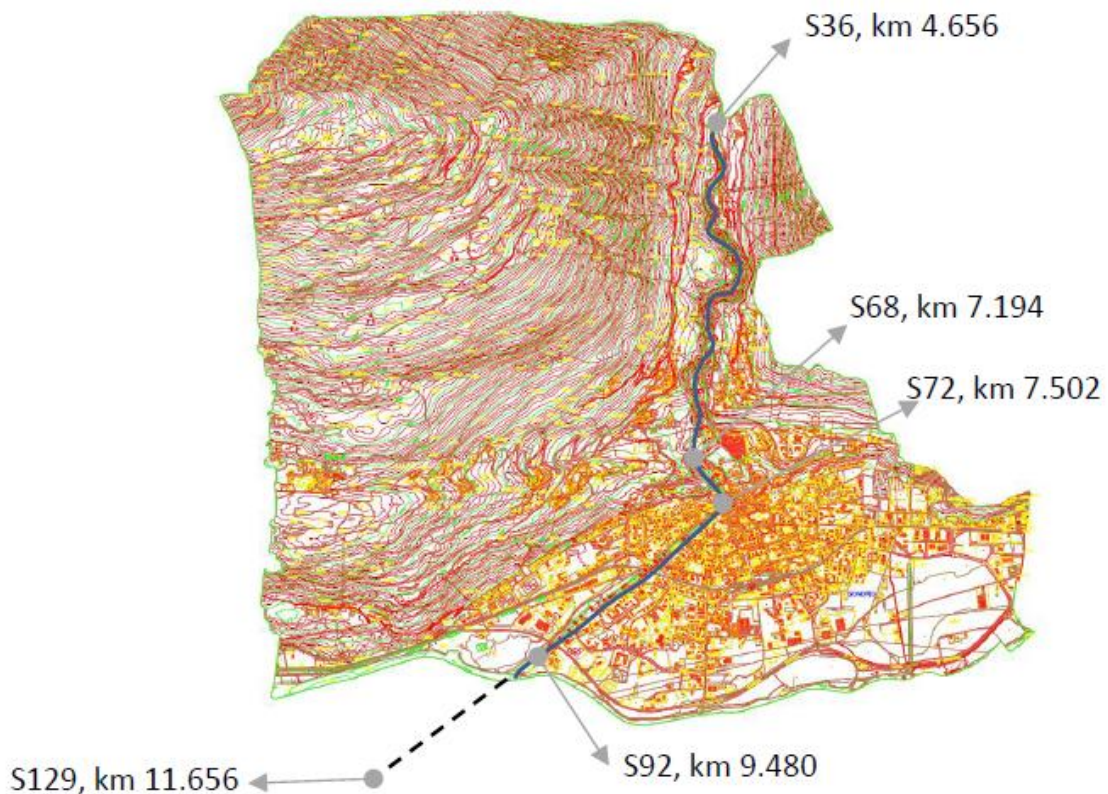


*2.2.5 Sedimenti accumulati nel Mallero nel corso degli anni nei pressi di Chiesa Valmalenco.*

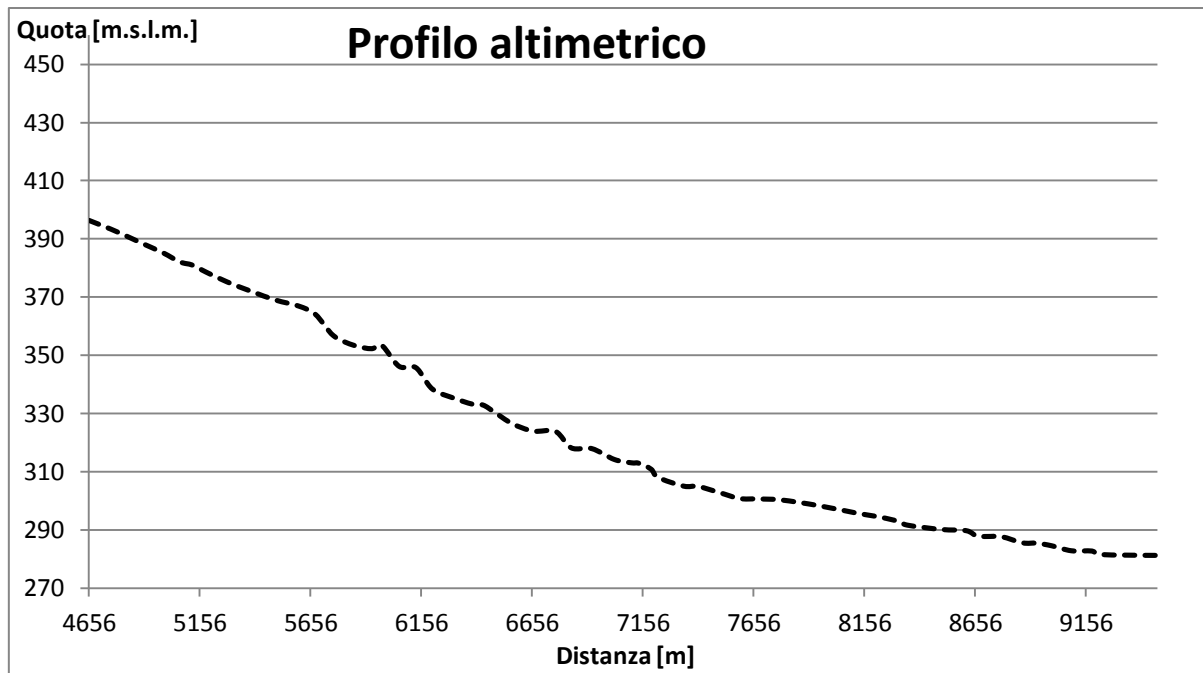
## 2.3 MODELLAZIONE IDRAULICA MONODIMENSIONALE (1D)

Il tratto dal breakpoint allo sbocco del Mallero nel fiume Adda, lungo circa 4.5 km, è stato modellato idraulicamente utilizzando il software BASEMENT\_v2.4. La geometria del torrente è stata considerata inserendo diverse sezioni del torrente. Il breakpoint, che è il punto dove inizia la modellazione idraulica, corrisponde alla sezione 36. Lo sbocco del Mallero dentro l'Adda corrisponde alla sezione 92. E' poi stato inserito un tratto fittizio di torrente a valle di tale sezione, con una pendenza molto basso (0.001). Inserire un tratto fittizio di torrente con una pendenza molto ridotta permette di modellare il blocco dei sedimenti in queste ultime sezioni in una maniera facile da implementare nel software, è inoltre risolto in questo modo il problema della condizione al contorno di valle che viene tenuta lontana dalla città e quindi non influenza il processo. Tale scelta permette una semplificazione del modello senza introdurre una significativa perdita di accuratezza, infatti se si verifica un intenso evento meteorologico, come quello ipotizzato nello scenario, il fiume Adda esonda, un grosso accumulo di acqua con velocità pressoché nulla fuoriesce nella parte bassa della città di Sondrio, dove si trovano le ultime sezioni del Mallero, con l'effetto di bloccare i sedimenti trasportati dal Mallero in queste ultime sezioni. L'effetto della pendenza di tale tratto è mostrato in dettaglio in Radice et al. (2013).

Si tenga presente che in tale modellazione molto parametri sono coinvolti, saranno quindi effettuate molte analisi di sensitività al fine di comprendere il peso di ciascuno nella modellazione e calibrarli il meglio possibile.



*Fig. 2.3.1 Tratto di torrente modellato con modello idraulico monodimensionale*



*Fig. 2.3.2 Profilo altimetrico del Mallero nel modello idraulico*

Il tratto di torrente a monte di Sondrio (dalla sezione 36 alla 65) mostra caratteristiche molto diverse dal tratto cittadino di quest'ultimo: nelle sezioni di monte si nota una pendenza maggiore e una larghezza minore dell'alveo che nel tratto di Mallero in città dove si ha un alveo che è stato affetto da sistemazioni.



*Fig. 2.3.3 Esempio di sezione di monte (nei pressi della sezione 37). Si nota un alveo stretto e pendente, con un fondo naturale molto scabro*



*Fig. 2.3.4 Esempio di sezione di valle (nei pressi di sezione 69, Sondrio). Si nota un alveo artificiale, ampio e poco pendente.*

### **Modello 1D**

Il modello monodimensionale utilizzato si basa sull'integrazione di un sistema di equazioni differenziali composto dalle equazioni di De Saint-Venant (equazione di continuità e di conservazione della quantità di moto), dall'equazione di Exner (continuità dei sedimenti) e da un'equazione di chiusura per la capacità di trasporto. Vanno quindi aggiunte adeguate condizioni al contorno e una condizione iniziale.

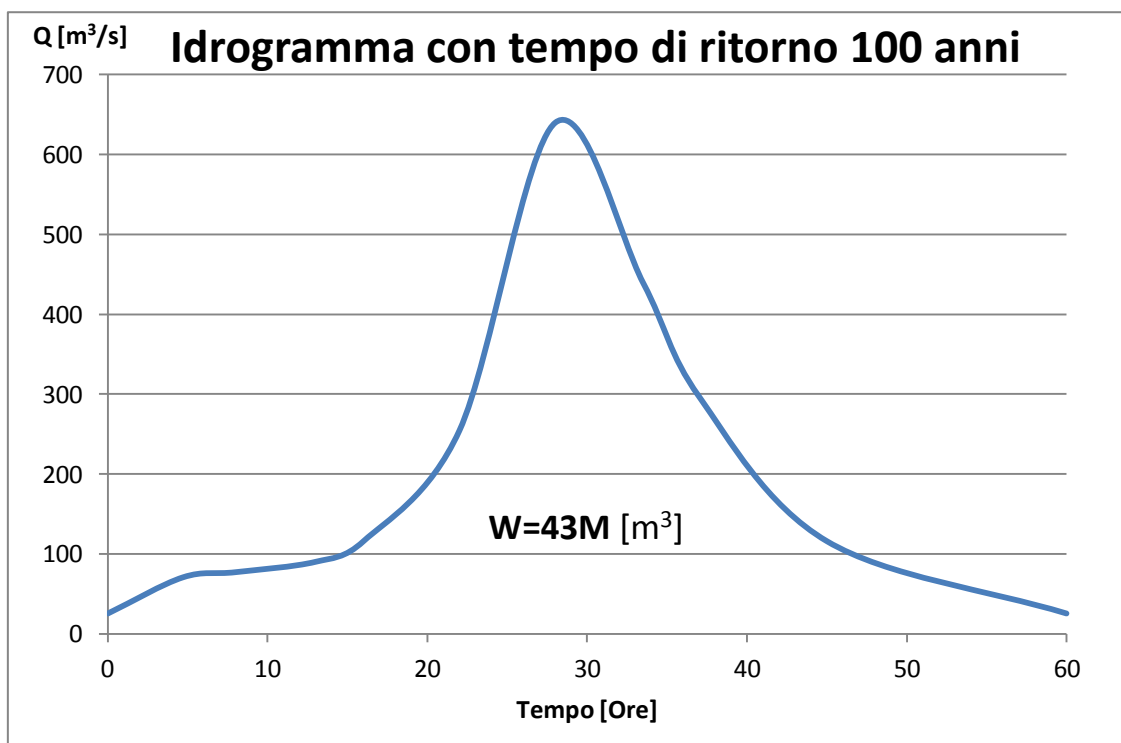
$$\begin{cases}
 \frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\
 \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial s} + g \frac{\partial d}{\partial s} = g(S_0 - S_f) \\
 \frac{\partial Q_s}{\partial s} \frac{1}{1 - P_0} + \frac{\partial A_s}{\partial t} = q_s \\
 Q_s = f(\tau^*, \tau_c^*)
 \end{cases}
 \quad + \text{BC, IC}
 \tag{2.3.1}$$

Per costruire la condizione iniziale si procede come segue: si esegue una modellazione a fondo fisso, partendo da fondo asciutto, con un idrogramma costante come condizione al contorno, al termine della quale sarà ottenuto un profilo di moto permanente, che viene usato come condizione iniziale del modello morfologico. Si consideri comunque che l'effetto della condizione iniziale si nota solo per pochi minuti dopo l'inizio del processo modellato, il quale, al contrario, è lungo 60 ore, dunque qualunque sia la condizione iniziale in questo modello la sua importanza è piuttosto ridotta.

Come condizione al contorno di valle è stato scelto di inserire un tratto fittizio di torrente come già discusso, al termine del quale è scelta l'altezza di moto uniforme.

Come condizione al contorno di monte è stato scelto l'idrogramma relativo a un evento con tempo di ritorno di 100 anni. Questo è da ritenersi un evento estremo da un punto di vista idrologico, si modella dunque uno scenario estremamente gravoso.

Tale idrogramma è stato ottenuto da modellazioni idrologiche del bacino della Valmalenco e della sua risposta a un evento meteorologico estremo.



*Fig. 2.3.5 Idrogramma utilizzato per la modellazione dello scenario con un volume di 43 milioni di metri cubi di acqua in 60 ore.*

Una stima della scabrezza del torrente è molto difficile e non vi sono dati a disposizione per una valutazione accurata. Si ipotizza un coefficiente di Strickler pari a  $30 m^{1/3}/s$  lungo tutto il canale, noto che questa non è l'unica scelta possibile. Tale scelta risulta coerente con i valori di tale coefficiente proposti in diversi manuali per alvei di questo tipo.

## Analisi in acqua chiara

Si è per prima cosa analizzato il comportamento del sistema senza l'apporto di sedimenti entranti dalla sezione di monte. Sotto tale ipotesi si nota che il torrente sarebbe in grado di trasportare tutto il volume d'acqua entrante senza mai esondare. Si identifica la sezione 74 come la più critica, ovvero quella col franco più piccolo: nella fase di picco dell'onda di piena la differenza di quota tra l'argine sinistro di tale sezione e il pelo dell'acqua è inferiore al mezzo metro. Analizzando il livello dell'acqua in tale sezione al variare della portata si è ricavato che per avere esondazione sarebbe necessario, nell'ipotesi di trascurare i sedimenti entranti, avere una portata di 775 metri cubi al secondo. Per tale valore di portata entrante nel modello idraulico si avrebbe sfioro di acqua solo nella sezione 74, ma tale sezione si trova nei pressi del centro città, in prossimità del ponte di via De Simoni, dunque lo sfioro avverrebbe in una zona molto importante. Si noti che la stima di tale valore può essere fortemente influenzata dalla stima del coefficiente di scabrezza sul quale però c'è molta incertezza.

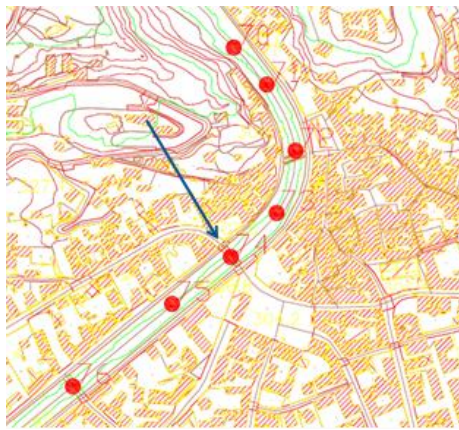


Fig. 2.3.6 Sezione 74

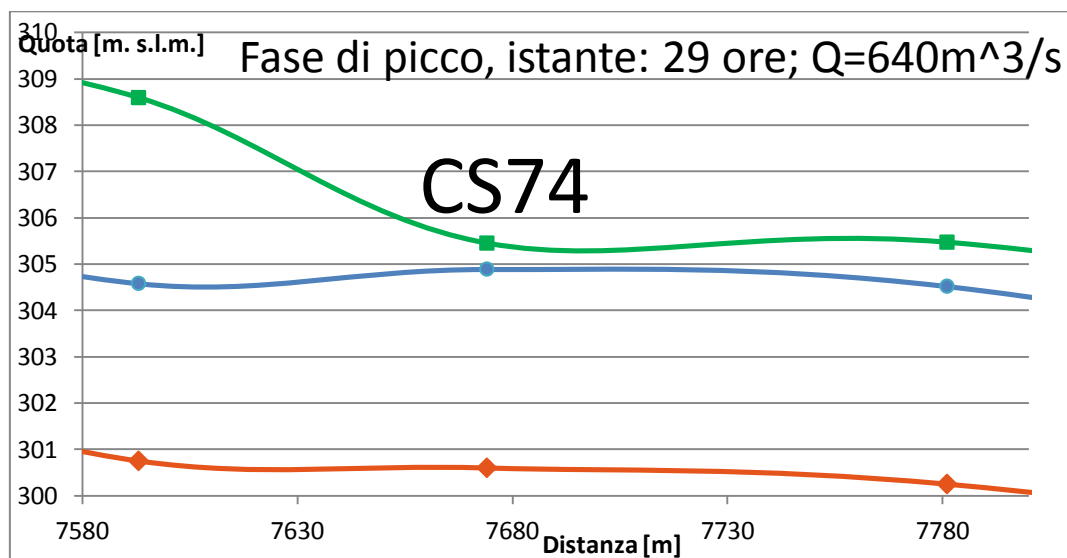


Fig. 2.3.7 Profilo del letto del torrente (arancione), del pelo dell'acqua (blu) e dell'argine sinistro (verde). I punti rappresentano quote in corrispondenza delle sezioni nel modello, le linee sono curve di interpolazione.



*Fig. 2.3.8 Posizione della sezione 74 all'interno della città di Sondrio*



*Fig. 2.3.9 Sezione 74, posizione nella città di Sondrio e visione frontale (da valle)*



### Stima del diametro critico

E' stato stimato per ciascuna sezione del tratto in analisi di torrente il diametro critico, ovvero il massimo diametro che un sedimento, ipotizzato di forma sferica, può avere per essere mobilizzato in tale sezione. Si tenga però presente che la valutazione dei diametri critici è stata fatta con metodi empirici, affetti da molta incertezza; tali risultati sono da ritenersi validi solo a livello di stima dell'ordine di grandezza del fenomeno.

Sono state svolte diverse analisi con diversi valori di portata e con calcolo degli sforzi di taglio ricavati sia dal software Basement sia da calcolo manuale usando l'equazione (2.3.2):

$$\tau_{sed} = \frac{\left(\frac{d_{90}^{1/6}}{26}\right)^2 V^2}{R_H^{1/3}} \rho g \quad (2.3.2)$$

Dove  $\tau_{sed}$  è lo sforzo di taglio sui sedimenti,  $d_{90}$  è il diametro a cui corrisponde un passante del 90%,  $V$  è la velocità dell'acqua nella sezione considerata,  $R_H$  è il raggio idraulico in tale sezione,  $\rho$  è la densità dell'acqua e  $g$  è l'accelerazione di gravità.

Una volta ottenuti gli sforzi di taglio, dal software o dall'equazione (2.3.2), sfruttando in tal caso velocità e raggio idraulico ottenuti dal software, si stimano i diametri critici secondo la relazione:

$$(d_s)_c = \frac{\tau_{sed}}{\rho g(s-1)(\tau_*)_c} \quad (2.3.3)$$

Dove  $(d_s)_c$  è il diametro critico dei sedimenti,  $s$  è il rapporto tra la densità del materiale di cui sono composti i sedimenti e la densità dell'acqua,  $\tau_*$  è lo sforzo di taglio adimensionalizzato e  $(\tau_*)_c$  è il valore critico dello sforzo di taglio adimensionalizzato (che può essere scelto in un intervallo da 0.03 a 0.06).

Sono qui riportati i risultati dell'analisi svolta con la portata di picco dell'idrogramma dell'evento considerato per differenti scelte dello sforzo critico adimensionalizzato (0.03, 0.045, 0.06).

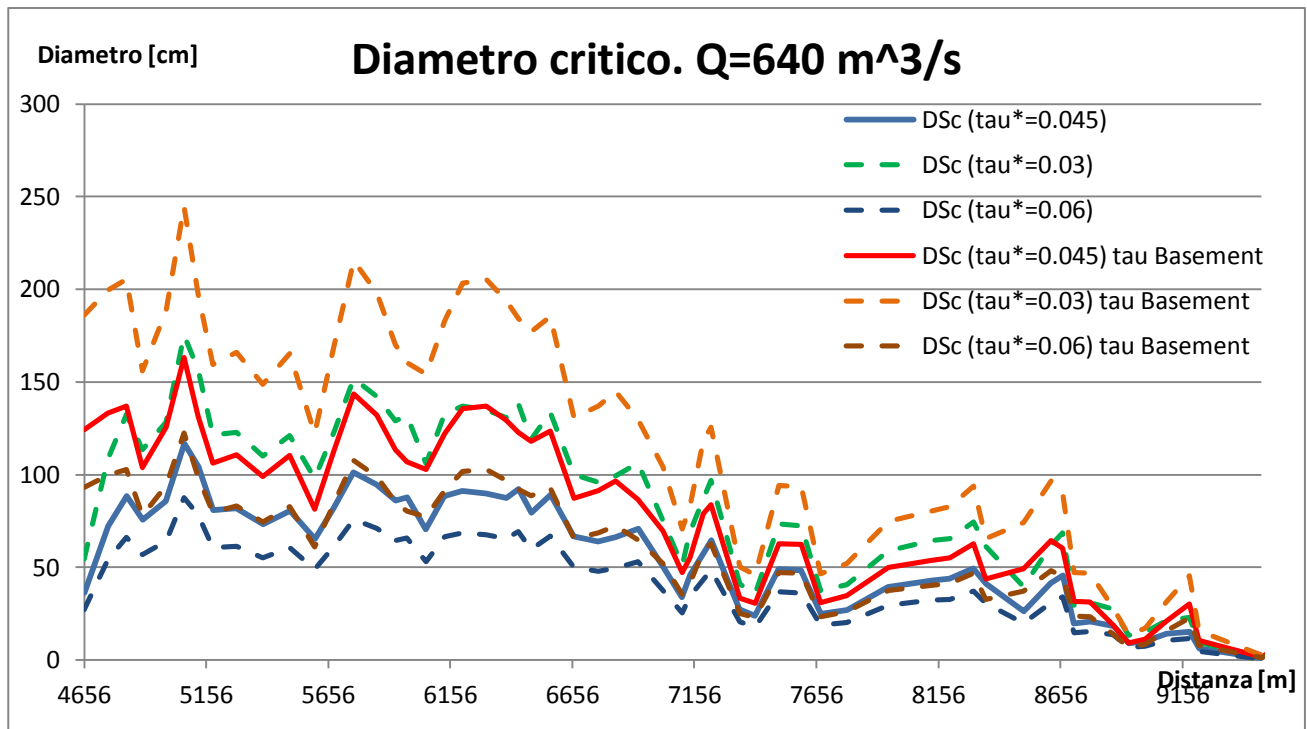


Fig. 2.3.10 Diametro critico lungo il tratto considerato di torrente per portata di picco dell'idrogramma.

I diametri critici ottenuti col calcolo degli sforzi manuale risultano piuttosto diversi da quelli ottenuti gli sforzi ricavati col software. Questo è dovuto soprattutto al fatto che gli sforzi calcolati manualmente sono riferiti al sedimento, mentre quelli ottenuti dal software sono sforzi totali.

Ne è risultato che nelle sezioni di monte, dove il torrente è più stretto e più pendente, la velocità dell'acqua è maggiore e quindi, a causa dei maggiori sforzi di taglio, il diametro critico è maggiore rispetto a quello nelle sezioni di valle dove il torrente è più largo e meno pendente, con velocità dell'acqua minori e minori sforzi di taglio. Ciò indica chiaramente che i sedimenti più grossi saranno bloccati a monte, nella prima sezione incontrata con diametro critico minore del diametro del sedimento considerato, mentre a valle, nei pressi di Sondrio, solo i sedimenti di dimensioni più piccole arriveranno. Si consideri inoltre che tali valori e considerazioni hanno lo scopo di rappresentare una tendenza generale, non vi è ragione per supporre con certezza che nei pressi di Sondrio non arrivino, in seguito all'evento, sedimenti con diametri critici di un metro, si può solo supporre che sia improbabile trovarne molti di queste dimensioni in tale tratto di torrente rispetto al tratto più a monte.

Si riportano delle figure per documentare come attualmente ci siano sedimenti di dimensioni molto maggiori nel letto del torrente in Valmalenco rispetto che nei pressi di Sondrio.



*Fig. 2.3.11 Esempio di dimensione dei sedimenti accumulati in sezione di monte*



*Fig. 2.3.12 Esempio di dimensione dei sedimenti accumulati in sezione di valle*

## Evoluzione morfologica

In un evento estremo come quello proposto per lo scenario, a una grossa portata di acqua è accoppiata una grossa portata di sedimenti, la quale inevitabilmente determina una variazione nel profilo altimetrico del letto del torrente. Considerando come volume di sedimenti entranti dalla prima sezione considerata dal modello idraulico un milione di metri cubi di sedimenti monogranulari sono state condotte diverse analisi al variare della distribuzione nel tempo di portata di sedimenti entranti e del diametro dei sedimenti.

### Diametro dei sedimenti

Il modello ovviamente è molto sensibile alla dimensione dei sedimenti inserita. A parità di tutti gli altri parametri si notano grosse variazioni nell'evoluzione morfologica del profilo altimetrico del torrente al variare della dimensione dei sedimenti, in particolare nelle zone di accumulo. Diverse analisi sono state effettuate per giungere alla conclusione attesa che la dimensione dei sedimenti influenza fortemente la modellazione dello scenario, sono qui riportati i risultati di un'analisi con sedimenti monogranulari sferici di 2 cm di diametro e di 30 cm di diametro, supponendo una distribuzione costante nel tempo di portata di sedimenti entrante e un volume totale di soli 300000 metri cubi (la scelta di mostrare questa analisi tra le tante è stata fatta perché con questa distribuzione si notano molto chiaramente le differenze e le zone in cui è prevalente l'accumulo di sedimenti e perché con un volume di sedimenti entranti relativamente piccolo il modello non mostra instabilità numeriche dunque la visualizzazione è ottima, non perché una distribuzione costante è ritenuta più verosimile, come sarà discusso a breve).

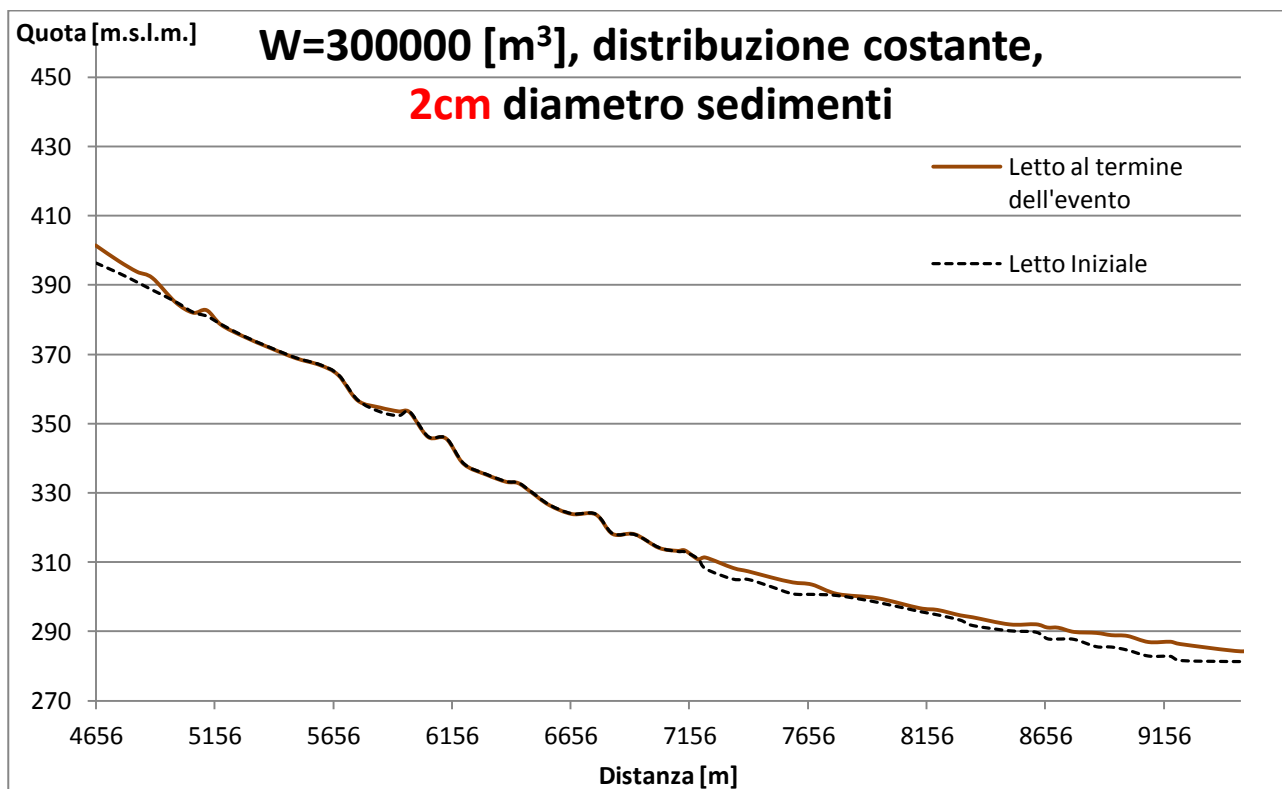
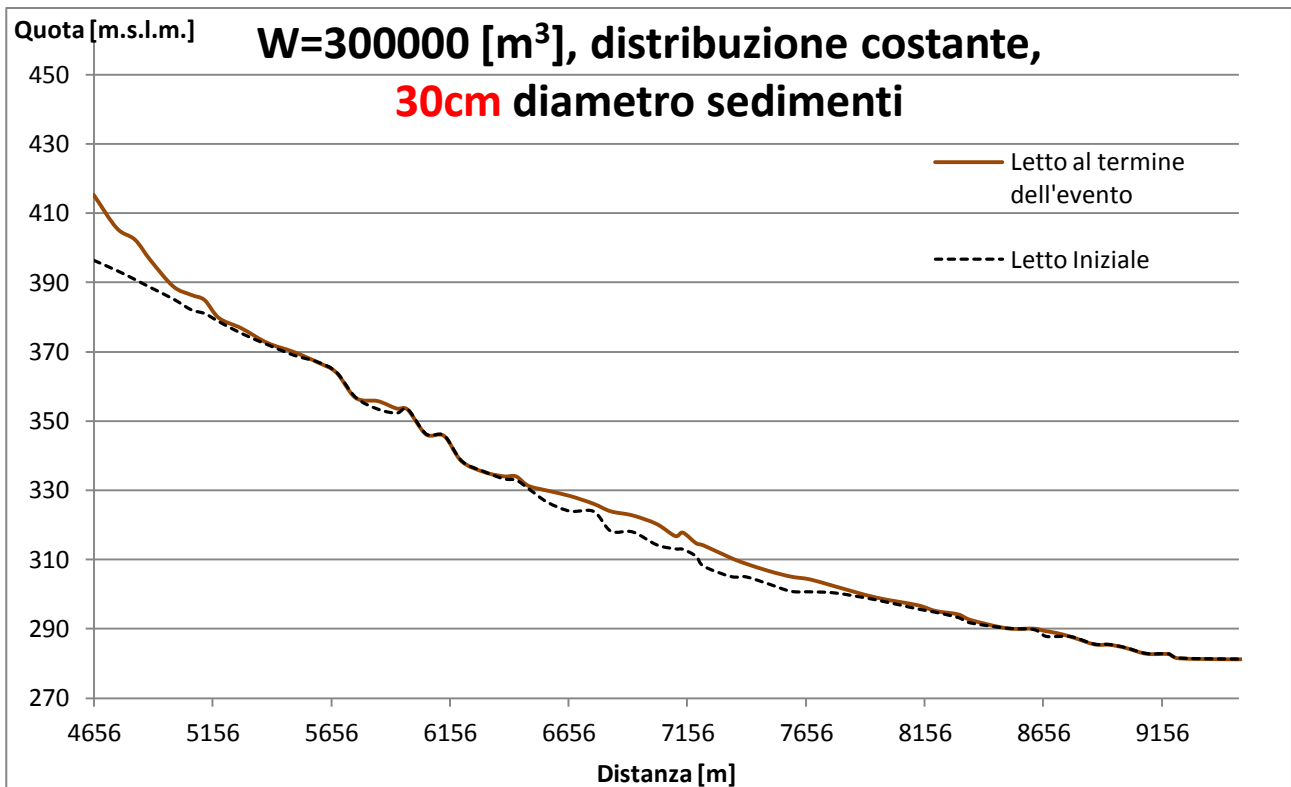


Fig. 2.3.13 Letto del torrente prima (nero) e dopo (marrone) l'evento.



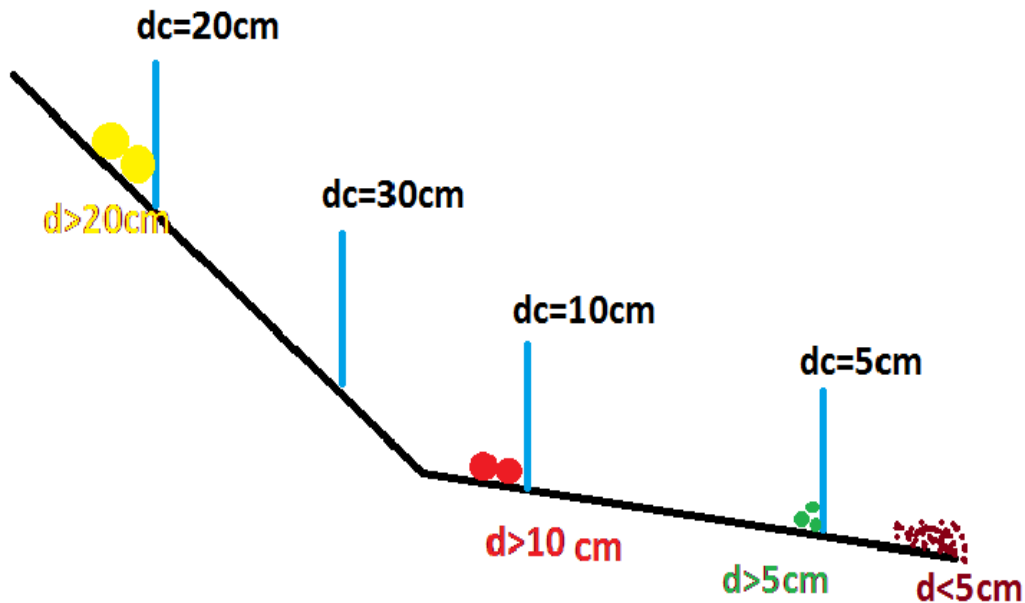
*Fig. 2.3.14 Letto del torrente prima (nero) e dopo (marrone) l'evento.*

Con sedimenti monogranulari sferici di 2 cm di diametro si nota un forte accumulo a valle, al contrario con sedimenti monogranulari sferici di 30 cm di diametro si nota un forte accumulo a monte. Se il diametro dei sedimenti è piccolo (2 cm) la maggior parte di essi vengono trasportati dal torrente fino alle sezioni di valle, nei pressi di Sondrio, dove si accumulano. Se il diametro è grande (30cm) essi avranno la tendenza ad accumularsi nelle prime sezioni di monte perché l'acqua non ha energia sufficiente per portarli a valle.

E' importante sottolineare che in un evento reale la dimensione e la forma dei sedimenti non sono costanti, ma ovviamente si ha una distribuzione di differenti forme e dimensioni dei sedimenti. Si può quindi in generale concludere che in un evento reale:

- i sedimenti più grossi si fermeranno in prevalenza nelle sezioni di monte del torrente;
- i sedimenti più piccoli si accumuleranno nelle sezioni di valle, nei pressi di Sondrio.

Si riporta un esempio concettuale per chiarire il concetto e mettere in relazione le informazioni date dall'analisi dei diametri critici nelle varie sezioni del torrente e del diametro dei sedimenti entranti nel modello.



*Fig. 2.3.14 Fissato un istante di tempo, fissato un valore di portate entranti di sedimenti e acqua, nell'ipotesi di letto non erodibile, questa può essere una foto istantanea del processo in atto in un evento reale con differenti dimensioni dei sedimenti, dove  $dc$  rappresenta il diametro critico della sezione in considerazione e  $d$  il diametro dei sedimenti accumulati nei pressi di quest'ultima.*

Dall'esempio concettuale si può notare in maniera immediata e di facile lettura come, secondo questo modello, i sedimenti di dimensione maggiore tendono ad accumularsi nelle sezioni di monte mentre quelli di dimensioni minori tendono ad accumularsi nelle sezioni di valle nei pressi della città di Sondrio.

In queste analisi sui diametri critici e sull'evoluzione morfologica del letto del torrente al variare del diametro dei sedimenti considerato è stato mostrato quanto il modello proposto è sensibile, come atteso, alla dimensione dei sedimenti. Queste analisi non sono ovviamente sufficienti per calibrare in maniera accurata la dimensione dei sedimenti da usare per la modellazione dello scenario e quindi la fuoriuscita di acqua nella città di Sondrio, ma danno indicazioni utili per una scelta consapevole del diametro dei sedimenti da utilizzare per modellare lo scenario, in assenza di dati affidabili.

### Distribuzione nel tempo del volume di sedimenti entranti

Per prima cosa si analizza come possono distribuirsi un milione di metri cubi di sedimenti in un evento estremo della durata di 60 ore. Sono qui proposte 4 configurazioni:

- portata di sedimenti costante durante tutto l'evento
- portata di sedimenti proporzionale alla portata d'acqua
- portata di sedimenti con picco anticipato rispetto alla portata d'acqua
- portata di sedimenti con picco ritardato rispetto alla portata d'acqua

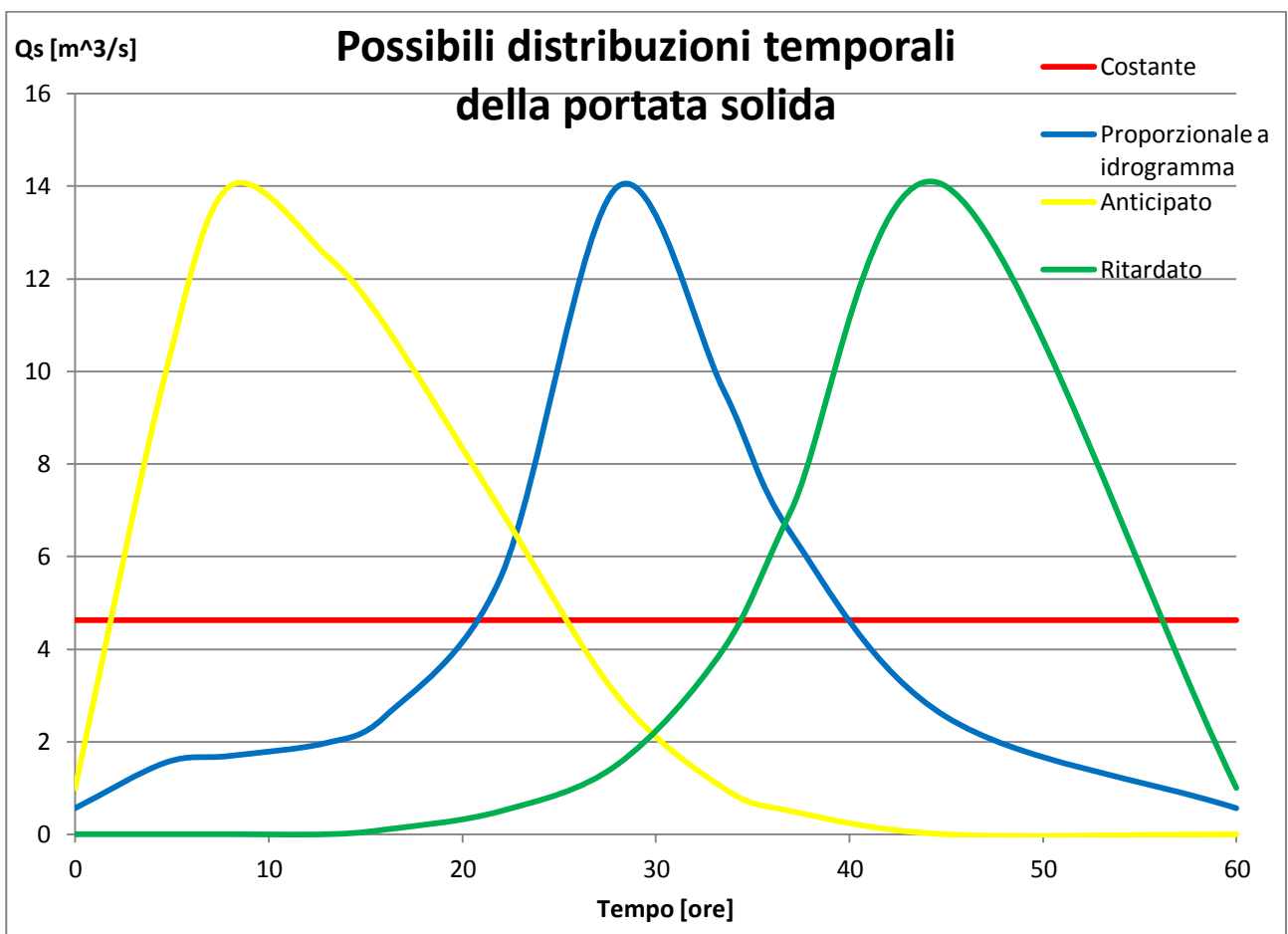
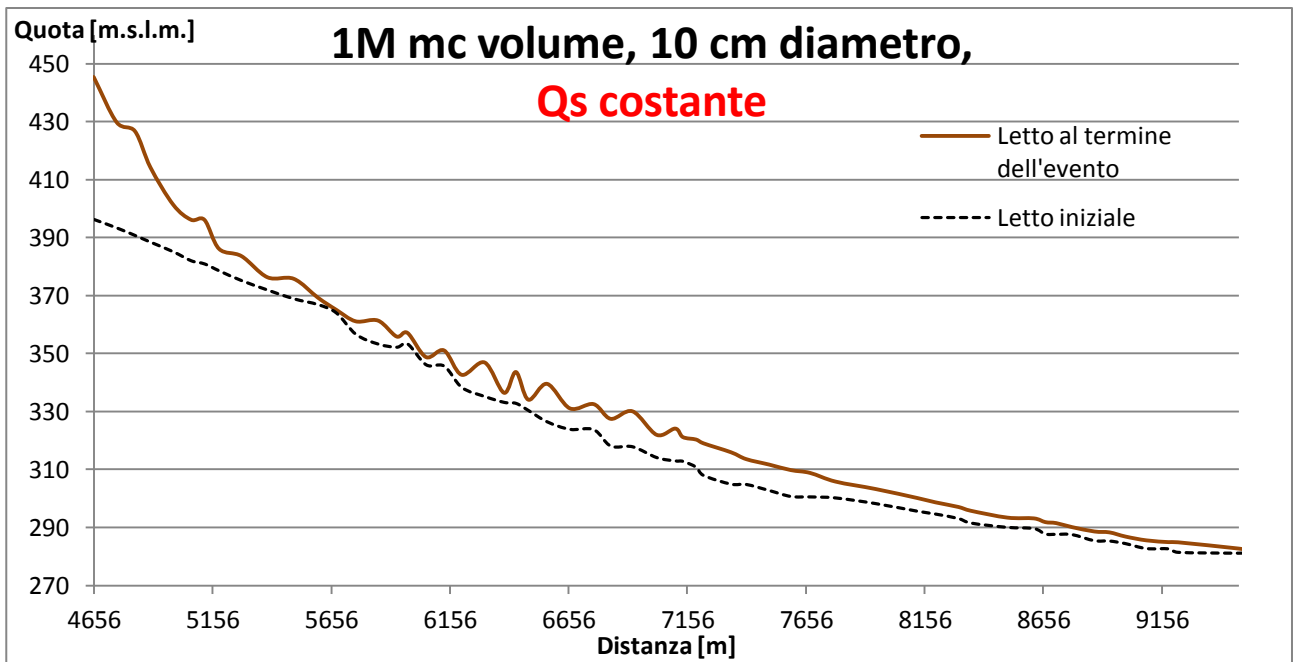


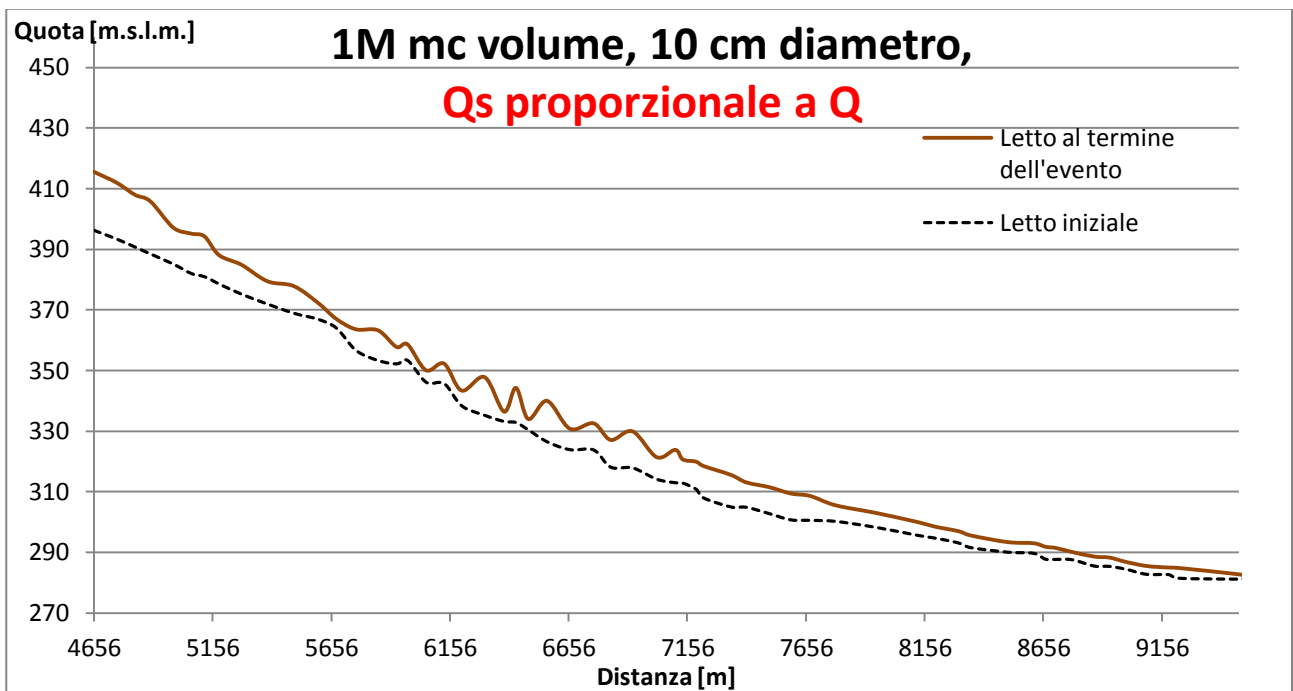
Fig. 2.3.15 Distribuzione nel tempo di un volume di 1 milione di metri cubi di sedimenti. Configurazioni proposte di portata solida: costante (rosso), proporzionale a portata di acqua (blu), con picco anticipato (giallo), con picco ritardato (verde)

Fissato un diametro di 10 cm dei sedimenti monogranulari è stata modellata l'evoluzione del letto del torrente in seguito all'evento per ciascuna di queste distribuzioni temporali di portata solida. Questi sono i risultati:



*Fig. 2.3.16 Evoluzione morfologica del letto del Mallero nell'ipotesi di portata solida costante*

Nel caso sotto ipotesi di portata solida costante, a causa della presenza di una grossa portata di sedimenti anche negli istanti finali del processo, quando la portata di acqua risulta essersi molto ridotta, si nota un forte accumulo di sedimenti a monte, dovuto al fatto che la ridotta portata di acqua entrante in tali istanti non è sufficiente a trasportare gli ancora molti sedimenti entranti che quindi restano bloccati nelle prime sezioni di monte.



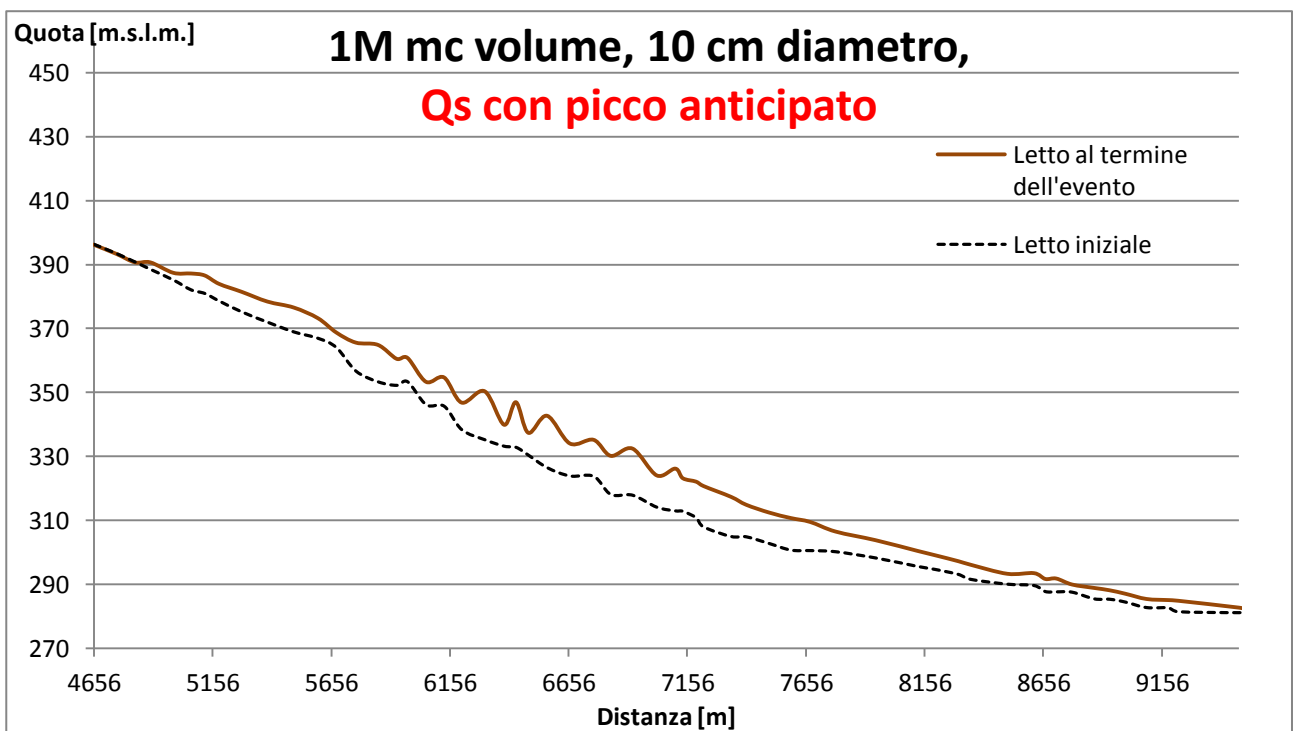
*Fig. 2.3.17 Evoluzione morfologica del letto del Mallero nell'ipotesi di portata solida proporzionale alla portata di acqua.*



In questo caso la portata solida è espressa come una frazione fissa della portata liquida. E' considerato ragionevole che a tanta portata liquida corrisponda tanta portata solida e viceversa. La portata di sedimenti è proporzionale a quella di acqua secondo la relazione:

$$Q_s = 0.022 Q$$

Il valore della costante (in questo caso 0.022) è calibrato in modo che il volume totale di sedimenti, calcolato come area sottesa dalla curva  $Q_s(t)$  risulti essere un milione di metri cubi.



*Fig. 2.3.18 Evoluzione morfologica del letto del Mallerio nell'ipotesi di picco di portata solida anticipato rispetto a quello di portata liquida*

Nel caso sotto l'ipotesi di portata solida con picco anticipato si nota un maggiore accumulo di sedimenti a valle, nei pressi di Sondrio, perché il flusso ha molto tempo per portare a valle il materiale introdotto nel torrente in prevalenza nei primi istanti di tempo del processo.

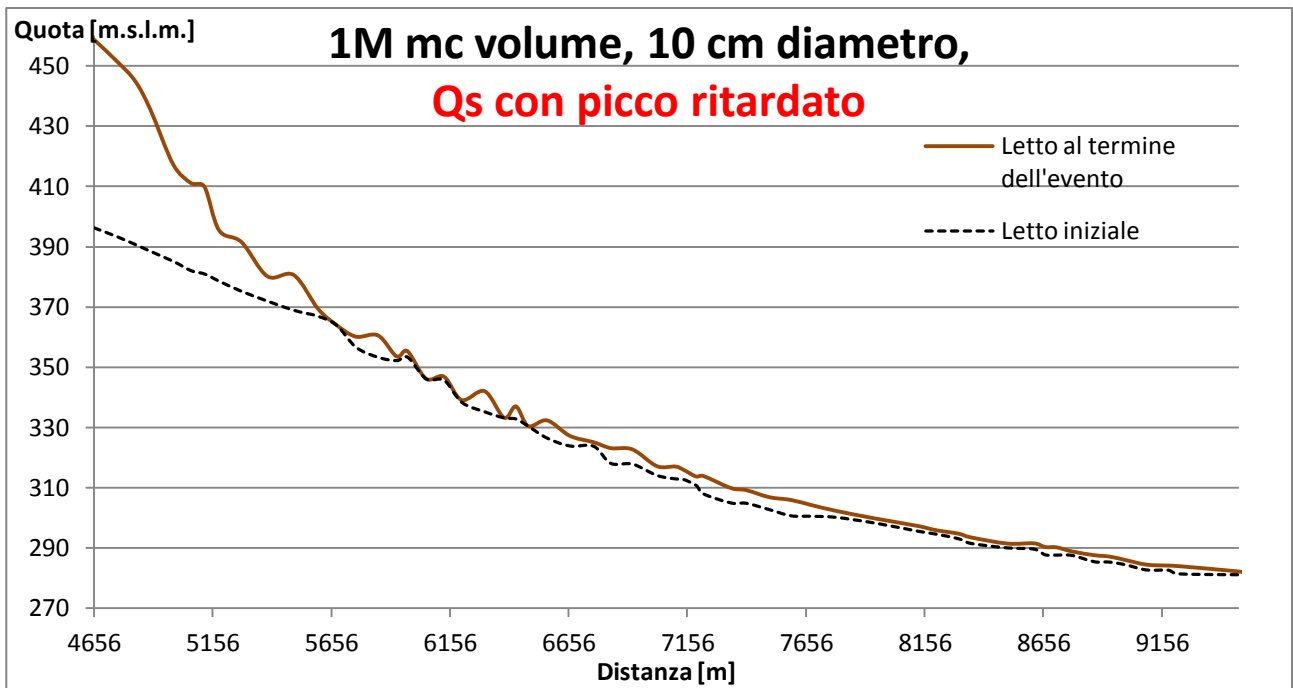


Fig. 2.3.19 Evoluzione morfologica del letto del Mallero nell'ipotesi di picco di portata solida ritardato rispetto a quello di portata liquida

Nel caso sotto l'ipotesi di portata solida con picco ritardato si nota un forte accumulo di sedimenti a monte dovuto al fatto che la maggior parte dei sedimenti sono inseriti nel torrente quando la portata di acqua è già ridotta e quindi non ha energia sufficiente per portarli a valle.

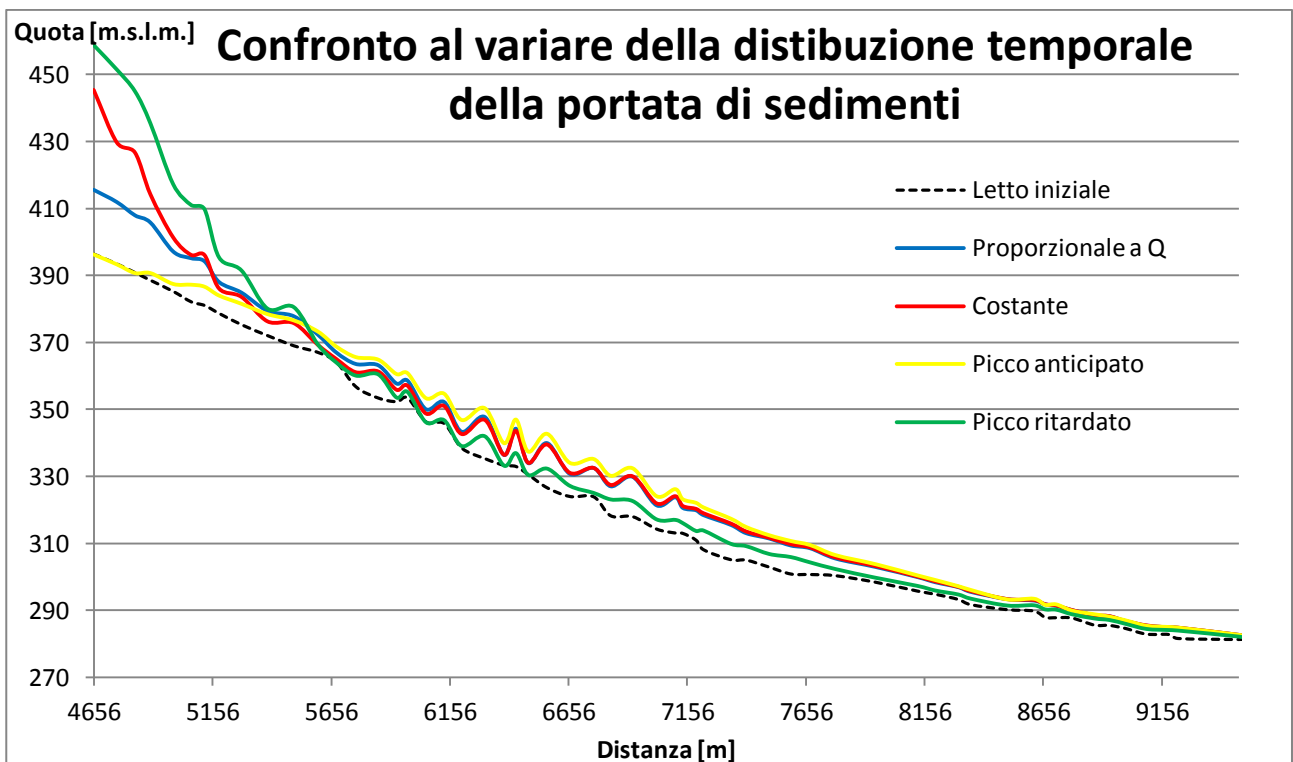
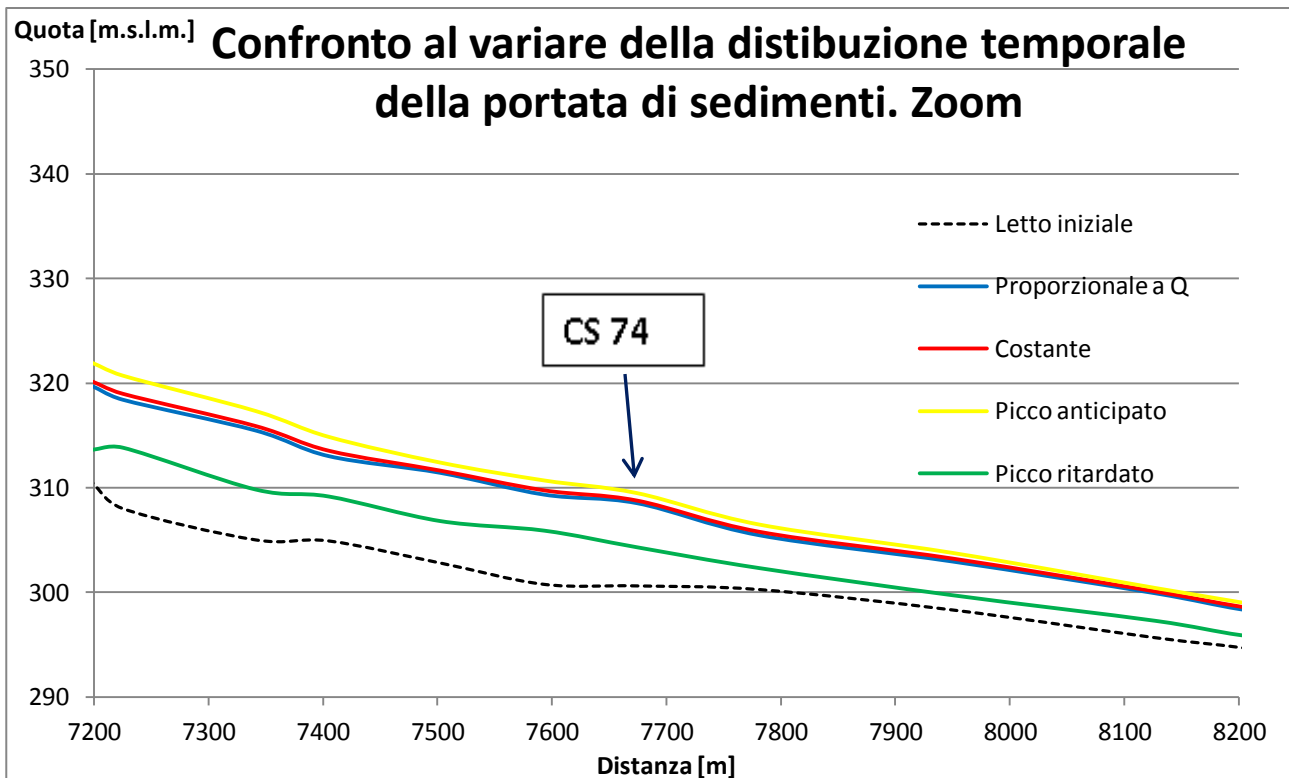


Fig. 2.3.20 Confronto tra evoluzione morfologica del letto del Mallero sotto le 4 ipotesi di distribuzione temporale della portata solida.



*Fig. 2.3.21 Confronto tra evoluzione morfologica del letto del Mallero sotto le 4 ipotesi di distribuzione temporale della portata solida. Zoom su tratto di torrente attorno alla sezione 74 dove avviene la fuoriuscita.*

Dal confronto si nota che seppure le altezze degli accumuli di sedimenti nelle sezioni di monte siano molto diverse, nelle sezioni di valle si ottengono risultati simili sotto le tre ipotesi di distribuzione temporale di sedimenti costante, proporzionale alla portata liquida o con picco anticipato rispetto a quest'ultima. Solo nel caso sotto ipotesi di picco di portata solida ritardato rispetto al picco di portata liquida si ha un'evoluzione nettamente diversa, ma con altezze di sedimenti in città più basse e questo implica uno sfioro minore nella sezione 74.

Si consideri che sulla distribuzione temporale di portata solida c'è molta incertezza. Sono proposti 4 scenari, 3 dei quali danno risultati simili al fine della valutazione dello sfioro a Sondrio, mentre il quarto appare a sfavore di sicurezza e quindi viene escluso dalla scelta per la modellazione dello scenario dell'evento. Si può scegliere quindi uno di questi tre come riferimento, senza ottenere risultati molto differenti che scegliendo uno dei due rimanenti. A seguito di questa analisi si è deciso di modellare lo scenario utilizzando una portata di sedimenti proporzionale alla portata d'acqua.

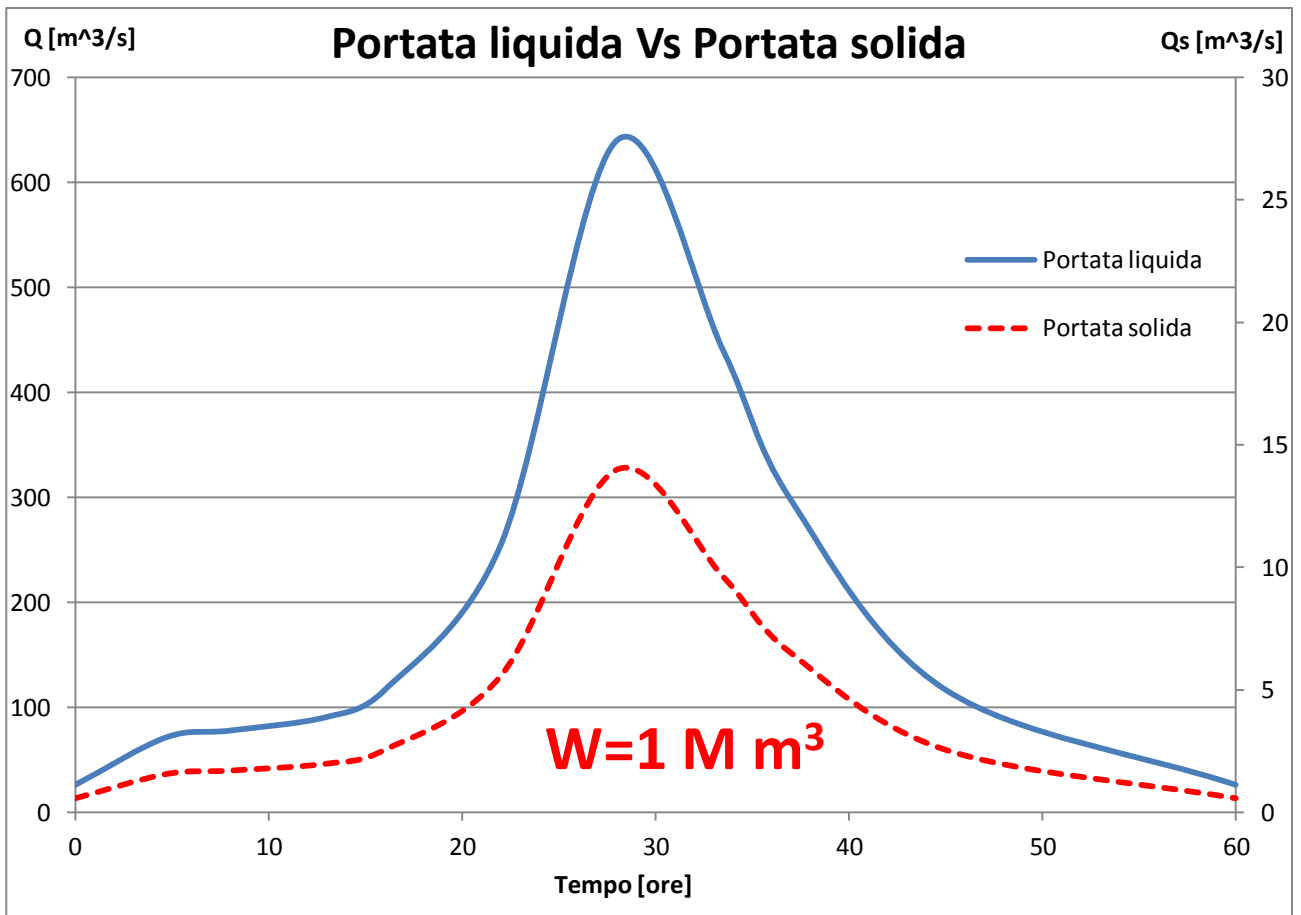


Fig. 2.3.22 Portata solida proporzionale a portata di acqua. Volume sotteso dalla curva di portata solida: 1 milione di metri cubi.

### Analisi con ipotesi di letto fisso e letto completamente erodibile

Le analisi finora riportate sono state tutte effettuate nell'ipotesi di letto fisso, ovvero di letto del torrente non erodibile, come se il substrato fosse in roccia, piuttosto che corazzato: questa è da considerarsi un'approssimazione della realtà. Ora si analizzerà quanto tale approssimazione, che semplifica il modello, possa ritenersi valida.

Si valuta ora l'evoluzione morfologica del letto del torrente nell'ipotesi opposta, ovvero di letto completamente erodibile, per valutare quanto è sensibile il modello alla scelta di un letto fisso piuttosto che un letto erodibile. Si riporta il confronto nelle ipotesi di sedimenti monogranulari sferici di 2 cm di diametro e 20 cm di diametro per valutare anche quale può essere la sensibilità del modello a tale scelta con diverse dimensioni dei sedimenti dato che è stato precedentemente discusso che la dimensione dei sedimenti influenza molto fortemente l'evoluzione morfologica. Entrambe le analisi sono svolte nell'ipotesi di distribuzione temporale di portata di sedimenti proporzionale a quella di portata d'acqua e volume totale di un milione di metri cubi di sedimenti.

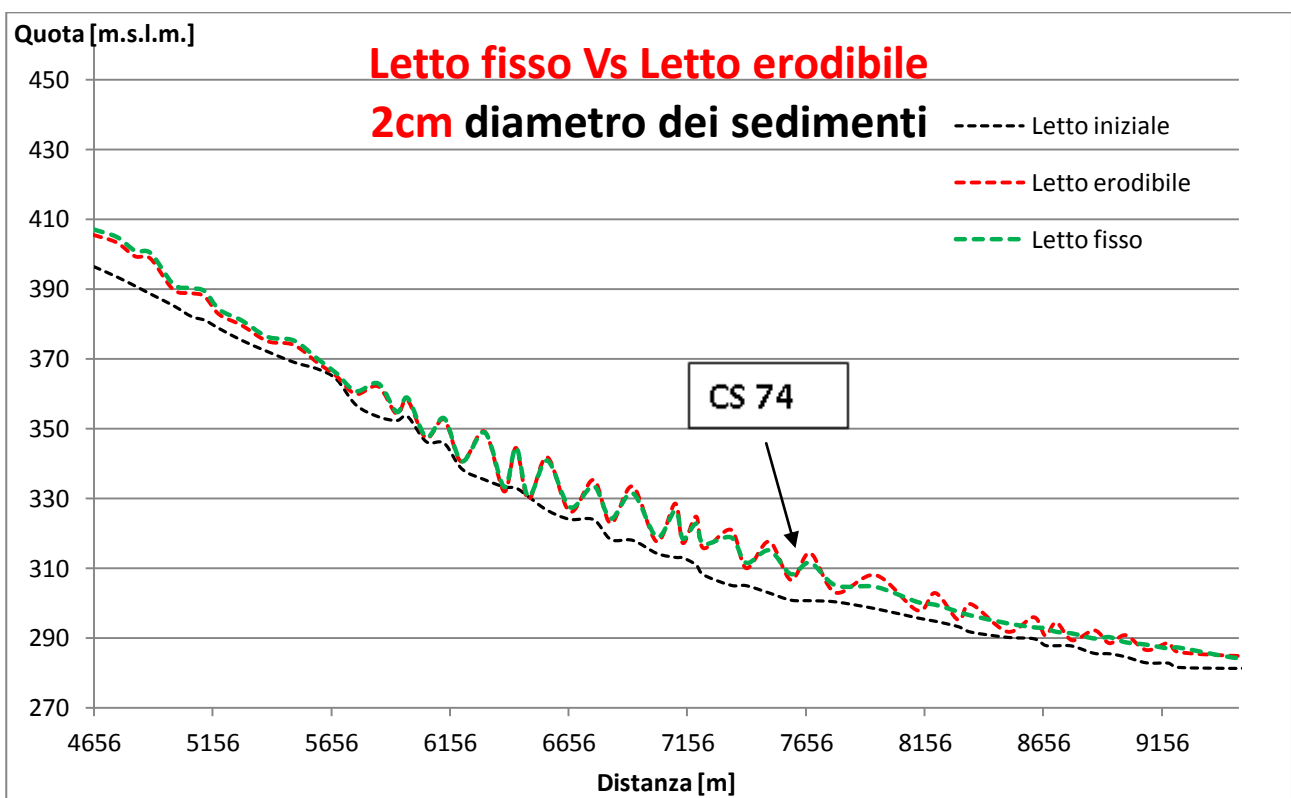


Fig. 2.3.23 Confronto tra evoluzioni morfologiche in ipotesi di letto fisso (verde) e letto erodibile (rosso).

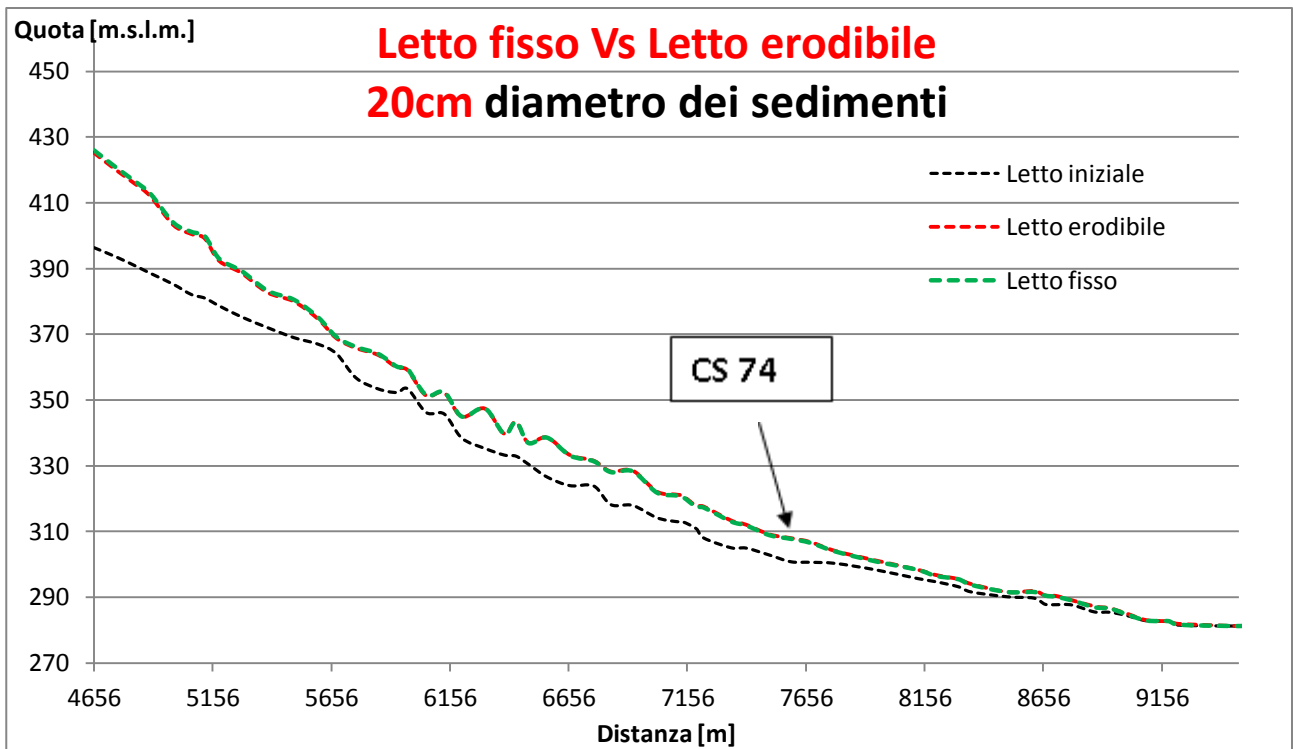


Fig. 2.3.24 Confronto tra evoluzioni morfologiche in ipotesi di letto fisso (verde) e letto erodibile (rosso).

Dal confronto si nota che l'evoluzione morfologica del letto del torrente nell'ipotesi di letto fisso o completamente erodibile è in entrambi i casi riportati molto simile. Con un diametro piccolo (2 cm) dei sedimenti si notano differenze piuttosto limitate nei profili altimetrici con le differenti ipotesi di letto fisso o erodibile, mentre con un diametro grande (20 cm) non si nota alcuna differenza sostanziale, i due profili sono quasi sovrapposti. Si consideri inoltre che in entrambi i casi nei pressi della sezione 74, dove è calcolato lo sfioro nella città di Sondrio, non vi sono sostanziali differenze nei due profili. Se ne conclude che, ai fini della modellazione dello scenario di allagamento di Sondrio, l'ipotesi semplificativa di letto fisso sia ben approssimante la realtà, soprattutto se si considerano sedimenti di grosse dimensioni.

Si tenga presente che queste conclusioni sono state tratte dallo studio di questo scenario che è uno scenario di deposito. Se si fosse trattato di uno scenario con una significativa erosione giungere a queste conclusioni non sarebbe stato possibile.

### Sensitività al volume totale di sedimenti entranti

La stima del volume totale di sedimenti entranti nel modello idraulico con il modello di Gavrilovic racchiude molta incertezza. Si è stimato un volume totale dei sedimenti entranti attorno al milione di metri cubi, ma tale valore può variare a seconda della calibrazione dei parametri in un ampio intervallo, fino a valori attorno al milione e mezzo di metri cubi. Si analizza dunque la sensitività del modello al volume totale di sedimenti entranti, fissata la distribuzione temporale di portata di sedimenti proporzionale a quella di acqua e nell'ipotesi di letto fisso. In questo caso si propone un'analisi con diametro dei sedimenti di 2 cm e 10 cm.

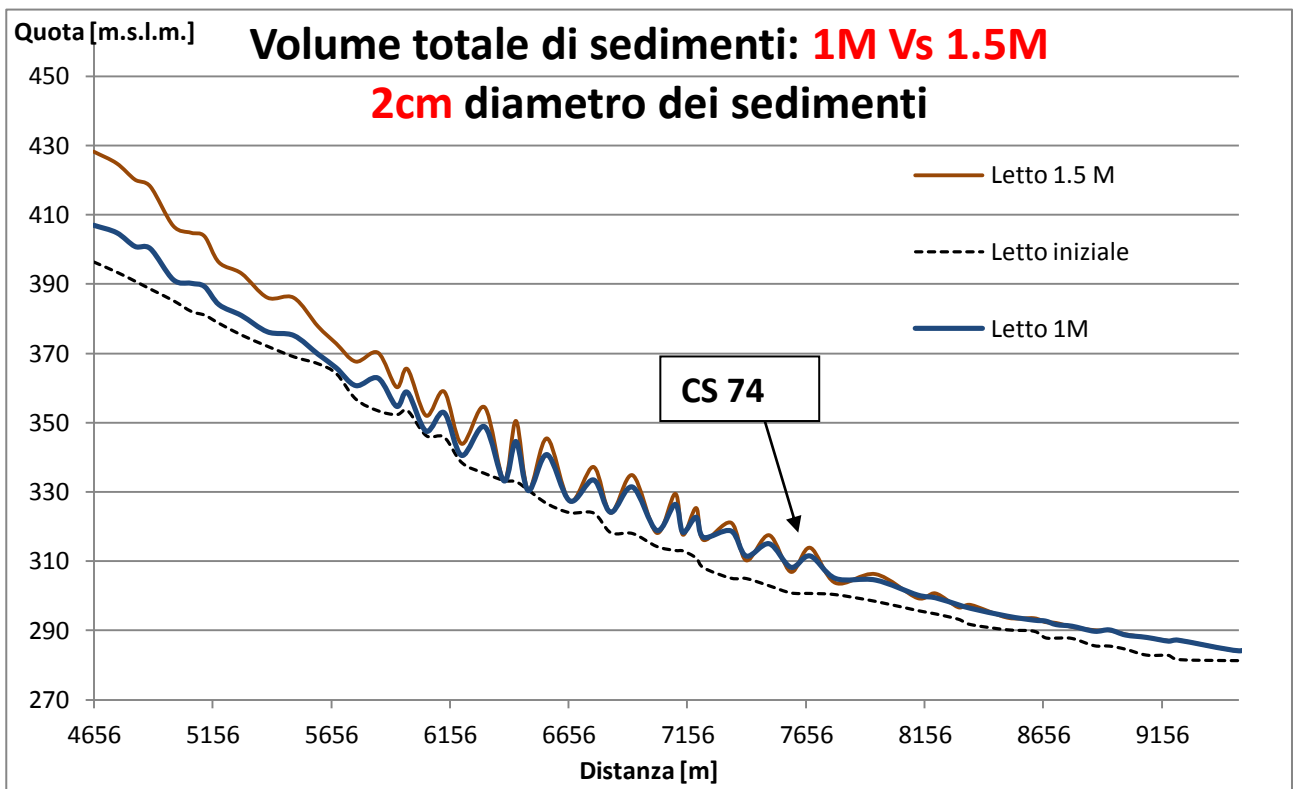


Fig. 2.3.25 Evoluzione morfologica al variare del volume totale di sedimenti entranti. Diametro dei sedimenti 2 cm

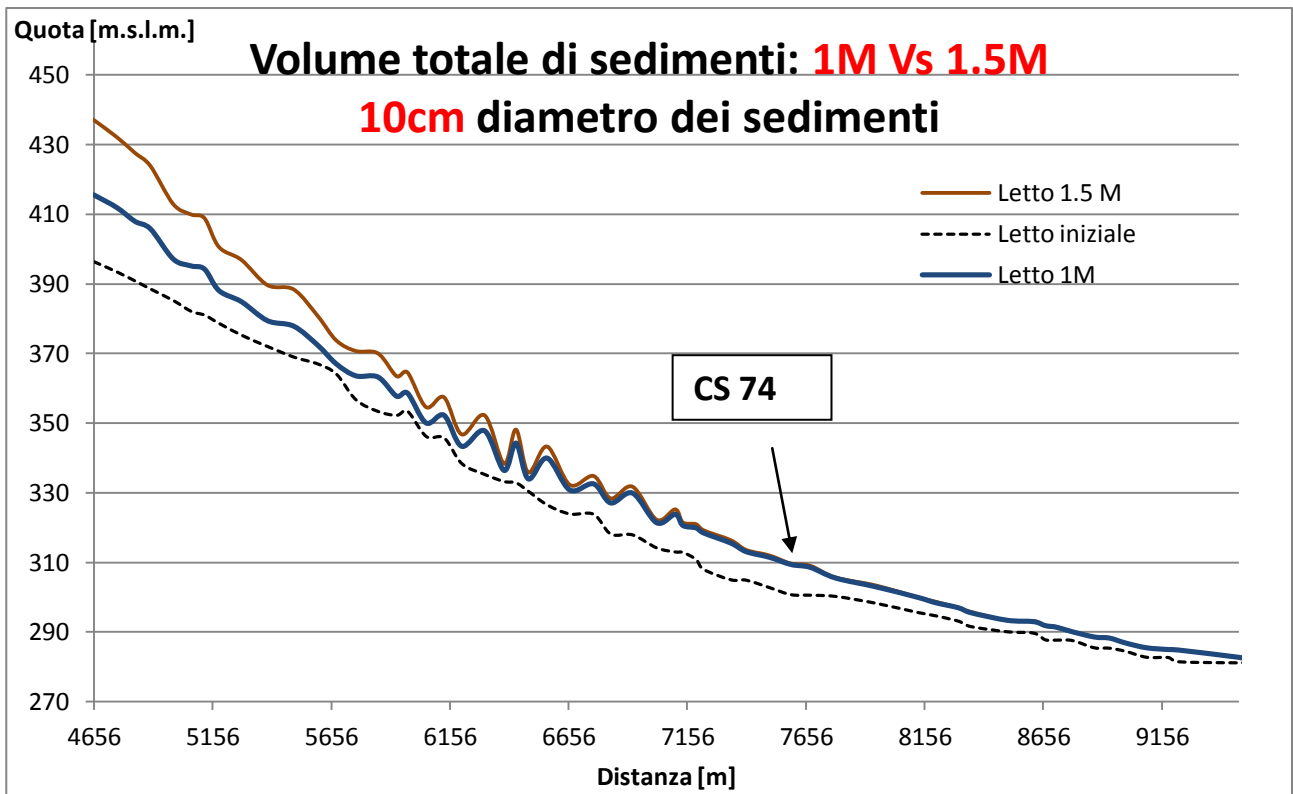


Fig. 2.3.26 Evoluzione morfologica al variare del volume totale di sedimenti entranti. Diametro dei sedimenti 10 cm

Il mezzo milione di metri cubi di differenza tra i due volumi totali di sedimenti entranti si accumula principalmente nelle sezioni di monte e tale considerazione diventa sempre più evidente all'aumentare del diametro dei sedimenti. Questo avviene perché la capacità di trasporto del Mallero è limitata, anche con una grossa portata di acqua entrante come quella in analisi. Per il calcolo dello sfioro nella città di Sondrio non si nota una differenza grande se si sceglie un milione o un milione e mezzo di volume di sedimenti entranti per quanto riguarda la variazione morfologica nei pressi della sezione 74. Se ne conclude che l'incertezza sulla stima dell'erosione ottenuta dal modello di Gavrilovic diventa quasi insignificante per la modellazione dello scenario di allagamento di Sondrio nel momento in cui ci si rende conto che la capacità di trasporto del Mallero è limitata, dunque un milione o un milione e mezzo di metri cubi di sedimenti entranti non implica sostanziali differenze nella modellazione dello scenario a Sondrio.



Si riporta un esempio concettuale i cui si chiarisce come la limitata capacità di trasporto del torrente giochi un ruolo chiave in tale analisi. I numeri qui riportati sono puramente rappresentativi di un ordine di grandezza e il fine è solo di evidenziare il fenomeno in atto.

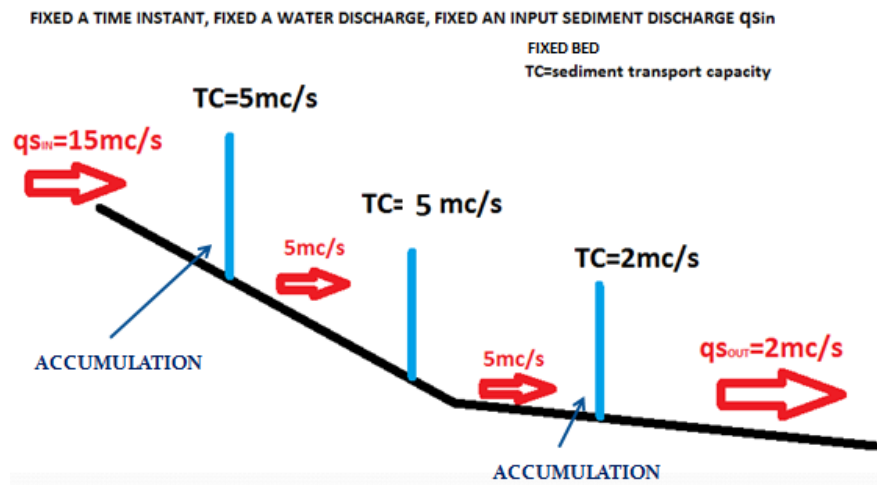


Fig. 2.3.27 Illustrazione, fissato un istante di tempo, dell'effetto della capacità di trasporto (TC) in tale processo in relazione alla portata di sedimenti ( $q_s$ ) nelle diverse sezioni del torrente

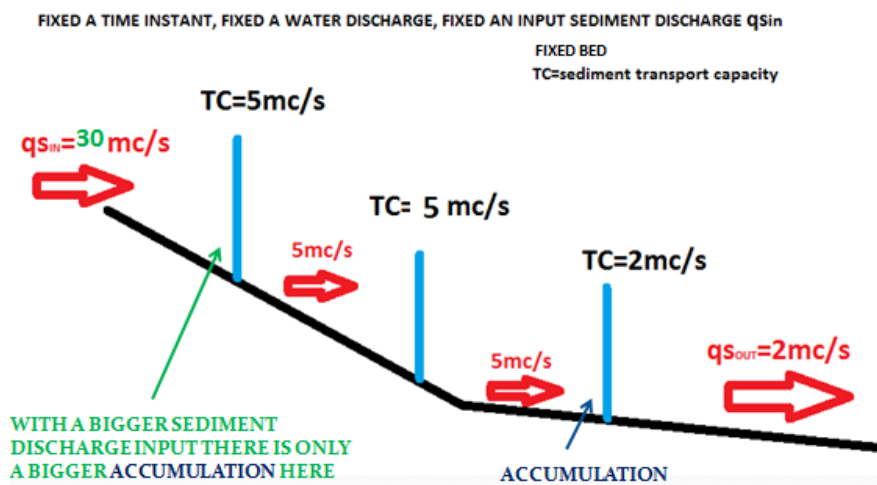


Fig. 2.3.28 Illustrazione, fissato un istante di tempo, dell'effetto della capacità di trasporto (TC) in tale processo in relazione alla portata di sedimenti ( $q_s$ ) nelle diverse sezioni del torrente

Con un apporto inferiore di sedimenti si nota un accumulo a monte e a valle. Con un apporto maggiore invece si nota un accumulo più grande di sedimenti a monte e un accumulo delle stesse dimensioni dei quello del caso precedente a valle (nei pressi di Sondrio) perché la portata di sedimenti che effettivamente passa nelle sezioni di valle è in entrambi i casi la stessa a causa della limitata capacità di trasporto del Mallero.

### *Modellazione dello scenario*

A seguito delle analisi sopra riportate si sono fissati dei parametri per la modellazione dello scenario per avere un caso di riferimento con i parametri ritenuti sensati per ben approssimare la realtà nello studio del fenomeno:

- Volume totale di sedimenti entranti: 1 000 000 m<sup>3</sup>
- Distribuzione temporale di portata solida: proporzionale a portata di acqua  $Q_s = 0.022Q$
- Letto fisso
- Dimensione dei sedimenti monogranulari sferici: 30 cm

Con la scelta di un diametro di riferimento dei sedimenti di 30 cm è possibile osservare un forte accumulo di sedimenti a monte, questo è considerato un risultato ragionevole secondo le attese, si tenga però ben presente che questa non è l'unica scelta possibile per modellare tale fenomeno che presenta nella realtà sedimenti trasportati ovviamente di diverse dimensioni. Dunque l'evoluzione morfologica ottenuta con un diametro dei sedimenti di 30 cm si ritiene ben approssimante un possibile evento reale, meglio di quella proposta con diametri molto piccoli che mostrano quasi tutto il volume di sedimenti accumularsi nei pressi di Sondrio. Questa scelta non è a favor di sicurezza ma è ritenuta approssimare il processo reale meglio che la scelta di diametri molto più piccoli. Si noti inoltre che il modello non tiene conto del trasporto sospeso di sedimenti, con diametri piccoli tale trasporto può in un reale processo innescarsi, mentre con diametri grossi come 30 cm si è certi che tutto il trasporto di sedimenti sia di fondo. Si riportano alcuni risultati rappresentativi di tale scenario.



*Fig. 2.3.29 Mallero in piena nei pressi di Arquino (sezioni 36-37-38-39), 1987. L'evento modellato nello scenario, con tempo di ritorno di 100 anni, è ancora più estremo di quello in fotografia.*

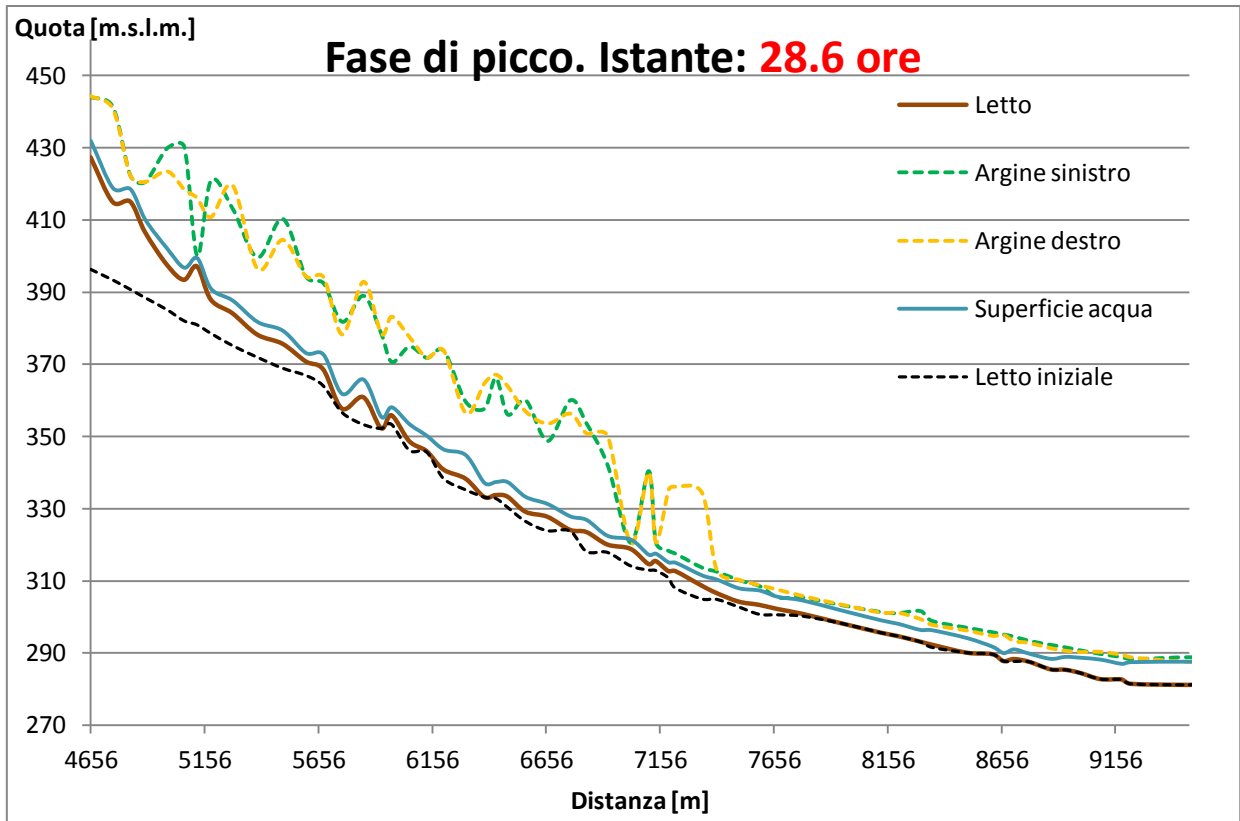


Fig. 2.3.30 Fase di picco dell'evento modellato. Profilo letto prima dell'inizio dell'evento (nero), profilo letto all'istante 28.6 ore (marrone), pelo dell'acqua (blu), argine destro (giallo), argine sinistro (verde)

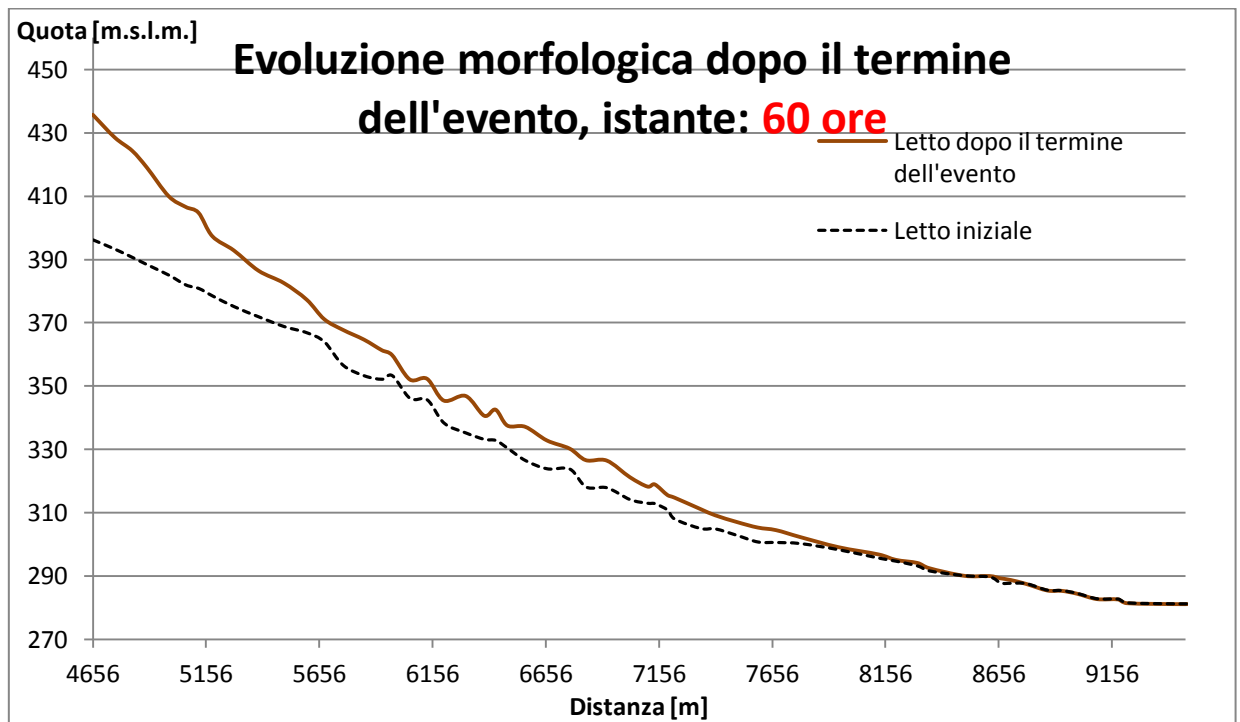
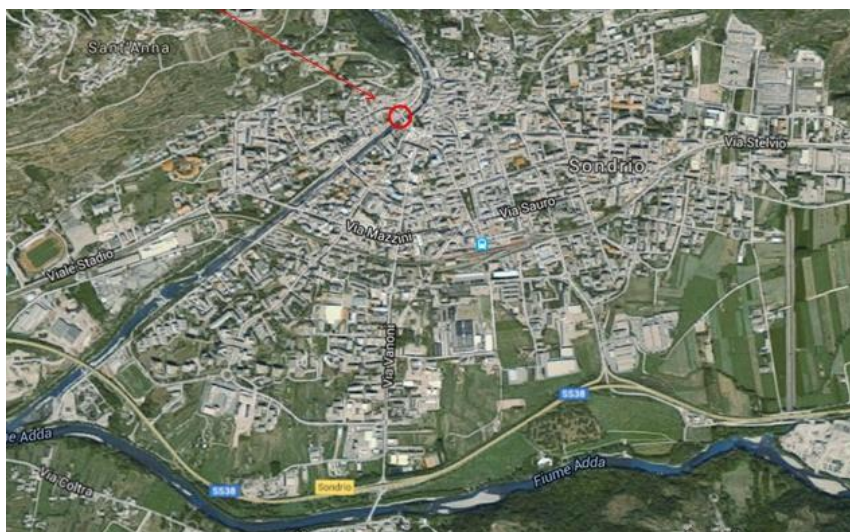


Fig. 2.3.31 Profilo del letto del torrente al termine dell'evento (marrone) rispetto al letto iniziale (nero)

### 3.4 SFIORO A SONDRIO

Dai risultati ottenuti dal modello idraulico si notano alcune sezioni nel tratto di torrente a monte in cui il livello dell'acqua supera quello degli argini e una sezione a valle, la sezione 74, nel centro di Sondrio in cui ciò avviene (rispetto solo all'argine sinistro). Tutti i possibili sfiori in sezioni a monte, all'interno della Valmalenco sono trascurati perché, trovandosi il torrente all'interno di una stretta gola, anche se il livello dell'acqua supera quello degli argini, a causa della forte pendenza dei versanti laterali quell'acqua ritorna nel torrente, o comunque segue il suo percorso, dunque non vi è perdita di portata. Dunque l'unica fuoriuscita considerata è quella nei pressi della sezione 74 a Sondrio (dall'argine sinistro), l'unica per cui vi è una effettiva perdita di portata. Tutta l'acqua che fuoriesce dal torrente in tale tratto si riversa immediatamente in città.



*Fig. 2.4.1 Sezione 74: posizione nella città di Sondrio*



*Fig. 2.4.2 Sezione 74: confronto tra i livelli d'acqua in condizioni normali (sinistra), in un evento moderato (cento) e in un evento estremo, cioè durante l'alluvione dell'anno 1987 (destra)*

Per il calcolo dell'outflow è stato usato un modello molto semplificato, l'equazione dello sfioratore (weir equation), applicata a ogni istante di tempo della discretizzazione richiesta al modello idraulico per i risultati, cioè ogni 1000 secondi:

$$Q = C_W L h \sqrt{2gh} \quad (2.4.1)$$

Dove:

$C_W=0.25$  rappresenta il coefficiente adimensionale di sfioro, si sceglie 0.25 per la forma irregolare dell'argine (per forme più regolari si hanno valori più alti);

$L = 150$  m è la lunghezza dello sfioro scelta. La lunghezza dello sfioro dipende da  $h$ , che dipende dall'istante di tempo, ma considerato che la variazione altimetrica del profilo dell'argine sinistro in tale tratto di torrente è trascurabile, infatti tra le sezioni 73 e 74 si ha una pendenza relativamente piccola (circa  $1.5^\circ$ ), mentre tra le sezioni 74 e 75 la pendenza è circa nulla, e anche per stare a favor di sicurezza si è scelto un valore di  $L$  costante nel tempo, pari circa al valor massimo che  $L$  assume nel corso dell'evento;

$h$  è la differenza positiva tra il livello dell'acqua e la quota dell'argine, tale grandezza dipende dall'istante di tempo;

$g=9.81$  m/s<sup>2</sup> è l'accelerazione di gravità.

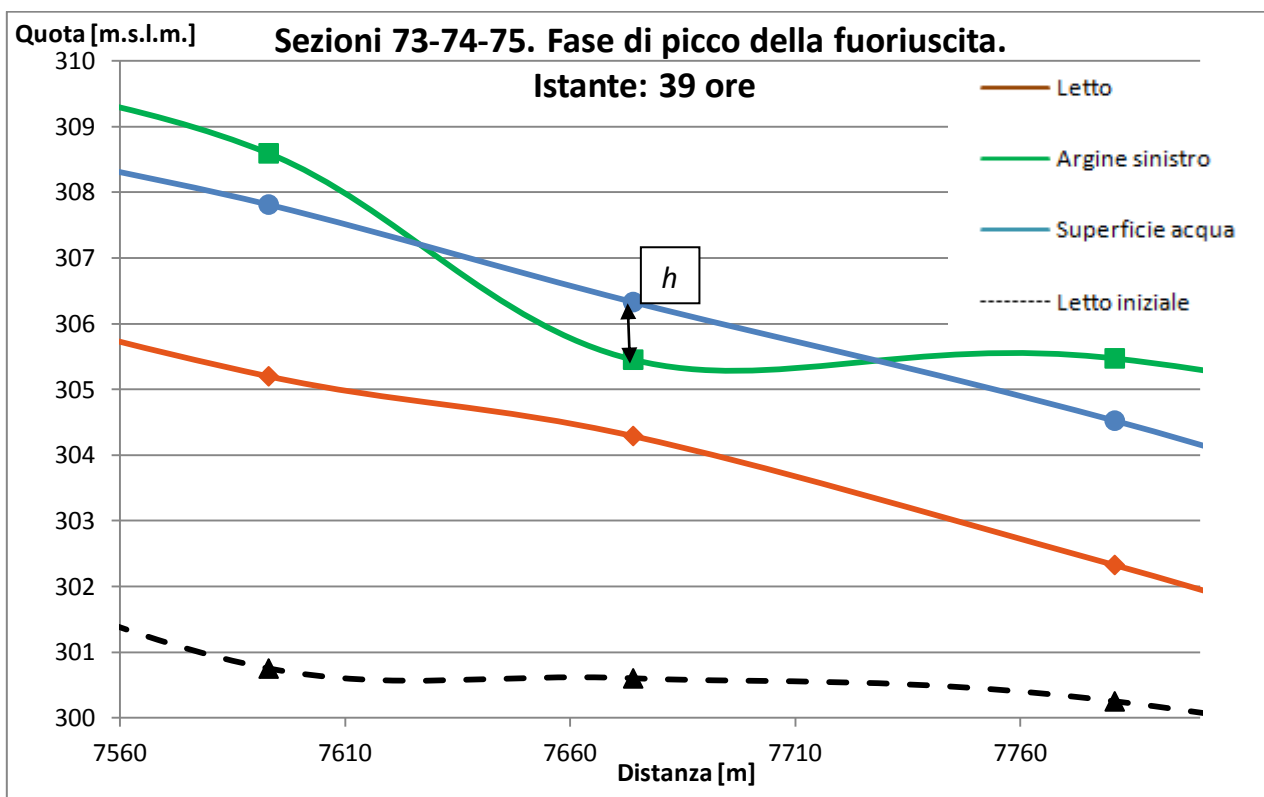


Fig. 2.4.2 Da sinistra a destra le sezioni 73-74-75 sono indicate con i punti. Profilo del fondo del torrente prima dell'inizio dell'evento (nero) e all'istante 39 ore (marrone), pelo dell'acqua (blu) a tale istante, profilo dell'argine (verde).

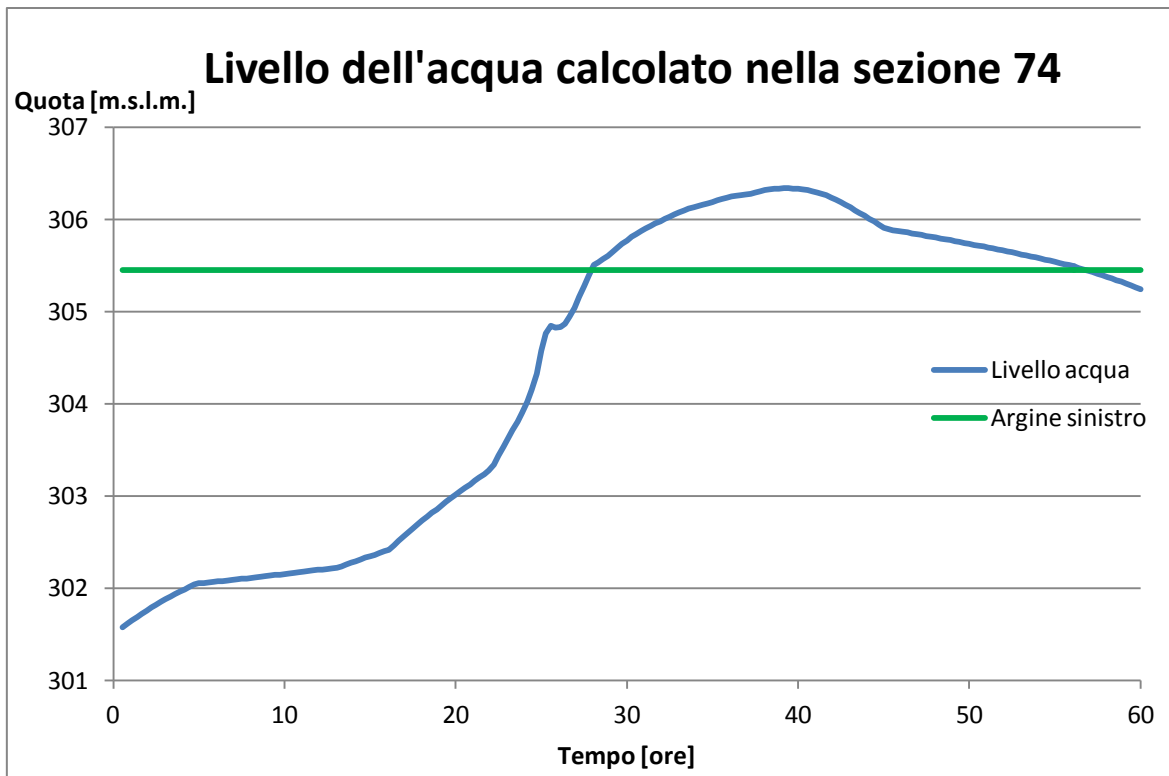


Fig. 2.4.3 Livello dell'acqua (blu) e quota dell'argine (verde) in sezione 74 al variare del tempo. Si può notare come  $h$ , differenza positiva tra i 2 livelli, varia nel tempo.

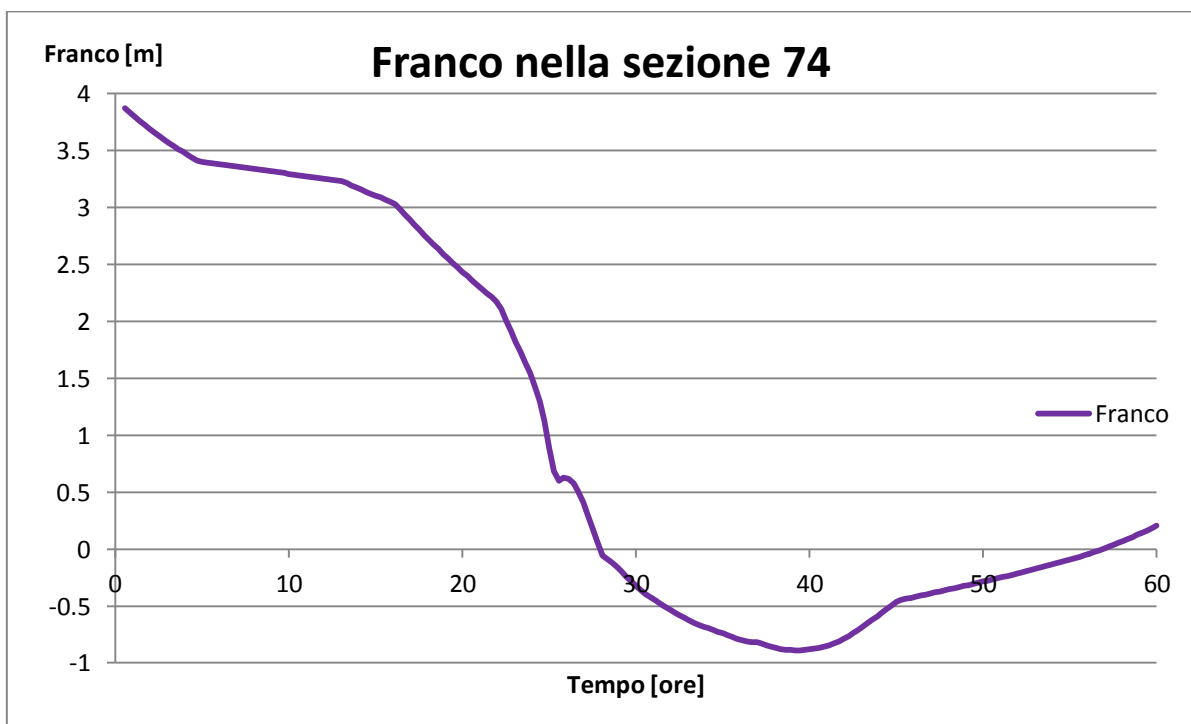


Fig. 2.4.4 Franco positivo valutato dall'argine sinistro della sezione 74 al variare del tempo.

L'accumulo di sedimenti nel letto del torrente determina un notevole innalzamento della quota del fondo e di conseguenza lo sfioro dell'acqua all'interno della città poiché il suo livello diventa superiore alla quota dell'argine. E' proprio a causa di tale accumulo di sedimenti che lo sfioro avviene, infatti in assenza di questi ultimi, come precedentemente discusso nell'analisi in acqua chiara, nonostante le portate imposte dall'idrogramma siano molto grandi, il livello dell'acqua non supererebbe mai quello dell'argine. Si riporta ora l'idrogramma uscente dal torrente nella sezione 74 e entrante nella città di Sondrio confrontato con l'idrogramma di piena del torrente.

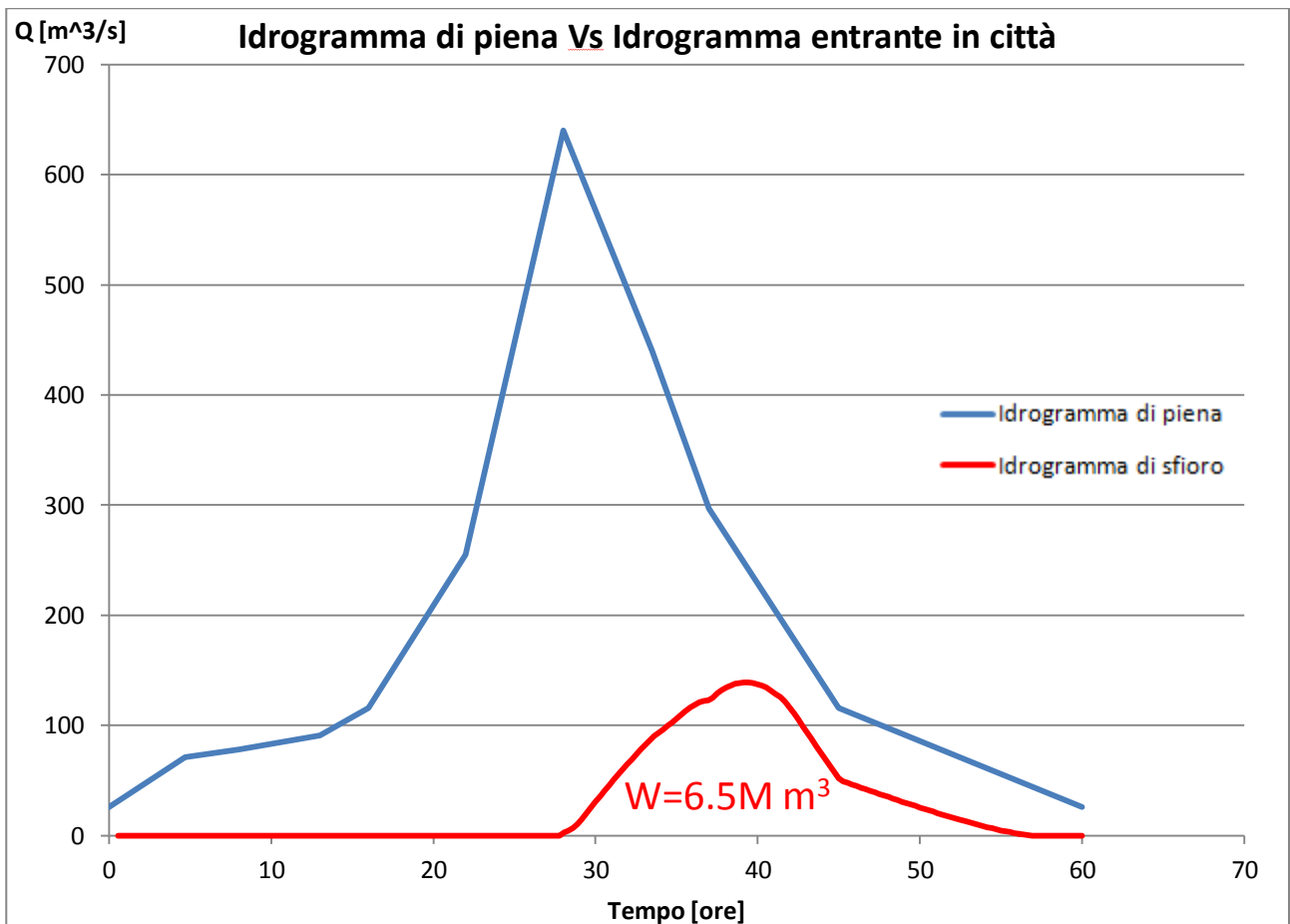


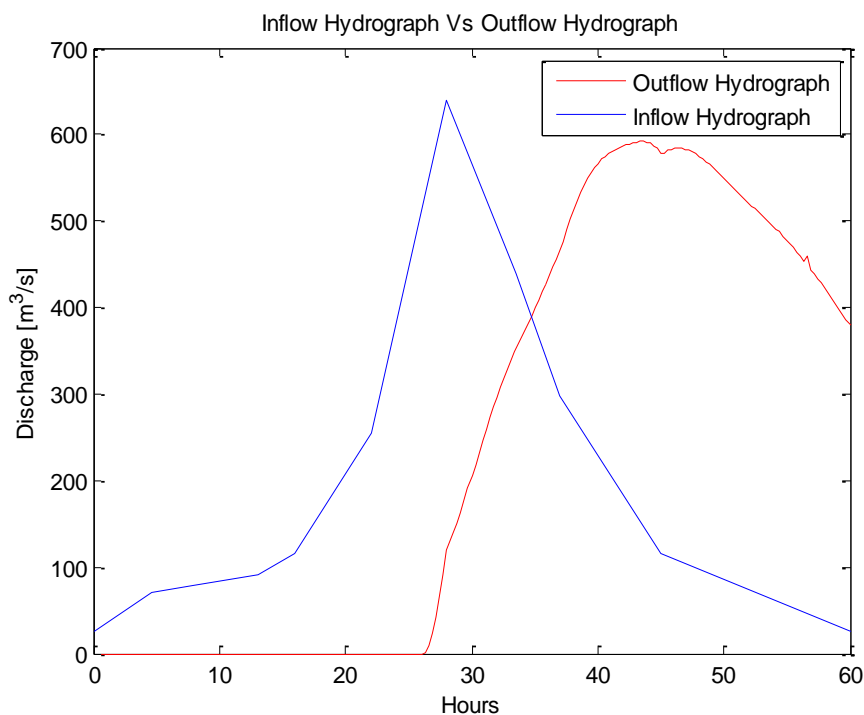
Fig. 2.4.5 Idrogramma entrante nel Mallero (blu) e idrogramma di sfioro nella città di Sondrio (rosso).

L'idrogramma di sfioro, che è il risultato del modello di fuoriuscita e sarà l'input per la modellazione bidimensionale dell'allagamento della città, è descritto da una curva che sottende un volume di 6.5 milioni di metri cubi d'acqua. Si noti la differenza di durata temporale dei due eventi modellati nello scenario: la piena del torrente dura 60 ore, mentre lo sfioro in città dura 30 ore.

E' importante far notare che il modello idraulico-morfologico monodimensionale con cui è stata simulata la piena del Mallero e il modello di sfioro nella città di Sondrio trattano uno stesso fenomeno disaccoppiandolo in due problemi. Questo disaccoppiamento rappresenta una forte limitazione della modellazione proposta e implica una serie di problemi, in particolare qui se ne discuteranno i due principali.

In primo luogo si consideri che il modello idraulico-morfologico monodimensionale non tiene conto dello sfioro, cioè della perdita di portata (sia liquida che solida), dunque tutti i risultati presentati dal modello nel tratto di torrente a valle della sezione di sfioro, dopo l'istante di inizio dello sfioro, non possono essere ritenuti significativi, dato che in un evento reale si avrebbe una portata in tale tratto inferiore a quella modellata a causa dello sfioro che avviene a monte. Si noti che una diminuzione di portata d'acqua non implica necessariamente una diminuzione dell'accumulo di sedimenti in tale tratto di torrente a causa di questa limitazione modellistica.

Il secondo problema, molto più evidente se si eseguono analisi di sensitività, è che, a causa del disaccoppiamento dei due modelli, se si scelgono certe combinazioni di parametri appaiono effetti che violano la fisica del processo. Si riporta questo esempio ritenuto significativo: se si sceglie un diametro dei sedimenti di 20 cm per la modellazione dello scenario si ha un accumulo di sedimenti nelle sezioni di valle molto maggiore rispetto a quello ottenuto nello scenario di riferimento; questo fa sì che la quota del fondo del letto nella sezione 74 diventi superiore alla quota dell'argine sinistro, poiché nel modello monodimensionale non può essere modellata alcuna fuoriuscita né di acqua né di sedimenti; calcolando quindi l'idrogramma di sfioro con le altezze d'acqua così ottenute dal modello monodimensionale utilizzando il modello di fuoriuscita si ottiene in questo modo un idrogramma uscente che implica un volume di acqua che si riversa in Sondrio superiore al volume d'acqua che entra nel Mallero nella sua sezione di monte e ciò chiaramente è impossibile da un punto di vista fisico.



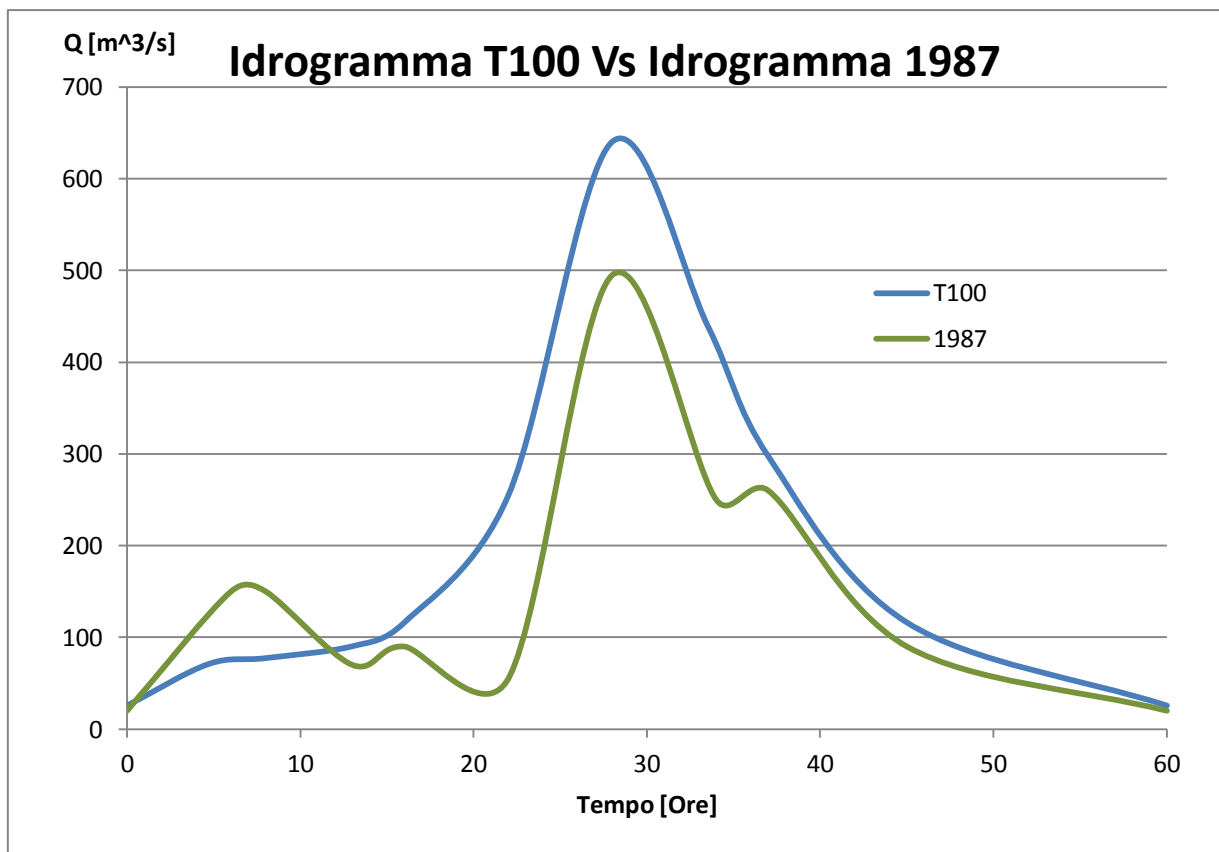
*Fig. 2.4.6 Effetto contrario alla fisica che si verifica a causa del disaccoppiamento dei due modelli: l'idrogramma di sfioro sottende un volume d'acqua maggiore di quello entrante nel torrente.*



### 3.5 CONFRONTO CON TESI PRECEDENTE

Ivanov (2014) ha trattato sia la modellazione di un evento simile a quello avvenuto nel 1987 (60 anni di tempo di ritorno stimato) che un evento con tempo di ritorno di 100 anni come quello modellato in questa tesi. In tale elaborato la modellazione dell'evento passato è stata effettuata al fine di calibrare il modello per poi utilizzarlo, con la stessa parametrizzazione, per modellare l'evento con tempo di ritorno di 100 anni.

L'idrogramma di un evento con tempo di ritorno di 100 anni rappresenta un evento estremo da un punto di vista idrologico, più intenso di quello accaduto nel 1987 (per il quale si può stimare un tempo di ritorno di 60 anni).



*Fig. 2.5.1 Confronto tra idrogramma stimato per un evento con tempo di ritorno di 100 anni usato in questa tesi e idrogramma stimato per l'evento del 1987 usato nella tesi di Vladislav Ivanov*

Il volume totale di sedimenti utilizzato da Ivanov (2014) nello scenario simile all'evento del 1987 è di 700000 metri cubi di sedimenti, volume stimato nel 1987 in fase post evento tenendo anche conto di dati registrati di volume di sedimenti rimosso dal letto del torrente.

In Ivanov (2014) per la modellazione dell'evento con tempo di ritorno di 60 anni non sono stati usati sedimenti tutti della stessa dimensione in ciascuna analisi come in questo lavoro, ma bensì si è tentata una stima più accurata della granulometria (utilizzata poi anche nel modello di scenario di un evento con tempo di ritorno di 100 anni). In questa tesi invece ciò non è stato effettuato per la scarsità di dati a disposizione (l'evento qui modellato con tempo di ritorno di 100 anni non ha un riferimento storico sufficientemente recente per avere dati affidabili) e tenendo conto della forte variabilità che questo dato può avere da una sezione all'altra del torrente, nonché dall'impossibilità di prevedere in maniera accurata la dimensione dei sedimenti entranti nella prima sezione di monte. Si è deciso quindi di procedere con l'analisi di sensitività al variare della dimensione dei sedimenti riportata in precedenza scegliendo sedimenti di dimensioni uniformi anziché affidarsi completamente a dati riguardanti un evento avvenuto precedentemente molto diverso da quello che si intende modellare.

Anche nella tesi precedente si è utilizzato il software *Basement* per la modellazione dello scenario. In quell'elaborato è però stato utilizzato anche *Hec-Ras* per il calcolo dello sfioro. Si noti che in entrambi i lavori il modello di sfioro è disaccoppiato da quello idraulico-morfologico. In entrambi i casi infatti si utilizza una successione di stati permanenti. La diversità sta in come ciascuno stato permanente viene modellato. Il software *Hec-Ras* permette, con l'approssimazione di torrente a fondo statico, un calcolo automatico dello sfioro, dunque Ivanov (2014) ha proposto diversi stati permanenti in successione, calcolando per ciascuno il contributo allo sfioro complessivo, discretizzando così il processo nel tempo. Al contrario, come già discusso, in questa tesi è stato scelto di modellare lo sfioro con la formula dello sfioratore, anche in questo caso proponendo una discretizzazione temporale del processo.

Ivanov (2014) ha modellato poi lo scenario di un evento con tempo di ritorno di 100 anni. Dunque per questo scenario in entrambe le tesi si usa lo stesso idrogramma come condizione al contorno di monte, ma è ben diverso l'approccio alla parametrizzazione:

-Ivanov (2014) ha parametrizzato il modello basandosi su dati di un evento passato, diverso da quello modellato nello scenario;

-in questa tesi la parametrizzazione è basata sull'analisi di sensitività.

Nella tesi precedente lo scenario relativo a un evento con tempo di ritorno di 100 anni è stato modellato considerando un volume totale di sedimenti entranti di soli 200000 metri cubi, distribuiti nel tempo proporzionalmente al quadrato della portata d'acqua (poi come analisi di sensitività tale distribuzione temporale di portata di sedimenti è stata proposta anche posticipata).

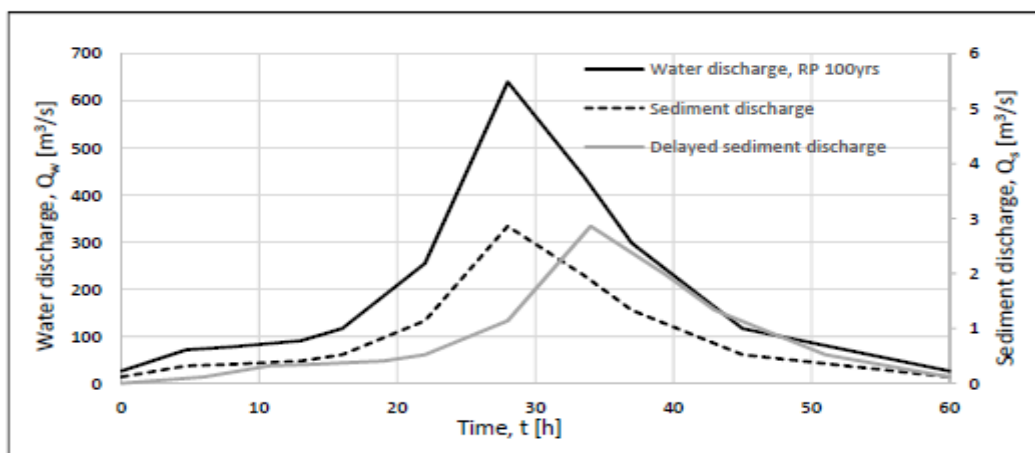


Fig. 2.5.2 Ivanov (2014) Idrogramma di piena e distribuzione temporale della portata solida.

Essendo l'idrogramma di monte lo stesso, ma il volume totale di sedimenti utilizzato nella tesi di Vladislav Ivanov più piccolo, la modellazione in tale elaborato corrisponde a uno scenario meno gravoso che quello modellato in questa tesi si attende un volume di acqua riversato in Sondrio inferiore a quello ottenuto in questa tesi. Bisogna però considerare che i due modelli sono molto diversi per come sono stati costruiti e parametrizzati.

Si riportano i risultati per lo sfioro ottenuti da Vladislav Ivanov.

t [h]	Q <sub>t, Garibaldi</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Outflow discharge, Q <sub>out</sub> [m <sup>3</sup> /s]		Water volume, ΔW [m <sup>3</sup> ]	
		C <sub>d</sub> 1.45	C <sub>d</sub> 1.7	C <sub>d</sub> 1.45	C <sub>d</sub> 1.7
26.1	-	0	0		
28.0	640	45.33	50.84	154122	172856
34.0	426	116.77	127.88	1750680	1930176
41.7	194	100.06	108.55	2992254	3262734
55.6	53	25.7	27.94	3144000	3412250
60.0	27	10.3	11.3	288000	313920
				ΣW [m <sup>3</sup> ]	
				8,329,056	9,091,936

Tab. 2.5.1 Ivanov (2014), volumi e portate di sfioro.

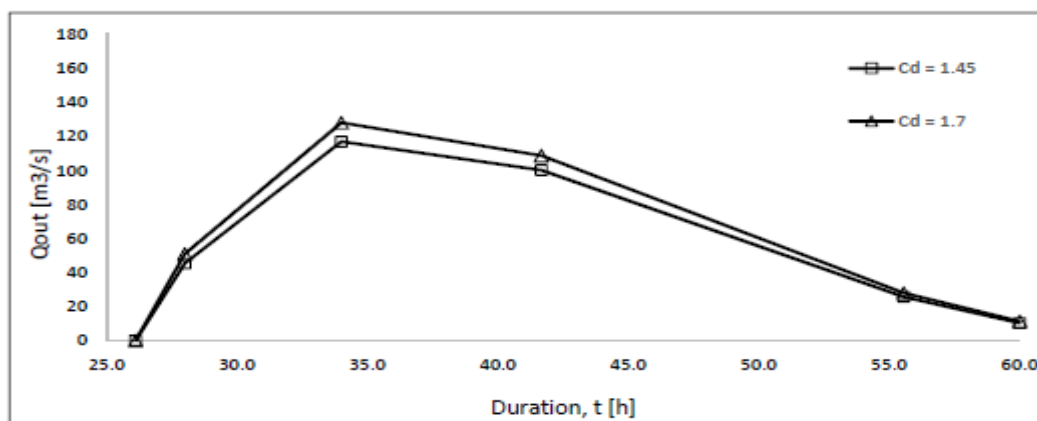
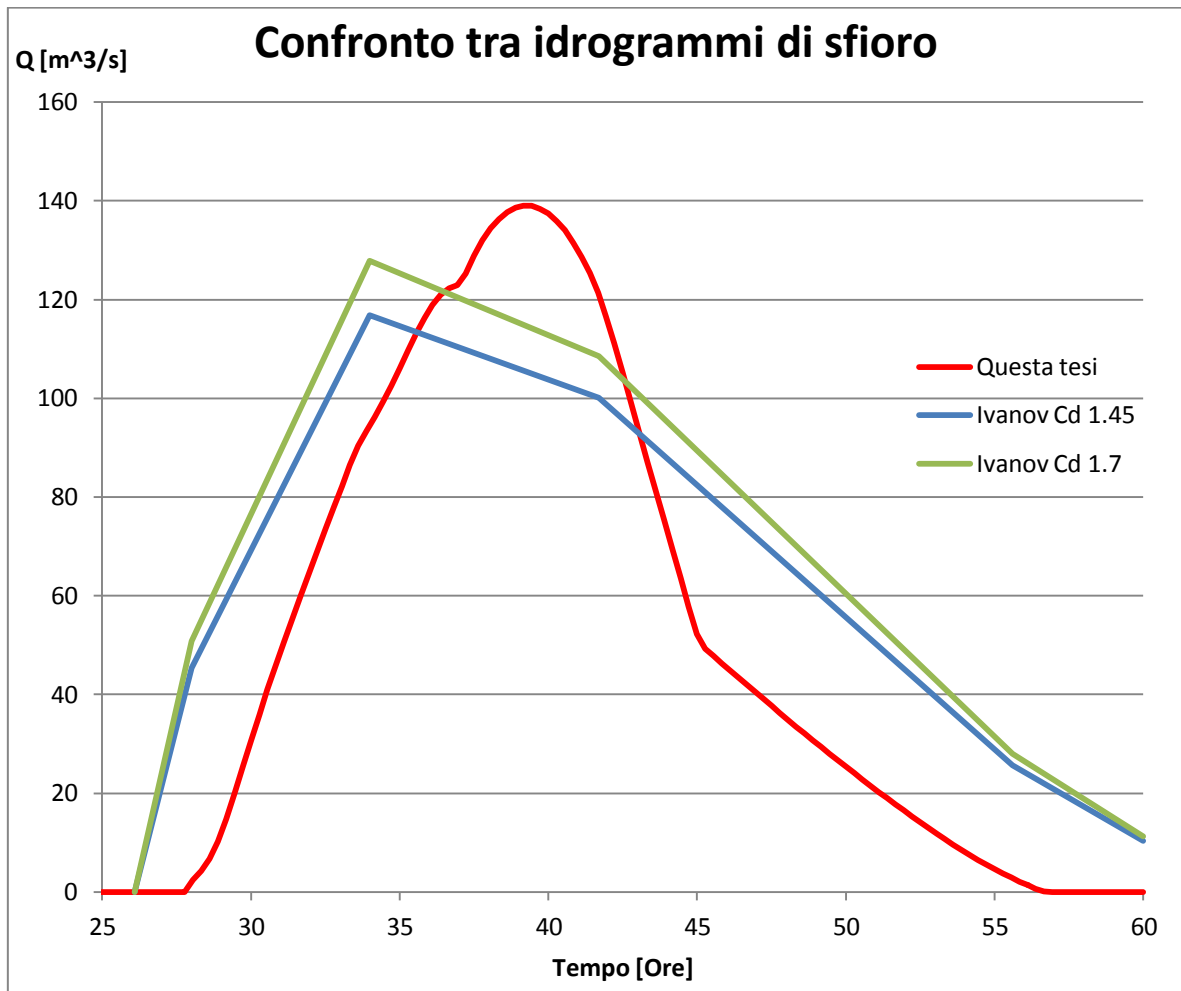


Fig. 2.5.2 Ivanov (2014), idrogrammi uscenti per due possibili valori del coefficiente di sfioro Cd.

Si confrontano gli idrogrammi di sfioro ottenuti nella tesi precedente e in questa.



*Fig. 2.5.3 Confronto tra idrogrammi di sfioro proposti nella tesi di Vladislav Ivanov e quello proposto in questa tesi.*

Seppure i modelli utilizzati siano differenti, i risultati ottenuti, riguardo la quantificazione della fuoriuscita, sono abbastanza simili, almeno per quanto riguarda la stima degli ordini di grandezza, ed entrambi i lavori sono concordi nel ritenere un idrogramma di sfioro di queste dimensioni accettabile per lo scenario considerato. In entrambe le modellazioni si sono spente quasi completamente certe dipendenze (come per esempio dal volume totale di sedimenti o dalla scelta di letto erodibile o fisso). Dunque le differenze sono presenti tra le due modellazioni, ma il peso di queste ultime risulta scarso al fine della valutazione dell'idrogramma uscente.

Questa somiglianza nei risultati è giustificata anche dalle seguenti argomentazioni. Detto che Ivanov (2014) ha usato, a differenza che in questa tesi, un modello calibrato su un evento passato, ha calcolato l'apporto di sedimenti in maniera differente, cioè modellando una singola pioggia, senza considerare l'accumulo di sedimenti nel corso degli anni, come è stato fatto nel modello di erosione riportato in questa tesi, e ha modellato la successione di stati permanenti dello sfioro con un modello diverso, ovvero utilizzando il software *Hec-Ras* anziché l'equazione dello sfioratore come in questa tesi, si notano principalmente queste differenze tra i due lavori:

-differente approccio al calcolo dell'apporto di sedimenti;

-modello plurigranulare Vs modello monogranulare;

-diverse equazioni usate per modellare lo sfioro, ma stesso approccio concettuale (disaccoppiamento dei due problemi modellistici);

-fondo erodibile Vs fondo fisso.

Considerato però che:

- 1) come mostrato nell'analisi di sensitività, l'apporto di sedimenti influenza poco la fuoriuscita;
- 2) un modello monogranulare è più sensibile al diametro scelto, ma, una volta calibrato, non implica sostanziali differenze con quello plurigranulare proposto da Ivanov (2014);
- 3) l'approccio allo sfioro è lo stesso, è solo implementato con relazioni differenti;
- 4) la scelta di semplificare il modello con l'ipotesi di fondo fisso non implica differenze sostanziali con un modello a fondo erodibile in questo scenario che è principalmente di accumulo.

Si può concludere che la limitata differenza negli idrogrammi di sfioro ottenuti nei due lavori può essere considerata ragionevole.

## 3 CASO SINTETICO

### 3.1 INTRODUZIONE

Dalla modellazione del torrente Mallero si è concluso che, per lo scenario considerato, c'è una fuoriuscita di acqua in città, alla quale inevitabilmente seguirà un allagamento dell'area urbana. Ora si cerca un modo per modellare al meglio questo allagamento e appare subito evidente la necessità di avere un solutore che funzioni, sia controllabile nelle sue risposte e tenga conto delle caratteristiche salienti della città di Sondrio.

Si hanno a disposizione due software sfruttabili per la modellazione idraulica bidimensionale di un allagamento, li si proveranno al fine di scegliere il più adatto per modellare lo scenario considerato.

E' inoltre necessario, sulla base delle equazioni governanti il modello idraulico bidimensionale utilizzato, scegliere i parametri rilevanti e calibrarli al meglio con i pochi dati a disposizione; per fare questo saranno eseguite diverse analisi di sensitività, in particolare a:

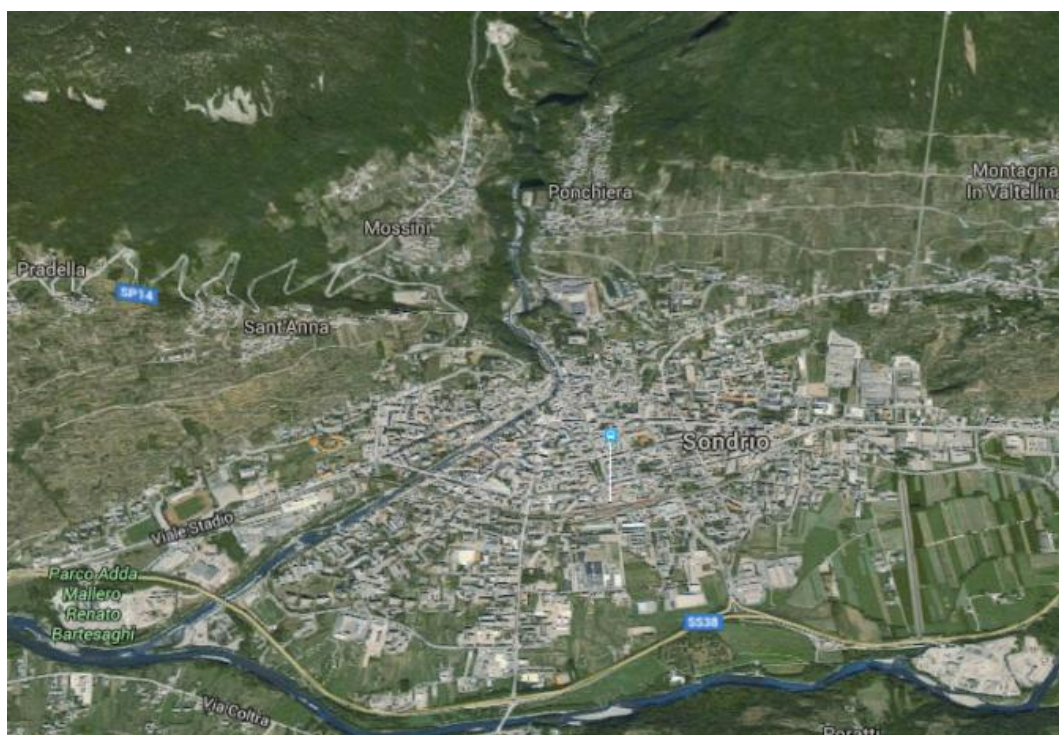
- griglia di calcolo numerico;
- scabrezza fondo;
- parametri del terreno;
- moto vario;
- presenza di ostruzioni.

Si studia quindi un caso sintetico, in cui si propone una geometria semplice, ma in qualche modo rappresentativa di quella della città di Sondrio, per mezzo del quale è possibile condurre analisi in relativamente poco tempo che permettano successivamente affrontare meglio il caso reale. I risultati qui ottenuti saranno poi sfruttati per fare delle scelte nel capitolo successivo finalizzate a modellare al meglio lo scenario in relazione alla quantità limitata di dati a disposizione e alle limitazioni modellistiche.

### 3.2 MODELLI DEL CASO SINTETICO

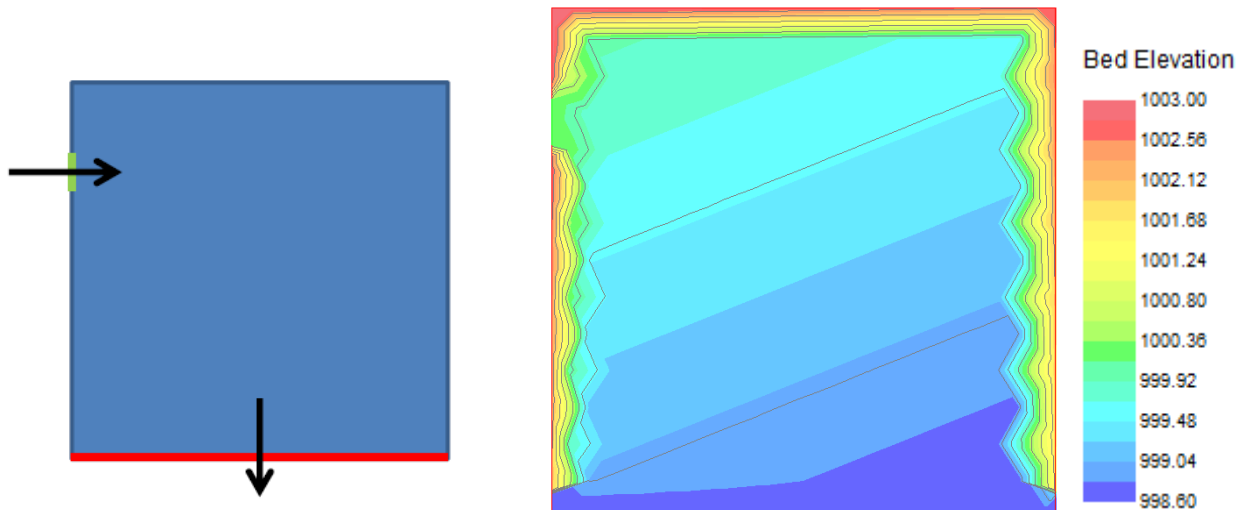
#### *Geometria*

La città di Sondrio sorge su un conoide alluvionale formato dal torrente Mallero, che vi scorre all'interno. Come sarà successivamente discusso la modellazione dello scenario prevede l'esonazione del Mallero dal suo argine sinistro nei pressi della zona a nord della città (in prossimità del ponte in via De Simoni). Analizzando quindi la parte di città alla sinistra idrografica del torrente si osserva una pendenza lungo la linea Ovest-Est e una pendenza, più accentuata, lungo la linea Nord-Sud.



*Fig. 3.2.1 Conoide alluvionale su ci sorge Sondrio, vista da Sud.*

Si decide quindi, per modellare il caso sintetico, di creare una geometria molto regolare: un quadrato di lato 220 m con pendenza lungo la linea Ovest-Est dello 0.2% e lungo la linea Nord-Sud dello 0.5%. Sul lato destro, a una distanza di 40 m dal vertice superiore, inizia un tratto di inflow lungo 20 m. L'acqua può fuoriuscire dal lato sud. Per evitare l'acqua possa fuoriuscire lateralmente dagli altri tre lati si sceglie di alzare tali argini a una quota superiore rispetto a quella del suolo, come mostrato in figura.



*Fig. 3.2.2 Geometria di riferimento per la modellazione del caso sintetico*

Si noti che le dimensioni del quadrato (e quella del tratto di entrata dell'acqua nell'area di allagamento, come sarà discusso al capitolo successivo) sono molto più piccole di quelle effettive della parte della città di Sondrio alla sinistra idrografica del torrente Mallero, ma ciò permette una modellazione relativamente rapida e quindi la possibilità di effettuare diverse analisi. Per la modellazione dell'allagamento della città nello scenario che sarà considerato sono infatti necessari al modello tempi di calcolo di diverse ore, il che non permette di effettuare un numero molto grande di analisi.



## Programmi utilizzati

Per lo studio di un processo di allagamento sono proposti due software, entrambi disponibili gratuitamente, che permettono una modellazione bidimensionale del fenomeno. In questa sezione si modella il caso sintetico con entrambi e si sceglierà il software che permette una miglior modellazione dello scenario proposto al prossimo capitolo secondo i criteri che verranno esposti. I software utilizzati sono:

-River2D Version0.95 January 25,2010

- HEC-RAS 5.0 Beta 2014-10-01

## River 2D

River2D, software sviluppato presso l'università dell'Alberta (Canada), propone una modellazione bidimensionale basata sulle Shallow Water Equations per il flusso superficiale e sulle equazioni dell'idraulica sotterranea per il flusso nel sottosuolo. Tale programma permette anche una modellazione nell'ipotesi di presenza di ghiaccio.

$$\begin{cases} \frac{\partial ud}{\partial t} + \frac{\partial u^2 d}{\partial x} + \frac{\partial uvd}{\partial y} + gd \left( \frac{\partial d}{\partial x} - S_{0x} \right) = -gdS_{fx} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (dT_{xx}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (dT_{xy}) \\ \frac{\partial vd}{\partial t} + \frac{\partial uvd}{\partial x} + \frac{\partial v^2 d}{\partial y} + gd \left( \frac{\partial d}{\partial y} - S_{0y} \right) = -gdS_{fy} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (dT_{yx}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (dT_{yy}) \\ \frac{\partial ud}{\partial x} + \frac{\partial vd}{\partial y} + \frac{\partial d}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

+ BC, IC

(3.2.1)

Le prime due equazioni riguardano la conservazione della quantità di moto (momentum equations) nelle due direzioni, la terza la conservazione della massa d'acqua (continuity equation) nel volume di controllo considerato.

Per quanto riguarda l'idraulica sotterranea si usa l'equazione (3.2.2), in cui rientrano il parametro di trasmissività e il coefficiente di immagazzinamento, i quali saranno oggetto di successive discussioni.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{T}{S} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} (H + z_b) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (H + z_b) \right)$$

(3.2.2)

## *HEC-RAS*

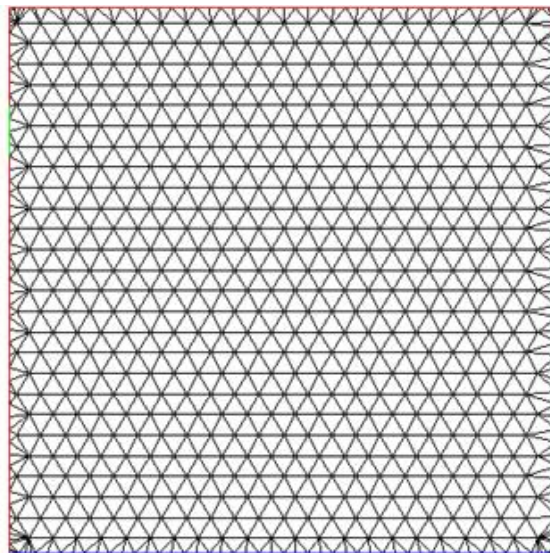
HEC-RAS è un software sviluppato dall'esercito statunitense (U.S. Army) che permette la modellazione monodimensionale di un corso d'acqua, la modellazione bidimensionale e anche la creazione di modelli misti con parti monodimensionali e bidimensionali connesse. Il programma nasce anni fa come modello monodimensionale, la possibilità di creare modelli bidimensionali o misti è stata introdotta recentemente e del software aggiornato a sfruttare tali nuove potenzialità è al momento della stesura della tesi disponibile solo una versione Beta, cioè una versione ancora in fase di sperimentazione, molto instabile e con la forte tendenza all'arresto improvviso, nonché con la presenza di diversi banchi nell'interfaccia con l'utente, ma che permette comunque la creazione di semplici modelli idraulici come quello proposto per il caso sintetico.

La modellazione bidimensionale è effettuata mediante l'integrazione delle S.W.E. (3.2.1). A differenza che in River2D, in HEC-RAS le equazioni di conservazione della quantità di moto vengono risolte solo dopo essere state semplificate. Un modello che introduce questa semplificazione viene definito quasi-2D. Questo rende il calcolo più rapido, ma implica una perdita di accuratezza della soluzione.

In HEC-RAS il suolo è ipotizzato impermeabile, non si ha quindi alcuna modellazione della circolazione idrica sotterranea.

### *Costruzione del modello in River2D*

Il modello è stato creato inserendo per prima cosa la geometria del quadrato nel software. Tale geometria è ottenuta calcolando una griglia di punti significativi con un codice Matlab che vengono poi interpolati linearmente dal programma, e successivamente inserendo i tratti di entrata e uscita dell'acqua, sui quali si possono definire le condizioni al contorno. Si crea poi una griglia per il calcolo numerico e infine si scelgono i valori da assegnare alle condizioni al contorno, alla condizione iniziale e ai parametri di calcolo e del terreno. Per la creazione di geometrie più complesse, come quelle contenenti i blocchi, di cui si discuterà in seguito, si inseriscono nella geometria anche elementi definiti come "internal boundary" con effetto di ostacolo all'acqua (il software suppone tali ostacoli di altezza infinita, cioè l'acqua non può passare sopra di essi). Per quanto riguarda la condizione al contorno di monte è sufficiente definire una portata entrante (costante o variabile nel tempo, si sceglie  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  costante per tutte le analisi effettuate ad eccezione di quelle eseguita usando un idrogramma) nel sistema e il software in automatico, nota la geometria della sezione di entrata, definisce un valore di altezza dell'acqua in tale sezione. La condizione al contorno di valle è invece definita come un valore fisso di altezza d'acqua nella sezione di uscita del sistema. Per condizione iniziale si definisce un valore iniziale di altezza d'acqua nella sezione di monte, il software in automatico interpola linearmente con la condizione al contorno di valle, per tutti gli istanti di tempo successivi l'altezza dell'acqua nella sezione di monte sarà invece calcolata come sopra specificato nota la portata entrante e la geometria di tale sezione.



*Fig. 3.2.3 Griglia per il calcolo numerico in nero, tratto di entrata in verde e tratto di uscita in blu*

Per quanto riguarda lo studio dell'allagamento di una superficie River2D permette la definizione dei seguenti parametri significativi per tale analisi: scabrezza della superficie, trasmissività, coefficiente di immagazzinamento. Le potenzialità del software in relazione a tale studio sono inoltre quelle di: poter creare griglie numeriche con diverse spaziature (purché non siano troppo fitte, si discuterà in seguito), inserire ostacoli, inserire portate variabili come condizione al

contorno di monte, scegliere arbitrariamente l'altezza della condizione al contorno di valle e scegliere arbitrariamente l'altezza iniziale nel tratto di ingresso come condizione iniziale.

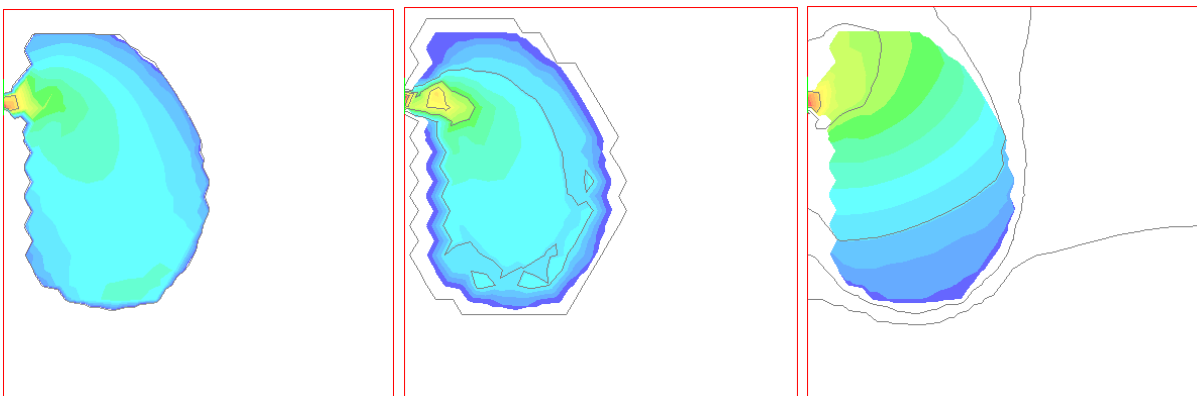
Al termine dell'analisi River2D può restituire gli andamenti spaziali, al variare del tempo, di diverse grandezze, in particolare si è interessati a:

-Altezza d'acqua

-Quota del pelo libero

-Portata unitaria scomposta nelle due componenti lungo x e lungo y

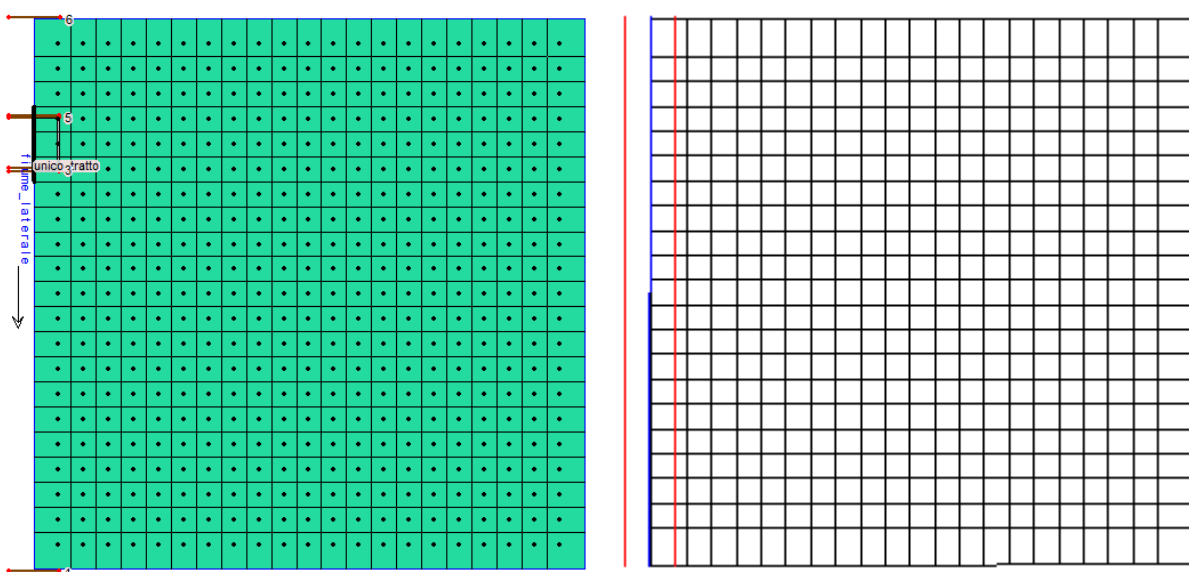
E' possibile ricavare le velocità dividendo le portate unitarie per l'altezza d'acqua.



*Fig. 3.2.4 Esempi di output di River2D, nell'ordine altezza d'acqua, velocità, quota.*

## Costruzione del modello in HEC-RAS

HEC-RAS permette di lavorare in parallelo con ArcGIS, mediante il quale è possibile interpolare la griglia di punti creata con Matlab ed esportare la mappa: HEC-RAS riceve il DTM creato da ArcGIS come input, così facendo la geometria è stata inserita nel software. Teoricamente HEC-RAS permetterebbe la costruzione di un modello puramente 2D, sarebbe sufficiente inserire la sezione di entrata e richiedere un certo valore di portata entrante in quest'ultima, ma purtroppo il modello così costruito genera continui arresti del software, il quale è ancora in una versione Beta, si cerca dunque una soluzione alternativa. Si decide di creare un modello combinato in parte monodimensionale e in parte bidimensionale, si costruisce quindi un tratto di fiume a lato del quadrato con argini molto alti lungo tutto il tratto, tranne in corrispondenza della sezione di input dove si pone un argine a filo del terreno che permetta lo sfioro. Volendo far entrare nel terreno quadrato una portata di  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , così come nel modello in River2D, per rendere possibile un confronto, si procede a un'attenta calibrazione dell'idrogramma entrante nel fiume laterale, in modo che la portata di sfioro si aggiri nel tempo attorno al valore costante di  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Si è così creato un modello più complesso di un modello puramente 2D e che richiede una calibrazione della portata entrante, eseguita per tentativi, ma che evita continui arresti del programma e dunque permette di portare a termine il calcolo (si è provato anche inserendo un fiume che sfiora frontalmente dentro il terreno quadrato ma anche in questo caso vi erano problemi di stabilità del software). Creata la geometria si procede alla costruzione della griglia numerica di calcolo.



*Fig. 3.2.5 Geometria del modello in HEC-RAS, nella prima figura sono indicati i centri dei poligoni della griglia numerica, le 6 sezioni inserite per creare il fiume, la posizione del fiume e dello sfioro; nella seconda figura si mostrano gli argini del fiume in rosso.*

	Stage HW US	Stage HW DS	Stage TW	Flow HW US	Flow HW DS	Flow Leaving	
Date	INST-VAL	INST-VAL	INST-VAL	INST-VAL	INST-VAL	INST-VAL	
	METERS	METERS	METERS	M3/S	M3/S	M3/S	
1	01nov2015 0100	1003.40	1003.27	1001.77	15.00	4.91	11.45
2	01nov2015 0101	1003.33	1003.27	1002.21	15.00	4.99	10.06
3	01nov2015 0102	1003.33	1003.27	1002.20	15.00	4.90	10.09
4	01nov2015 0103	1003.33	1003.27	1002.20	15.00	4.91	10.09
5	01nov2015 0104	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
6	01nov2015 0105	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
7	01nov2015 0106	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
8	01nov2015 0107	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
9	01nov2015 0108	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
10	01nov2015 0109	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
11	01nov2015 0110	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
12	01nov2015 0111	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
13	01nov2015 0112	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
14	01nov2015 0113	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
15	01nov2015 0114	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
16	01nov2015 0115	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
17	01nov2015 0116	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09
18	01nov2015 0117	1003.33	1003.27	1002.26	15.00	4.91	10.09

Tab. 3.2.1 Si mostra nella colonna a destra la portata di sfioro che converge rapidamente a un valore di 10.09 m<sup>3</sup>/s, molto prossimo ai 10 m<sup>3</sup>/s, dopo un’attenta calibrazione della portata entrante nel fiume.

Per quanto riguarda l’analisi bidimensionale HEC-RAS permette di inserire il parametro di scabrezza del fondo per l’area di allagamento, permette di eseguire l’analisi con diverse griglie di calcolo numerico, ma considera il suolo completamente impermeabile, non è quindi possibile eseguire alcuna analisi che tenga conto della circolazione di acqua sotterranea come in River2D. Anche in HEC-RAS è possibile scegliere alcuni parametri per il calcolo numerico.

Al termine dell’analisi HEC-RAS restituisce gli andamenti spaziali, al variare del tempo, di altezza d’acqua, di velocità e di quota del pelo libero.

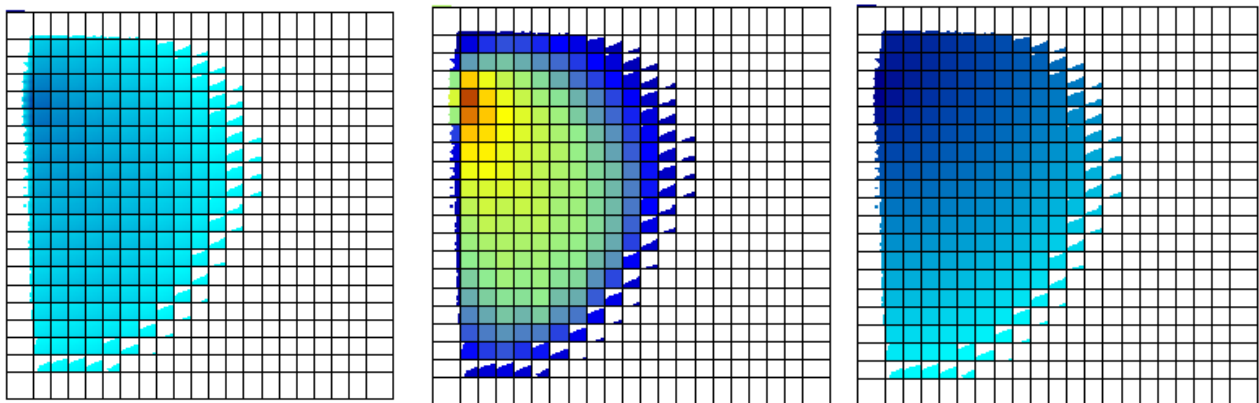


Fig. 3.2.6 Esempi di output di HEC-RAS, nell’ordine altezza d’acqua, velocità, quota.

In HEC-RAS sono calcolate l’altezza, la velocità e la quota della superficie dell’acqua nel punto centrale di ciascun elemento finito della griglia numerica. Tali valori sono considerati costanti in tutto l’elemento. Il terreno però non ha una quota costante, ogni elemento ha il vertice di Nord-Ovest a una quota superiore a quella del vertice di Sud-Est. Se in un singolo elemento il piano orizzontale che descrive la quota dell’acqua si interseca con quello inclinato che descrive la quota del terreno allora elemento apparirà colorato solo nella parte dove la quota dell’acqua calcolata è superiore a quella del terreno. Questo spiega l’effetto apparente di riempimento degli elementi prima a valle che a monte.

## Punti di controllo

Per ottenere risultati confrontabili si sceglie inizialmente un caso base e si fissano dei punti di controllo dentro l'area di allagamento in modo da poter estrarre i risultati in corrispondenza di tali punti. I 9 punti di controllo seguono il percorso prevalente del flusso e sono identificati con lettere dalla A alla I partendo dalla sezione di entrata. I punti da C a I seguono la linea di massima pendenza.

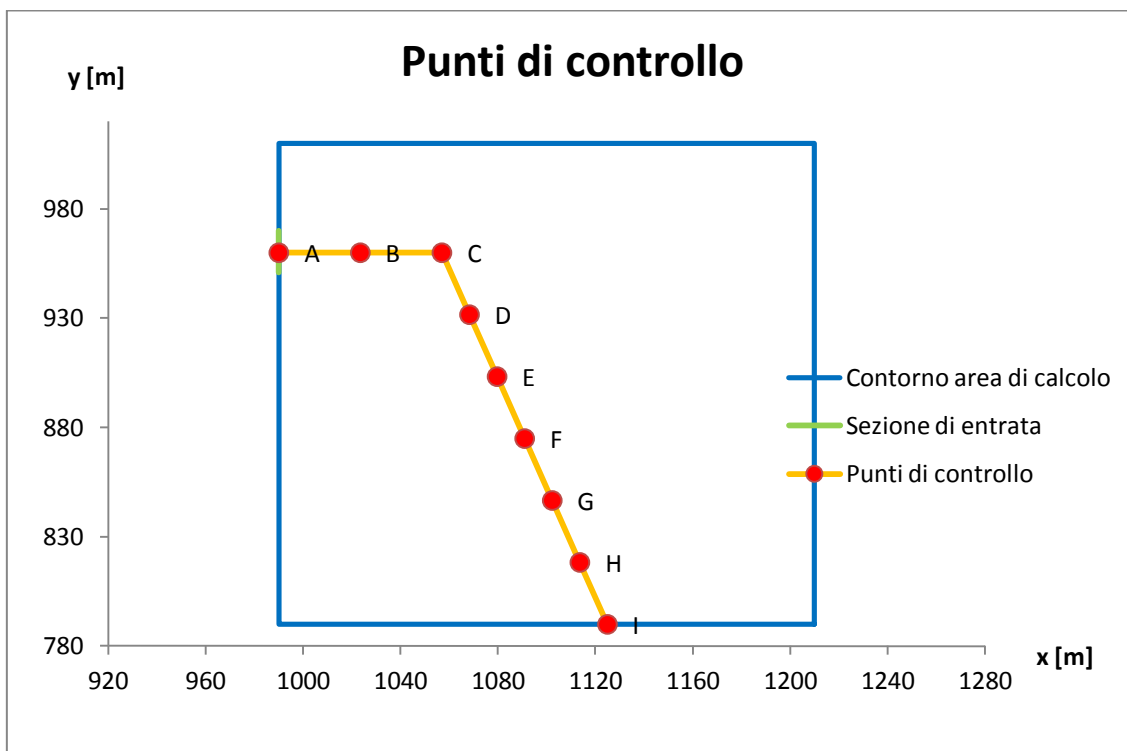


Fig. 3.2.7 Posizione dei punti di controllo nell'area di allagamento.

Si riporta la distanza di ciascun punto, misurata lungo il percorso in figura, dalla sezione di entrata. Si noti che il punto I si trova in corrispondenza della condizione al contorno di valle, dunque i risultati ivi ottenuti saranno poco significativi, mentre il punto A si trova in corrispondenza della sezione di ingresso.

Punto	Distanza [m]
A	0
B	33.5
C	67.0
D	97.5
E	128.0
F	158.5
G	189.1
H	219.6
I	250.1

Tab 3.2.2 Distanza dalla sezione d'entrata misurata lungo il percorso considerato.

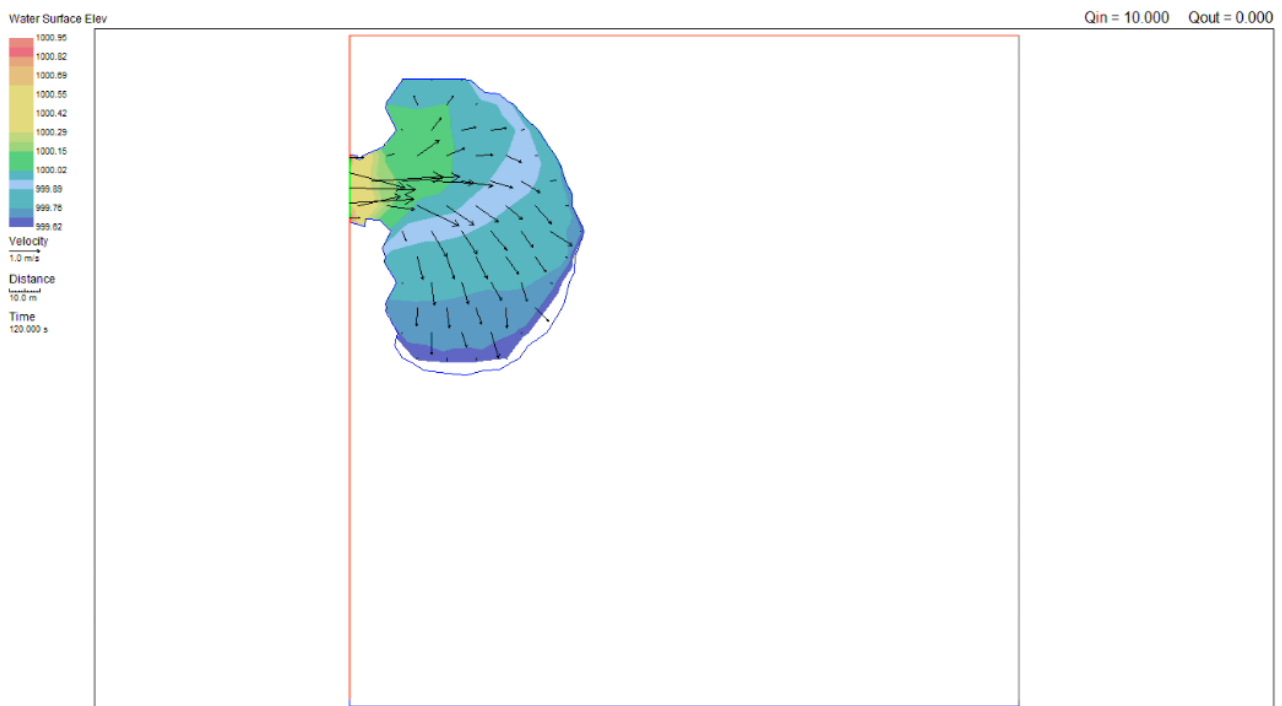
### 3.3 ANALISI E RISULTATI

#### Modellazione caso base con River2D

Si fissa un caso base con i seguenti parametri (riferiti a River2D):

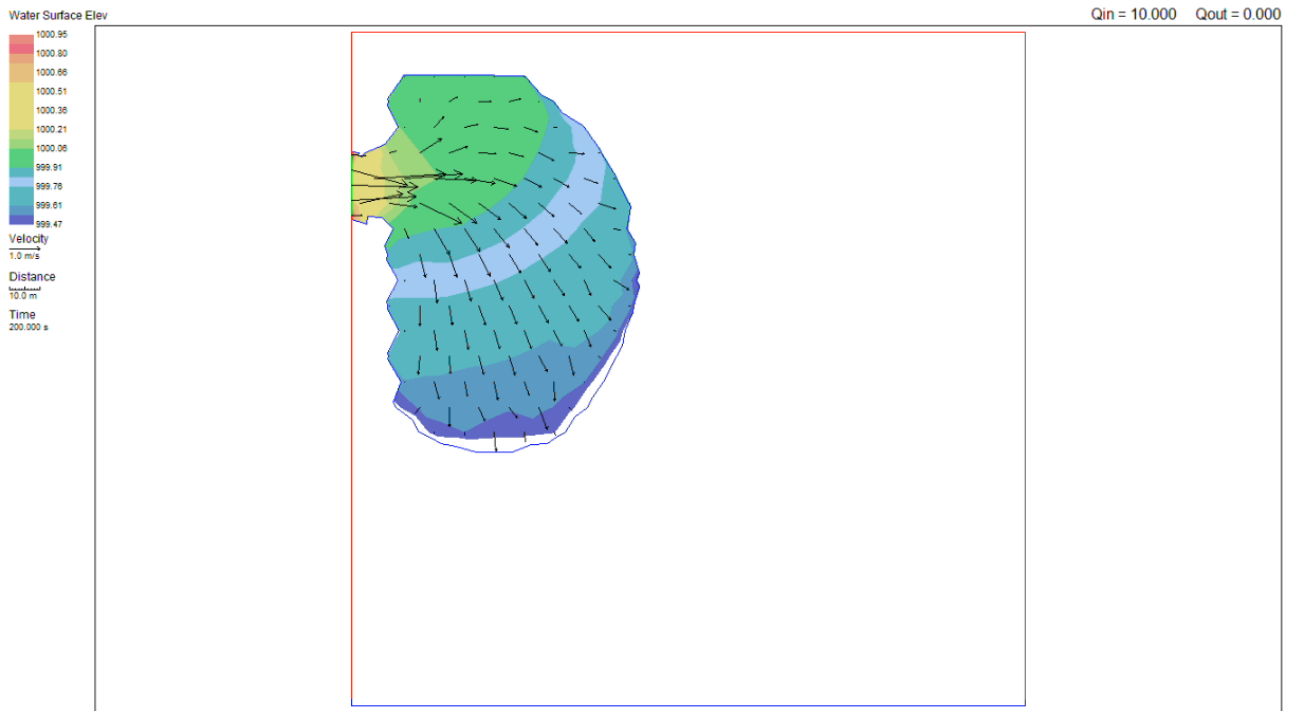
- portata entrante dalla sezione di monte: costante,  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- livello superficie dell'acqua in sezione di valle (lato sud): 998 mslm (60 cm sotto al terreno in tale sezione, si propone quindi altezza d'acqua negativa, al fine di modellare meglio l'avanzamento del fronte d'onda su un terreno inizialmente asciutto);
- altezza d'acqua nella sezione di monte all'istante iniziale: 1000.5 m.s.l.m.;
- scabrezza del fondo della zona di allagamento: 0.1 m;
- trasmissività:  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ ;
- coefficiente di immagazzinamento: 0.1;
- durata processo di allagamento: 800 s;
- griglia numerica: triangoli con spaziatura tra i vertici di 10 m.

Dalla modellazione del caso base con River2D si ottengono dunque i seguenti risultati:

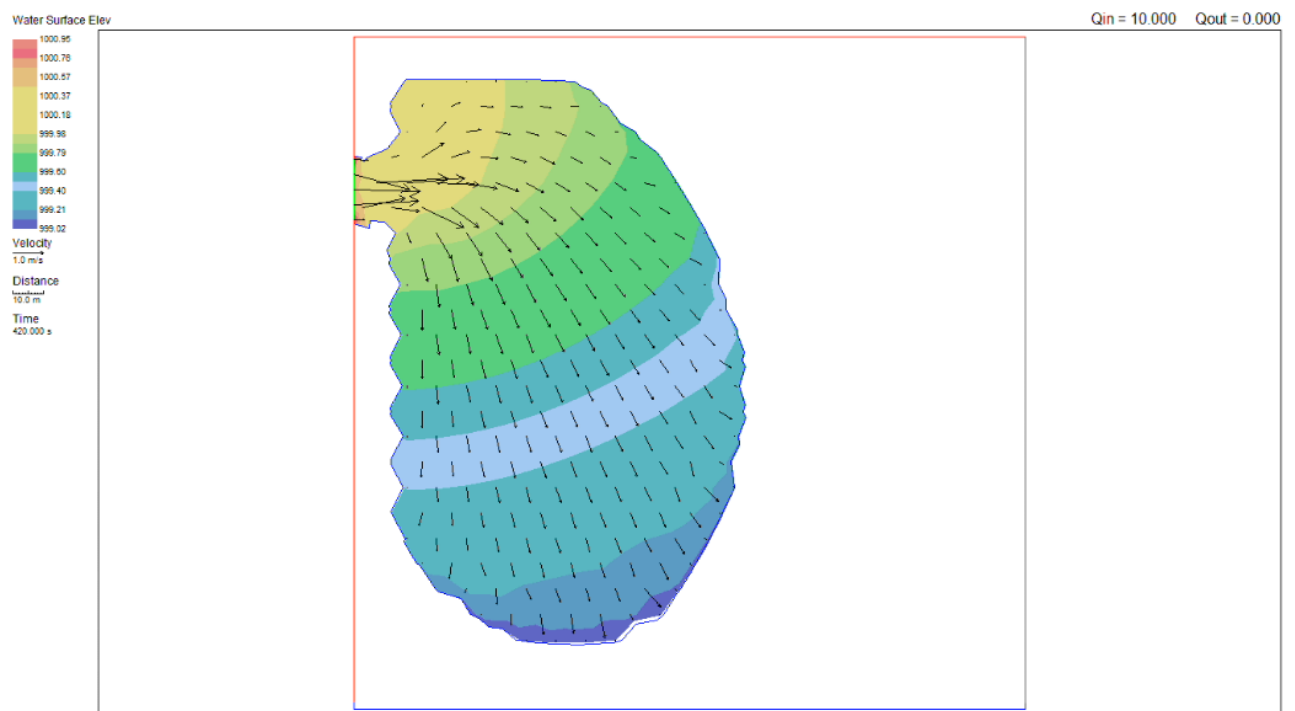


*Fig. 3.3.1 Allagamento dopo 100 secondi.*

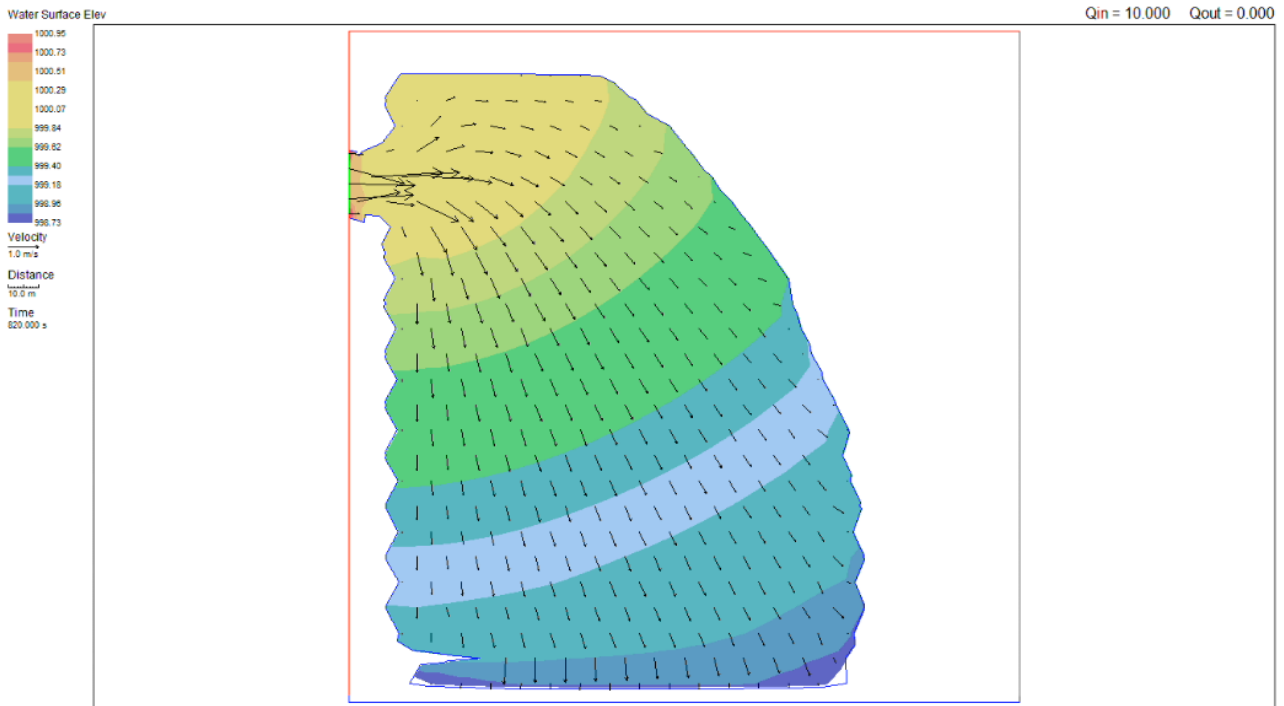




*Fig. 3.3.2 Allagamento dopo 200 secondi.*



*Fig. 3.3.3 Allagamento dopo 400 secondi.*



*Fig. 3.3.3 Allagamento dopo 800 secondi.*

Solo per questo caso base si riportano, a fine di esempio, tutti i risultati ottenuti per tutti i punti di controllo per le grandezze di altezza d'acqua, quota della superficie dell'acqua, portata per lunghezza unitaria e velocità. Per tutte le altre analisi eseguite con River2D che verranno esposte nei prossimi paragrafi solo alcuni risultati saranno riportati per ragioni di sintesi (in allegato si possono trovare tutti i risultati di ogni analisi effettuata). Per ciascuna di queste grandezze si riportano i valori nel tempo e nello spazio (lungo il percorso sopra riportato) fissati rispettivamente i punti di controllo e gli istanti di tempo rappresentativi.

Dall'osservazione dei grafici sotto riportati si nota che il calcolo effettuato da River2D (con parametri di calcolo numerico preimpostati dal software, tolleranza di 1 cm e passo temporale scelto dal programma stesso) è prevalentemente stabile. E' possibile distinguere chiaramente l'avanzamento del fronte dell'onda e notare come dopo 600 secondi il processo tenda a stabilizzarsi.

Il punto I, trovandosi in corrispondenza della condizione al contorno di valle, presenta risultati poco significativi, ma comunque riportati per completezza; infatti in tale punto non c'è flusso, quindi portata e velocità sono sempre nulle. Il software mostra solo altezze nulle in corrispondenza del punto I, quota del pelo libero, portata e velocità non vengono mostrate e dunque non sono presenti nei grafici.

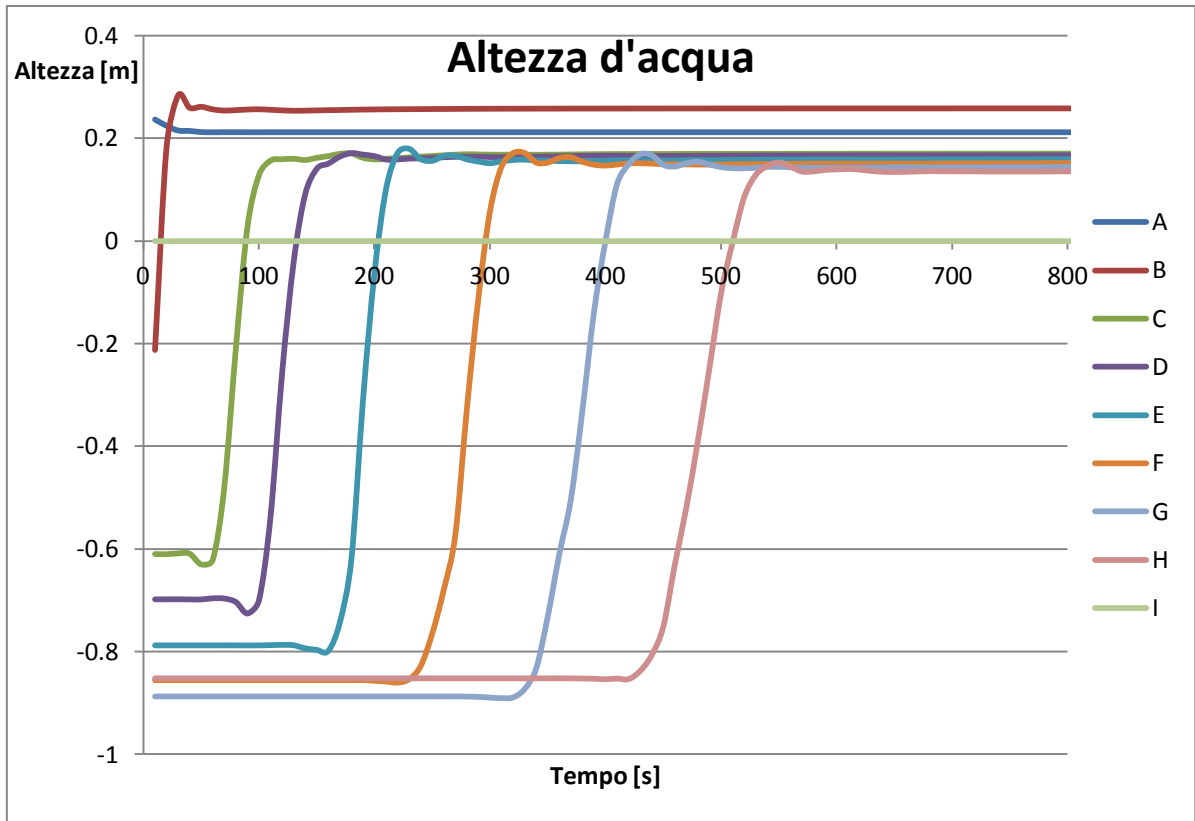


Fig. 3.3.4 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo.

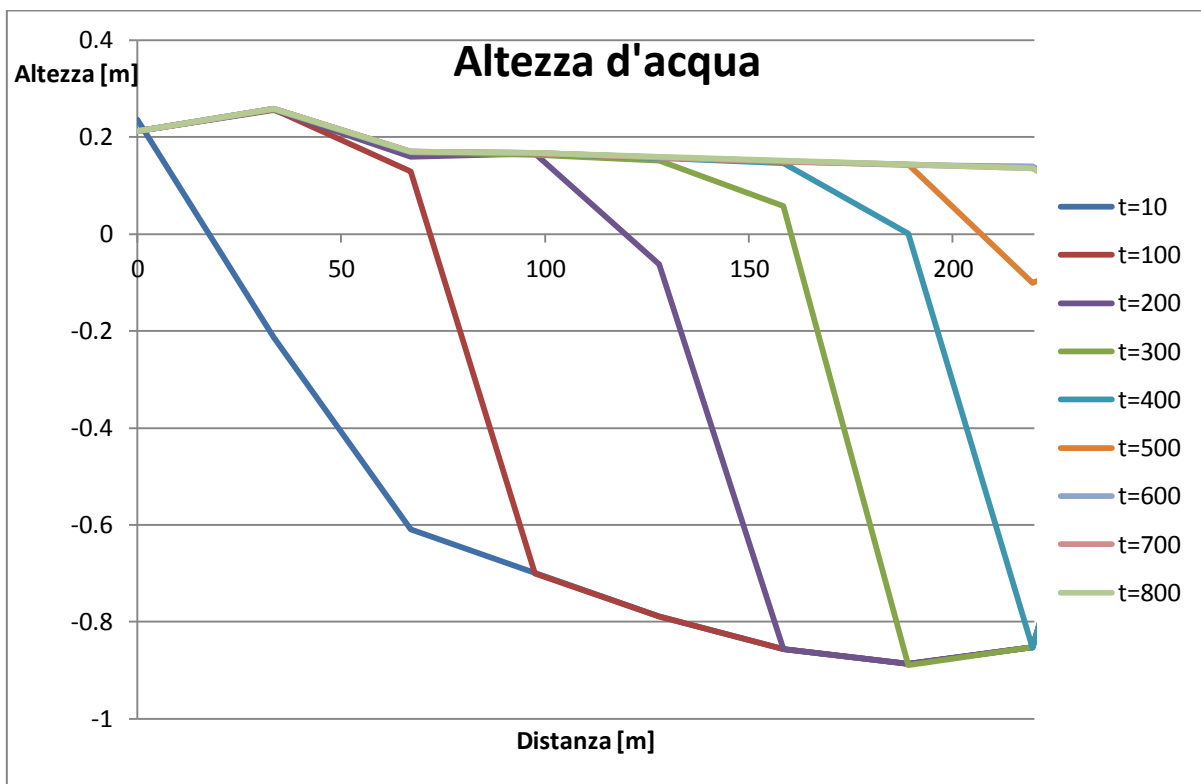


Fig. 3.3.5 Altezza d'acqua lungo il percorso considerato in istanti di tempo fissati.

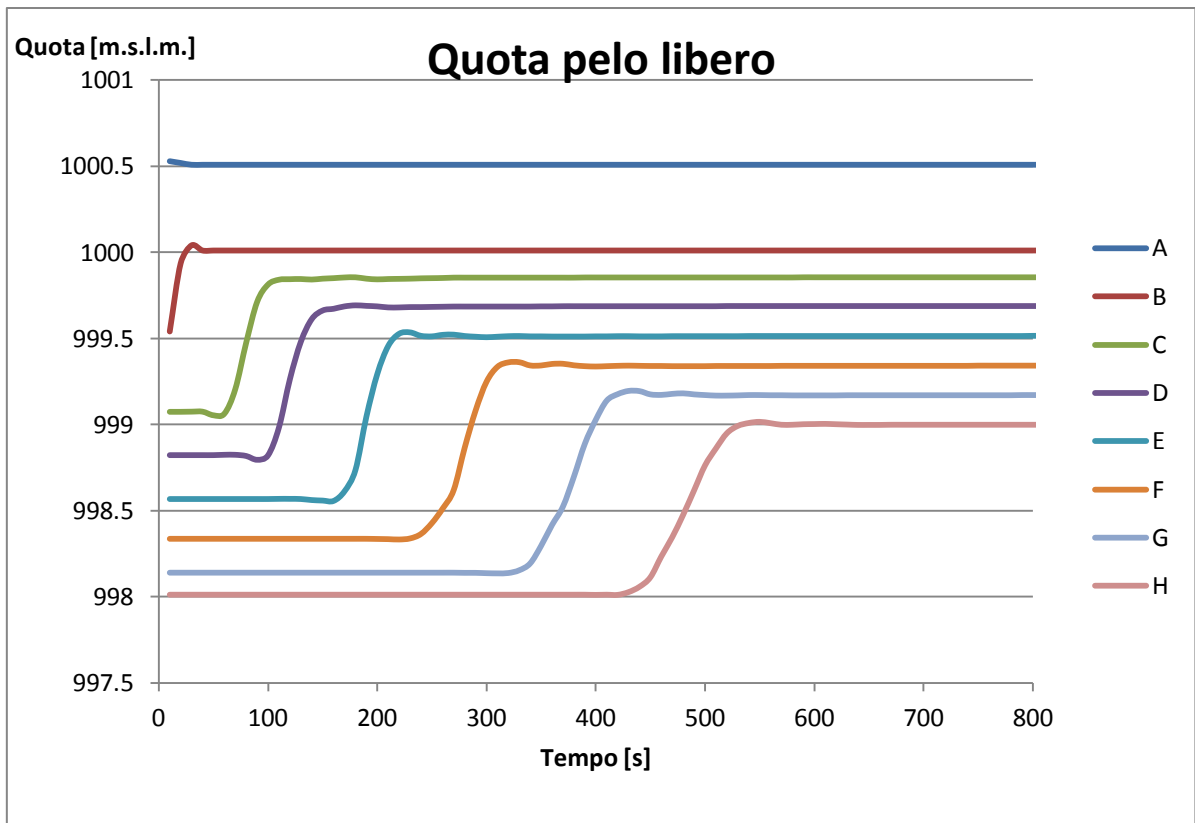


Fig. 3.3.6 Quota del pelo libero al variare del tempo nei punti di controllo.

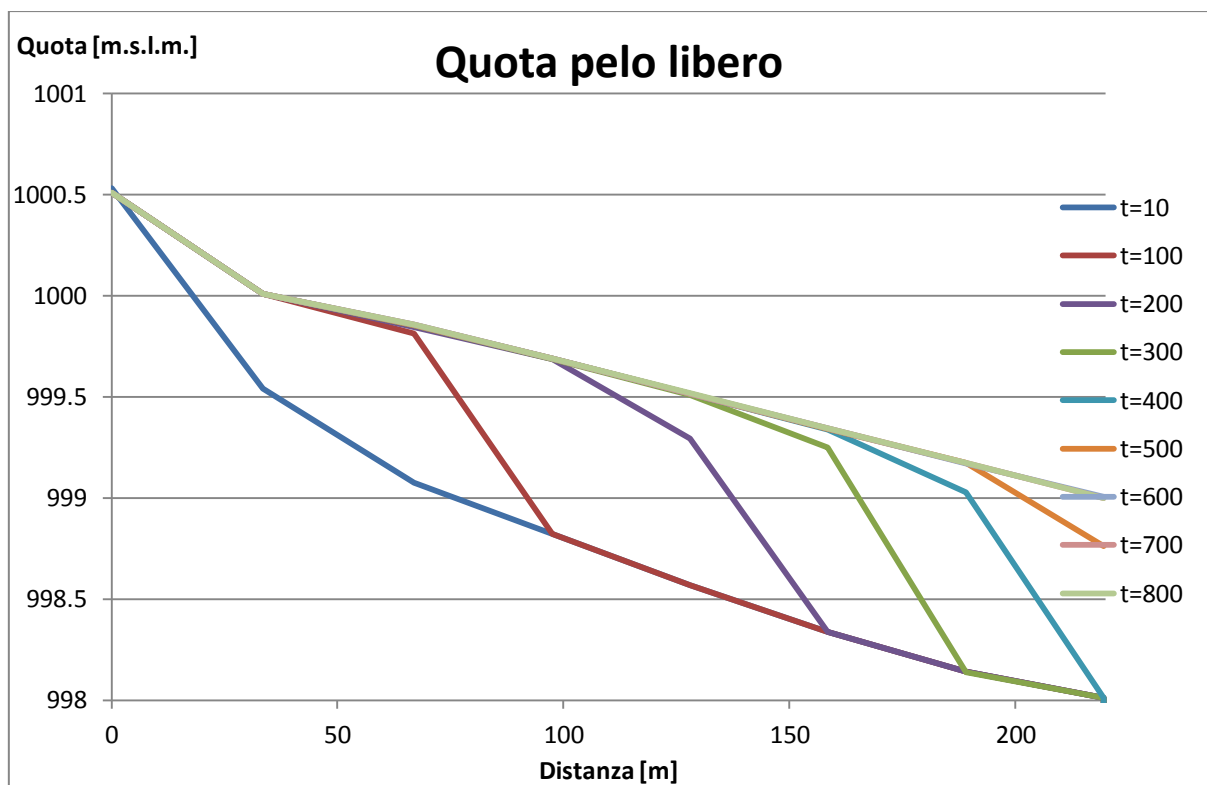


Fig. 3.3.7 Quota del pelo libero lungo il percorso considerato in istanti di tempo fissati.

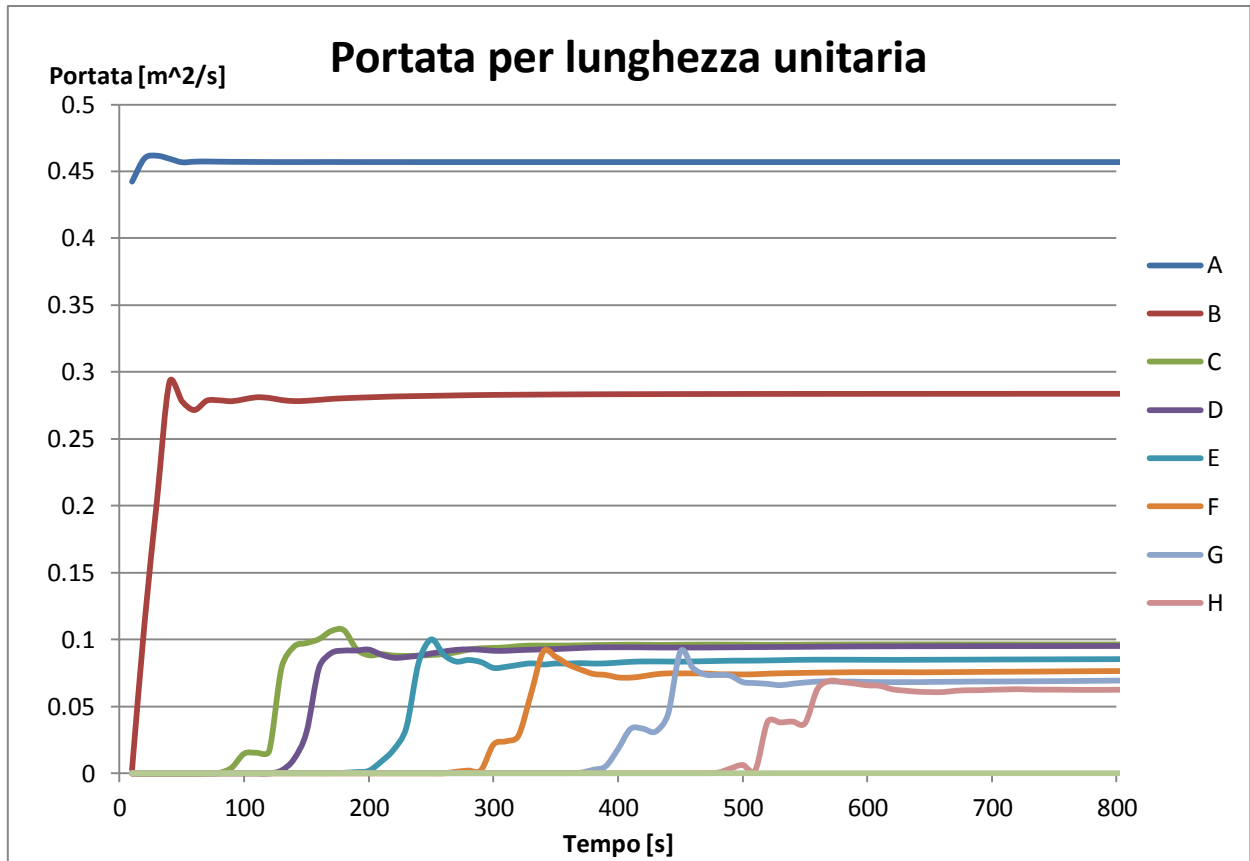


Fig. 3.3.8 Portata unitaria al variare del tempo nei punti di controllo.

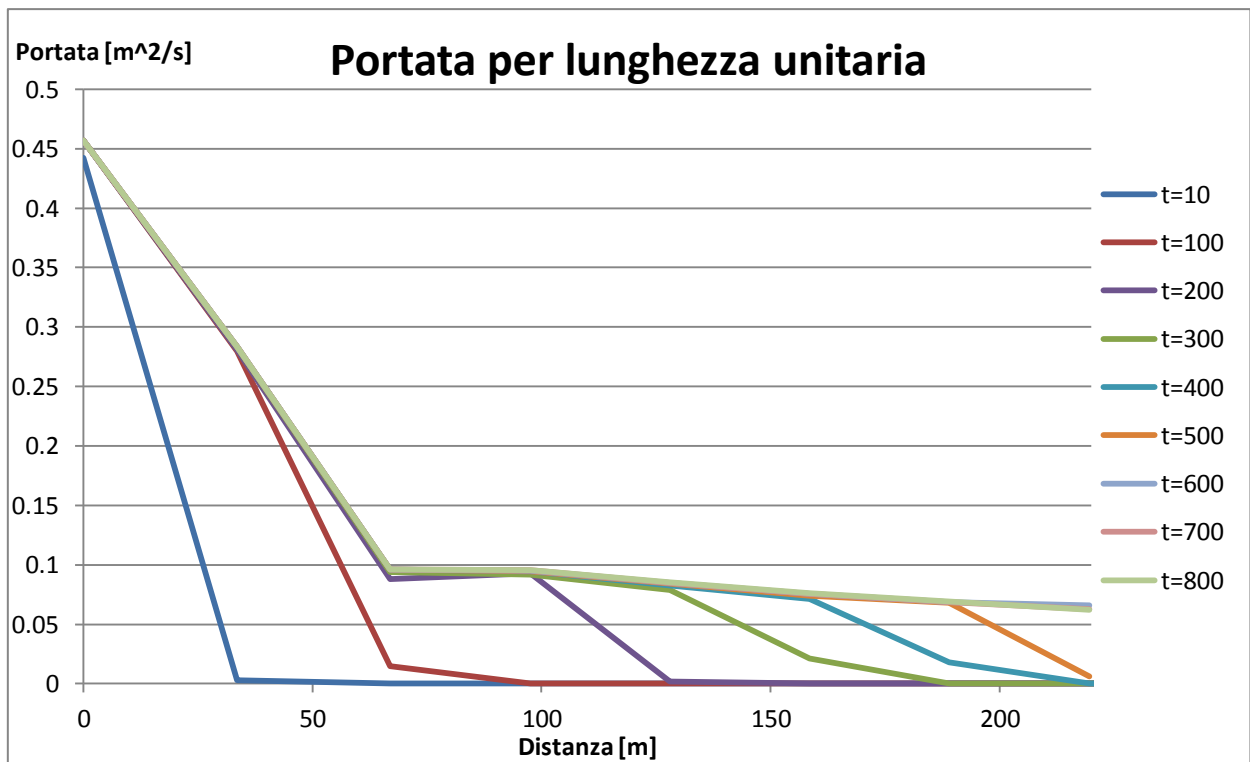


Fig. 3.3.9 Portata unitaria lungo il percorso considerato in istanti di tempo fissati.

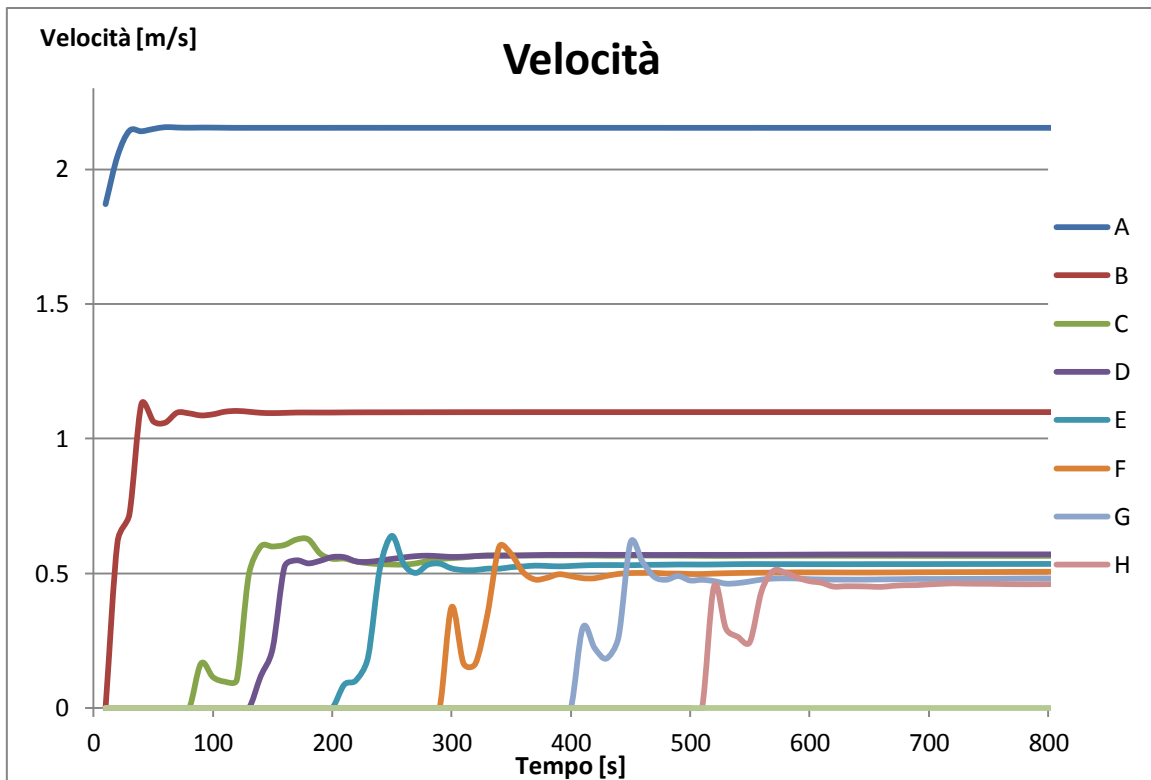


Fig. 3.3.10 Velocità al variare del tempo nei punti di controllo.

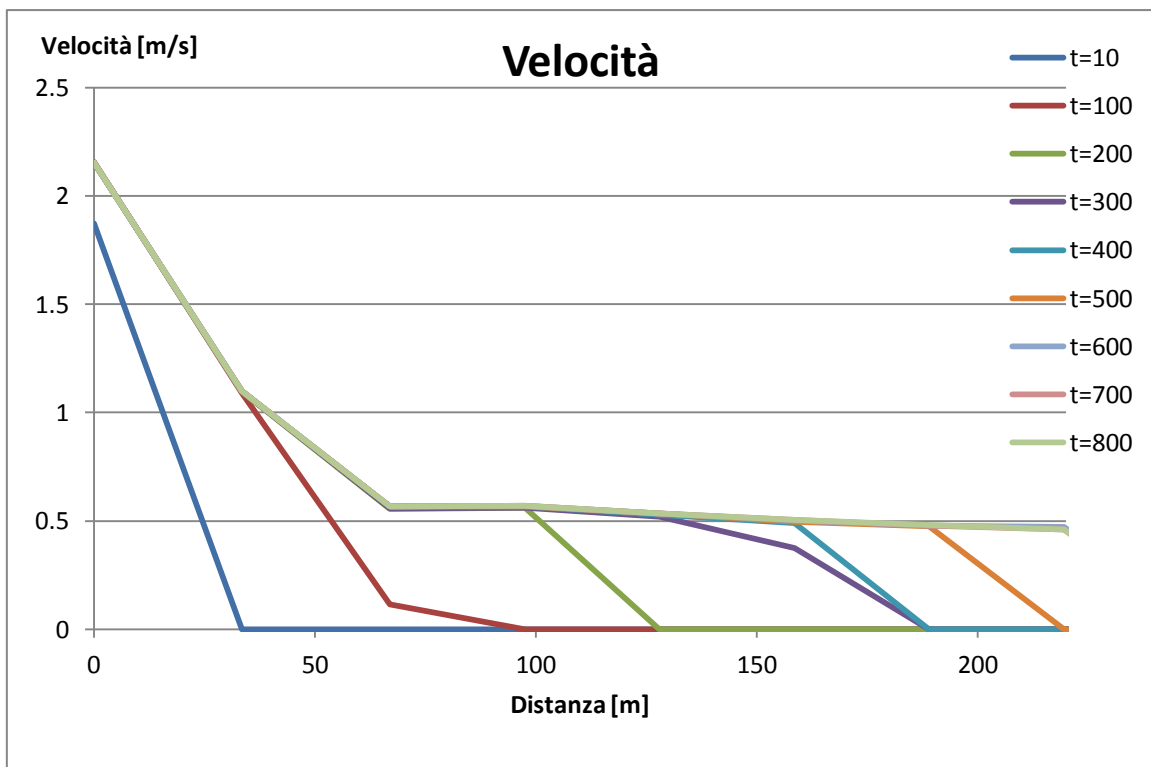


Fig. 3.3.11 Velocità lungo il percorso considerato in istanti di tempo fissati.

### Analisi con terreno impermeabile e confronto con HEC-RAS

Come già detto HEC-RAS considera il terreno completamente impermeabile, dunque per poter effettuare un confronto con i risultati ottenuti da River2D è necessario creare in quest'ultimo programma un modello che consideri il terreno impermeabile. Per fare ciò si fanno tendere a zero i parametri di trasmissività e coefficiente di immagazzinamento nel modello in River2D. Osservando l'equazione (3.2.2) contenente tali parametri si nota che  $T$  sta a numeratore e  $S$  sta a denominatore, è quindi possibile porre  $T=0$  azzerando quindi tutto il termine a destra dell'equazione, per  $S$  invece si sceglie 0.001. Anche se  $S$  non è esattamente zero e River2D tiene sempre conto della presenza o meno di acqua nel terreno, dunque questo modello non è esattamente a terreno impermeabile, ma quasi, questo caso sarà chiamato diverse volte "a terreno impermeabile".

Si riportano le altezze d'acqua ottenute dalla modellazione in River2D del caso con  $T=0$  e  $S=0.001$ , tutti gli altri parametri sono identici a quelli del caso base.

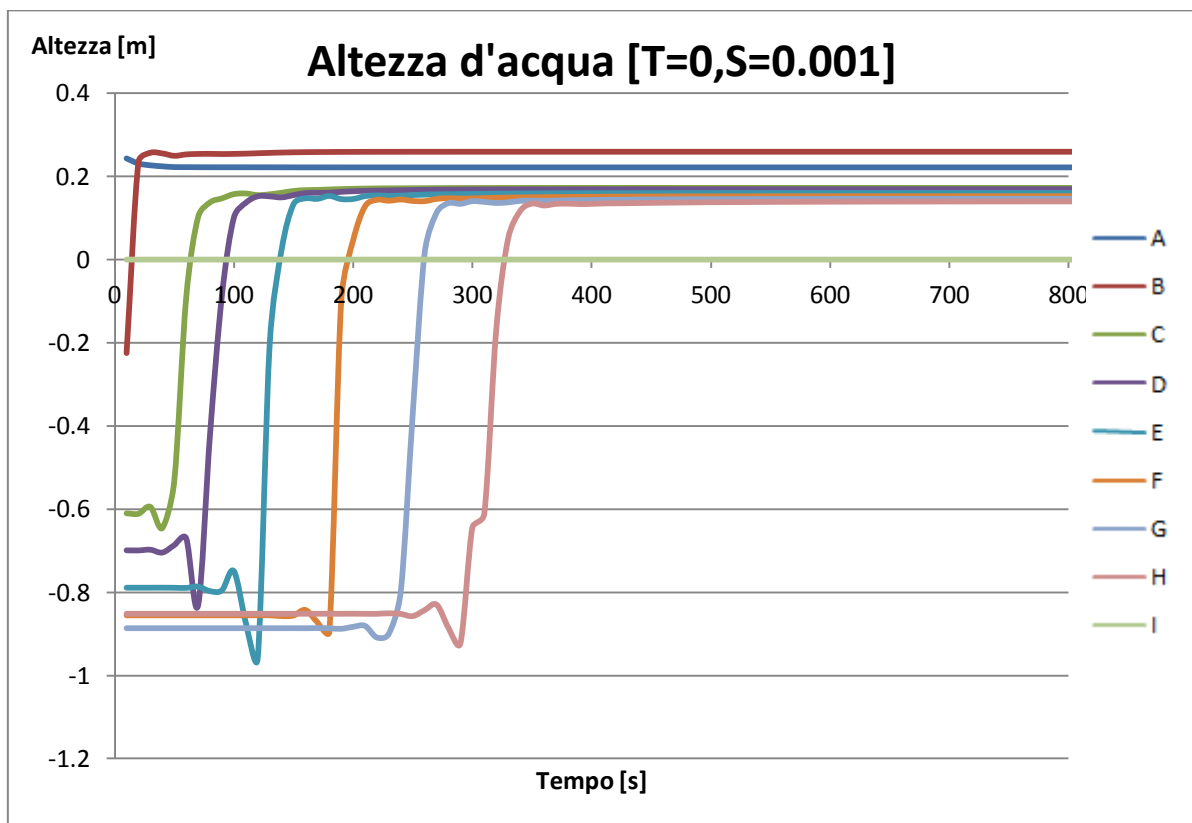


Fig. 3.3.12 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo, caso con  $T=0$  e  $S=0.001$ .

Da un confronto si nota che in questa analisi con terreno impermeabile il fronte d'onda procede molto più rapidamente che nel caso base. Si propone un confronto nel punto E dei due andamenti per metterne in risalto le differenze tra i due casi.

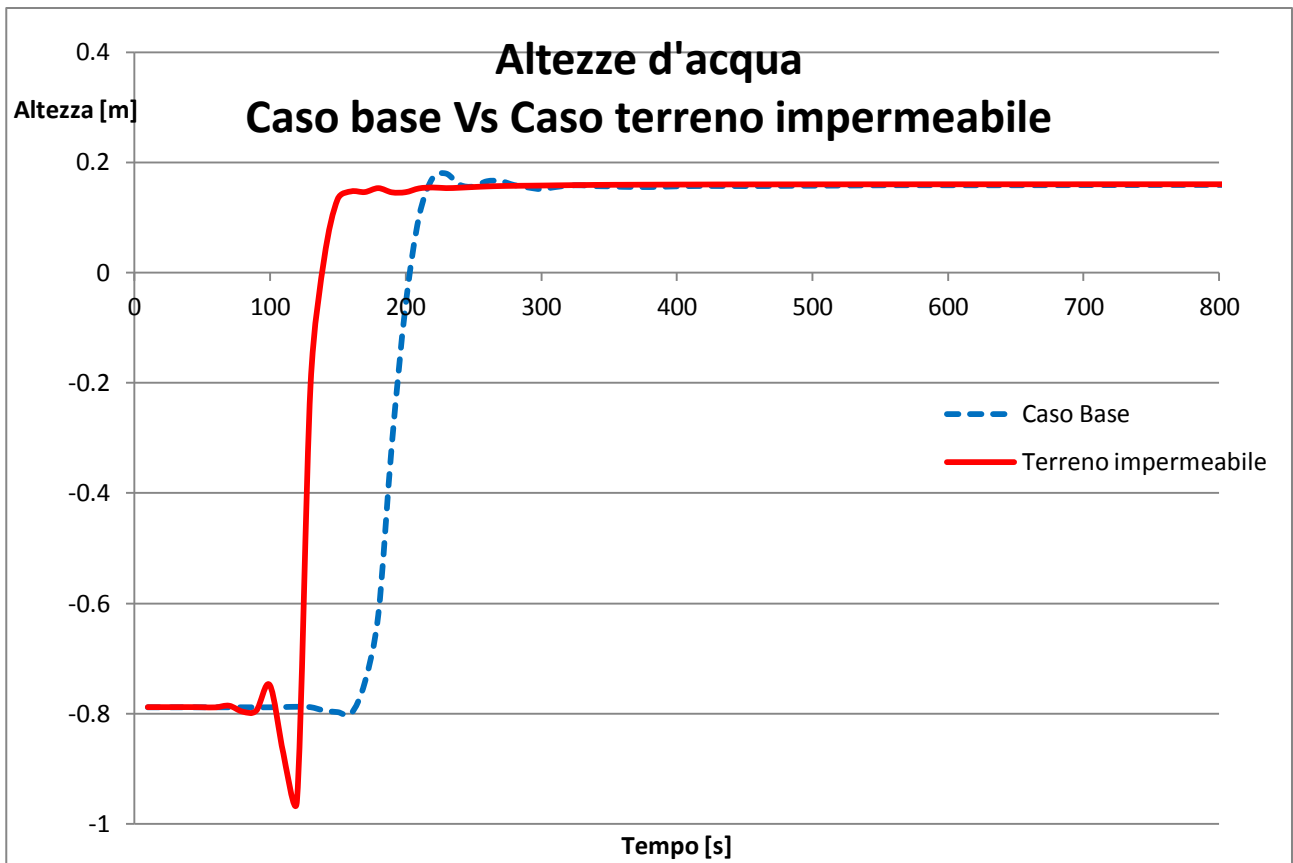


Fig. 3.3.13 Confronto tra andamento temporale dell'altezza d'acqua nel punto E nel caso base e nel caso con  $T=0$  e  $S=0.001$

L'onda si sposta più rapidamente sul terreno impermeabile e raggiunge il punto E dopo 135 secondi, mentre nel caso base impiega 203 secondi. Si nota un leggera instabilità numerica nel caso con terreno impermeabile (il picco verso il basso).

Si può concludere che la propagazione dell'onda nel modello è molto sensibile ai parametri del terreno (coefficiente di immagazzinamento e trasmissività). La sensibilità dell'altezza massima raggiunta dall'acqua in un fissato punto a tali parametri è invece molto più piccola, infatti una volta che il terreno è completamente saturo e la portata entrante è comunque superiore a quella uscente per filtrazione dal terreno l'effetto di tali parametri sul modello tende a diventare irrilevante.



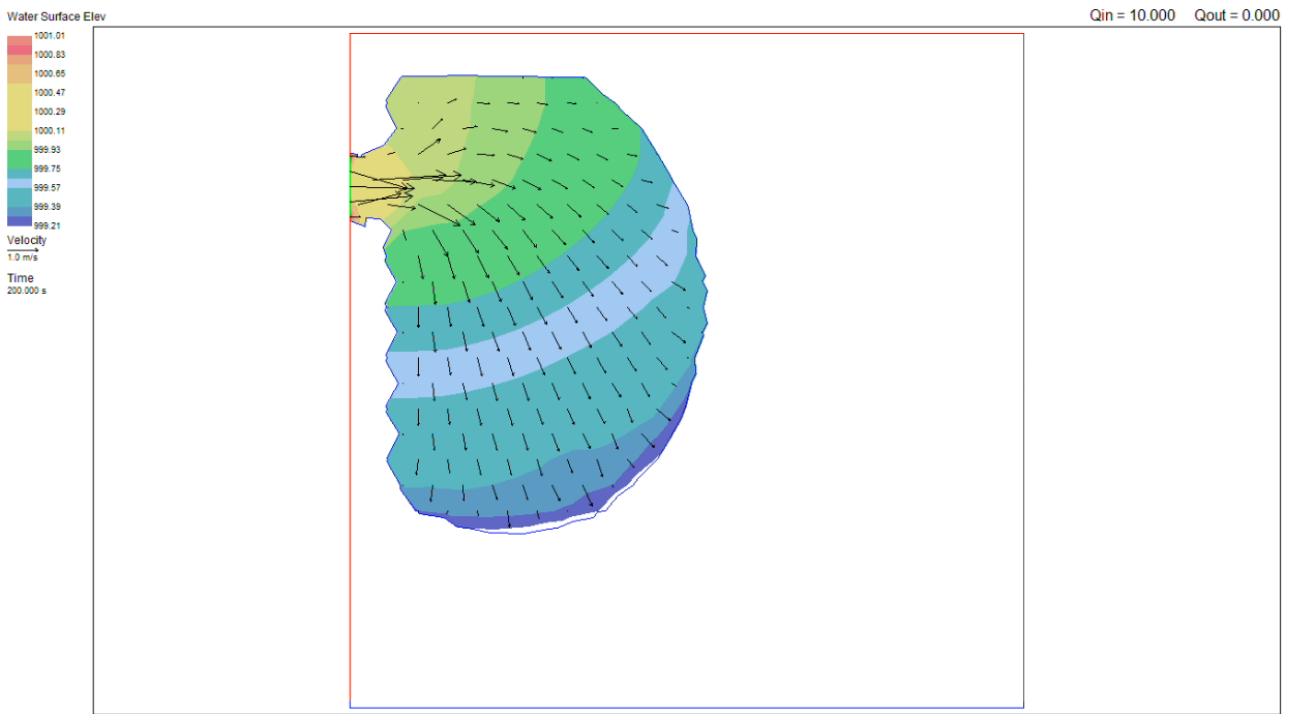


Fig. 3.3.14 Quota dell'acqua con River2D. Caso a terreno impermeabile dopo 200 secondi dall'inizio dell'allagamento.

Si noti come, in questo caso, il fronte d'onda sia avanzato molto di più rispetto al caso base, si riporta sotto un confronto ravvicinato tra i due modelli, si osservi l'estensione della zona di allagamento, la scala cromatica non è esattamente la stessa per entrambi.

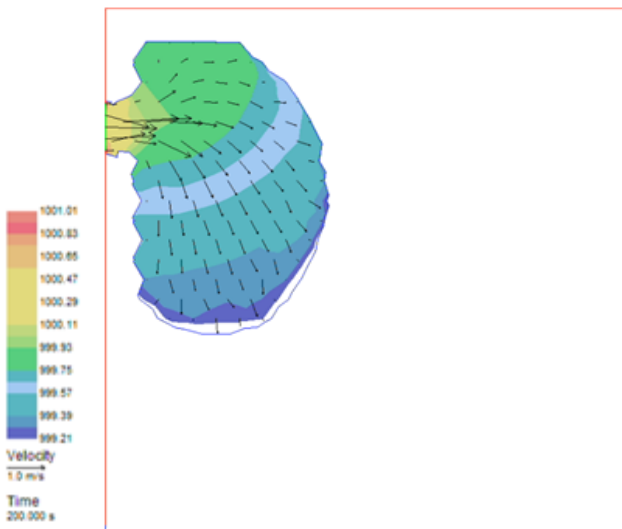


Fig. 3.3.15 Caso base

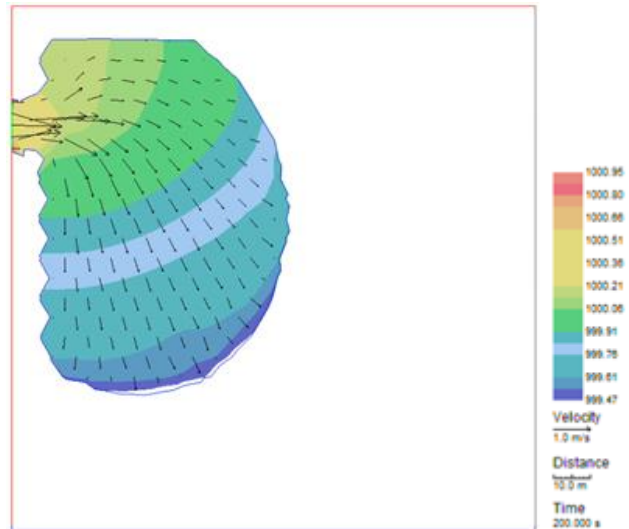


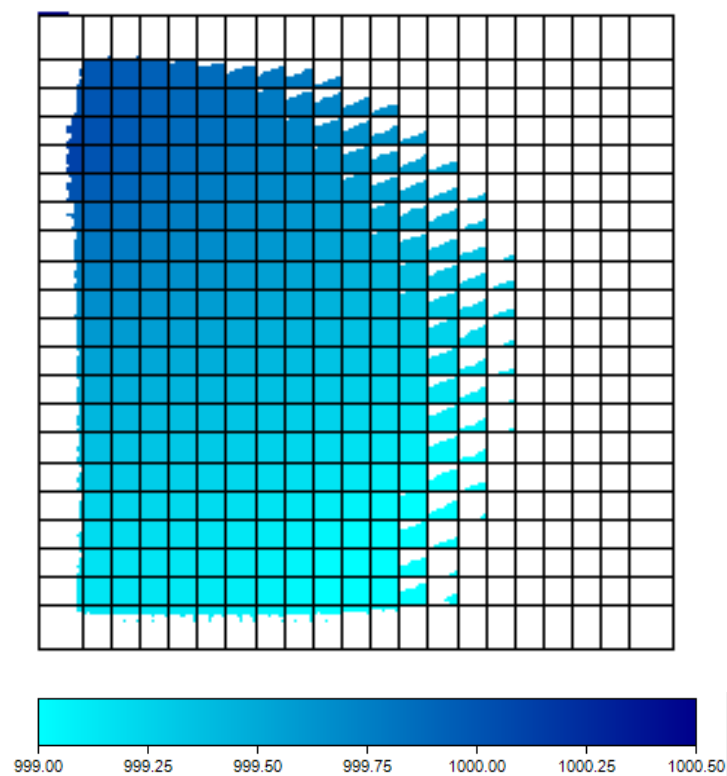
Fig. 3.3.16 Caso con:  $T=0$   $S=0.001$

Si noti che in HEC-RAS la scabrezza si quantifica col coefficiente di Manning mentre in River2D in termini di altezza, è quindi necessario effettuare una conversione, per poter usare la stessa scabrezza in entrambe le modellazioni, secondo la relazione:

$$n = \frac{k^{1/6}}{8.41\sqrt{g}} \quad (3.3.1)$$

Dove  $n$  rappresenta il coefficiente di Manning,  $k$  la scabrezza in termini di altezza e  $g$  l'accelerazione di gravità.

Si effettua ora l'analisi con gli stessi parametri utilizzando HEC-RAS, ottenendo i risultati seguenti, fissato l'istante temporale a 200 secondi dall'inizio dell'allagamento.



*Fig. 3.3.17 Quota della superficie dell'acqua [mslm]*

Da un primo confronto visivo si nota subito come qualitativamente nel modello in HEC-RAS l'onda si sposta più rapidamente che nel modello in River2D.

Confrontando ora le altezze d'acqua, le velocità e le quote della superficie d'acqua ottenute da entrambi i modelli ciò risulta molto evidente:

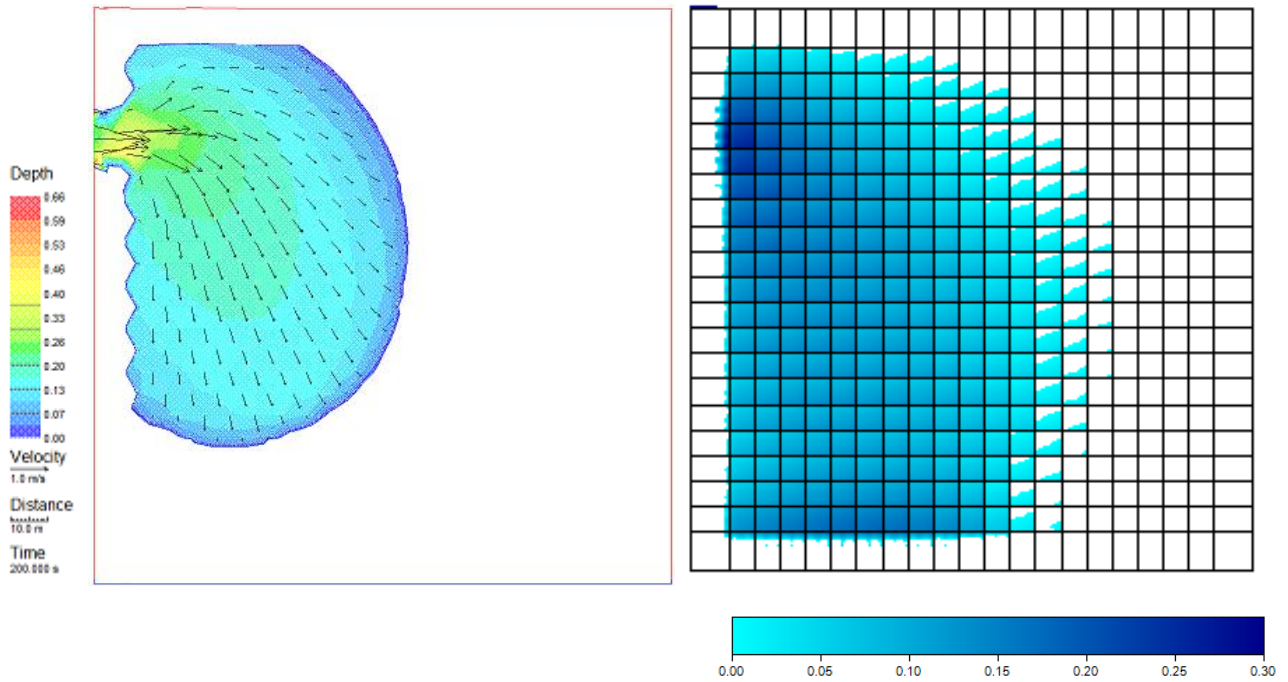


Fig. 3.3.18 Altezza [m] in modello, nell'ordine: a terreno impermeabile in River2D, in HEC-RAS. Istante: 200 secondi.

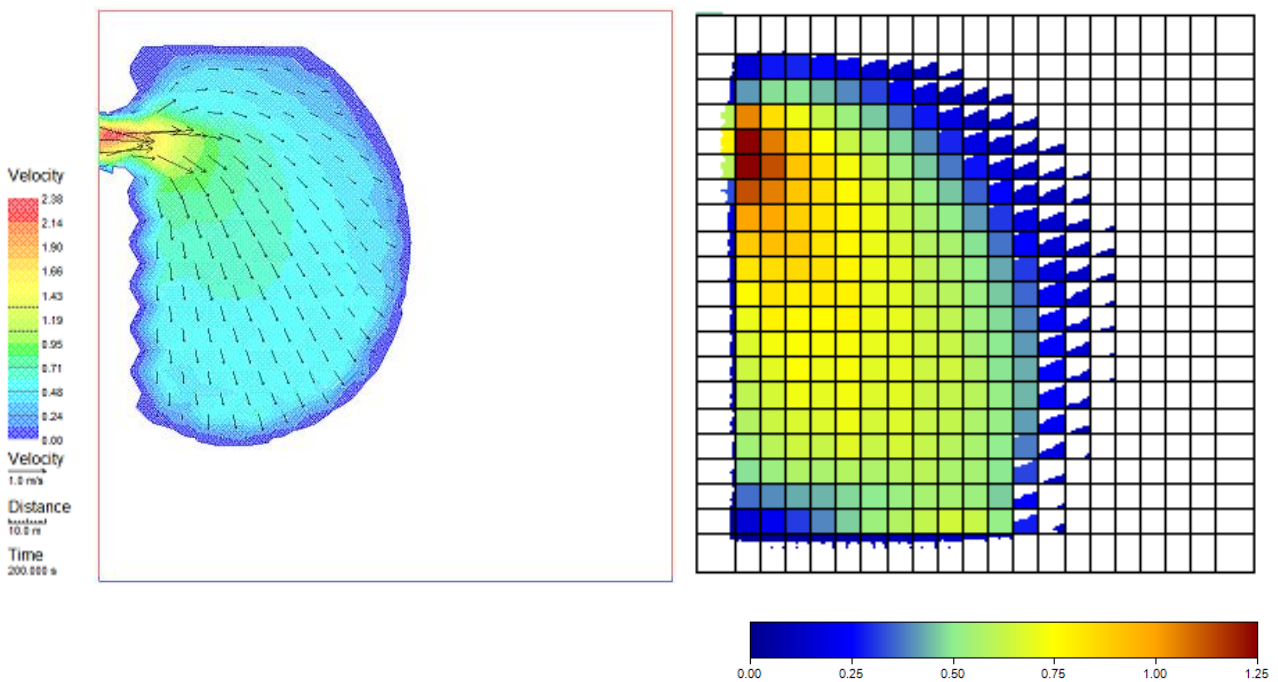
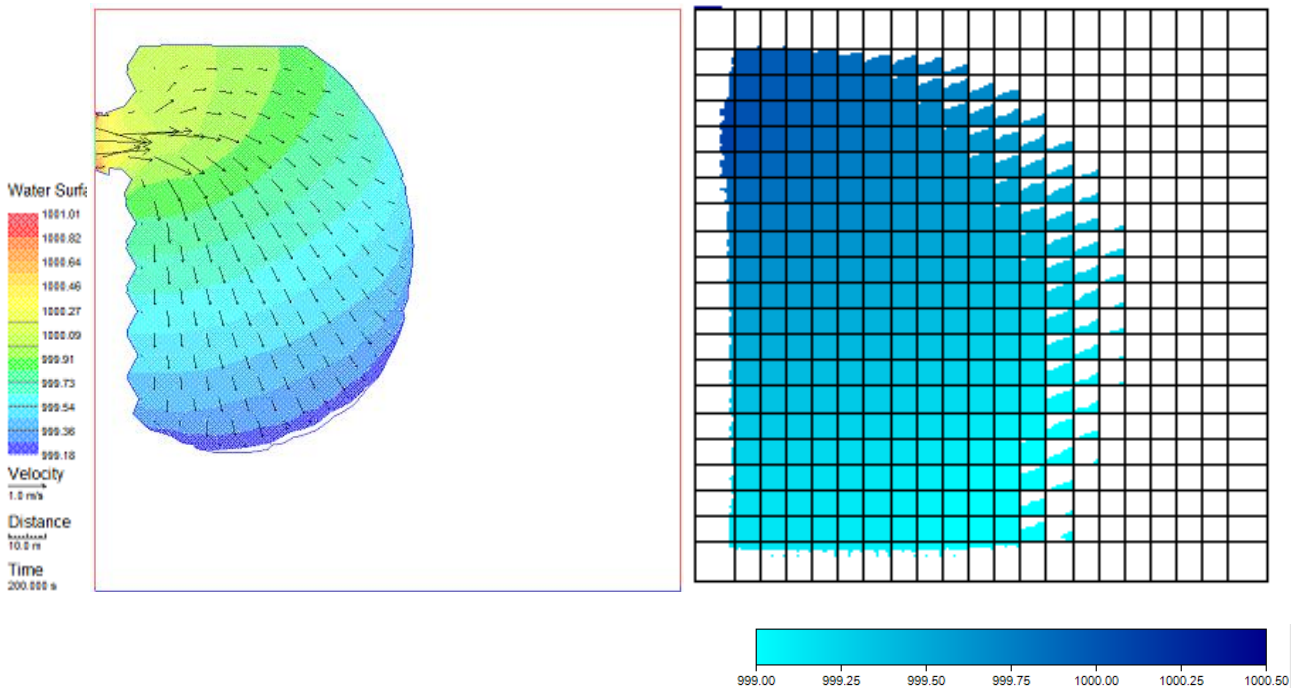


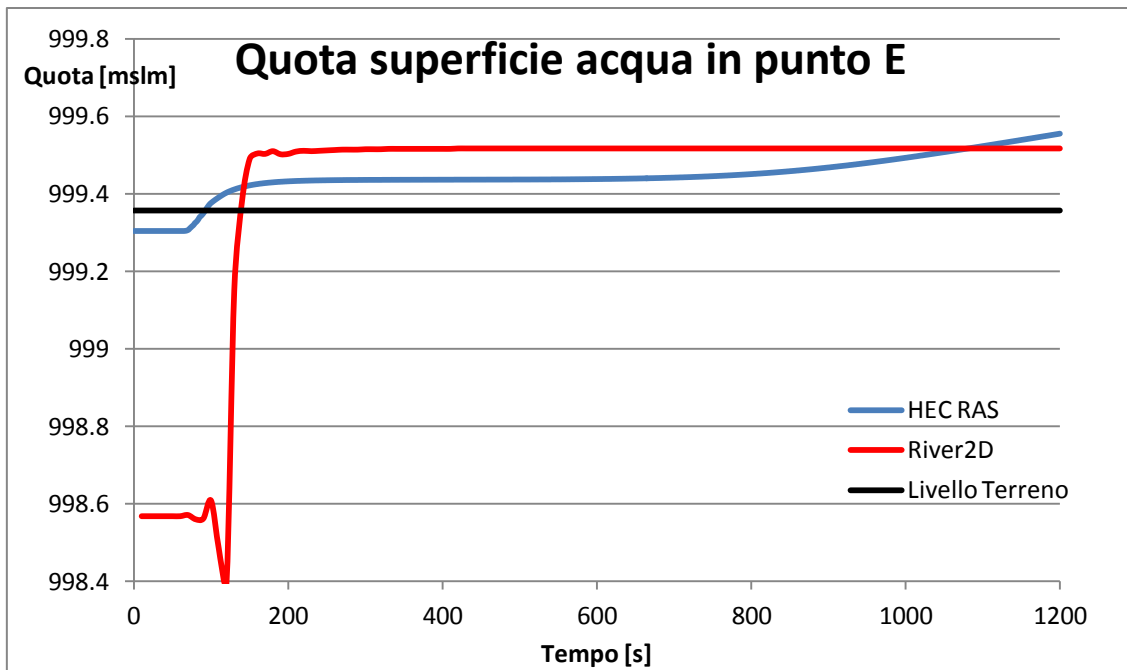
Fig. 3.3.19 Velocità [m/s] in modello, nell'ordine: a terreno impermeabile in River2D, in HEC-RAS. Istante: 200 secondi.



*Fig. 3.3.20 Quota superficie libera [mslm] in modello, nell'ordine: a terreno impermeabile in River2D, in HEC-RAS. Istante: 200 secondi.*

Dal confronto si nota come a parità di parametri e fissato l'istante di tempo 200 secondi nel modello in HEC-RAS l'onda si è propagata molto di più che nel modello in River2D.

Si tenga presente che in HEC-RAS in ciascuna cella di calcolo si ha un valore costante di quota sul livello del mare della superficie libera, questo implica che, per superfici in pendenza come quella considerata, è possibile avere il quadratino della griglia riempito solo in parte da acqua perché il terreno in quest'ultimo non ha quota costante; questo effetto non è fisico, ma raffinando molto la griglia di calcolo tende a essere poco visibile. Si propone ora un confronto quantitativo prendendo ancora come riferimento il punto E. Il confronto viene effettuato sulla quota del pelo libero, non sull'altezza, perché in HEC-RAS quest'ultima è calcolata come differenza tra quota dell'acqua e del terreno, ma nel singolo quadratino, come detto, la quota dell'acqua è supposta costante e quella del terreno no, dunque si ottengono risultati discontinui e oscillanti se considerati in un punto fissato. Il confronto è proposto solo su un punto anche a causa dei problemi che da HEC-RAS, essendo ancora una versione Beta, nell'estrazione dei risultati, infatti se si tenta di estrarre i dati in punti della zona di allagamento con i comandi del programma, esso si arresta improvvisamente; l'unico modo per estrarre i dati è farlo a mano (decodificando i file creati da HEC-RAS stesso per l'area di allagamento), procedura molto lunga e dispendiosa.



*Fig. 3.3.21 Confronto tra andamento temporale dell'altezza d'acqua nel punto E tra modello a terreno impermeabile costruito in River2D e modello in HEC-RAS.*

Dal confronto si nota come l'altezza d'acqua nel modello in HEC-RAS sia più bassa, ma l'onda arrivi prima, coerentemente col fatto che in HEC-RAS il terreno sia considerato perfettamente impermeabile e in River2D no.

Mentre nel modello in River2D l'altezza d'acqua si mantiene stabile fino alla fine del processo nel modello in HEC-RAS dopo 600 secondi il livello dell'acqua inizia a risalire, perché un onda di riempimento sta risalendo da valle.

Il modello in River2D prevede una sezione di uscita dell'acqua, anche se essa non fuoriesce dall'area di calcolo perché non vi è abbastanza tempo, mentre il modello in HEC-RAS non prevede alcuna sezione di uscita dell'acqua.

Nel modello in HEC-RAS i fenomeni del processo appaiono di arrivo dell'onda e risalita dell'onda di riempimento fino al punto E appaiono anticipati rispetto al modello in River2D. Sul tempo di arrivo dell'onda i due modelli sono abbastanza concordi, come mostrato in figura, sull'altezza d'acqua no, il modello di River2D mostra un'altezza molto maggiore, finché nel modello in HEC-RAS non inizia la risalita del lago. La quota d'acqua iniziale mostrata nel modello in HEC-RAS è inferiore al livello del terreno perché quando il quadrato della griglia numerica è completamente asciutto il software assume come quota dell'acqua quella del vertice a quota più bassa del quadrato, mentre la linea nera indica esattamente la quota del punto E.

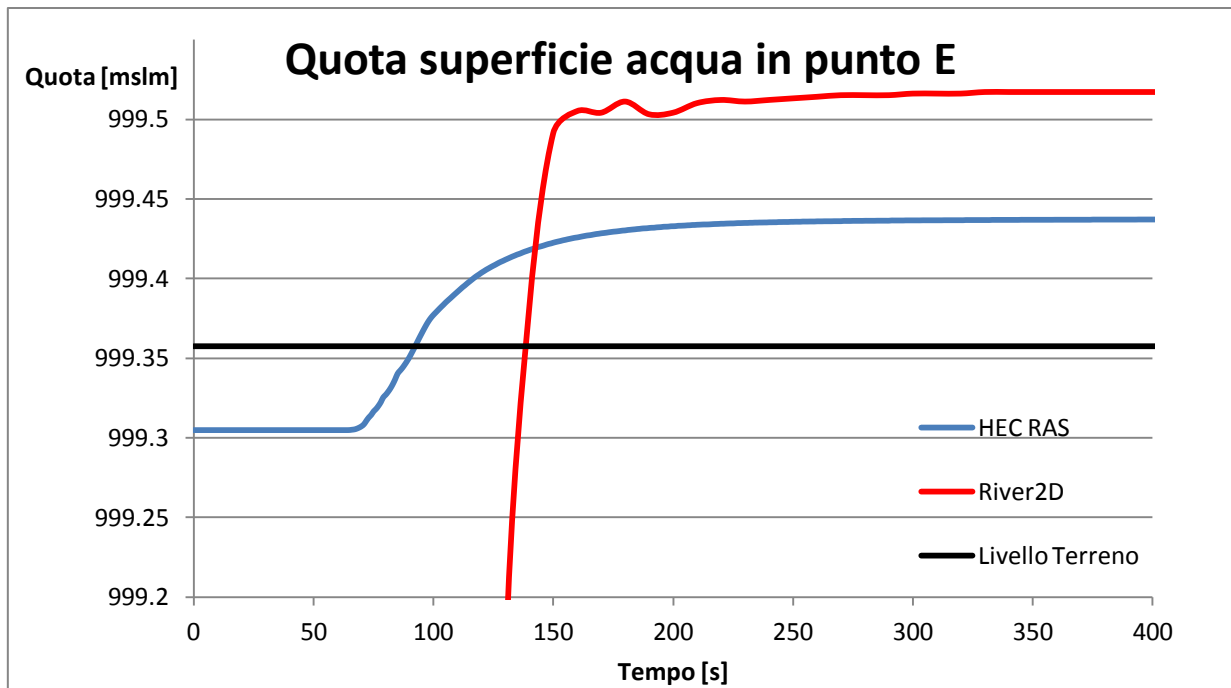


Fig. 3.3.22 Confronto tra andamento temporale dell'altezza d'acqua nel punto E tra modello a terreno impermeabile costruito in River2D e modello in HEC-RAS.

### Analisi di sensitività: scabrezza fondo (River2D)

Si esegue un'analisi di sensitività al variare dei parametri di scabrezza del fondo con entrambi i software, al fine di valutare quanto i due modelli sono sensibili a tale parametro.

In River2D le analisi sono effettuate utilizzando, in aggiunta al caso base con scabrezza di 10 cm, altri 2 casi con le seguenti scabrezze di fondo:

-50 cm

-0.1 cm

I risultati ottenuti dal calcolo in Rive2D sono quelli sotto riportati. Tutti i video e i grafici di altezze, velocità, portate e quote della superficie libera sono in allegato.

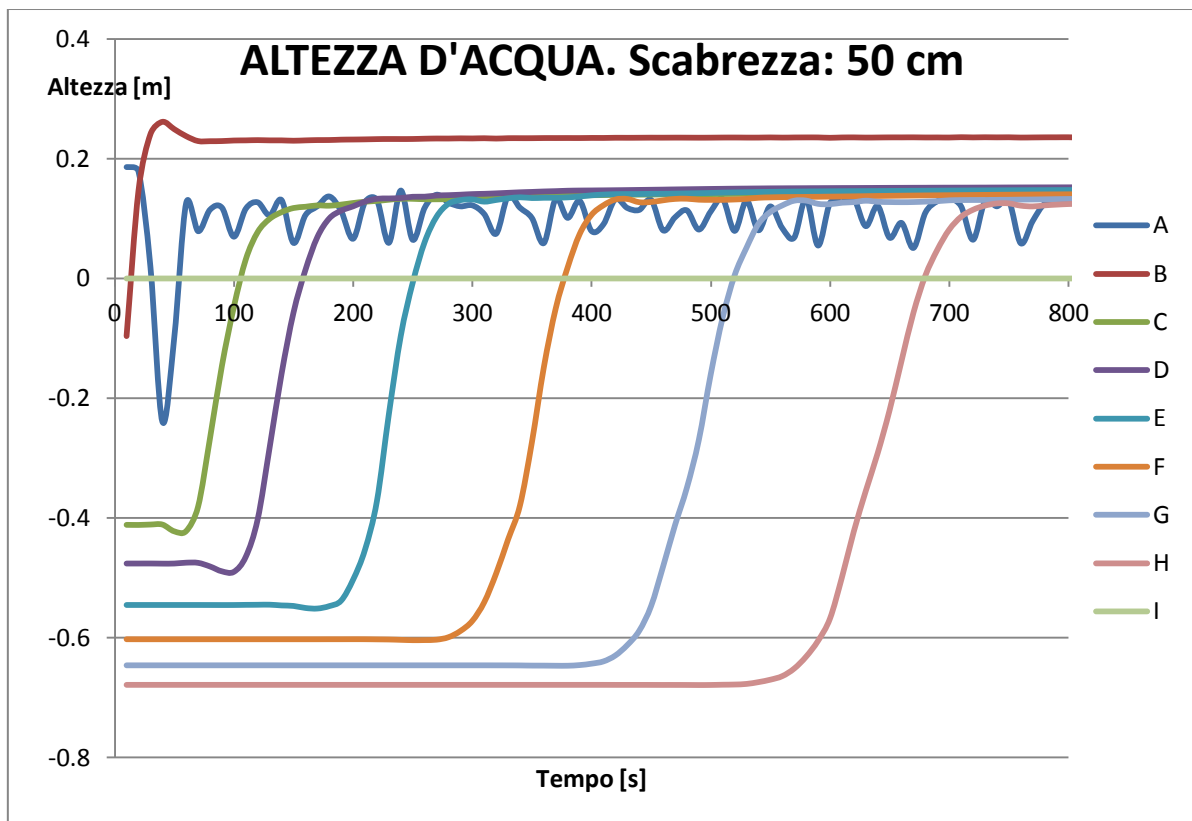


Fig. 3.3.23 Altezza d'acqua ottenuta dal modello in River2D con parametri del caso base tranne la scabrezza che anziché 10 cm è scelta 50 cm.

L'andamento instabile del punto A è dovuto a problemi di calcolo quindi si considera non significativo. Rispetto al caso base si notano subito onde che si spostano più lentamente.

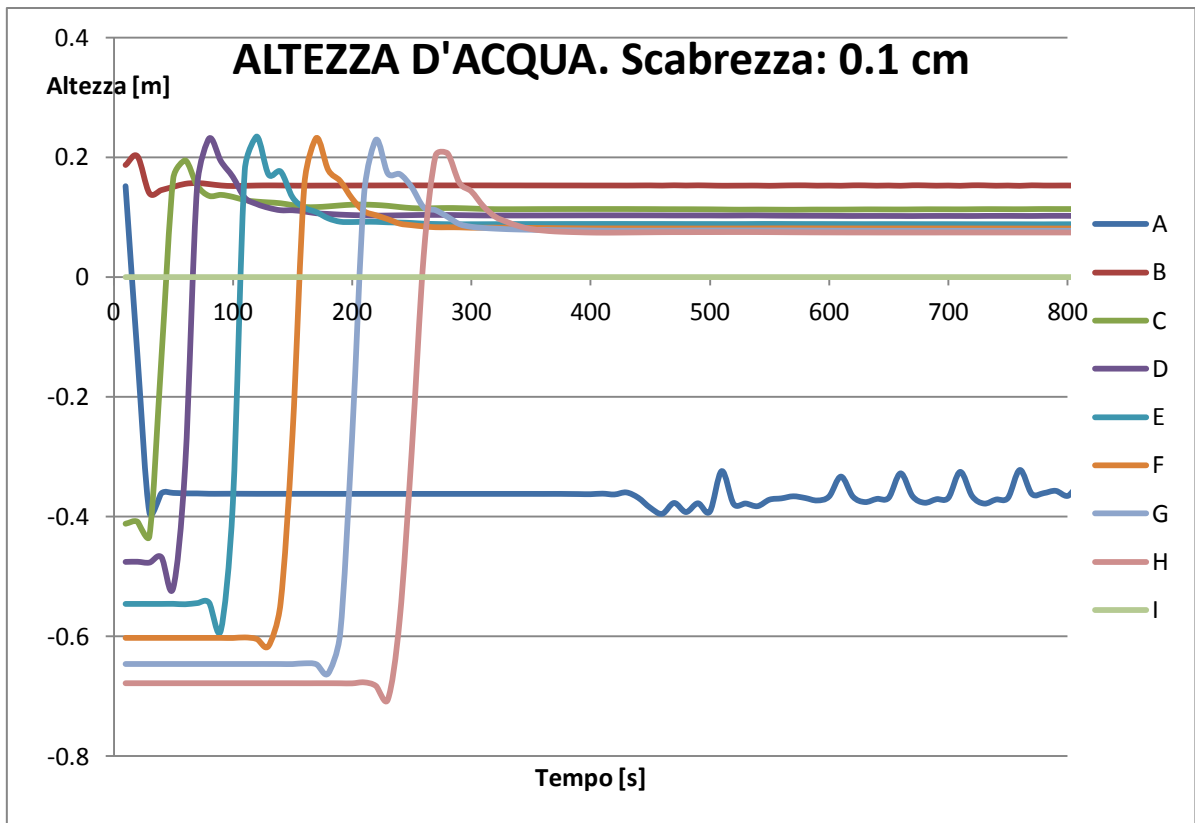


Fig. 3.3.24 Altezza d'acqua ottenuta dal modello in River2D con parametri del caso base tranne la scabrezza che anziché 10 cm è scelta 0.1 cm.

Anche in questo caso l'andamento instabile del punto A è dovuto a problemi di calcolo quindi si considera non significativo. Rispetto al caso base si notano subito onde che si spostano più rapidamente.

Si propone ora un confronto dei tre casi fissato l'istante temporale di 200 secondi, si osservi la propagazione dell'onda (scale cromatiche leggermente differenti).

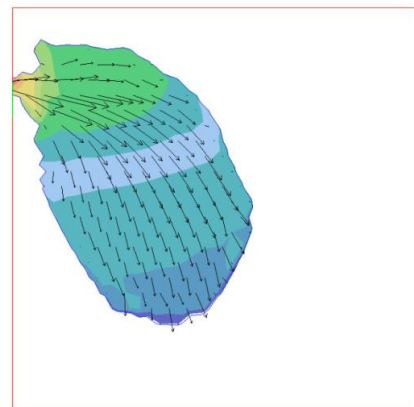
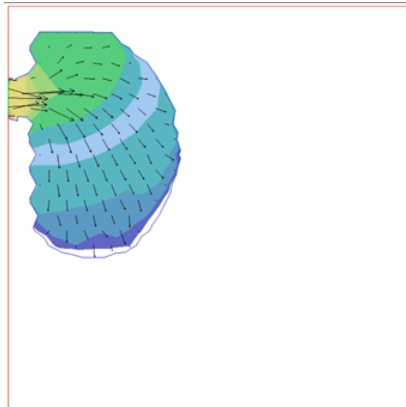
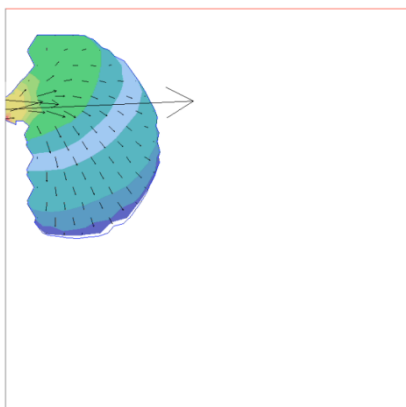


Fig. 3.3.25 Scabrezza: 50 cm

Fig. 3.3.26 Scabrezza: 10 cm

Fig. 3.3.27 Scabrezza: 0.1 cm

Risulta evidente quanto detto in precedenza, cioè che all'aumentare della scabrezza si riduce la velocità di spostamento dell'onda di allagamento. Si propone ora un confronto quantitativo nel punto E.



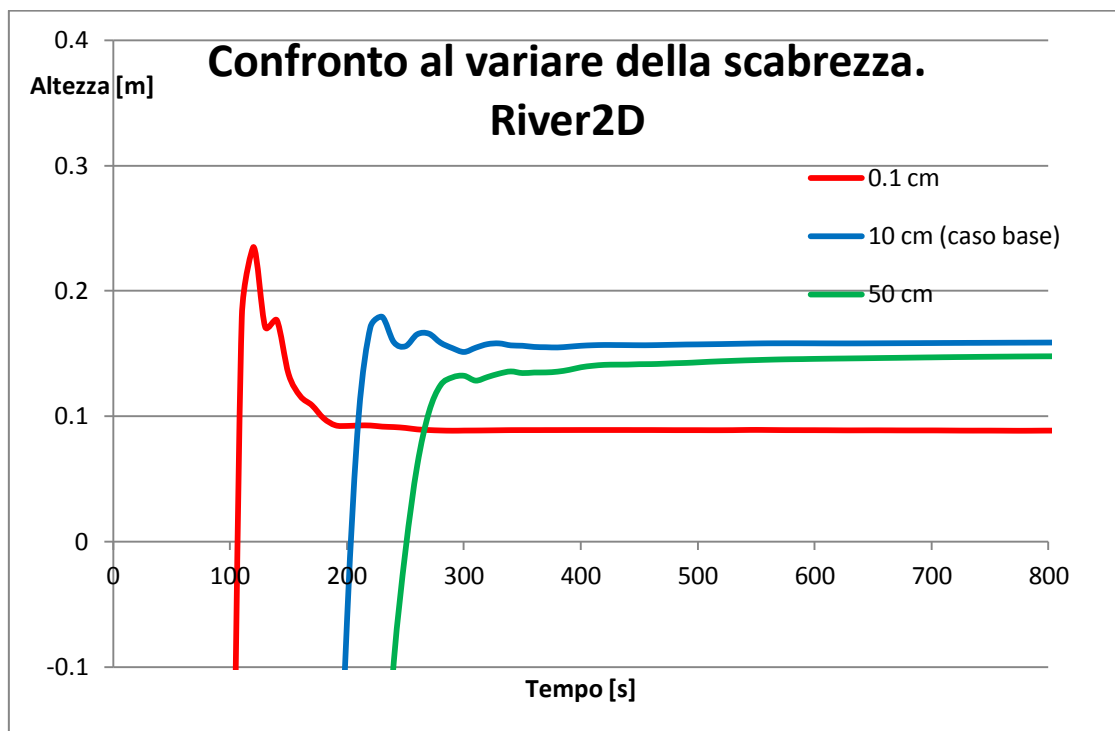


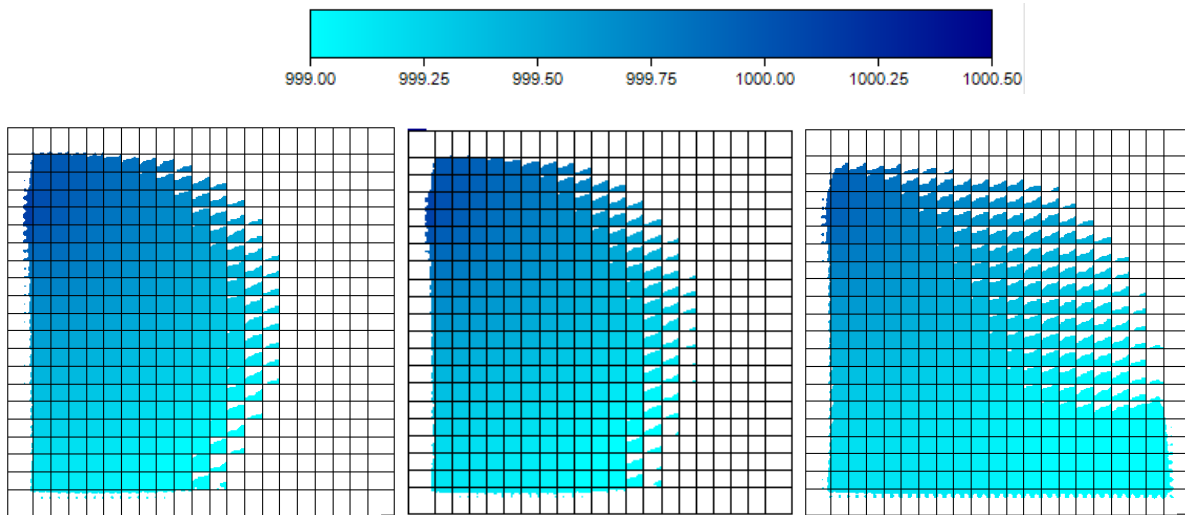
Fig. 3.3.28 River2D: altezze d'acqua nel punto E al variare del tempo per diversi valori della scabrezza del fondo.

Dal confronto quantitativo nel punto E si nota che la velocità di spostamento dell'onda è, come già detto, inversamente proporzionale alla scabrezza. L'altezza del picco dell'onda anch'essa inversamente proporzionale alla scabrezza, modelli con scabrezze piccole danno picchi d'onda alti, ma che poi proseguendo nel tempo si abbassano molto. Per tempi più lunghi per i due valori di scabrezza più grandi l'altezza d'acqua tende circa allo stesso valore, mentre per la scabrezza di 0.1 centimetri tende a un valore ben più basso, anche se inizialmente il picco in tale modello era più alto. Se ne conclude che il modello è sensibile al parametro di scabrezza del fondo, ma i risultati sono coerenti con le aspettative.

### Analisi di sensitività: scabrezza fondo (HEC-RAS)

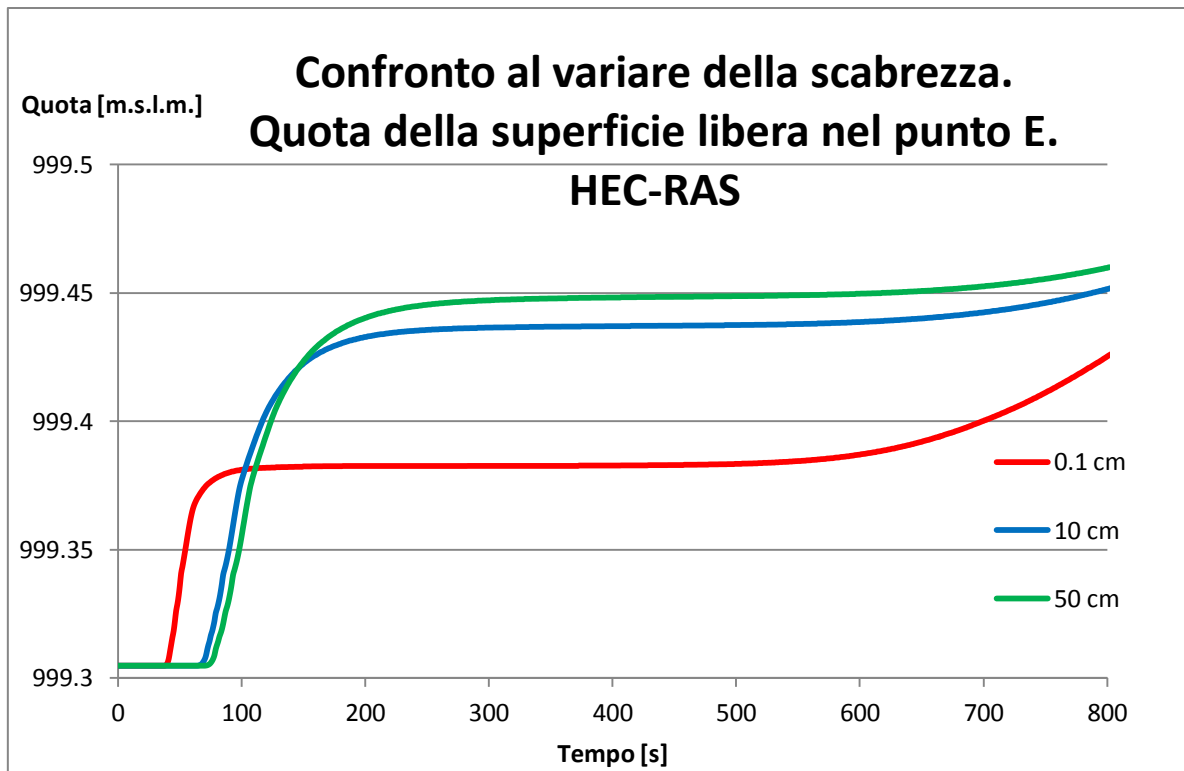
Anche nel modello costruito in HEC-RAS si propone un'analisi di sensitività alla scabrezza del fondo.

Fissato l'istante di tempo 200 secondi si ottengono le seguenti quote s.l.m della superficie d'acqua.



*Fig. 3.3.29 Scabrezza: 50 cm    Fig. 3.3.30 Scabrezza: 10 cm    Fig. 3.3.31 Scabrezza: 0.1 cm*

Qualitativamente i risultati danno le stesse informazioni che quelli ottenuti con River2D, ovvero che la velocità di propagazione dell'onda è inversamente proporzionale alla scabrezza del fondo. Si passa ora al confronto quantitativo nel punto E per un'analisi più dettagliata. Si ricorda che in HEC-RAS un'analisi puntuale ha senso solo se il confronto è effettuato sulle quote della superficie libera, non è possibile effettuarlo sulle altezze d'acqua a causa dell'ipotesi del programma di altezze costanti dentro una stessa cella, mentre la quota del terreno è variabile ovunque, come già spiegato.



*Fig. 3.3.32 HEC-RAS: quote superficie d'acqua nel punto E nel tempo per diversi valori della scabrezza del fondo.*

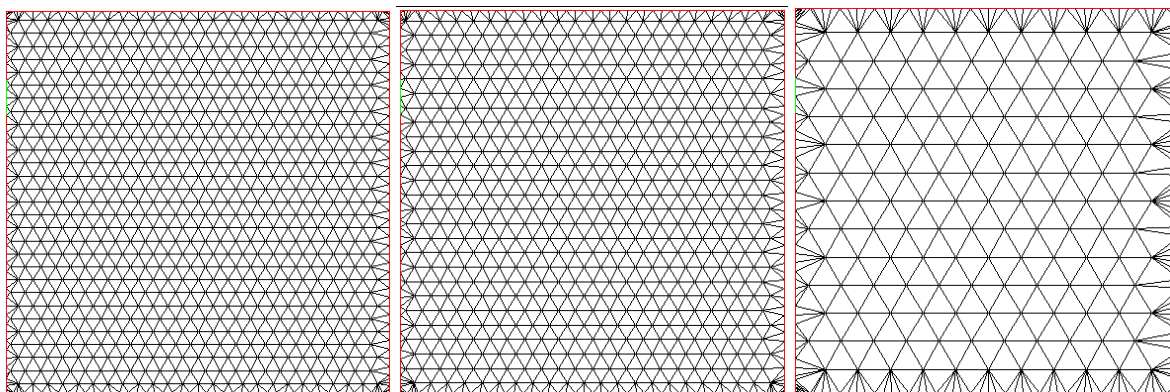
Il modello costruito in HEC-RAS non mostra il picco dell'onda come in River2D. Anche in HEC-RAS i modelli con scabrezza 10 cm e 50 cm presentano superfici d'acqua che tendono circa allo stesso valore, con uno scarto molto piccolo, attorno al centimetro, mentre il modello con scabrezza 0.1 cm tende a un valore molto più alto. Come in River2D e nel confronto qualitativo sopra riportato si nota che la velocità di propagazione dell'onda è inversamente proporzionale alla scabrezza del fondo. In HEC-RAS si nota anche la risalita del lago che avviene per tempi più brevi che in River2D e tale risalita avviene più rapidamente del modello a scabrezza più bassa. Rispetto al modello in River2D nel modello in HEC-RAS la velocità di propagazione dell'onda è molto maggiore, si noti che in River2D si tiene però conto dei parametri del suolo mentre in HEC-RAS il terreno è impermeabile, per questo il modello in River2D è ritenuto più accurato per questo genere di analisi, essendo anche un programma costruito solo per la modellazione bidimensionale, a differenza di HEC-RAS che nasce monodimensionale e sta venendo sviluppato in questi ultimi anni per un calcolo anche 2D.

### *Analisi di sensitività: griglia numerica*

Si esegue un'analisi di sensitività alla griglia numerica in entrambi i software. In River2D la griglia di triangoli di 10 m di lato proposta per i casi finora discussi è tra le più fitte possibili per una geometria di queste dimensioni, la più raffinata possibile per questa geometria è di triangoli di lato 9 m. Si propongono dunque, a partire dal caso a terreno impermeabile, per avere un confronto anche con HEC-RAS, le seguenti analisi con le seguenti spaziature tra i punti della mesh:

-9 m

-20 m



*Fig. 3.3.33 Spaziatura: 9 m*

*Fig. 3.3.34 Spaziatura: 10 m*

*Fig. 3.3.35 Spaziatura: 20 m*

Si riportano i risultati di altezze d'acqua per le spaziature di 9 m e 20 m essendo il caso con  $T=0$  e  $S=0.001$  e spaziatura di 10 m già stato riportato.

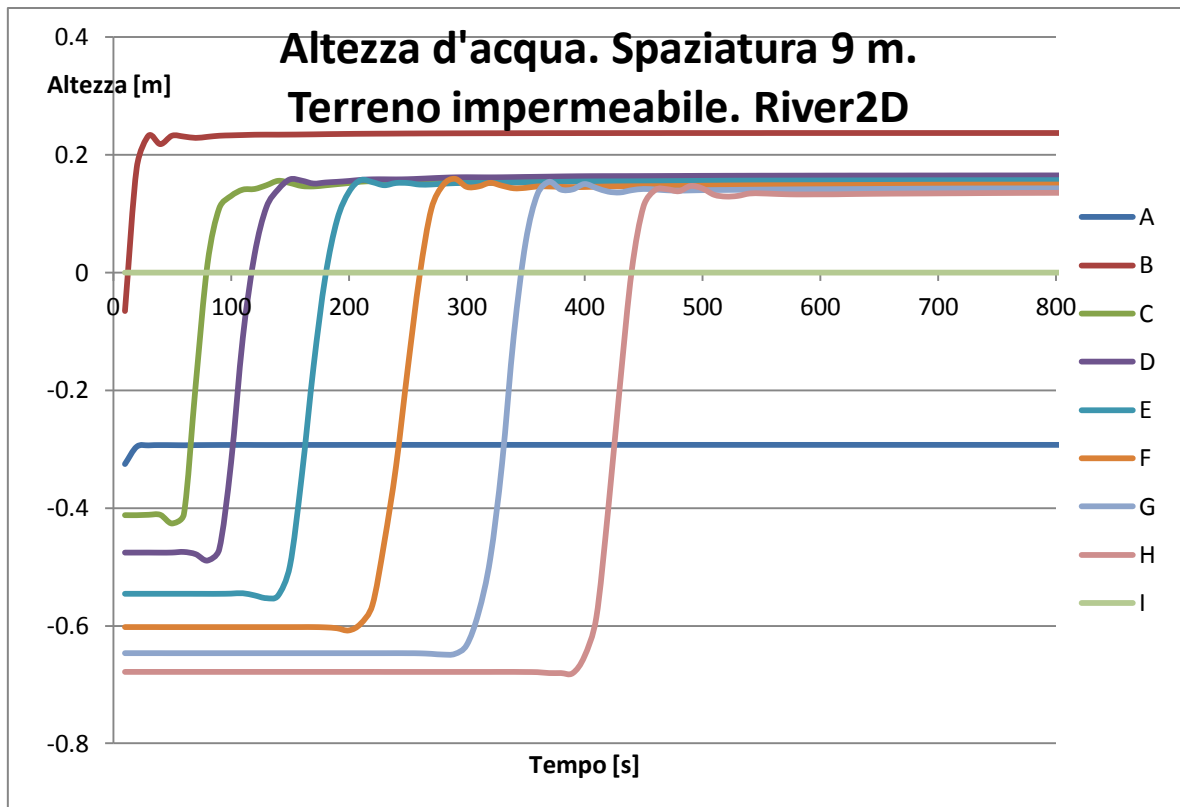


Fig. 3.3.36 Altezza d'acqua ottenuta dal modello in River2D con parametri del caso con  $T=0$  e  $S=0.001$  tranne la spaziatura della griglia che anziché 10 m è scelta 9 m.

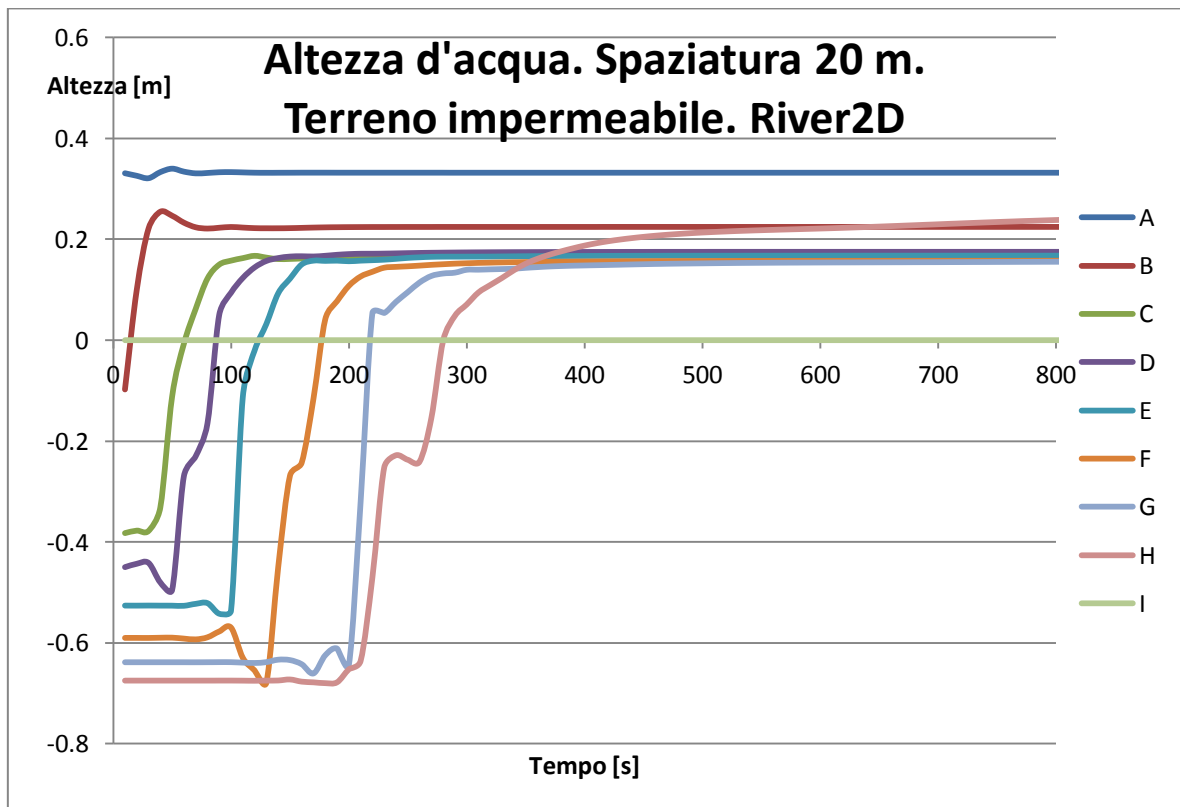


Fig. 3.3.37 Altezza d'acqua ottenuta dal modello in River2D con parametri del caso con  $T=0$  e  $S=0.001$  tranne la spaziatura della griglia che anziché 10 m è scelta 9 m.

Il caso con spaziatura di 9 metri risulta molto simile al caso a spaziatura di 10 metri riportato in precedenza, mentre osservando il caso a spaziatura 20 metri si notano interessanti differenze. Si noti che nel modello con spaziatura di 20 m nel punto H si osserva la risalita del lago negli istanti finali del processo anche nel modello in River2D, ciò conferma la previsione di risalita dell'onda di riempimento già vista in HEC-RAS dopo un lungo tempo di allagamento.

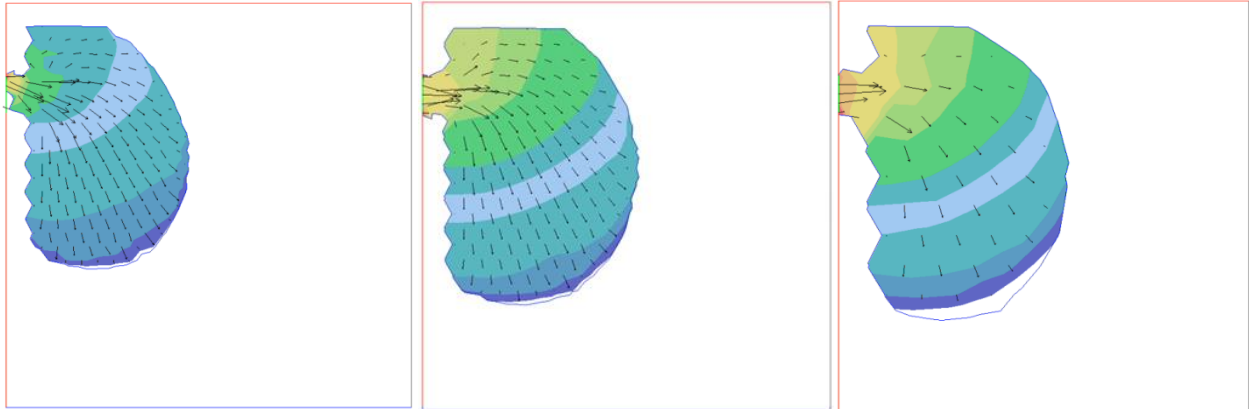


Fig. 3.3.38 Spaziatura: 9 m

Fig. 3.3.39 Spaziatura: 10 m

Fig. 3.3.40 Spaziatura: 20 m

Nel modello in River2D si nota che tanto più è raffinata la griglia di calcolo, tanto più lento è l'avanzamento del fronte d'onda.

Si propone ora un confronto quantitativo nel punto E.

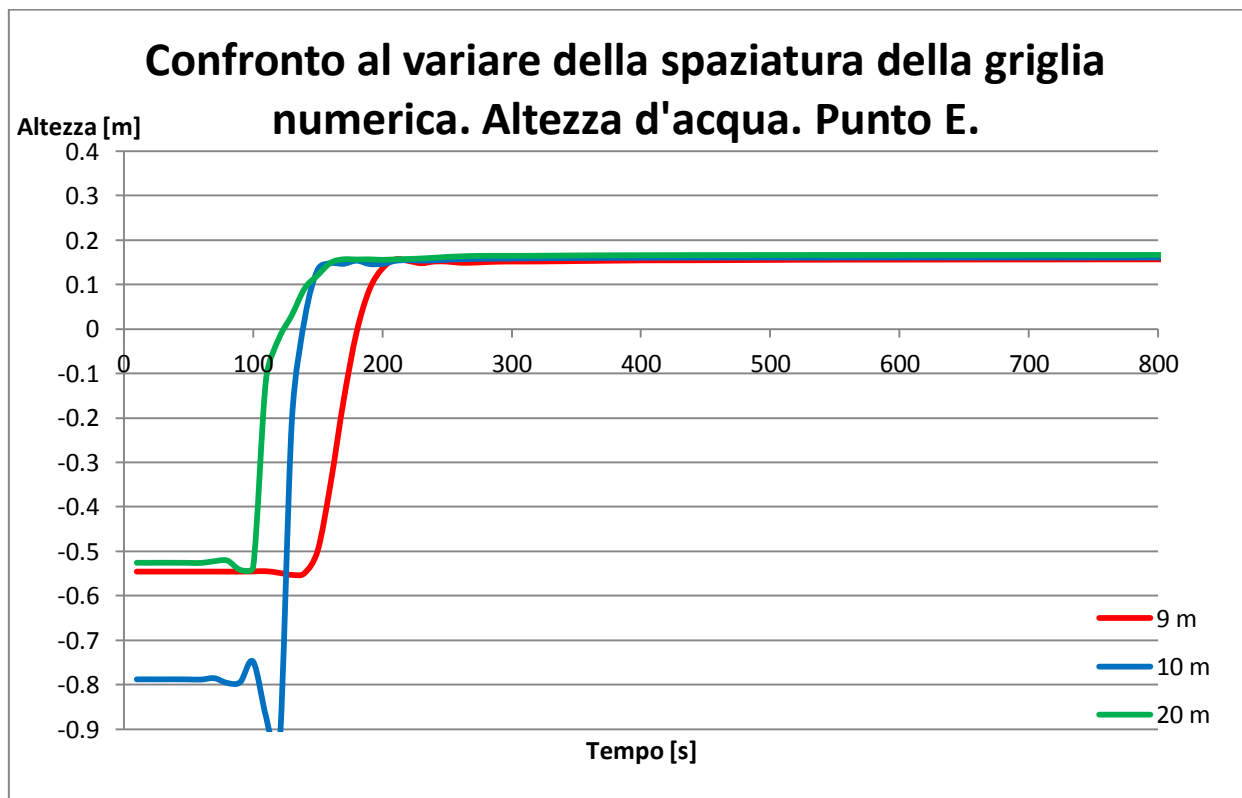


Fig. 3.3.41 River2D: altezze d'acqua nel punto E al variare del tempo per diversi valori della spaziatura per la costruzione della griglia numerica.

I profili appaiono partire da punti diversi, ciò appare anomalo, può essere legato a problemi di interpolazione nella creazione della condizione iniziale che risulta diversa variando la griglia numerica.

I profili tendono circa allo stesso valore di altezza d'acqua, ma tanto meno la griglia è fitta, tanto più rapidamente si sposta l'onda. La situazione di moto quasi permanente che viene raggiunta non dipende quindi dalla griglia numerica, mentre il transitorio dipende da essa.

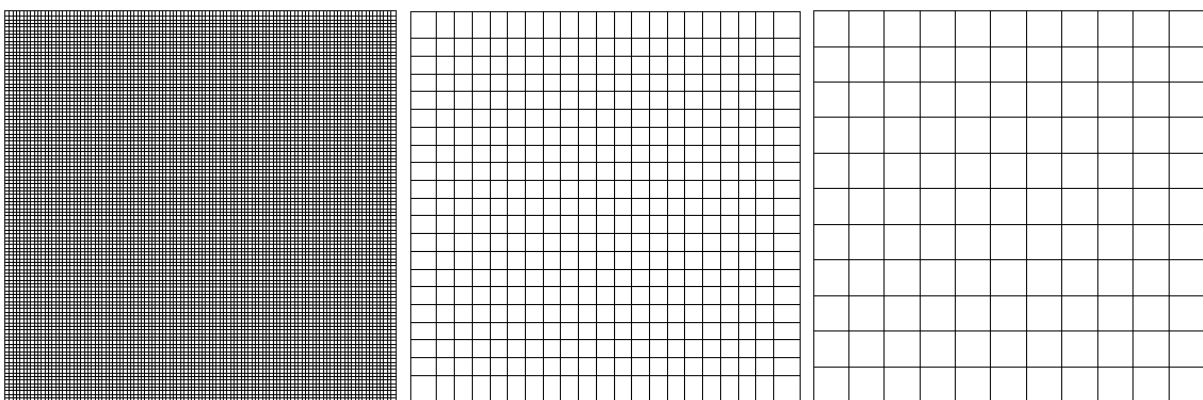
Riguardo la modellazione in River2D si può concludere che, tanto più la griglia numerica è fitta, tanto più lento sarà l'avanzamento dell'onda, ma non vi è una forte dipendenza dell'altezza massima dell'acqua con la spaziatura.

Izadifar e Babae (2015), avevano modellato con River2D la propagazione di un'onda già studiata sperimentalmente. La loro analisi riguardava un esperimento di "dam break", ovvero di collasso di una diga, su scala ovviamente ridotta al fine di poter costruire un modello in laboratorio. I risultati ottenuti in questo esperimento e la sua descrizione sono riportati in Soarez-Frazao e Zech (2008). Izadifar e Babae (2015) avevano trovato che griglie numeriche meno fitte, per quanto contrario all'intuizione, consentivano di rappresentare meglio i dati sperimentali trovati in letteratura riguardo il caso che era oggetto del loro studio. In questo caso invece non è possibile affermare ciò, non avendo a disposizione dati sperimentali sul caso sintetico modellato in questa tesi.

Si esegue anche in HEC-RAS un'analisi di sensitività alla griglia numerica. In tale programma un modello di tali dimensioni può essere discretizzato fino a una mesh di quadrati di 2x2 metri, si propongono dunque queste analisi in aggiunta a quella base:

-griglia di quadrati 2x2 m

-griglia di quadrati 20x20 m



*Fig. 3.3.42 Lato quadrati: 2 m    Fig. 3.3.43 Lato quadrati: 10    Fig. 3.3.44 Lato quadrati: 20 m*

Il primo confronto proposto è quello fissato un istante temporale a 200 secondi dall'inizio dell'allagamento, si può osservare la propagazione dell'onda, al variare della griglia di calcolo a tale istante temporale.

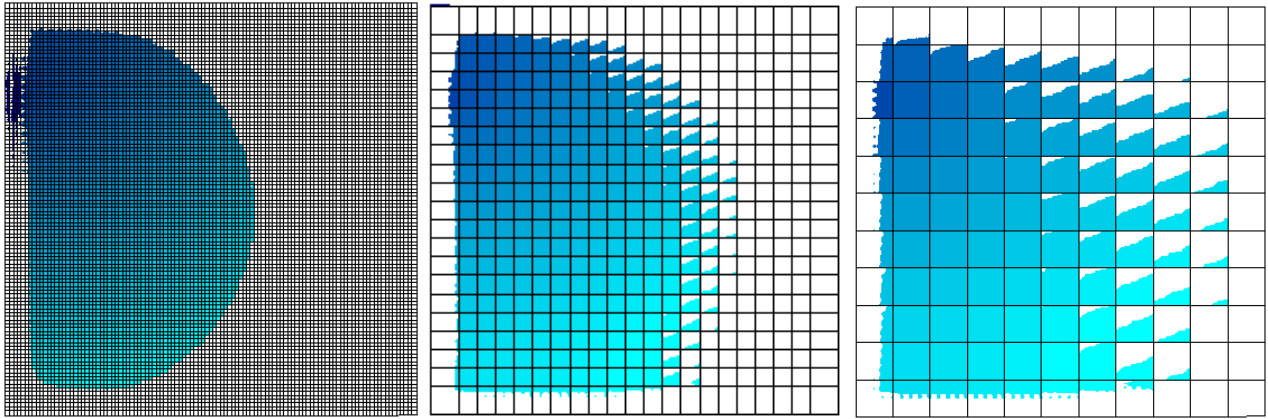


Fig. 3.3.45 Lato quadrati: 2 m    Fig. 3.3.46 Lato quadrati: 10 m    Fig. 3.3.47 Lato quadrati: 20 m

Anche con HEC-RAS si nota che la velocità di propagazione dell'onda è tanto maggiore tanto più grande è la dimensione degli elementi. Questo risultato è coerente con quanto trovato dall'analisi con River2D.

Si propone ora un confronto quantitativo delle altezze della superficie dell'acqua nel punto E al variare del tempo.

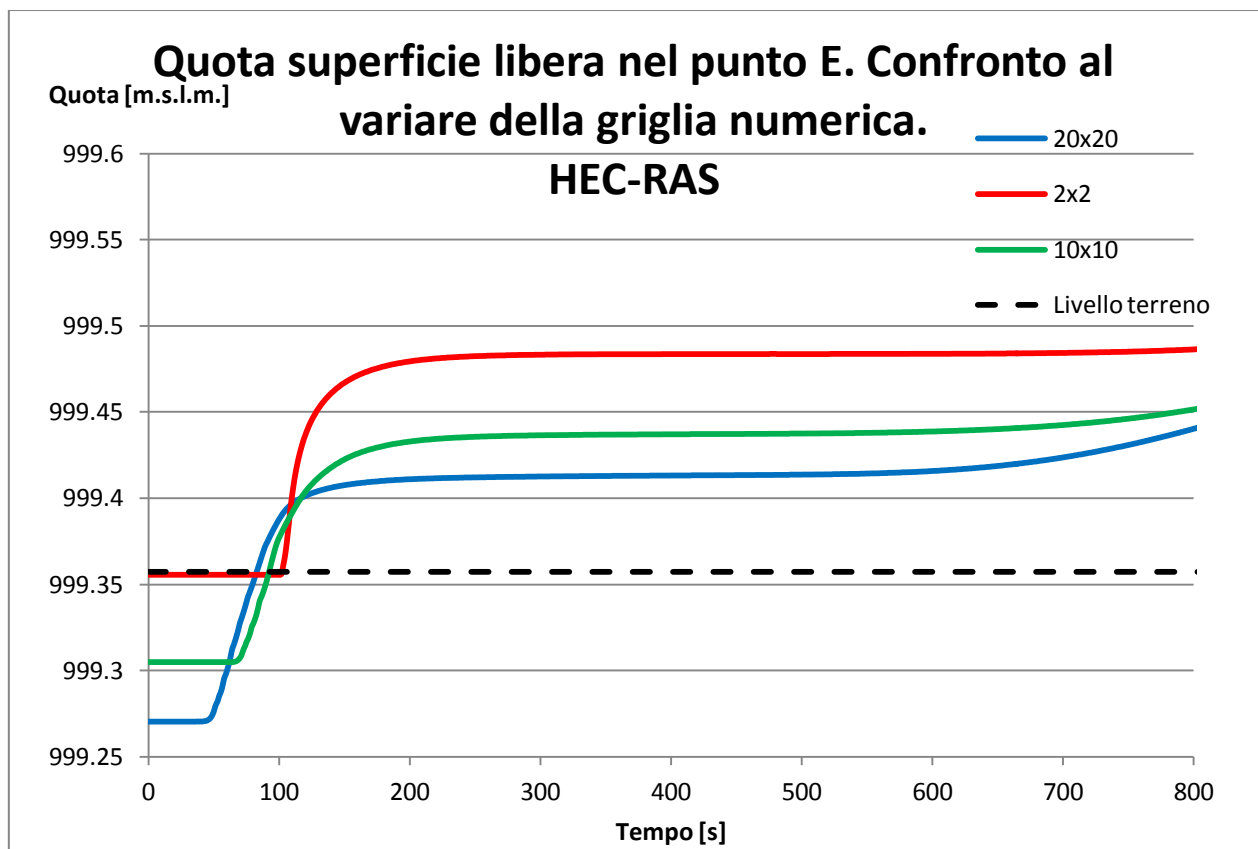


Fig. 3.3.48 HEC-RAS: altezze d'acqua nel punto E al variare del tempo per diversi valori del lato del quadrato per la costruzione della griglia numerica.



All'infittirsi della griglia numerica il valore iniziale della quota dell'acqua tende alla quota del terreno esattamente nel punto E, infatti tanto più è piccolo il quadratino tanto più il suo vertice a quota più bassa avrà quota vicina a quella del punto E all'interno di esso. Si nota chiaramente come per griglie più dense l'onda arrivi più in ritardo ma l'altezza d'acqua sia maggiore. Il risultato ottenuto con la griglia di quadrati di 2x2 metri pare essere più simile a quelli ottenuti con River2D ed è ritenuto più accurato di quelli ottenuti con le griglie 10x10 e 20x20 metri.

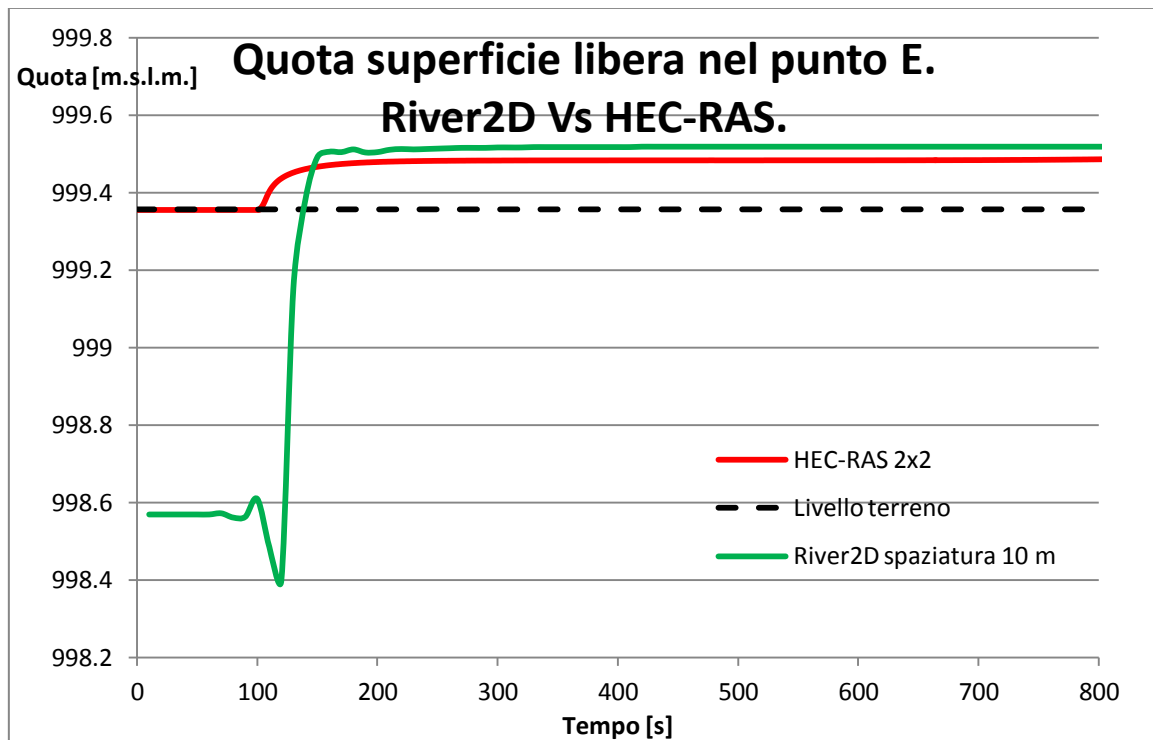
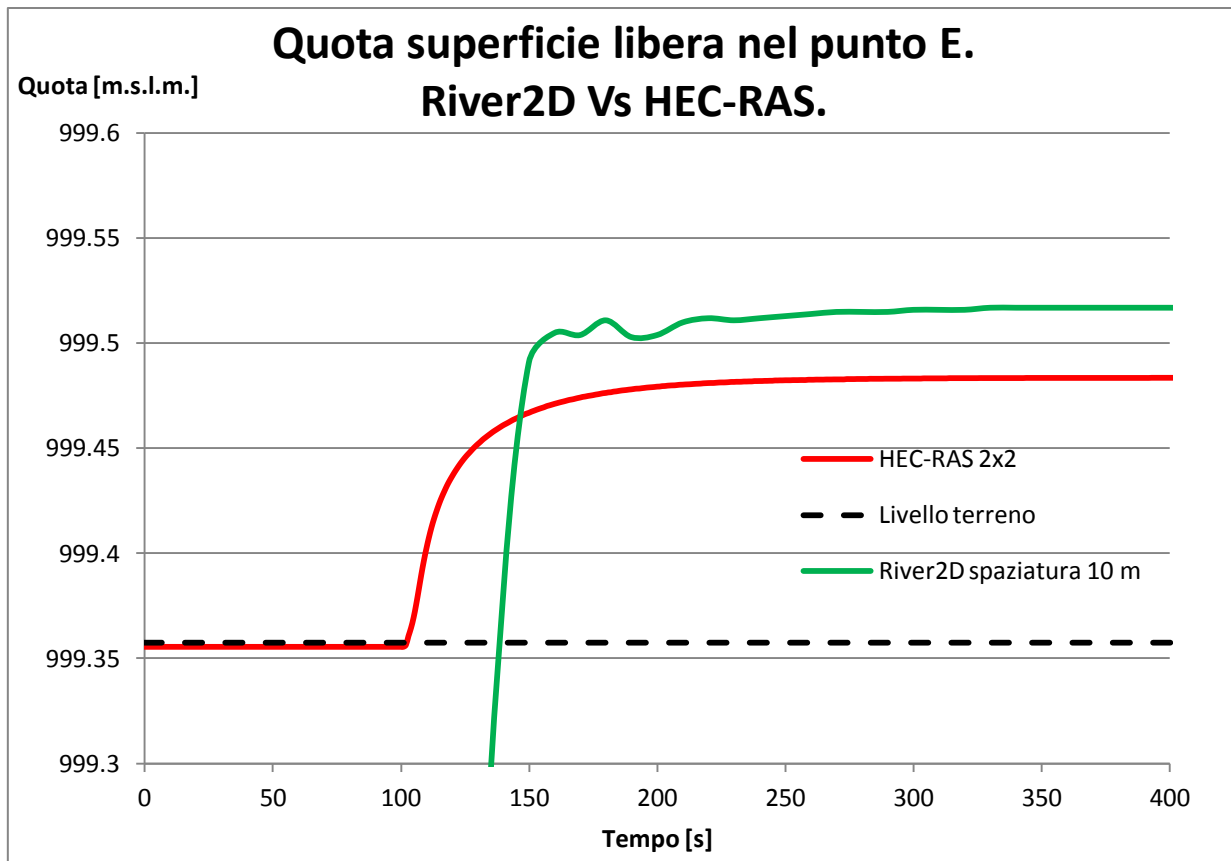


Fig. 3.3.49 Quota della superficie dell'acqua nel punto E al variare del tempo, modello in River2D con spaziatatura di 10 metri e modello in HEC-RAS con lato del quadrato elementare di 2x2 metri.

Confrontando il risultato ottenuto dal modello in HEC-RAS con la mesh più fitta possibile (2x2 m) con quello di River2D con spaziatatura tra i vertici dei triangoli di 10 m si ottengono risultati piuttosto coerenti. Il modello in HEC-RAS mostra sempre un'onda più rapida nello spostarsi, ma anticipata solo di pochi secondi (circa 20) rispetto al modello di River2D. Il modello in River2D mostra ancora una quota dell'acqua maggiore, ma quello in HEC-RAS ora ha una quota di poco inferiore, come mostrato nella figura zoommata seguente.



*Fig. 3.3.50 Quota della superficie dell'acqua nel punto E al variare del tempo, modello in River2D con spaziatura di 10 metri e modello in HEC-RAS con lato del quadrato elementare di 2x2 metri. Zoom.*

## *Scelta del software*

Considerato che:

-per ottenere buoni risultati con HEC-RAS è necessario estremizzare la discretizzazione e quindi rallentare molto il calcolo;

-con HEC-RAS allo stato attuale di sviluppo del software non è possibile inserire ostacoli all'interno dell'area di allagamento 2D per simulare la presenza di edifici (è possibile solo all'interno della modellazione 1D);

-essendo HEC-RAS una versione beta sono frequenti i problemi come l'arresto improvviso del programma o difficile estrazione di dati dovuti a funzioni di estrazione non ancora ben sviluppate.

Si sceglie di abbandonare il software HEC-RAS ritenuto al momento meno adatto di River2D allo studio dell'allagamento della città di Sondrio, che quindi sarà modellato con River2D.

Si prosegue lo studio del caso sintetico con River2D con le altre analisi che solo con tale programma si possono eseguire.

### *Analisi di sensitività: trasmissività e coefficiente di immagazzinamento*

Analizzato il caso base con  $T=0.1 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $S=0.1$  e il caso a terreno quasi impermeabile con  $T=0$  e  $S=0.001$  (valore minimo consentito dal software per non avere problemi di calcolo) si analizzano ora altri due casi, per valutare l'effetto di ciascuno di questi due parametri sul modello, in particolare si propongono i seguenti due casi ulteriori:

- $T=0$  e  $S=0.1$

- $T=0.1 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $S=0.001$

Per maggiore chiarezza si riportano le definizioni di trasmissività e coefficiente di immagazzinamento.

*Trasmissività*: prodotto tra lo spessore di un acquifero e la sua conducibilità idrica, espresso generalmente in  $\text{m}^2/\text{s}$ . Tale parametro esprime anche la portata della falda per unità di lunghezza e per cadente piezometrica unitaria.

*Coefficiente di immagazzinamento*: coefficiente adimensionale definito come il volume d'acqua rilasciato o immagazzinato da un acquifero confinato per unità di area superficiale della falda acquifera e per variazione unitaria di carico idraulico.

Si riportano le altezze d'acqua per i due nuovi casi.

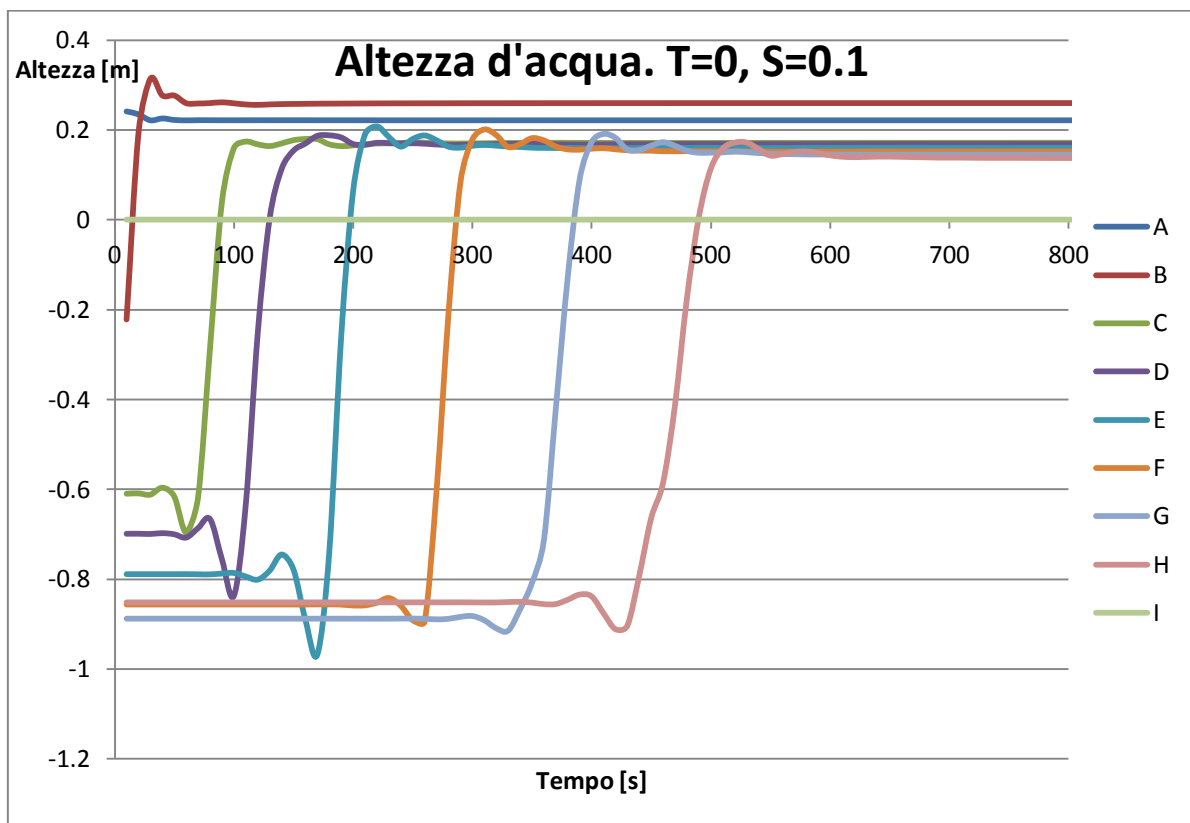


Fig. 3.3.51 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo, caso con  $T=0$  e  $S=0.1$ .

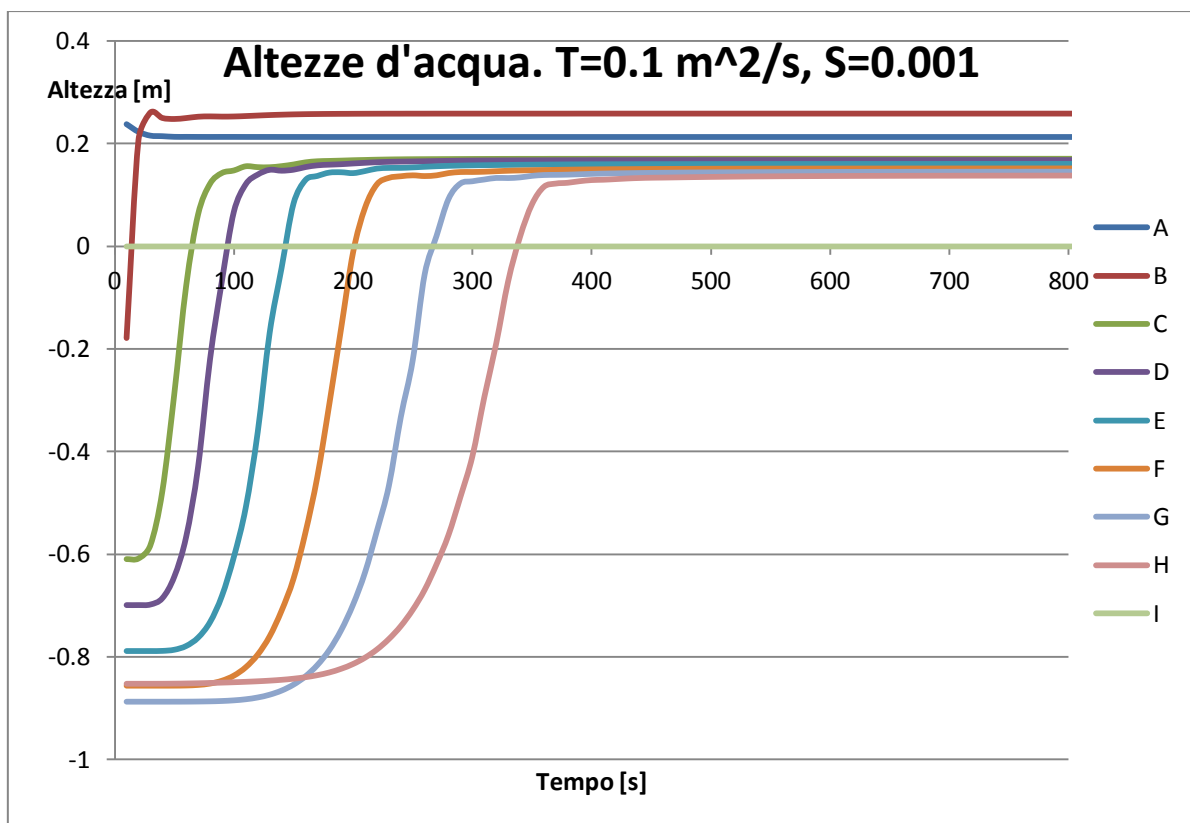


Fig. 3.3.52 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo, caso con  $T=0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $S=0.001$ .

Si confrontano anche le propagazioni dell'onda di allagamento dopo 200 secondi dall'inizio dello sfioro.

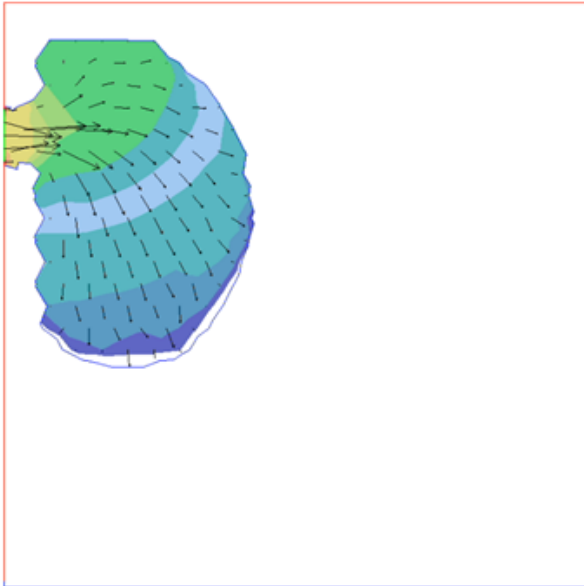


Fig. 3.3.53 Caso base:  $T=0.1\text{m}^2/\text{s}$   $S=0.1$

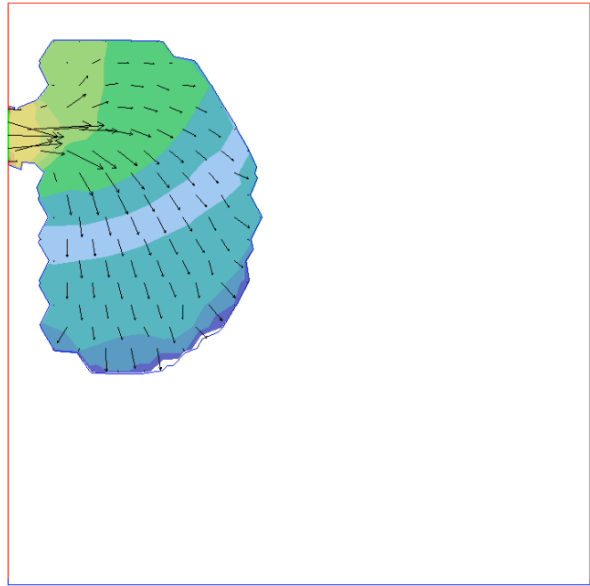


Fig. 3.3.54  $T=0$   $S=0.1$

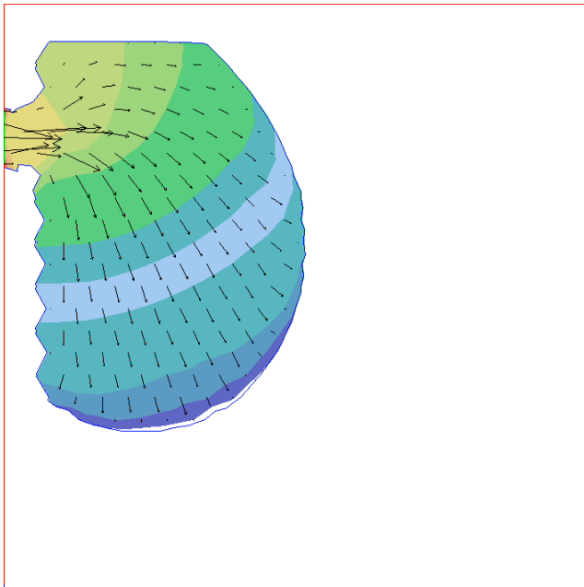


Fig. 3.3.55  $T=0.11\text{m}^2/\text{s}$   $S=0.001$

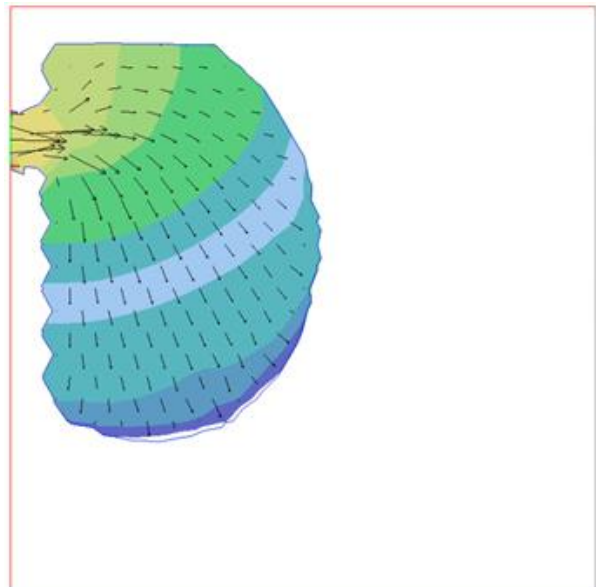


Fig. 3.3.56  $T=0$   $S=0.001$

Infine si confrontano gli andamenti temporali dell'altezza d'acqua nel punto E per i 4 casi considerati.

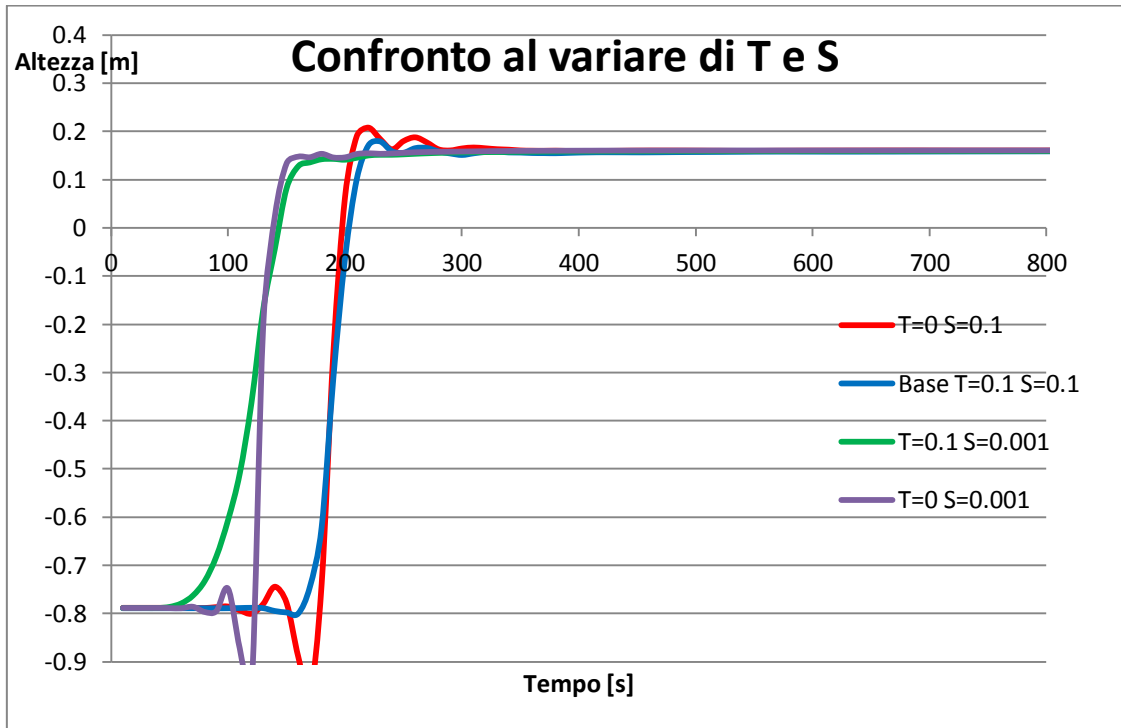


Fig. 3.3.57 Confronto al variare dei parametri di trasmissività e coefficiente di immagazzinamento

In una visione più di dettaglio:

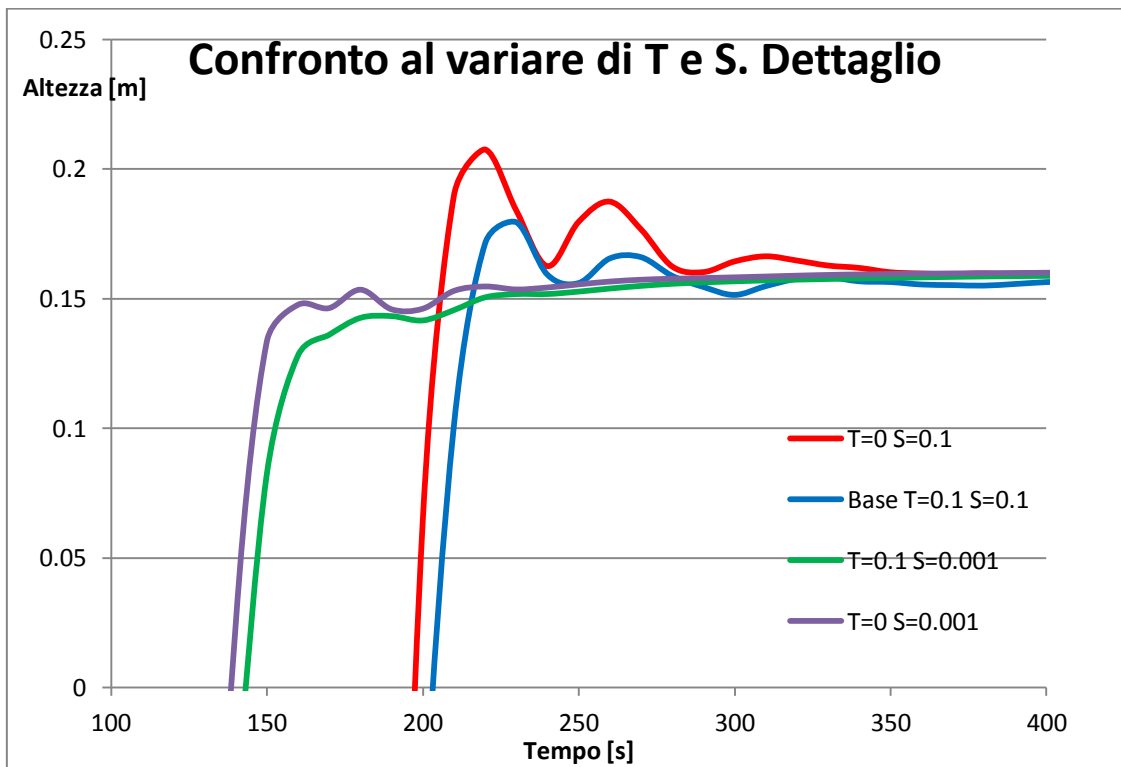


Fig. 3.3.58 Confronto al variare dei parametri di trasmissività e coefficiente di immagazzinamento

Dalle analisi ai parametri di trasmissività e coefficiente di immagazzinamento si giunge alle seguenti osservazioni.

Se si osserva il caso con  $T=0$  e  $S=0.1$  rispetto al caso base si nota un fronte d'onda più pendente (la curva rossa cresce con pendenza maggiore della curva blu), ciò è dovuto al fatto che annullando  $T$  si sta rallentando, rispetto al caso base, la saturazione del terreno perché l'acqua filtra lentamente, quindi il fronte d'onda non tende più a smussarsi come nel caso base, infatti si convoglia meno portata dentro il terreno; si ha, rispetto al caso base, un aumento del gradiente idraulico.

Osservando il caso con  $T=0.1 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $S=0.001$  rispetto al caso base si nota che il fronte d'onda arriva in anticipo perché l'acqua non viene più invasata nel terreno e può quindi scorrere in maggior quantità in superficie, infatti con  $S$  molto piccola il suolo si satura prima perché ha meno vuoti.

Osservando infine il caso con  $T=0$  e  $S=0.001$  (linea viola) si nota che tale modello risulta molto più simile a quello con  $T=0.1 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $S=0.001$  (linea verde) che a quello con  $T=0$  e  $S=0.1$  (linea rossa), si può quindi ritenere che il modello è più sensibile al parametro di immagazzinamento che a quello di trasmissività, dunque nello studio dell'allagamento della città di Sondrio si dovrà porre più attenzione a una buona calibrazione di  $S$  che di  $T$ .

Anche osservando le altezze d'acqua si nota che queste ultime sono simili per casi con lo stesso valore di  $S$  e diverse per casi con valori di  $S$  diversi, e questo conferma che il parametro di immagazzinamento ha un peso maggiore.

Si noti però che tutte le curve tendono, dopo il passaggio dell'onda di allagamento, circa allo stesso valore di altezza, questo significa che i parametri di immagazzinamento e trasmissività influiscono sulla propagazione iniziale dell'onda di allagamento, ma una volta che il terreno è saturo, soprattutto in un caso come questo in cui si ha una grossa portata entrante, l'effetto di tali parametri sul modello tende a sparire.



### Analisi di sensitività: condizione al contorno di valle

Si propone un'analisi al variare della condizione al contorno di valle, cioè della quota di acqua scelta nel lato Sud del quadrato. Nel caso base era stata scelta una quota 60 centimetri sotto il livello del terreno, cioè un'altezza d'acqua negativa, ora si analizza lo stesso caso ma con quota della superficie dell'acqua pari alla quota del terreno, cioè con altezza d'acqua a vale nulla lungo tale sezione. In questo modo il terreno risulta all'istante iniziale del processo di allagamento più prossimo all'essere saturo che nel caso base poiché la condizione iniziale è calcolata interpolando linearmente la quota dell'acqua data come condizione al contorno di valle e la quota dell'acqua data come condizione iniziale di monte, dunque una quota più alta a valle della superficie dell'acqua implica, a parità di condizione iniziale di monte e di tipo di interpolazione per creare la condizione iniziale su tutta l'area di allagamento, un terreno più vicino alla saturazione all'istante iniziale del processo.

Si ottengono questi valori di altezza nei punti di controllo, al variare del tempo.

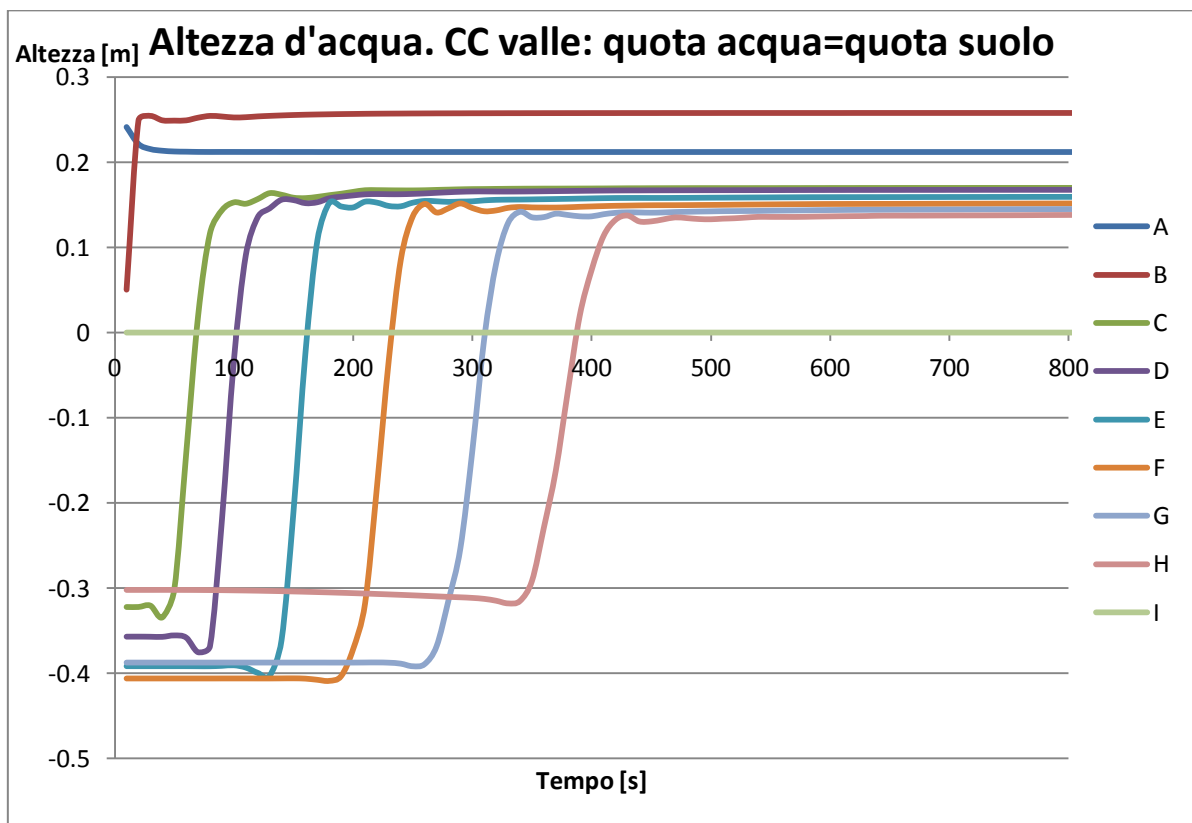


Fig. 3.3.59 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo. Caso con condizione di valle: altezza d'acqua al livello del suolo.

Si confrontano il caso base e il caso con condizione al contorno di valle di altezza nulla dopo 200 secondi di allagamento.

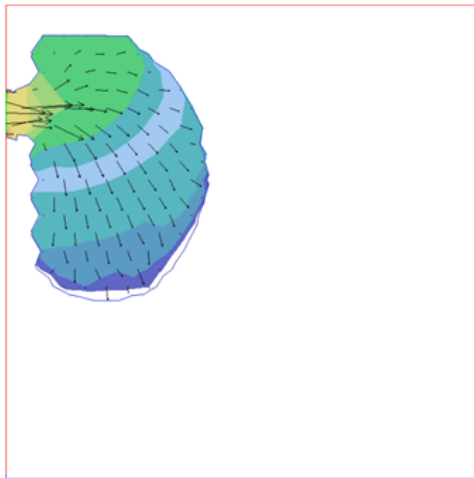


Fig. 3.3.60 Caso base

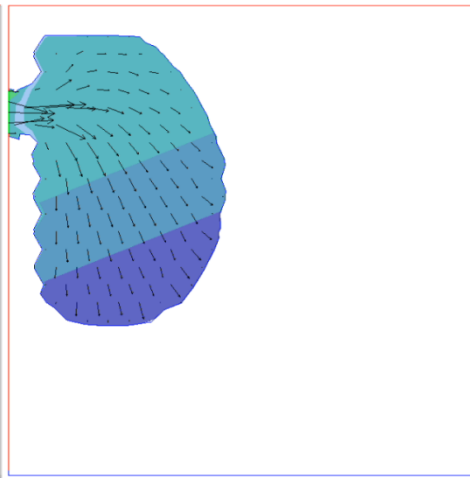


Fig. 3.3.61 Caso con  $h=0$  come CC di valle

Si propone ora un confronto quantitativo delle altezze d'acqua nei punti C,E,G al variare del tempo. Sono scelti tre punti di controllo per mostrare l'influenza della condizione al contorno di valle al variare della distanza da quest'ultima.

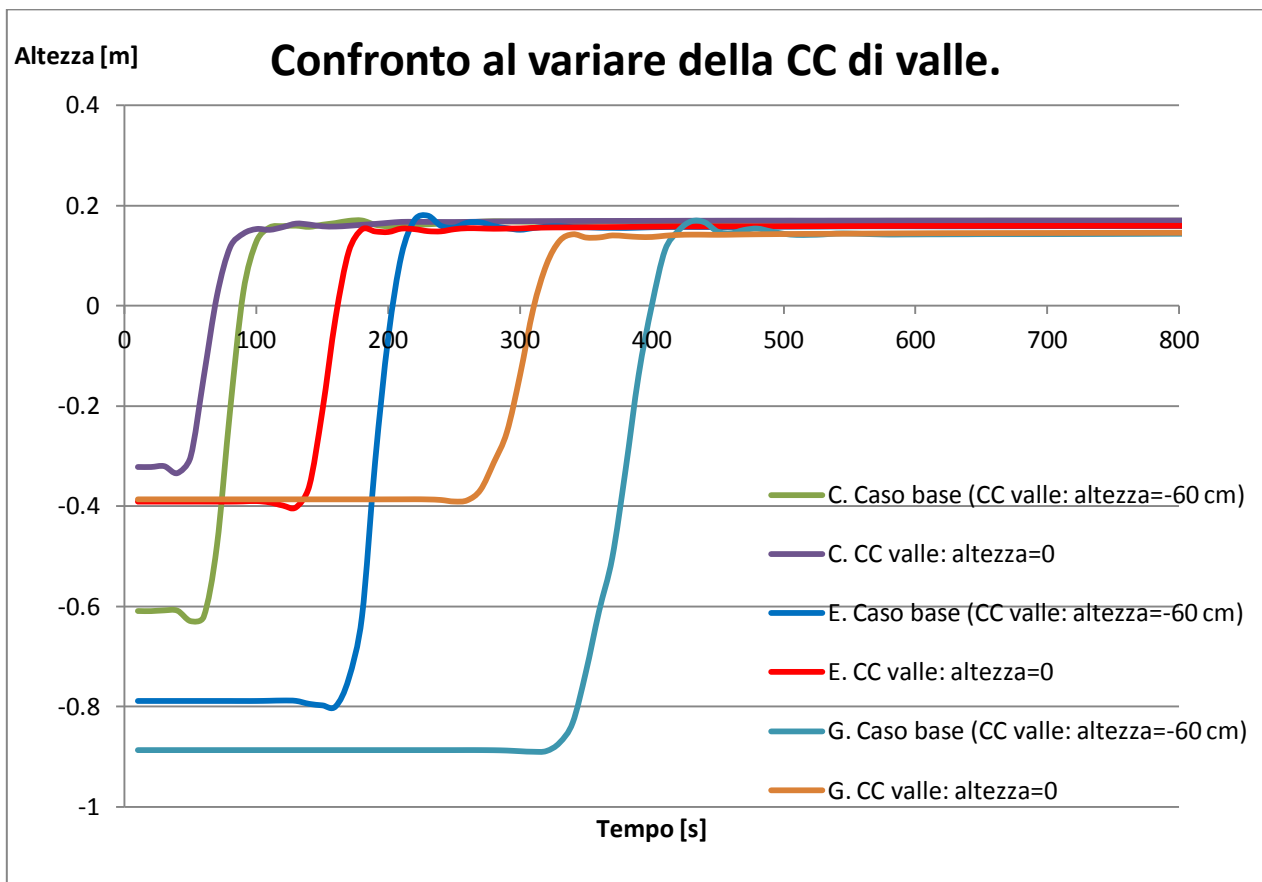
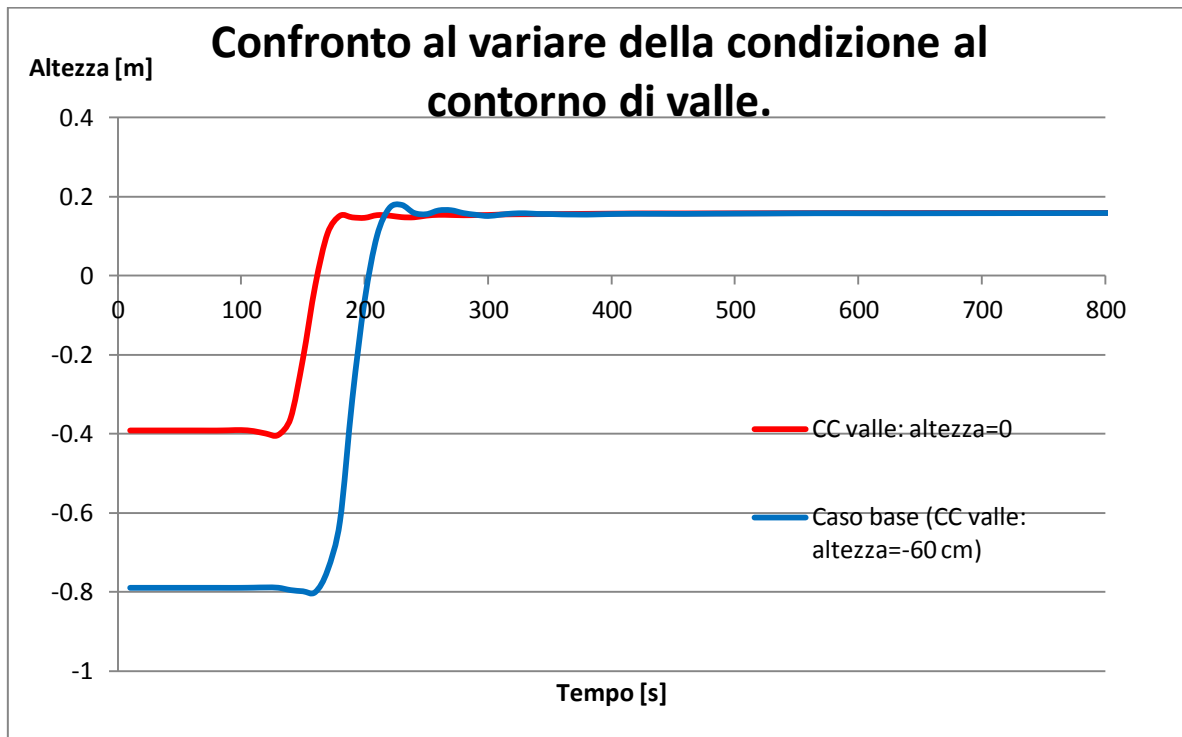


Fig. 3.3.62 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo C,E,G. Confronto tra caso base e caso con condizione di valle di altezza d'acqua al livello del suolo.

Lo stesso confronto è proposto anche per il singolo punto E.



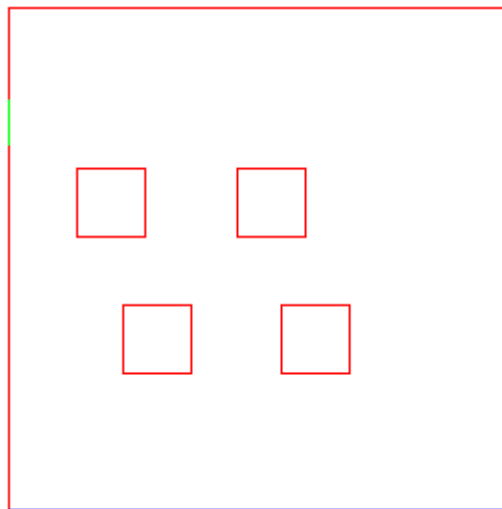
*Fig. 3.3.63 Altezza d'acqua al variare del tempo nel punto di controllo E. Confronto tra caso base e caso con condizione di valle di altezza d'acqua al livello del suolo.*

Essendo il terreno più prossimo alla saturazione già all'istante iniziale nel modello con condizione al contorno di valle di quota della superficie dell'acqua uguale a quota del terreno, rispetto al modello del caso base, si nota che l'onda di piena arriva prima, infatti il terreno assorbirà meno acqua dell'onda mentre esse si sposta. Col passare del tempo, una volta che il terreno è coperto d'acqua e quindi saturo, l'altezza d'acqua diviene circa la stessa nel punto E, che è lontano dalla condizione al contorno di valle e quindi non ne è influenzato. Se ne conclude che la condizione al contorno di valle non ha grosso peso nel modello se si studiano punti distanti da essa, come si nota chiaramente dal confronto proposto in figura 3.3.62, dove è mostrato come il punto C, che si trova a distanza maggiore dalla condizione di valle, sia quello che ne risente meno, al contrario il punto G, che è il più vicino, ne risente di più.

### *Inserimento blocchi*

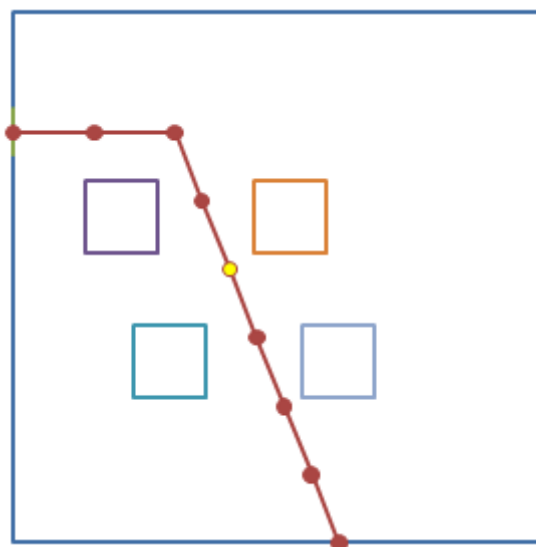
In River2D è possibile inserire blocchi all'interno dell'area di allagamento per simulare la presenza di ostacoli alla propagazione dell'acqua. Nel caso dello studio dell'allagamento della città di Sondrio è necessario modellare la presenza di edifici, trattandosi di un'area urbana, e tale modellazione può essere effettuata mediante l'inserimento di blocchi. I blocchi inseriti sono considerati di altezza infinita, cioè l'acqua non può passarci sopra.

Si propongono dunque analisi, con gli stessi parametri del caso base, con diverse configurazioni geometriche di ostacoli all'interno dell'area di allagamento. Si parte da una configurazione di base con 4 blocchi quadrati di 30 metri di lato disposti nell'area di allagamento.



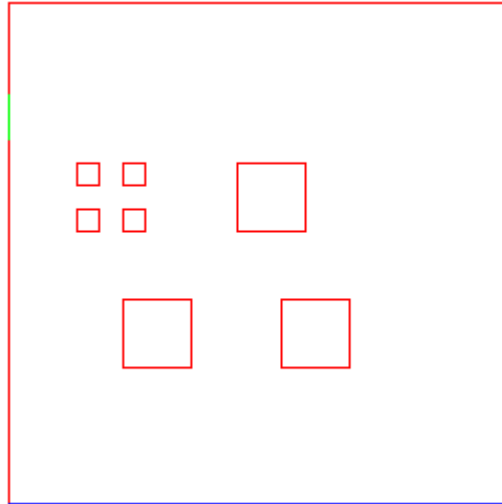
*Fig. 3.3.64 Configurazione a 4 blocchi chiusi*

Si pone particolare attenzione a non sovrapporre i blocchi ai punti di controllo in precedenza definiti. Si mostra la posizione del punto E (in giallo) tra i blocchi.



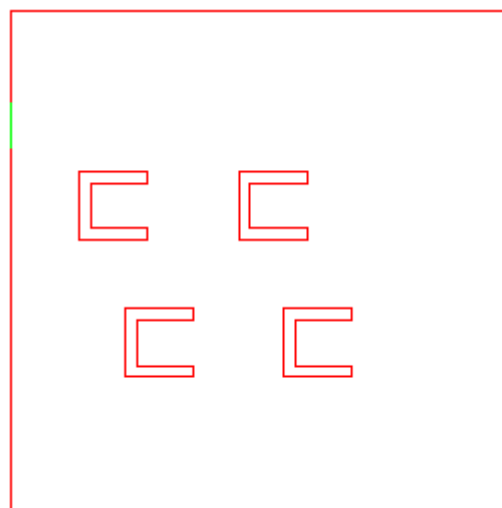
*Fig. 3.3.65 Posizione dei punti di controllo tra i blocchi. Punto E in giallo.*

Si propongono due variazioni a tale configurazione geometrica, la prima inserendo al posto di un blocco 30x30 metri 4 piccoli blocchi di 10x10 metri, al fine di valutare il peso che può avere una rappresentazione geometricamente accurata, edificio per edificio, piuttosto che una rappresentazione più grossolana dove sono modellati solo gli isolati con grossi blocchi:



*Fig. 3.3.66 Configurazione a blocchi chiusi con 4 blocchi 10x10 e 3 blocchi 30x30 metri*

Infine si propone una configurazione con i blocchi aperti in direzione Est, in modo che possano immagazzinare acqua ma allo stesso tempo non influenzino troppo l'idrodinamica del flusso cambiandone direzione. Questo può essere un modo, nello studio dell'allagamento di una città, di simulare il volume invasato in garage o cortili interni a edifici.



*Fig. 3.3.66 Configurazione a 4 blocchi aperti*

Per le 3 configurazioni coi blocchi, utilizzando gli stessi parametri del caso base, si ottiene:

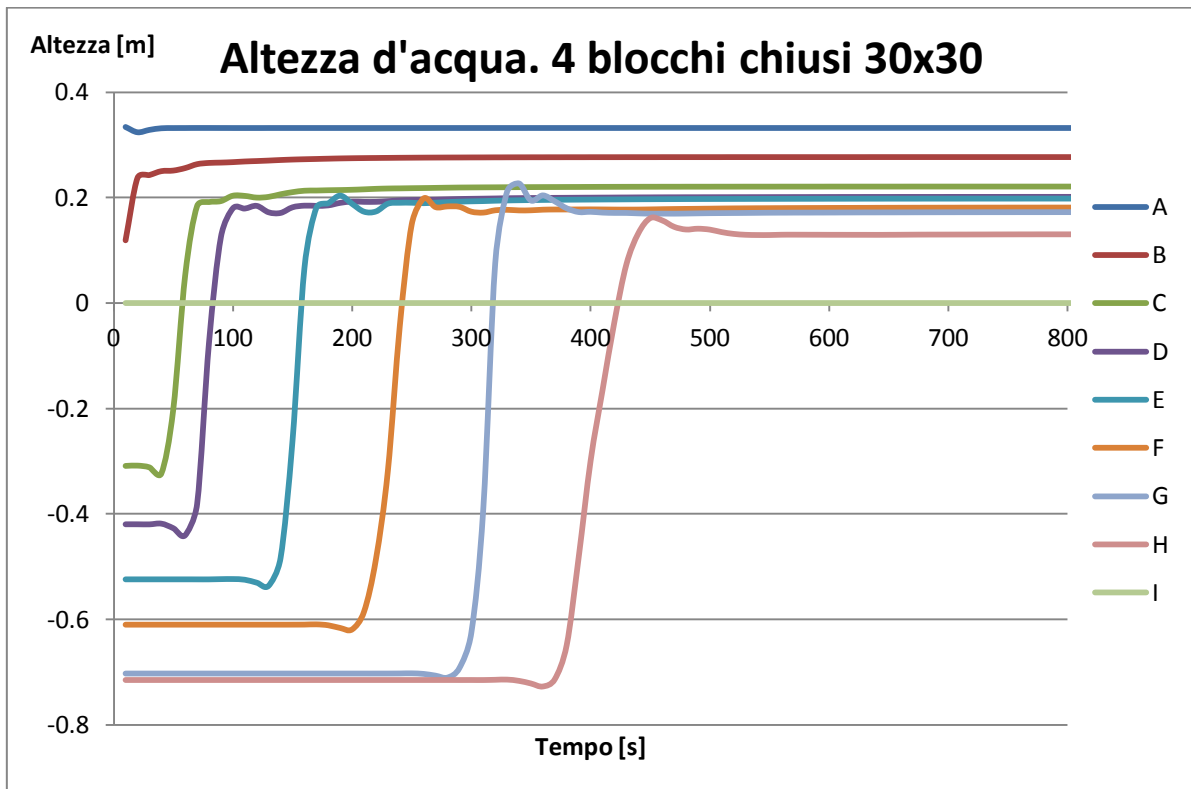


Fig. 3.3.67 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo. Caso con 4 blocchi chiusi.

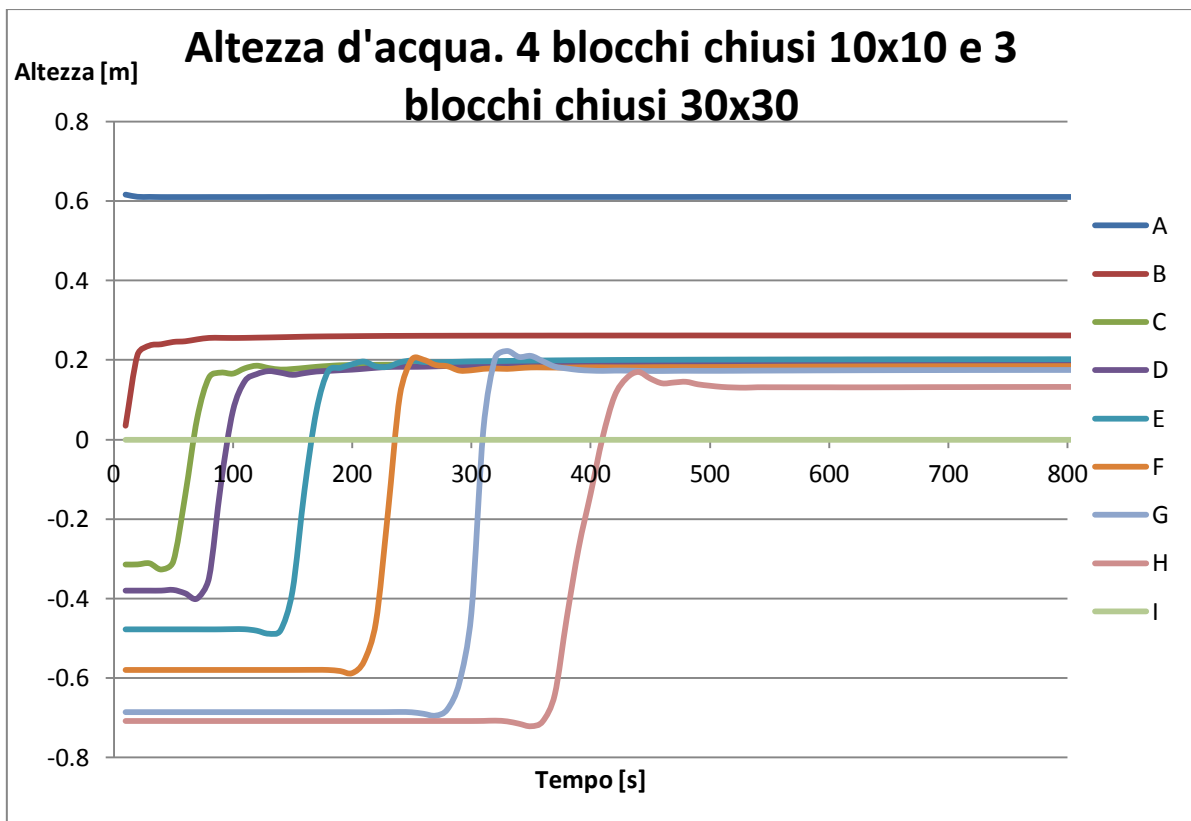


Fig. 3.3.68 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo. Caso con 7 blocchi chiusi.

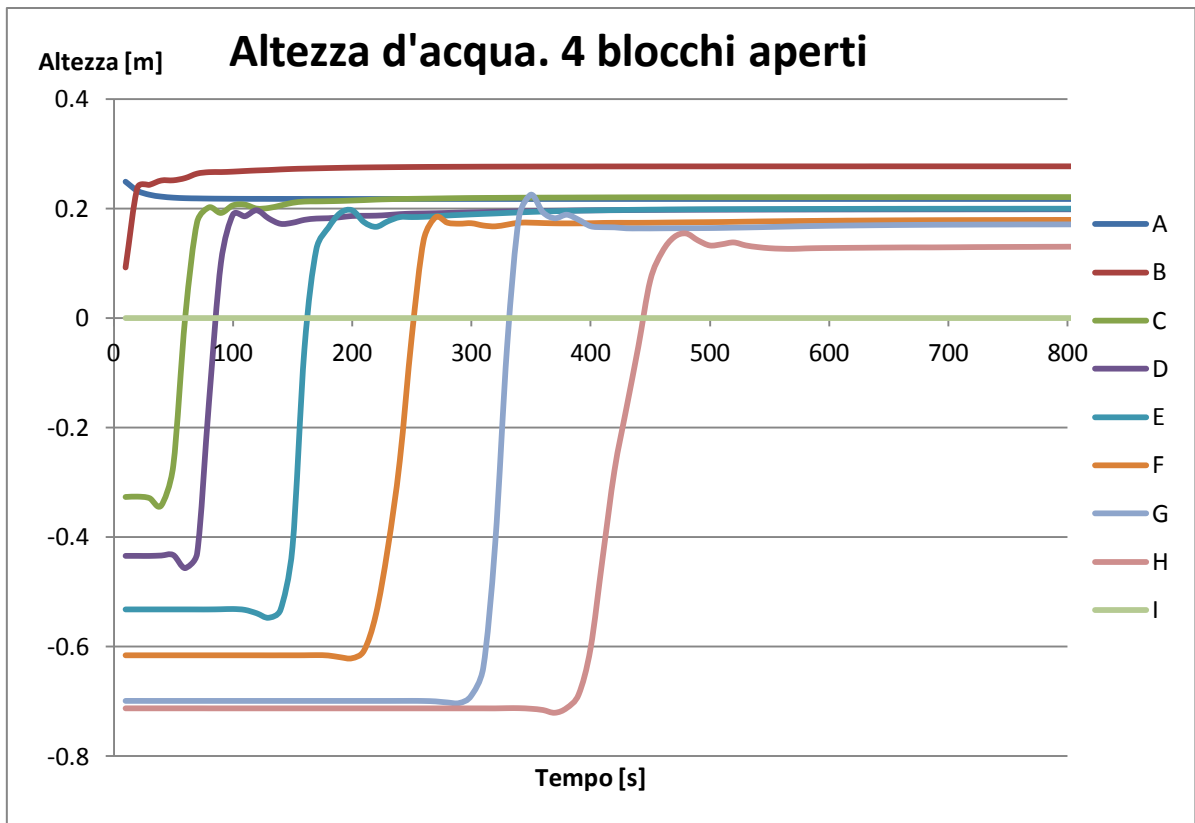
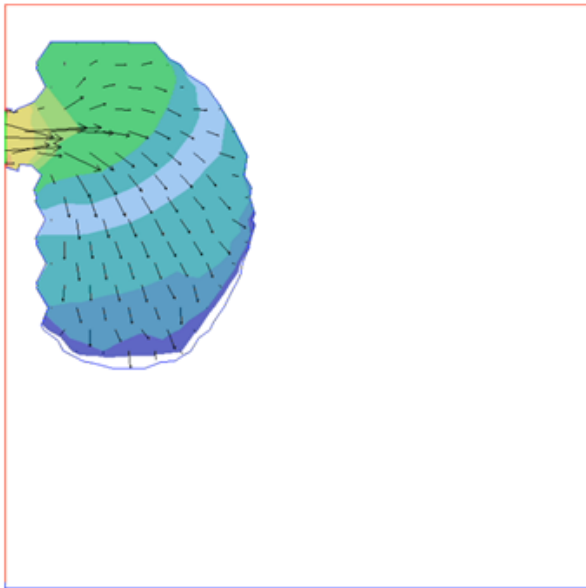
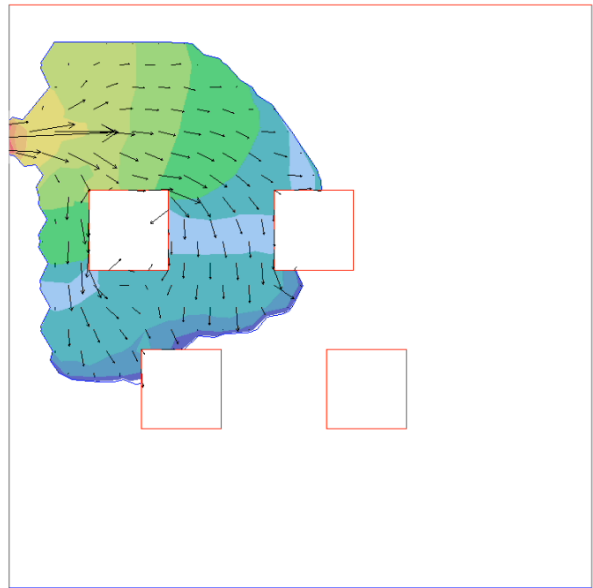


Fig. 3.3.69 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo. Caso con 4 blocchi aperti.

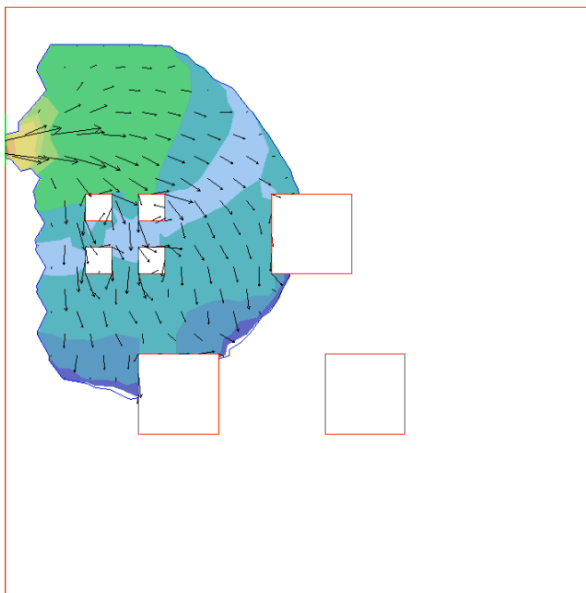
Dopo 200 secondi di allagamento l'acqua si è così propagata nei diversi casi:



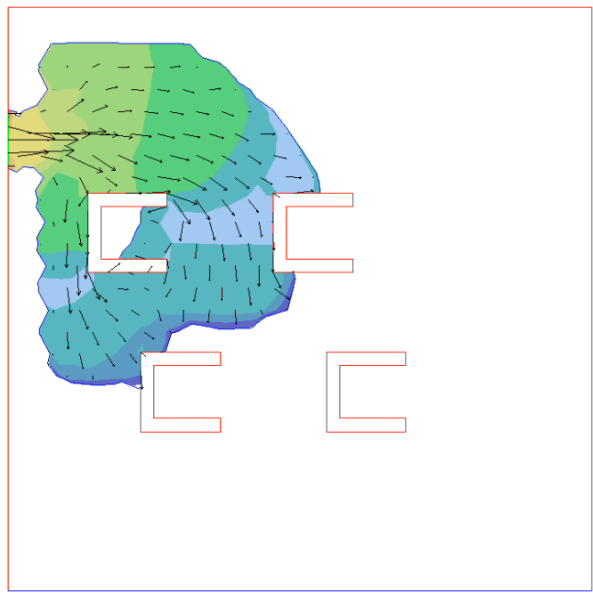
*Fig. 3.3.70 Caso base*



*Fig. 3.3.71 Blocchi chiusi*



*Fig. 3.3.72 4 blocchi 10x10 e 3 blocchi 30x30*



*Fig. 3.3.73 Blocchi aperti*



Si propone infine un confronto quantitativo delle altezze d'acqua al variare del tempo nel punto E.

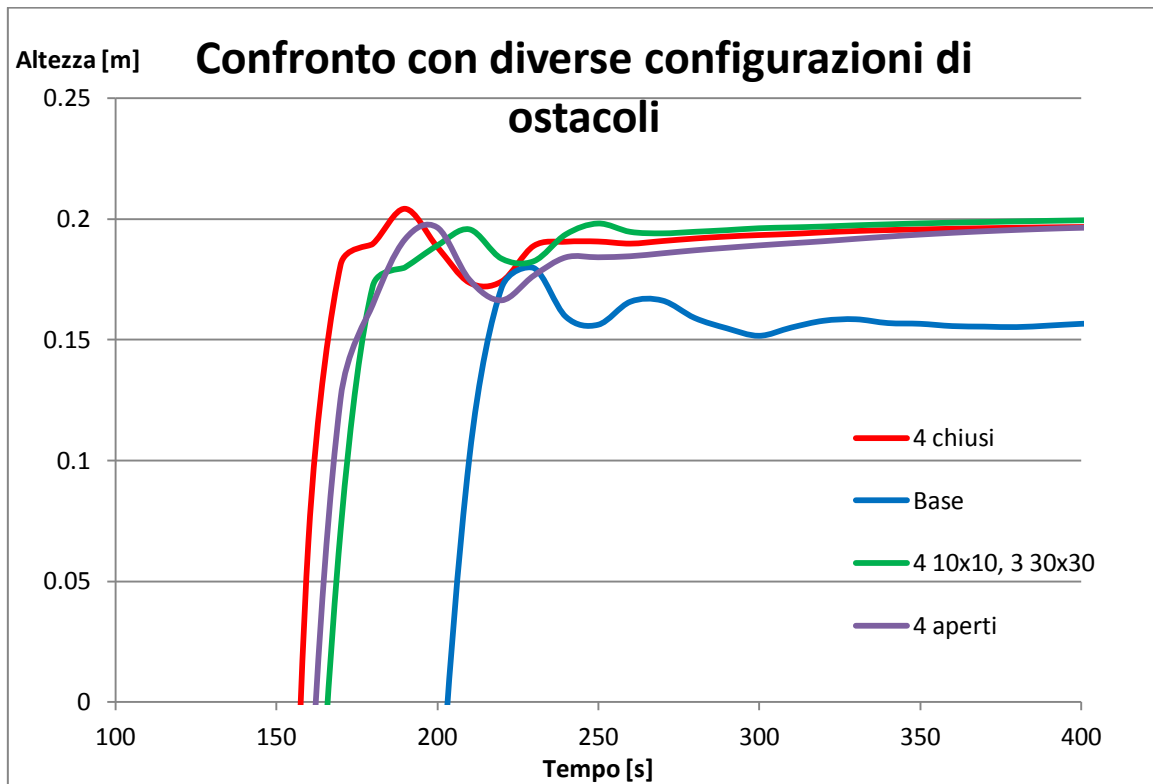


Fig. 3.3.74 Altezza d'acqua al variare del tempo nel punto E. Confronto tra diverse configurazioni geometriche degli ostacoli.

Si osservano andamenti piuttosto simili per le configurazioni a 4 blocchi chiusi e a 4 blocchi aperti, più significative sono le differenze tra questi due casi e quello con i blocchi più piccoli a Nord-Ovest che vengono in breve tempo incontrati dall'onda. Tale caso risulta anche più simile al caso base senza blocchi rispetto alle altre due configurazioni con tutti i blocchi di 30x30 cm.

Si può inoltre osservare che l'impatto dei blocchi sul modello è piuttosto forte, soprattutto se questi ultimi sono di dimensioni notevoli. Essi costringono l'acqua a seguire percorsi diversi rispetto a quelli che seguirebbe se non fossero presenti, seguendo in generale soprattutto la pendenza. La presenza di ostacoli costringe l'acqua su un percorso che la fa arrivare più rapidamente al punto E, che quindi è raggiunto prima. Inoltre trovandosi il punto E stretto tra i blocchi, come se in mezzo a una strada, si nota che in tutte e tre le configurazioni con ostacoli vede altezze d'acqua maggiori che in configurazione senza ostacoli. L'altezza massima raggiunta nelle 3 configurazioni con ostacoli è circa la stessa, ed è superiore a quella del caso senza ostacoli, dunque l'effetto degli ostacoli sull'altezza massima d'acqua in un punto tra essi è in generale di aumentarla, si noti però che in queste tre configurazioni l'altezza massima del picco è circa uguale a quella del flusso quando si è stabilizzato, dunque l'altezza del picco d'onda non è più così fondamentale in configurazioni con blocchi.

### Portata variabile nel tempo

Nello studio dell'allagamento della città di Sondrio la portata di sfioro del Mallero che si riverserà all'interno della città non sarà costante, si propone dunque un'ultima analisi per capire come reagisce il modello all'inserimento di un idrogramma come condizione al contorno.

Si propongono due diversi idrogrammi, il primo molto pendente che riversa tutto il volume d'acqua nel modello entro 600 secondi.

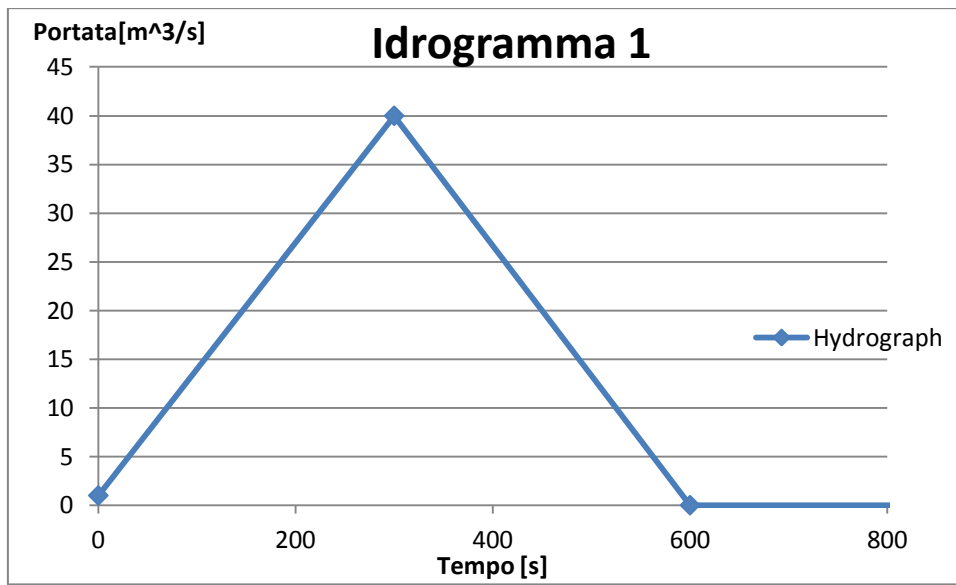


Fig. 3.3.75 Idrogramma con rapida crescita ed esaurimento

Il secondo invece con un aumento graduale della portata fino a 10000 secondi.

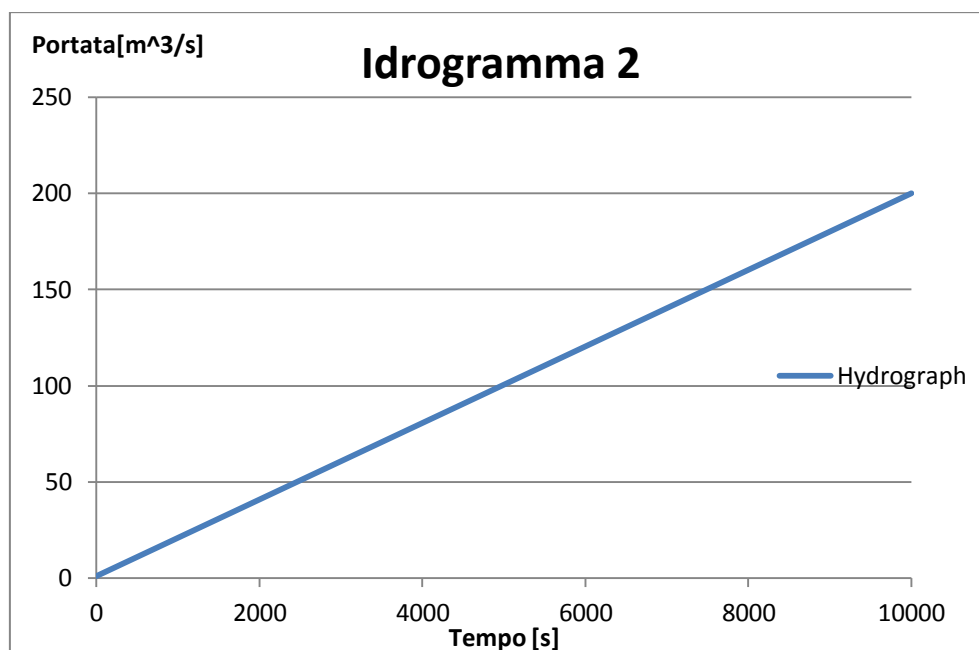
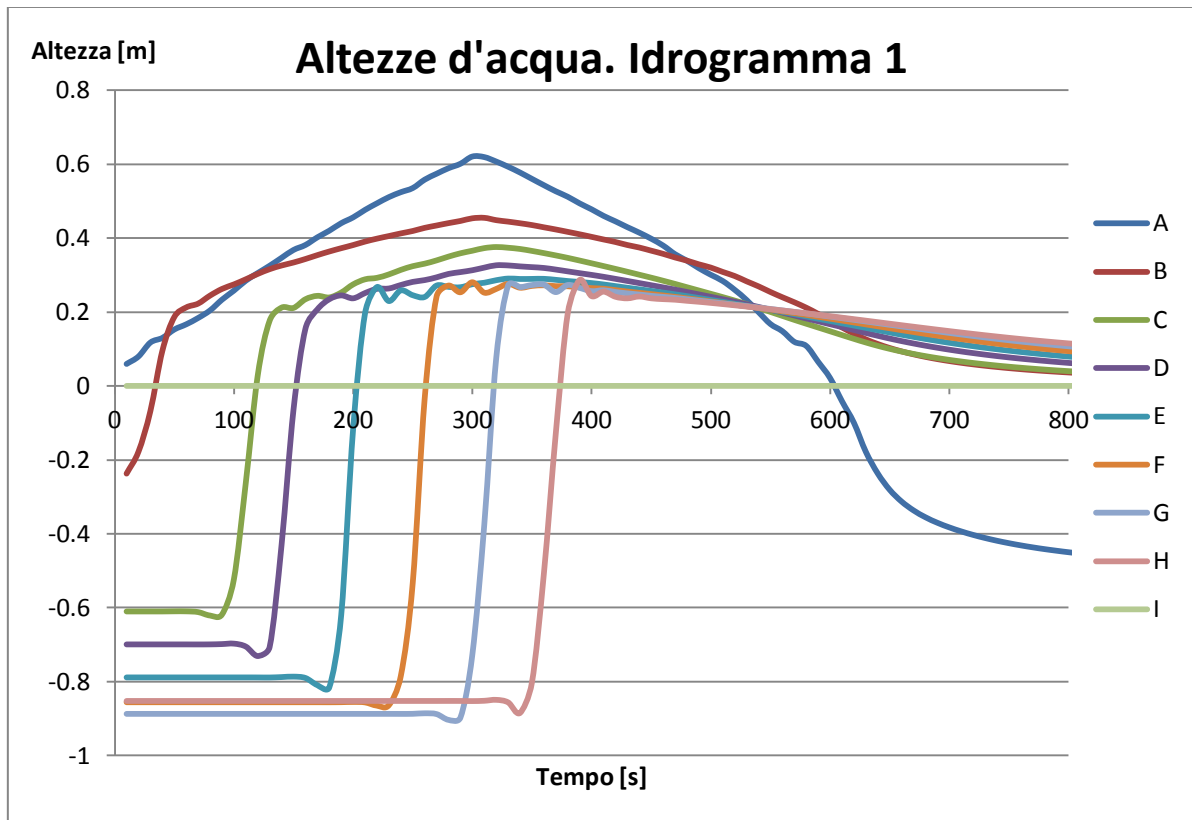


Fig. 3.3.76 Idrogramma con crescita graduale

Ovviamente con diverse distribuzioni temporali di portate entranti fare un confronto tra i modelli risulta difficile, ma delle analisi con ciascuno di questi due idrogrammi sono utili a capire gli effetti sul modello di portate non costanti. Si noti che se si considerano i primi 1000 secondi il volume d'acqua, in tale periodo, riversato dai due idrogrammi nel modello è circa lo stesso.

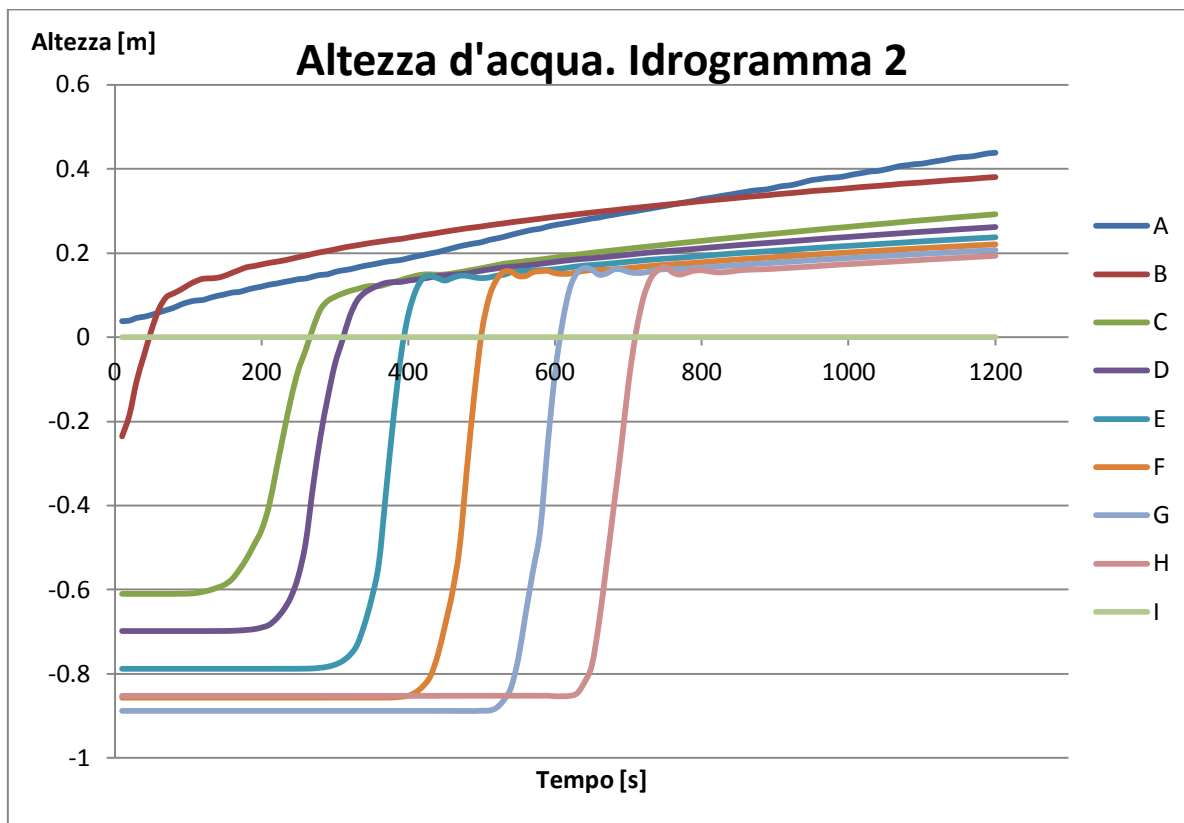
Si propongono le altezze d'acqua nei diversi punti di controllo, ottenute dall'analisi con l'idrogramma 1 come condizione al contorno di monte.



*Fig. 3.3.77 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo. Caso con idrogramma 1.*

Risulta evidente l'andamento delle altezze d'acqua tipico di allagamenti con idrogrammi triangolari di questo tipo, soprattutto osservando il punto A. In tutti i punti (escluso I che come già detto è troppo vicino alla condizione al contorno di valle di altezza negativa per avere risultati significativi) si nota un aumento dell'altezza d'acqua e una successiva fase di abbassamento a differenza dei casi studiati finora in cui portate costanti entranti facevano tendere ad altezze costanti dopo il passaggio del picco dell'onda. Il modello risponde quindi come previsto all'inserimento di portate variabili come condizione al contorno di monte.

Si propone ora la stessa analisi con l'idrogramma 2, un idrogramma di durata temporale più lunga del precedente e con portata in continuo aumento. La forma dell'idrogramma non richiama per nulla quella dell'idrogramma di allagamento che sarà usato per Sondrio, ma è molto lungo e porta ad avere portate molto considerevoli, così come quest'ultimo.



*Fig. 3.3.78 Altezza d'acqua al variare del tempo nei punti di controllo. Caso con idrogramma 2.*

Come si nota dal grafico il programma arresta il calcolo dopo circa 1200 secondi perché le portate sono diventate troppo elevate. Si nota però l'andamento ad altezza crescente per tutti i punti considerati, come atteso. Per l'utilizzo di River2D si deve porre attenzione a non inserire portate troppo elevate in geometrie troppo piccole altrimenti il software arresta il calcolo, ma ciò fortunatamente non è il caso dello studio dell'allagamento di Sondrio per il quale la geometria dell'area di allagamento è molto ampia in relazione alla portata entrante.

### 3.4 CONCLUSIONI

Lo studio del caso sintetico ha permesso di scegliere River2D come software da usare per la modellazione dell'allagamento della città di Sondrio, ritenuto al momento più efficiente e ricco di HEC-RAS per tale tipo di studio.

Con River2D sono state effettuate molte analisi, di cui si riporta qui una tabella di sintesi per avere un quadro riassuntivo.

Caso	Altezza max in E [cm]	Tempo per raggiungere E [s]
CASO BASE	17.95	203
T=0	20.76	198
S=0	15.97	143
T=0, S=0.001	16.04	135
Altezza a valle 0	15.93	161
Idrogramma1	29.08	204
Idrogramma2	54.51	395
Sp 20m, T=0, S=0.001	16.69	124
Sp 9m, T=0, S=0.001	15.71	180
Scabrezza 50 cm	14.88	250
Scabrezza: 0.1 cm	23.50	107
4 blocchi chiusi	20.43	158
4 blocchi aperti	19.96	163
4+3 blocchi chiusi	20.19	167

*Tab. 3.4.1 Altezza massima nel punto E e tempo necessario all'onda per raggiungerlo nei casi modellati con River2D*

Grazie a tali analisi è stato possibile capire come risponde il modello alla variazione di alcuni parametri.

Ora si procede alla modellazione dello scenario di allagamento della città di Sondrio sfruttando le indicazioni ottenute dallo studio di questo caso sintetico.

## 4 ALLAGAMENTO DI SONDRIO

### 4.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo si modella l'allagamento della città di Sondrio nelle ipotesi dello scenario presentate nel capitolo 2, dalla cui modellazione si stima uno straripamento del torrente Mallero nei pressi del ponte in via De Simoni con una portata uscente dal torrente ed entrante in città riportata nell'idrogramma riportato in figura 2.4.5.

Partendo da un unico scenario di straripamento del Mallero si propongono diverse analisi con diversi modelli della città di Sondrio, tutti creati in River2D, al fine di studiare la propagazione dell'alluvione e valutarne la sensibilità a diversi parametri, cosa fondamentale in un processo come questo in cui ci sono molte incertezze. Si cercherà quindi di identificare dei modelli che descrivono il fenomeno in maniera ritenuta ragionevole e i risultati da essi ottenuti saranno poi utilizzati per la stima dei danni su alcuni edifici riportata nel capitolo successivo.

Dallo studio del caso sintetico sono emerse diverse informazioni, dalle quali si traggono, tra le altre, le indicazioni di seguito riportate.

Per la modellazione dell'allagamento della città di Sondrio, per cui si è interessati soprattutto all'altezza d'acqua massima raggiunta, si potrà usare una griglia numerica non estremamente fitta, stando anche a favor di sicurezza sulla velocità della propagazione dell'onda e risparmiando diverso tempo nei calcoli, essendo già molto lunghi nel modello della città (nell'ordine di alcune ore).

La condizione al contorno di valle non ha grosso peso nel modello se si studiano punti distanti da essa, dunque nello studio dell'allagamento della città di Sondrio si cercherà di tenere la condizione al contorno di valle più lontano possibile dal centro città, che si vuole studiare più in dettaglio.

Dall'analisi delle configurazioni geometriche con presenza di ostacoli proposte nello studio del caso sintetico (figura 3.3.71, 3.3.72 e 3.3.73) si è notato che l'effetto degli ostacoli sull'altezza massima raggiunta dall'acqua in un punto tra essi è in generale quello di aumentarla (figura 3.3.74).

Per lo studio dell'allagamento della città di Sondrio si decide di non utilizzare configurazioni a blocchi aperti, come quella proposta in figura 3.3.73, viste le poche differenze di risultati con quelle a blocchi chiuse (figura 3.3.74) ma difficoltà di implementazione molto maggiori.

Nella modellazione della città di Sondrio concettualmente non c'è molto in più da osservare rispetto a quanto già discusso nell'analisi del caso sintetico, si ha però una geometria più complessa, un'area di allagamento molto più grande, tempi di calcolo molto più lunghi e una lettura meno immediata dei risultati.

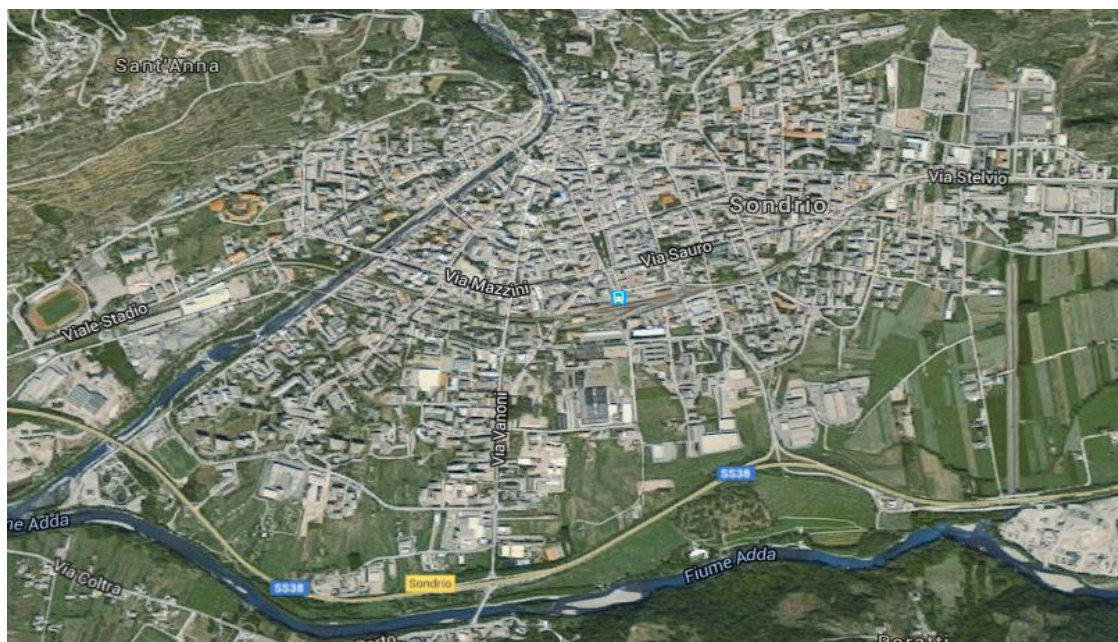
## 4.2 MODELLAZIONE DELL'ALLAGAMENTO

### *Modelli geometrici proposti*

Si propongono 3 diversi modelli geometrici creati per mezzo del software River2D. Non essendo possibile rappresentare l'esatta geometria della città e dei suoi edifici, infatti il software non lavora con geometrie troppo complesse o raffinate, in ciascuna delle rappresentazioni proposte si cerca un'approssimazione della geometria della città che ne permetta una modellazione efficiente e affidabile. Tutti i modelli proposti hanno come base lo stesso DTM, ovvero la stessa configurazione di terreno, dunque le stesse pendenze (si ricorda, come già discusso nel capitolo 2, che la parte di città alla sinistra idrografica del Mallero presenta una pendenza prevalentemente in direzione Nord-Sud e anche una pendenza in direzione Ovest-Est); la differenza tra i modelli geometrici proposti è legata alla porzione di città che si sceglie di modellare e alla disposizione dei blocchi per simulare la presenza degli edifici.

I 3 modelli geometrici proposti sono denominati:

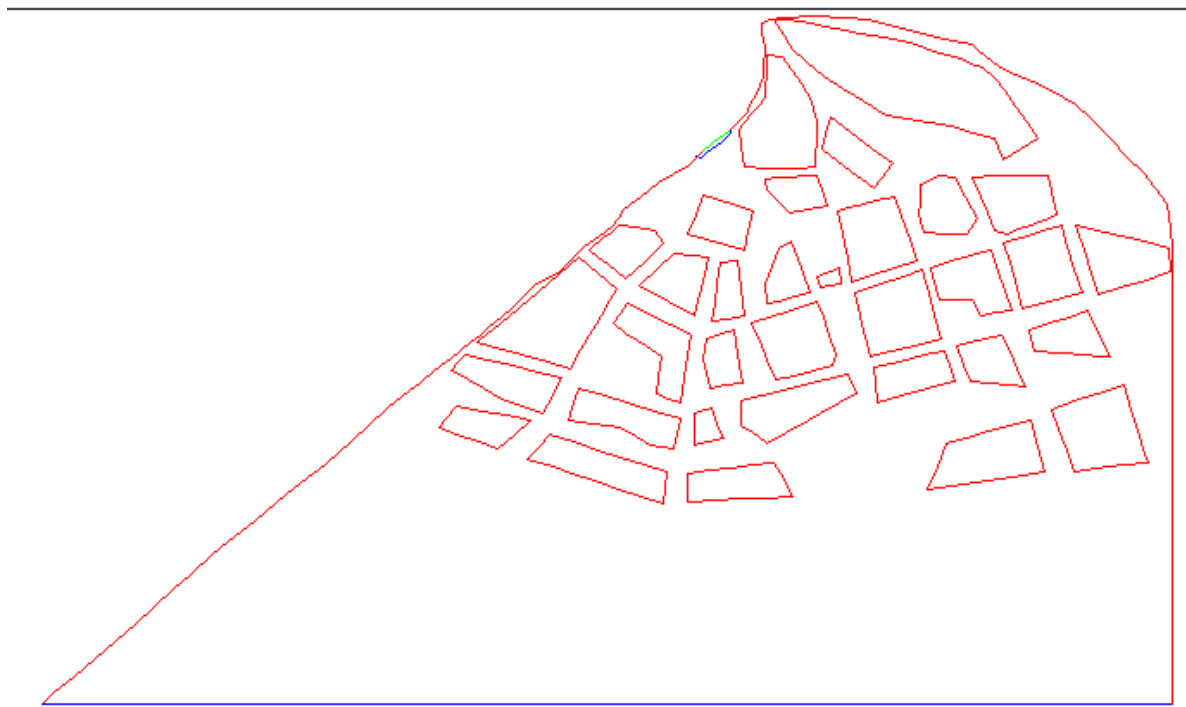
- Geometria base;
- Geometria densa;
- Geometria raffinata.



*Fig. 4.2.1 Città di Sondrio, geometria reale.*

## Geometria base

Il primo modello geometrico proposto viene denominato “geometria base”, è un modello semplificato della città di Sondrio in cui sono modellati gli edifici a blocchi, cioè ciascun blocco rappresenta un isolato. In questo modello le strade hanno larghezze maggiori delle dimensioni reali e non tutti gli isolati sono rappresentati, in particolare in zone della città lontane dal centro.



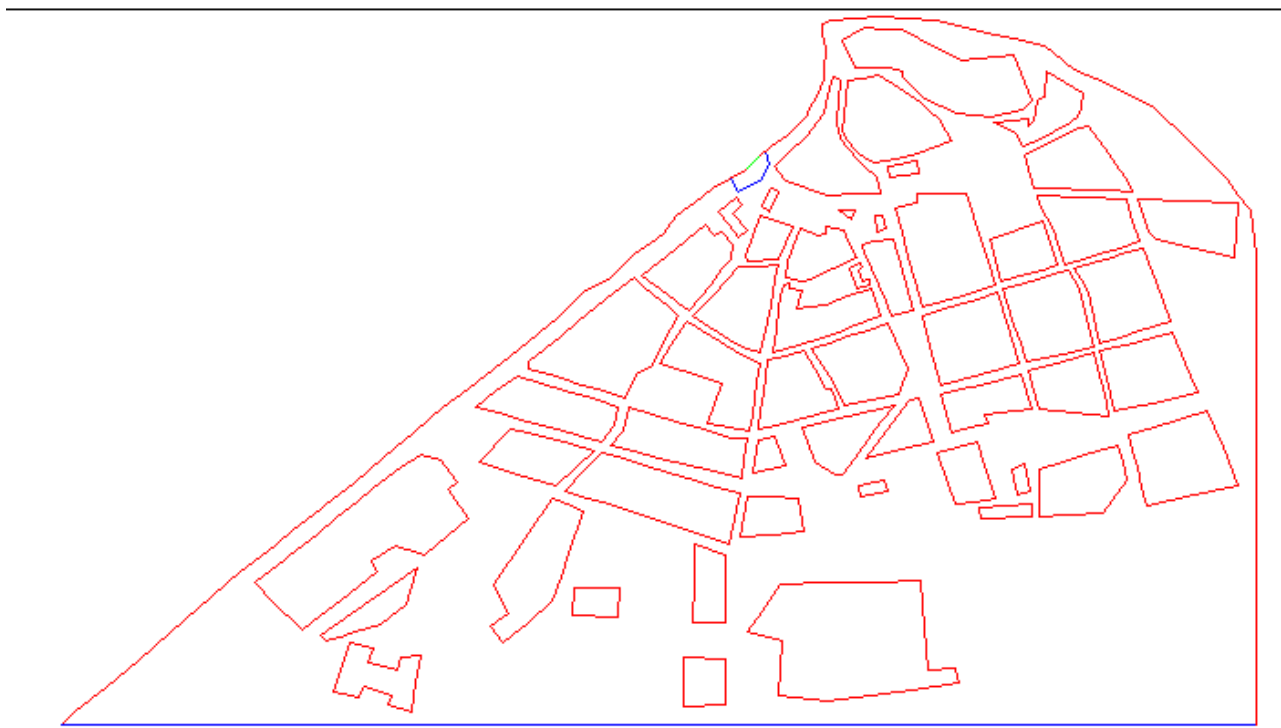
*Fig. 4.2.2* Modello geometrico della città di Sondrio: geometria base

Questo modello permette un calcolo stabile da parte del software, privo di instabilità numeriche nei risultati ed è inoltre l'unico modello della città di Sondrio costruito in River2D in cui sia possibile eseguire una simulazione completa con tutto l'idrogramma di sfioro della durata di quasi 30 ore e osservare anche tutta la fase di esaurimento con la successiva scomparsa dell'acqua dalla città qualche ora dopo il termine dello sfioro del Mallero.



## *Geometria densa*

Il secondo modello geometrico proposto viene denominato “geometria densa”. Tale configurazione è sicuramente più accurata della precedente da un punto di vista geometrico, infatti le strade hanno generalmente la stessa dimensione delle strade reali, gli isolati sono meglio rappresentati, alcuni edifici nel centro città sono rappresentati singolarmente e quasi tutta l’area urbana alla sinistra del Mallero è rappresentata dal modello.



*Fig. 4.2.3* Modello geometrico della città di Sondrio: geometria base

Questo modello permette il calcolo fino alla fase più critica dell’alluvione e per pochi istanti successivi, ma non permette di osservare la fase di esaurimento (solo un iniziale accenno al diminuire delle altezze d’acqua) a causa della troppa complessità di tale configurazione che quindi causa un calcolo troppo oneroso per il software River2D che quindi si arresta. La fase più critica dell’alluvione è comunque la fase da cui si ricavano i dati di altezza e velocità massima per la stima dei danni, dunque questo modello è utile per la stima dei danni su alcuni edifici, ma meno del precedente, perché, come si vedrà nel capitolo successivo, la durata dell’allagamento è un parametro cruciale per la stima dei danni con il modello che verrà proposto, ed essa non può essere direttamente ricavata se si utilizza questa configurazione geometrica.

### *Geometria raffinata del centro città*

Il terzo modello geometrico proposto rappresenta solo una piccola parte della città, la prima zona a essere colpita dall'alluvione. In tale modello gli edifici sono rappresentati singolarmente, solo edifici fisicamente collegati sono rappresentati come un blocco unico. Tale modello risulta molto raffinato da un punto di vista geometrico, ma ciò va a scapito delle dimensioni, non può infatti essere rappresentata tutta la città in modo così raffinato, ma solo una piccola porzione, inserendo blocchi così piccoli in un modello delle dimensioni dell'intera città il software sarebbe costretto infatti a creare una griglia numerica troppo fitta e quindi non sarebbe in grado di eseguire la simulazione. Nel modello è rappresentata la porzione di città delimitata a Ovest da Via Lungomallero Cadorna (e quindi dal torrente), a Sud da Via Trento e a Est da Via XXV Aprile proseguendo poi in linea retta fino a incontrare di nuovo il letto del Mallero a Nord.

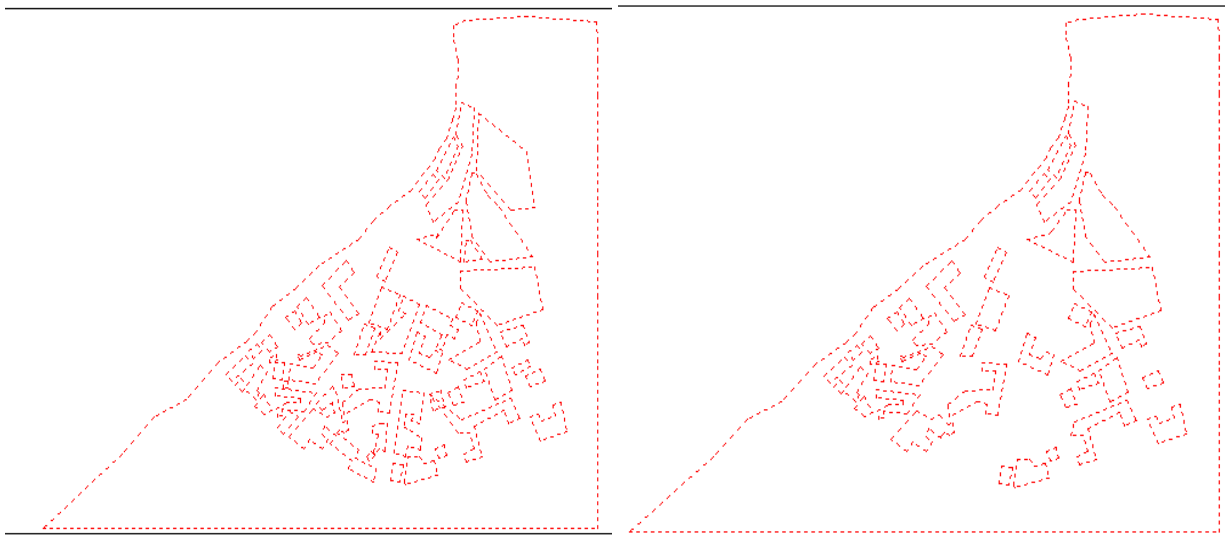


*Fig. 4.2.4 Geometria reale della porzione di città rappresentata*



*Fig. 4.2.5 Geometria raffinata del centro città, modello originale*

Tale modello geometrico risulta però troppo complesso e il software non è in grado di eseguire la simulazione. Si sceglie dunque di eliminare alcuni edifici con forme troppo complesse per permettere al software di eseguire la simulazione. Non si eliminano però edifici lungo Via Alessi. Tale configurazione geometrica verrà usata infatti per lo studio della propagazione dell'onda alluvionale lungo tale percorso. Con tale semplificazione si introduce certamente un errore, ma l'errore non è concentrato lungo Via Alessi, inoltre questa è tra le prime zone a essere raggiunta dall'acqua, quindi gli edifici eliminati altrove sarebbero comunque raggiunti, per la maggior parte dei casi, più tardi.



*Fig. 4.2.6 Originale*

*Fig. 4.2.7 Con eliminazione di alcuni edifici*

Anche dopo aver rimosso alcuni edifici il software non è in grado di eseguire una simulazione con l'idrogramma di sfioro del Mallero. E' però possibile comunque sfruttare tale modello molto raffinato da un punto di vista geometrico per eseguire analisi e confronti con gli altri due modelli geometrici proposti utilizzando portate entranti costanti. Ovviamente ciò impedisce di ottenere risultati quantitativi utili alla stima dei danni sugli edifici.

### *Condizioni al contorno e condizione iniziale per modelli a geometria base e densa*

La condizione al contorno di monte scelta per la modellazione dello scenario di alluvione nella città di Sondrio è l'idrogramma di sfioro del torrente Mallero.

Come condizione al contorno di valle per la modellazione dello scenario, con configurazione geometrica base e densa, si sceglie un'altezza d'acqua negativa, alla profondità di circa 10 metri sotto il livello del suolo. La condizione al contorno di valle è posta lungo la linea di confine a Sud del modello (linea blu), molto lontana dal centro città, circa nei pressi di dove scorre il fiume Adda; infatti, dalle analisi condotte sul caso sintetico, si è concluso che se la condizione al contorno scelta è di altezza d'acqua negativa ed essa è sufficientemente lontana dalla zona in cui si vogliono estrarre risultati, allora tali risultati saranno influenzati in maniera trascurabile dalla condizione al contorno.

Tale scelta della condizione al contorno di valle permette una approssimazione ritenuta ragionevole del livello di falda, e quindi della circolazione idrica sotterranea, in tutta la zona di città lontana dalla condizione al contorno di valle.

La condizione iniziale è ottenuta dal software interpolando linearmente la condizione al contorno di valle con un valore fissato dall'utente dell'altezza all'istante iniziale nella sezione dove si ha la condizione al contorno di portata di monte. Si sceglie come condizione iniziale l'altezza di 306 metri sul livello del mare nella sezione dove sfiora il Mallero.

### *Condizioni al contorno e condizione iniziale per modello a geometria raffinata*

Non essendo possibile eseguire l'analisi con l'idrogramma di sfioro del Mallero come condizione al contorno di monte per il modello a geometria raffinata, e più in generale non essendo possibile eseguirla con portate non costanti, si sceglie come condizione al contorno di monte una portata costante di  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ovviamente ciò rende impossibile una modellazione dello scenario proposto, ma permette comunque di eseguire delle analisi da cui trarre indicazioni.

Come condizione al contorno di valle si sceglie un'altezza d'acqua negativa di 4 metri sotto il livello del suolo, posta a sud di Via Trento.

Come condizione iniziale si sceglie di far interpolare al software la stessa altezza iniziale nella sezione di monte utilizzata per gli altri modelli (306 m.s.l.m.).

## *Parametrizzazione*

Fissate le condizioni al contorno e la condizione iniziale restano ora da scegliere i parametri che descrivono il suolo e dunque influenzano non solo il flusso sotterraneo ma anche quello superficiale. Si tratta dei parametri di trasmissività e immagazzinamento. Per quanto riguarda il modello a geometria base è possibile effettuare l'analisi sia con dei valori significativi come  $T=0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $S=0.1$  che con valori tendenti a zero di tali parametri  $T=0.001 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $S=0.001$ . Come si è discusso nel caso sintetico però l'influenza di  $T$  sul modello è comunque molto piccola rispetto a quella di  $S$ , dunque occorre discutere con più attenzione il coefficiente di immagazzinamento; si eseguirà un'analisi con  $S=0.1$  e un'analisi con  $S=0.001$  nel modello a geometria base e se ne discuteranno le differenze. Per quanto riguarda il modello a geometria densa la simulazione viene effettuata solo con i parametri di  $T=0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $S=0.1$ , usare valori tendenti a zero di tali parametri rende instabile il calcolo in tale modello. Per l'analisi con il modello a geometria raffinata si sceglie  $S=0.001$ . Il terreno della città di Sondrio è in parte pavimentato, ma essa sorge su un conoide alluvionale, dunque un terreno generalmente piuttosto permeabile. Si tenga quindi presente che una calibrazione di tali parametri è molto difficile, considerato anche che essi non sono costanti nello spazio, ma il software non permette una differenziazione spaziale di essi.

Per tutti i modelli proposti si sceglie una scabrezza di  $30 \text{ cm}$ , ritenuto un valore ragionevole per un fondo di pavimentazione urbana ricco di irregolarità come quello della città di Sondrio.

La griglia per il calcolo numerico è quasi completamente imposta dalla configurazione geometrica scelta, poiché il software utilizza i vertici dei blocchi che rappresentano edifici isolati come punti per costruire i triangoli della griglia. Si sceglie comunque, per i modelli a geometria base e densa, un valore per la spaziatura massima di 100 metri, soprattutto al fine di avere dei punti non troppo distanti nelle zone dove non sono presenti edifici, come nella zona Sud della città. Per il modello con configurazione geometrica raffinata si sceglie una spaziatura massima di 50 metri.

## Analisi con geometria base

Si propone la simulazione dell'alluvione col modello a geometria base con valori di  $S$  pari nel primo caso a 0.1 e nel secondo caso a 0.001. I video e i risultati ottenuti al variare del tempo in diversi punti della città sono in allegato.



Fig. 4.2.8 Geometria base.  $S=0.1$ . Istante 1000 secondi (circa 17 minuti)

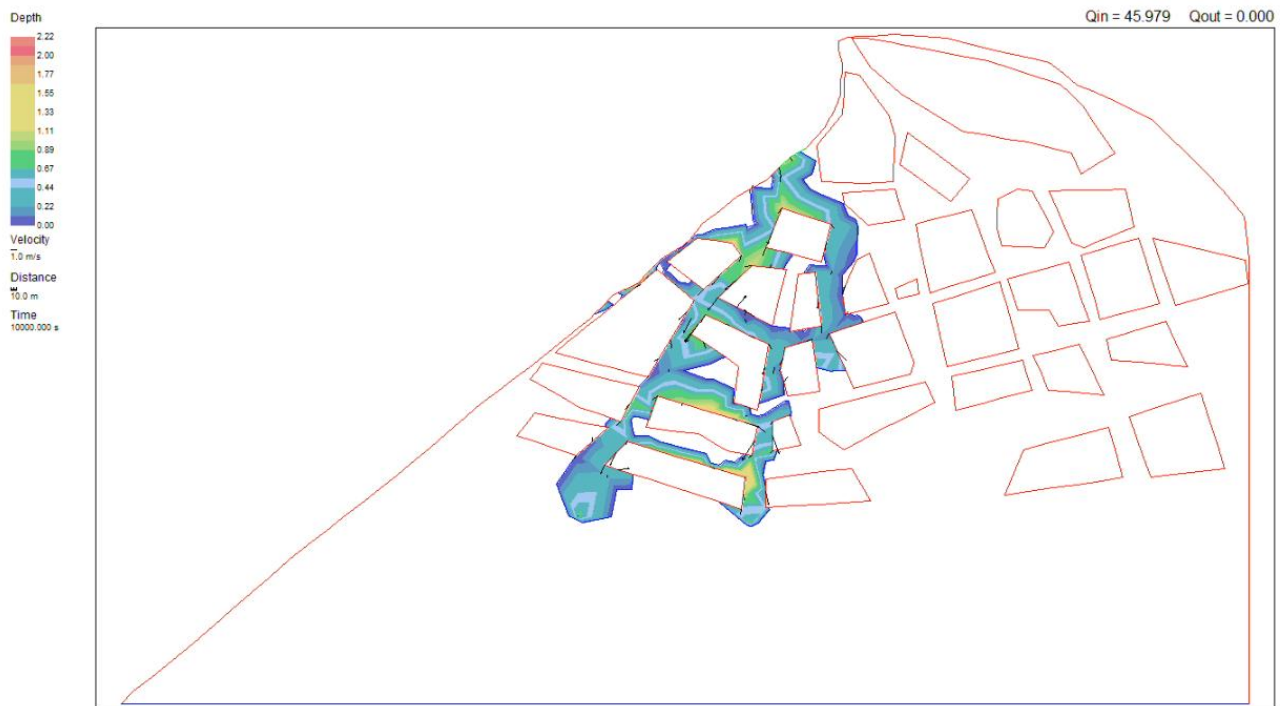


Fig. 4.2.9 Geometria base.  $S=0.1$ . Istante 10000 secondi (2 ore e 47 minuti)

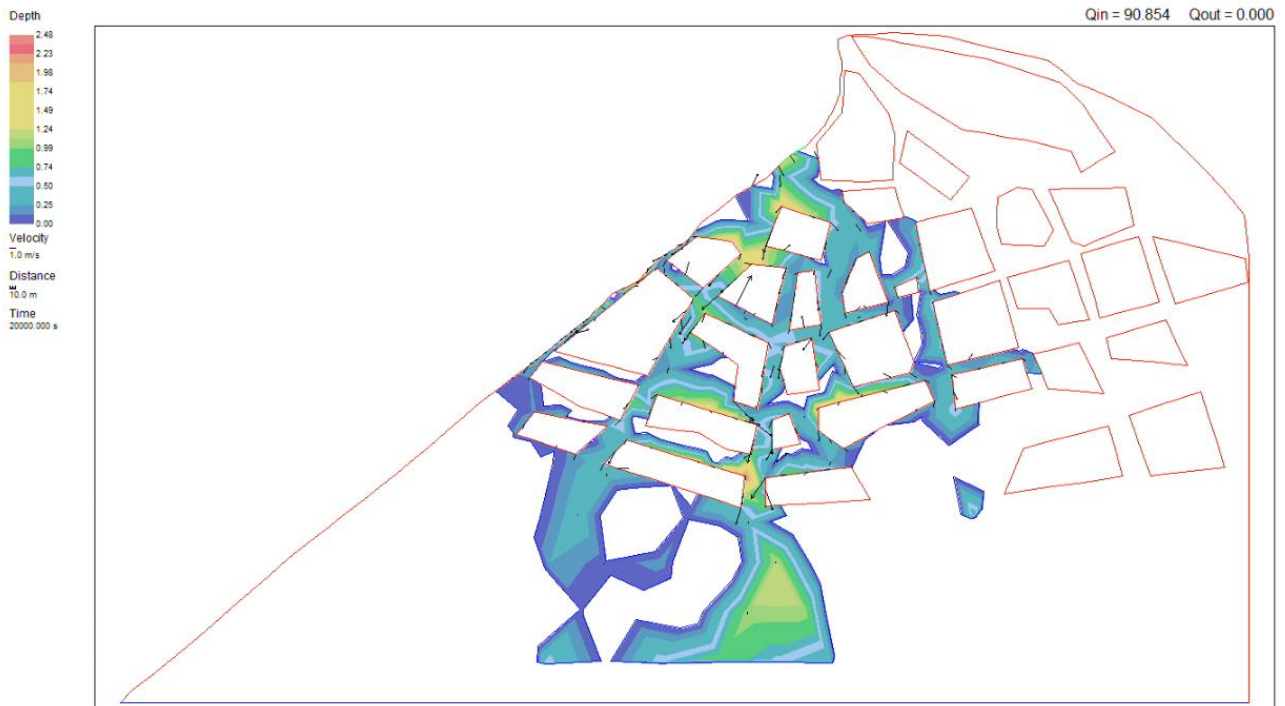


Fig. 4.2.10 Geometria base.  $S=0.1$ . Istante 20000 secondi (5 ore e 33 minuti)

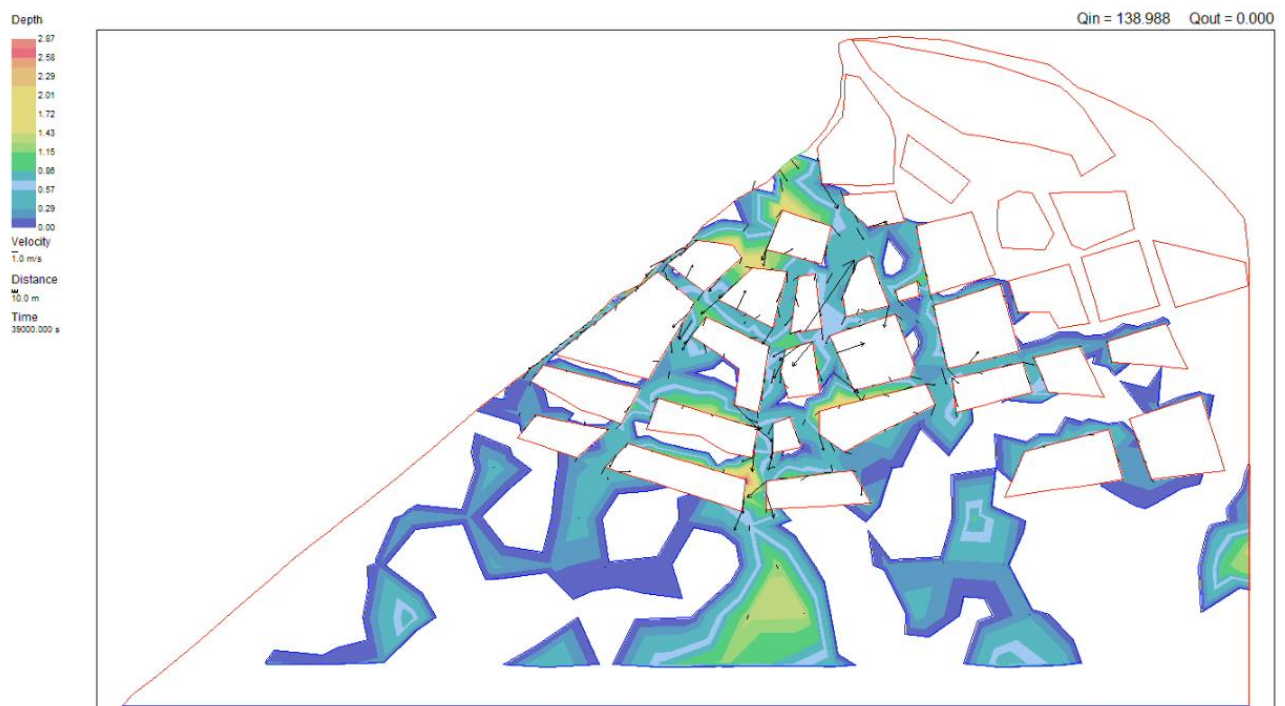


Fig. 4.2.11 Geometria base.  $S=0.1$ . Istante 39000 secondi (10 ore e 50 minuti, istante più critico)

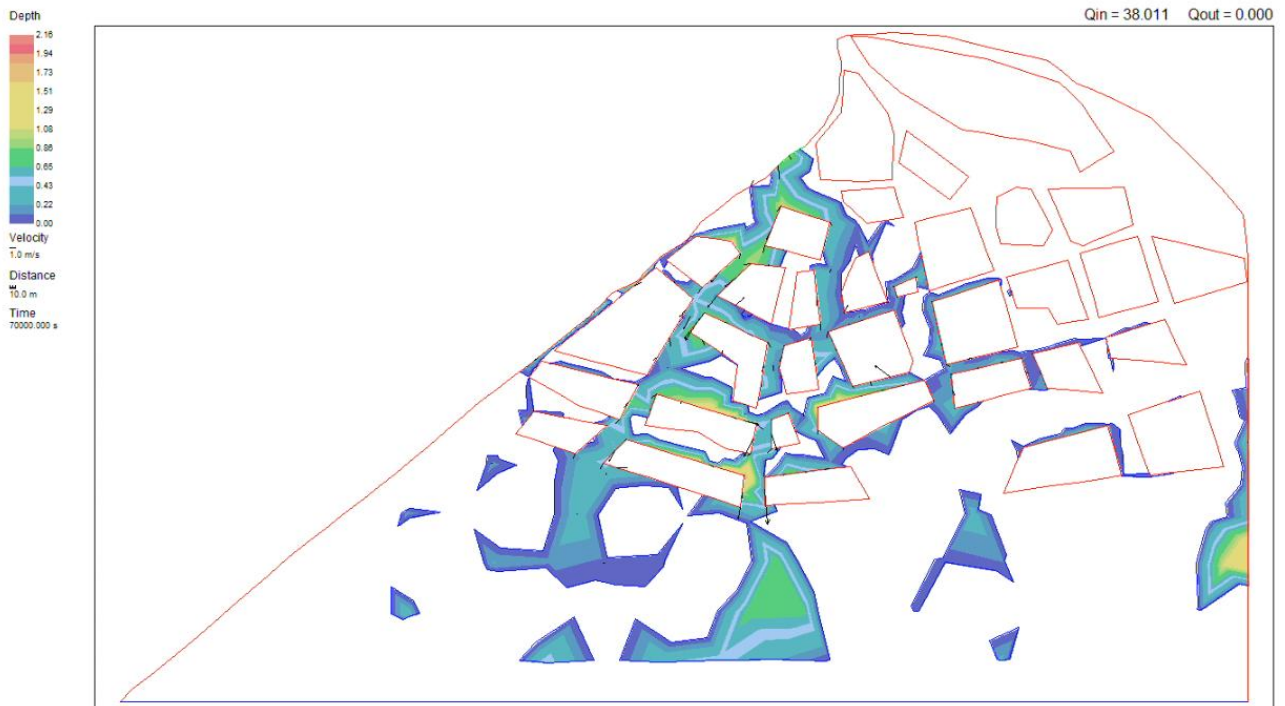


Fig. 4.2.12 Geometria base.  $S=0.1$ . Istante 70000 secondi (19 ore e 27 minuti)

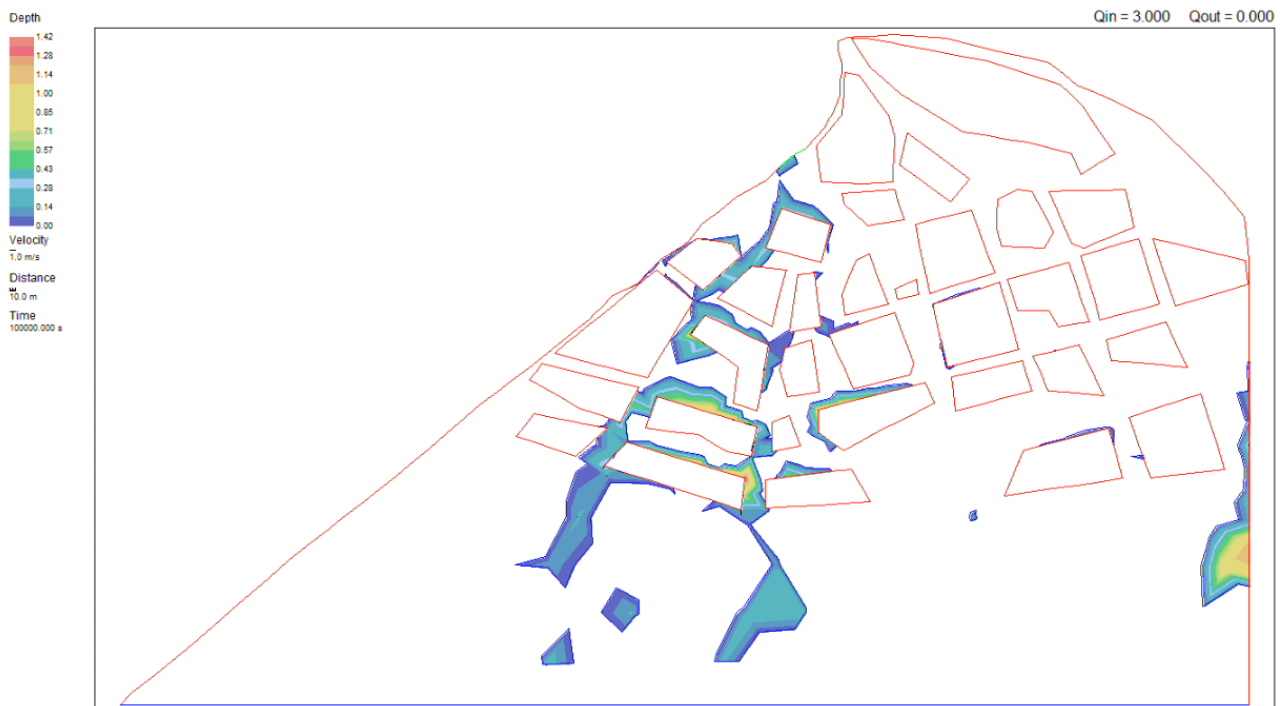


Fig. 4.2.13 Geometria base.  $S=0.1$ . Istante 100000 secondi (27 ore e 47 minuti)





Fig. 4.2.14 Geometria base.  $S=0.001$ . Istante 1000 secondi (circa 17 minuti)

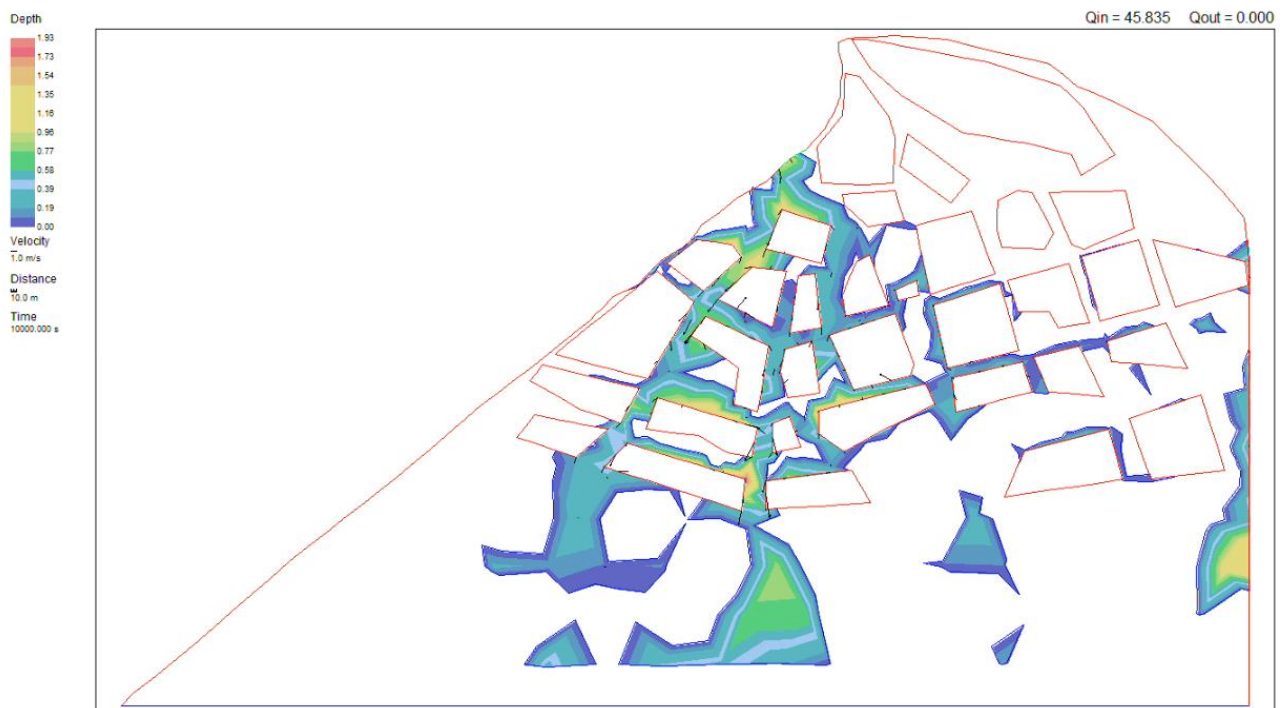


Fig. 4.2.15 Geometria base.  $S=0.001$ . Istante 10000 secondi (2 ore e 47 minuti)

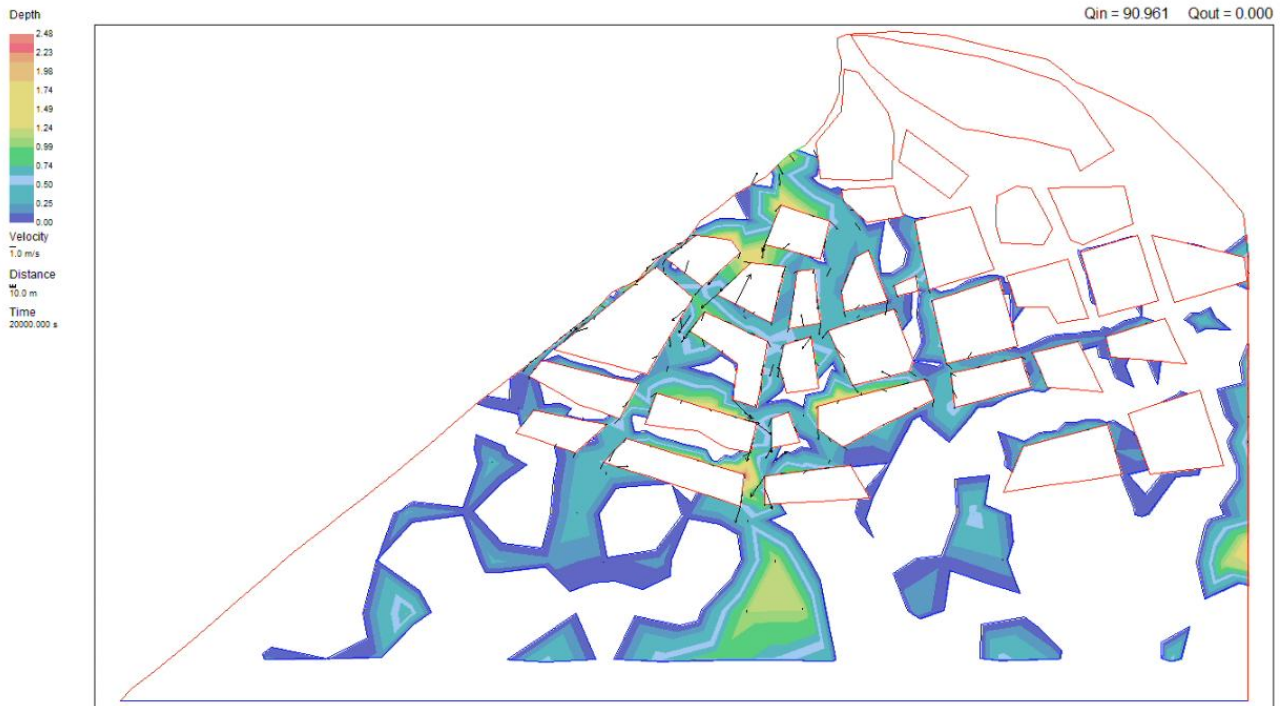


Fig. 4.2.16 Geometria base.  $S=0.001$ . Istante 20000 secondi (5 ore e 33 minuti)

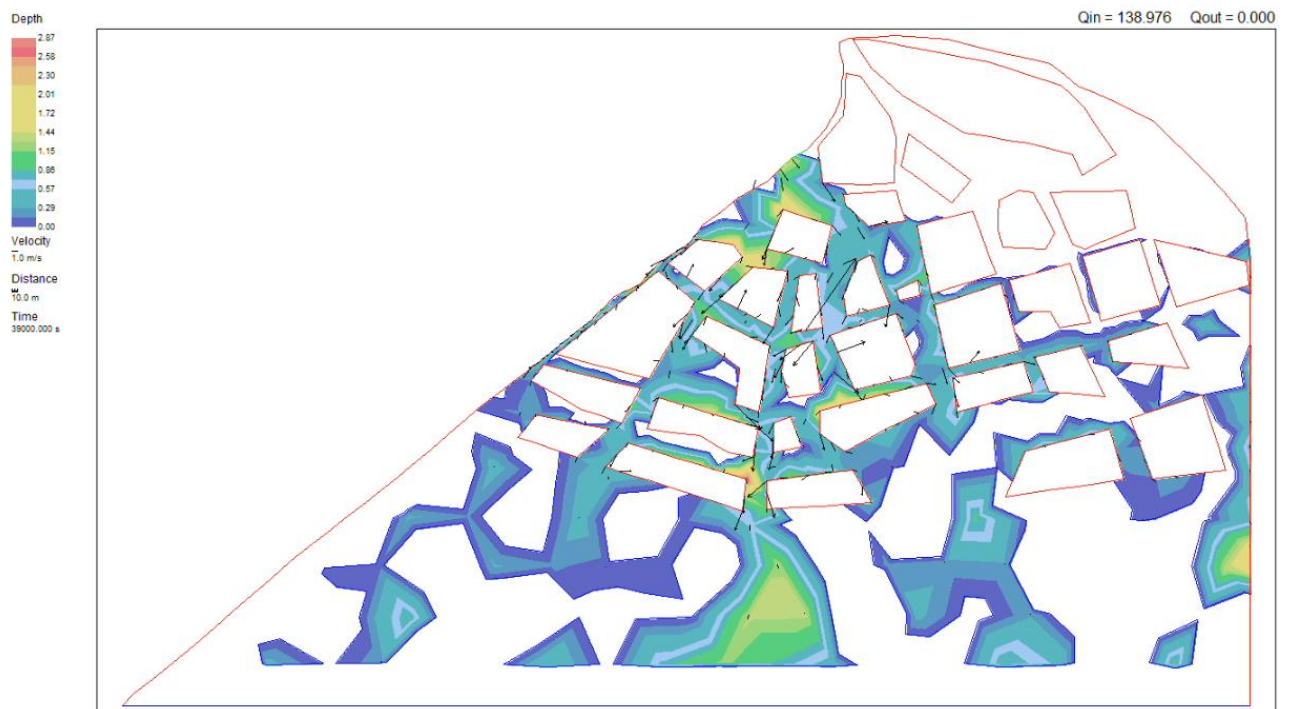


Fig. 4.2.17 Geometria base.  $S=0.001$ . Istante 39000 secondi (10 ore e 50 minuti, istante più critico)

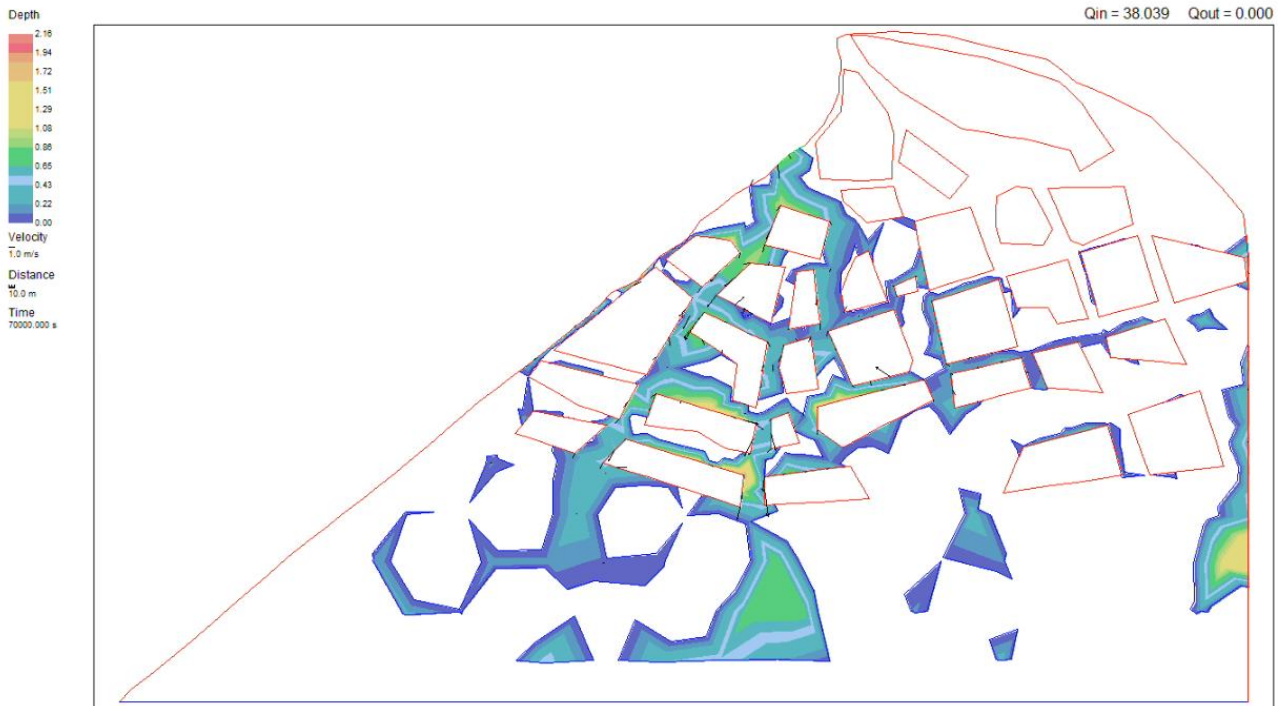


Fig. 4.2.18 Geometria base.  $S=0.001$ . Istante 70000 secondi (19 ore e 27 minuti)

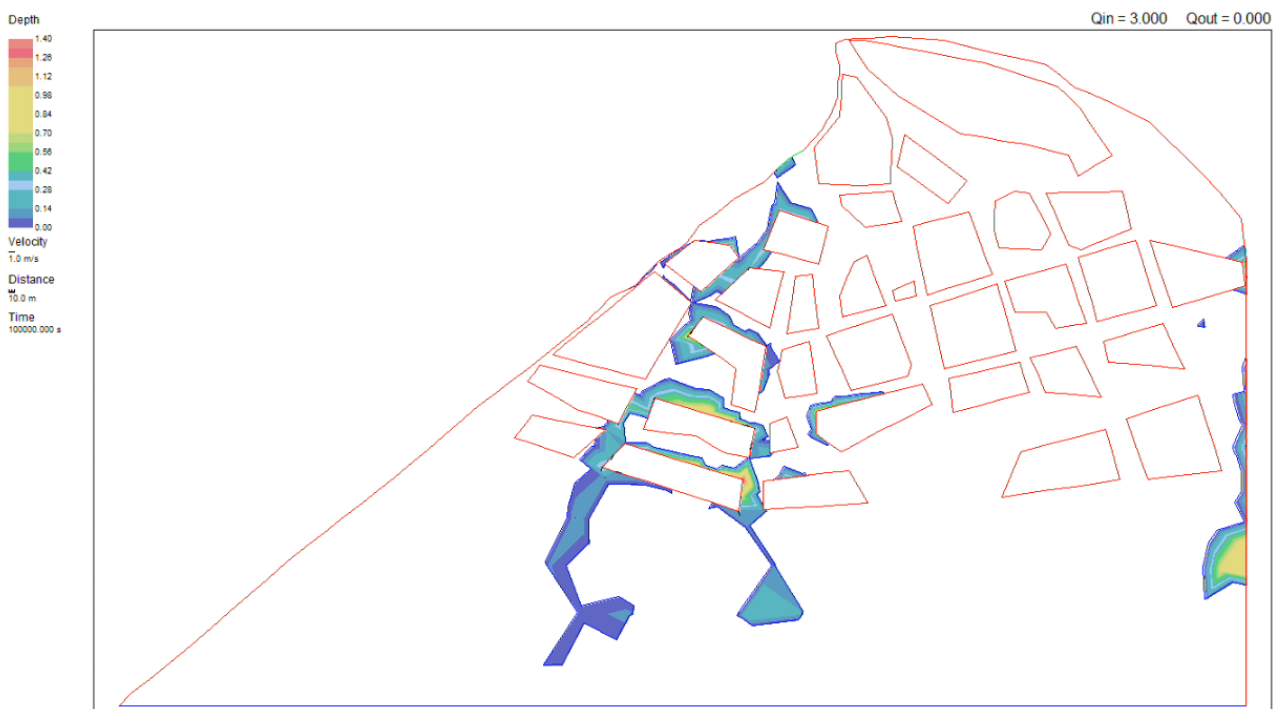


Fig. 4.2.19 Geometria base.  $S=0.001$ . Istante 100000 secondi (27 ore e 47 minuti)

Risulta evidente a una prima visione l'anomalia di alcuni vettori velocità riportati da River2D. Questo software riporta i vettori velocità in scala, ma in alcuni punti, a causa probabilmente della complessità del modello, il calcolo diviene instabile e puntualmente, in alcuni istanti, appaiono velocità molto alte e con direzioni poco verosimili, ma questi i vettori sono appariscenti perché più grandi in modulo degli altri. Tali valori vengono scartati nella stima delle velocità massime per costruire le mappe di hazard o per la stima dei danni agli edifici.

Dal confronto tra i due modelli si notano differenze piuttosto accentuate nei primi istanti della simulazione, dove si nota come, con un coefficiente di immagazzinamento tendente a zero, l'acqua si propaga molto più rapidamente, dato che il terreno è quasi impermeabile, mentre nel caso con  $S=0.1$  parte più consistente dell'acqua viene invasata nel suolo, ma col passare del tempo tali differenze tendono a diventare trascurabili. Il processo è infatti molto lungo, mentre il terreno si satura in un tempo relativamente breve rispetto alla durata totale dell'evento. Nel momento di massima criticità dell'evento, ovvero all'istante 39000 secondi, le differenze tra le altezze d'acqua nei due modelli diventano molto piccole e non si compie un grande errore a trascurarle. Si noti che l'istante di maggior criticità dell'allagamento in città circa coincide temporalmente col picco dell'idrogramma entrante, probabilmente a causa del fatto che l'acqua scorre via velocemente in questo tipo di alluvione modellata su un'area urbana in pendenza, tendendo a evitare di accumularsi.

Se ne conclude che per un evento di così lunga durata, essendo interessati soprattutto ai valori di altezza massima in ciascun punto, per la stima del danno sugli edifici, utilizzare  $S=0.1$  o  $S$  tendente a zero non comporta sostanziali differenze proprio perché il terreno si satura in un tempo molto più breve della durata dell'evento.

## Analisi con geometria densa

Si simula ora l'allagamento con il modello a geometria densa con il parametro  $S=0.1$ . I video e i risultati ottenuti al variare del tempo in diversi punti della città sono in allegato.

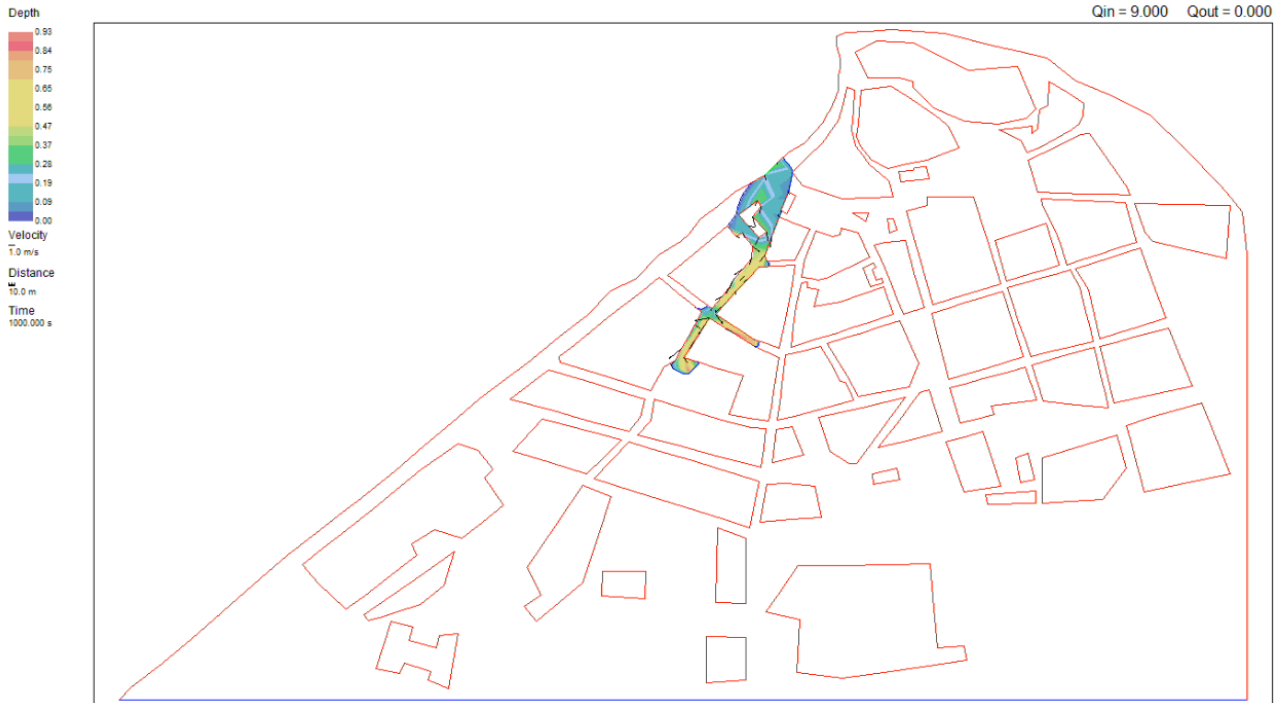


Fig. 4.2.20 Geometria densa.  $S=0.1$ . Istante 1000 secondi (circa 17 minuti)



Fig. 4.2.21 Geometria densa.  $S=0.1$ . Istante 10000 secondi (2 ore e 47 minuti)



Fig. 4.2.22 Geometria densa.  $S=0.1$ . Istante 20000 secondi (5 ore e 33 minuti)

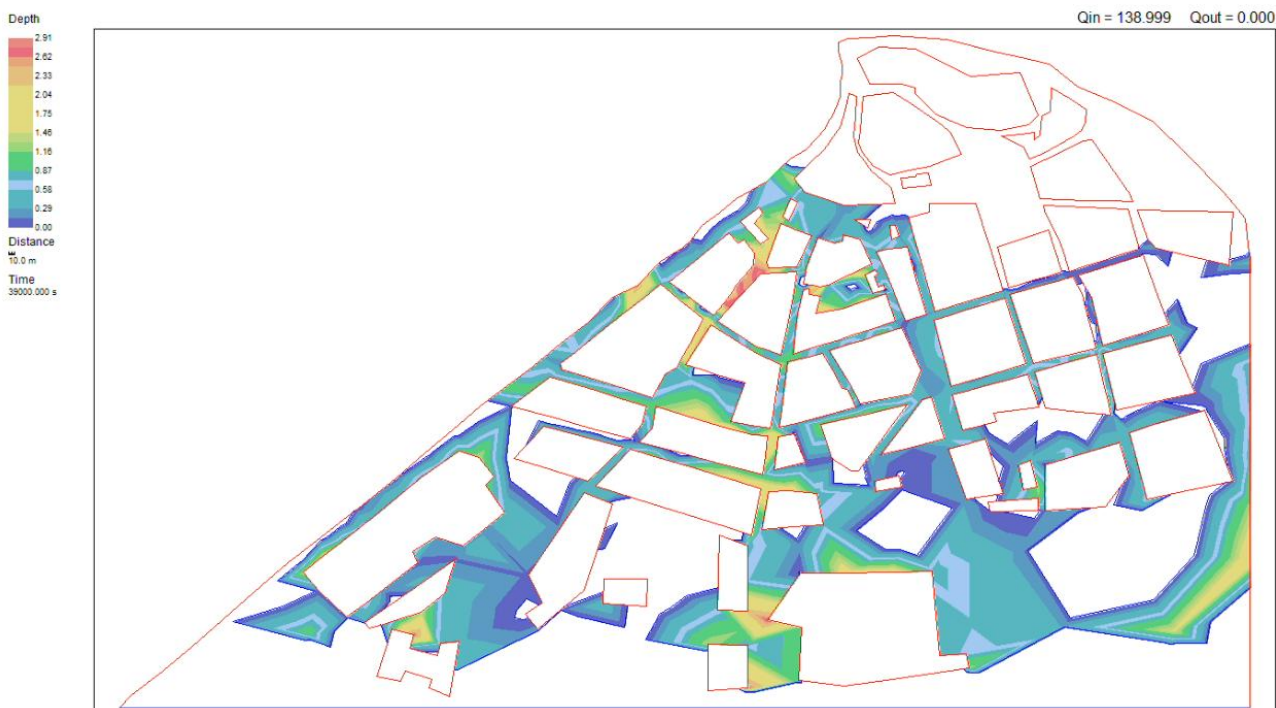
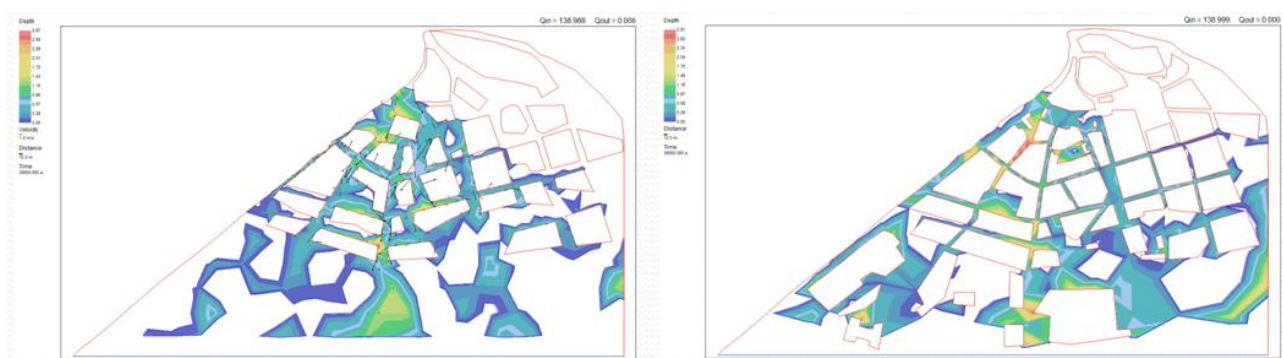


Fig.4.2.23 Geometria densa.  $S=0.1$ . Istante 39000 secondi (10 ore e 50 minuti, istante più critico)

L'analisi viene eseguita solo fino poco dopo l'istante più critico 39000 secondi, poi il software non è più in grado di eseguire il calcolo, dunque la fase di esaurimento non è mostrata. Si hanno comunque informazioni sufficienti per la stima del danno sugli edifici potendo rilevare altezza e velocità massime dell'acqua anche negli istanti di massima criticità dello scenario. Non è possibile ricavare direttamente la durata dell'allagamento in ciascun punto non avendo a disposizione dati sulla fase di esaurimento del processo.

Si confrontano ora i risultati ottenuti dai modelli finora proposti della città di Sondrio con diverse configurazioni geometriche: modello a geometria base e modello a geometria densa.

Nel modello a geometria densa, a causa della presenza di strade più strette rispetto a quelle del modello a geometria base, si notano in generale altezze d'acqua più alte, quantomeno nella fase di picco dell'evento (10/11 ore) dopo l'inizio dello sfioro, mentre la propagazione dell'onda è generalmente più rapida. Nel modello a geometria densa inoltre l'acqua tende a espandersi di più anche lateralmente, cioè nella zona Est della città. Ciò implica che molti edifici in tale area urbana, che nello scenario col modello a geometria base non risultano colpiti dall'alluvione, nel modello a geometria densa invece lo sono, dunque nel modello a geometria densa un'area maggiore di città subisce allagamento. Probabilmente anche a causa di questa diffusione laterale dell'acqua nel modello a geometria densa si notano, nella fase di picco, velocità del flusso, lungo i suoi percorsi principali (come Via Alessi o Via Caimi), generalmente inferiori a quelle rilevate dall'analisi a geometria base. Si può in generale concludere che dal modello a geometria densa si prevede uno scenario di allagamento più gravoso che nel modello a geometria base. Si tenga però presente che configurazioni geometriche diverse implicano percorsi di distribuzione dell'acqua diversi. Basti pensare alle diverse dimensioni delle vie. Si tenga quindi conto che localmente si possono avere risultati anche in parte diversi da quanto detto sopra. Le considerazioni finora fatte sono infatti da considerarsi come indicazioni su una tendenza generale in larga scala, localmente può non essere ovunque così, si può infatti avere un impatto diverso a seconda della configurazione scelta.



*Fig. 4.2.24 Confronto tra modello a geometria base (sinistra) e modello a geometria densa (destra) in istante critico dell'allagamento.*

### *Analisi con geometria raffinata*

Si simula ora l'allagamento con il modello a geometria raffinata con il parametro  $S=0.001$ . Si ricorda che, a differenza che nei modelli proposti in precedenza, come condizione al contorno di monte non si usa l'idrogramma di sfioro del Mallero ma una portata costante di  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , dunque è modellata una violenta onda di piena (shock wave). I video e i risultati ottenuti al variare del tempo in diversi punti della città sono in allegato.



*Fig. 4.2.25 Geometria raffinata.  $S=0.001$ . Istante 100 secondi (1 minuto)*



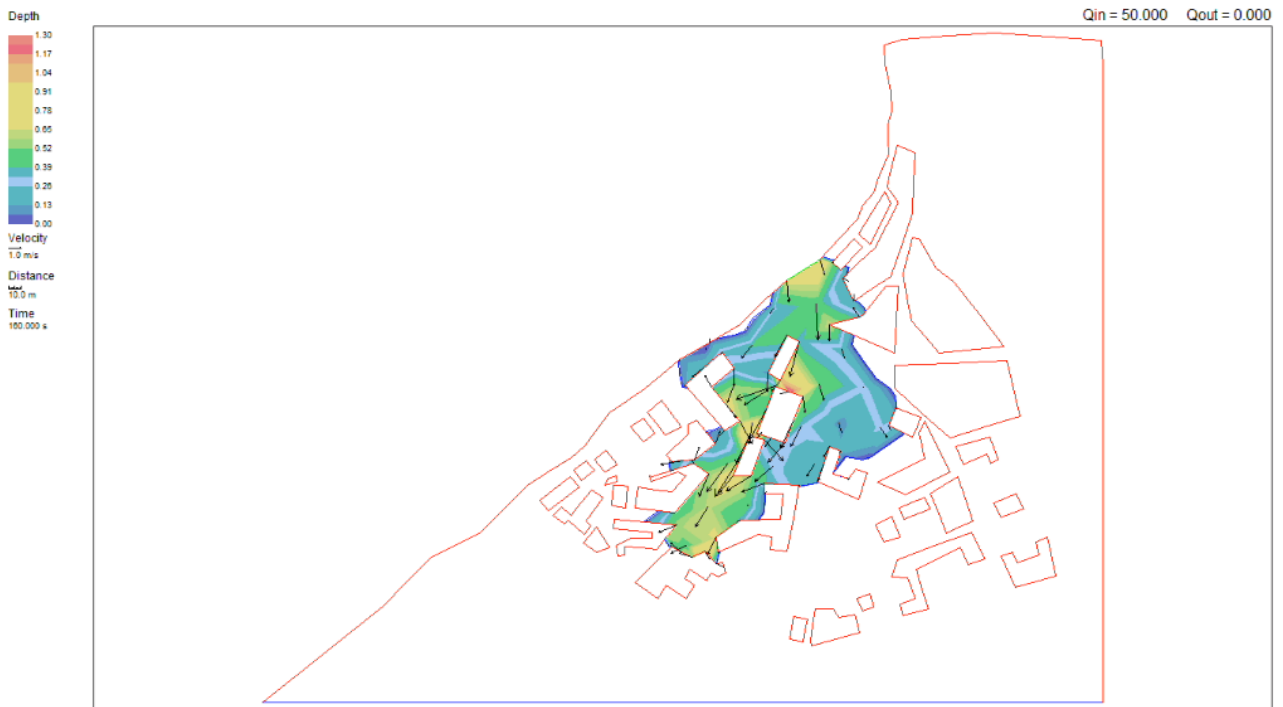


Fig. 4.2.26 Geometria raffinata.  $S=0.001$ . Istante 180 secondi (3 minuti)

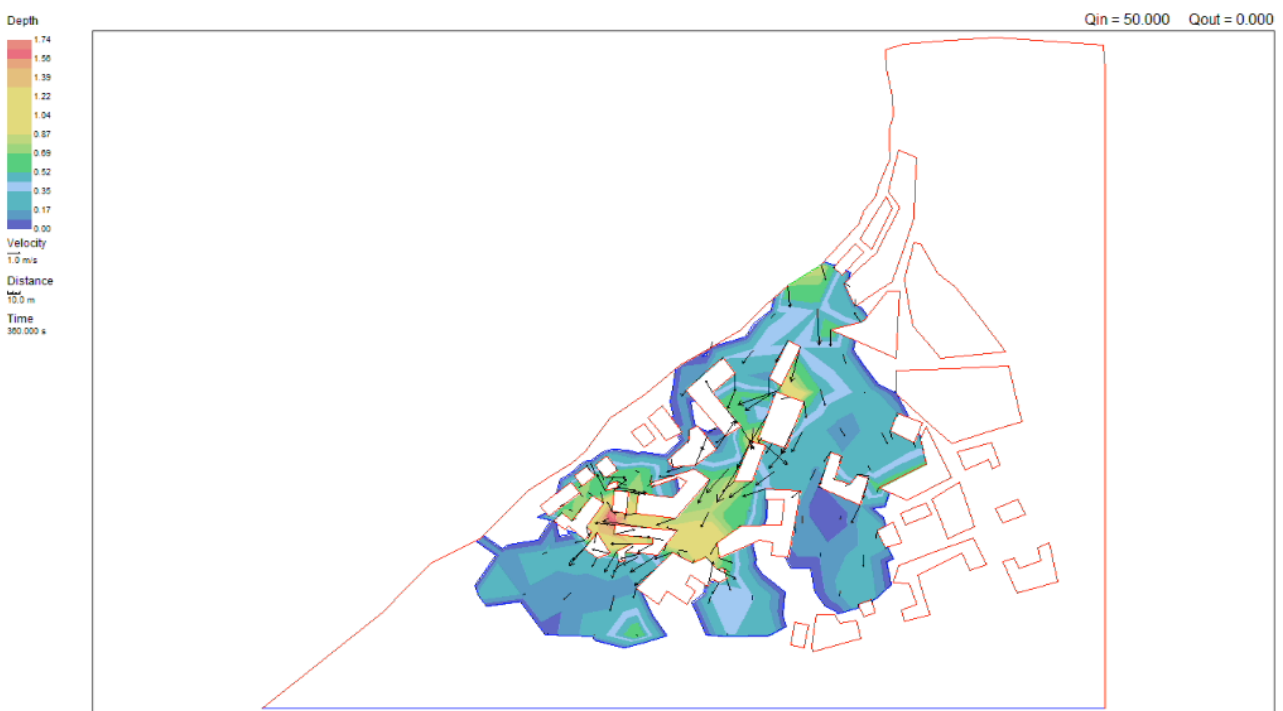


Fig. 4.2.27 Geometria raffinata.  $S=0.001$ . Istante 380 secondi (6 minuti e 20 secondi)

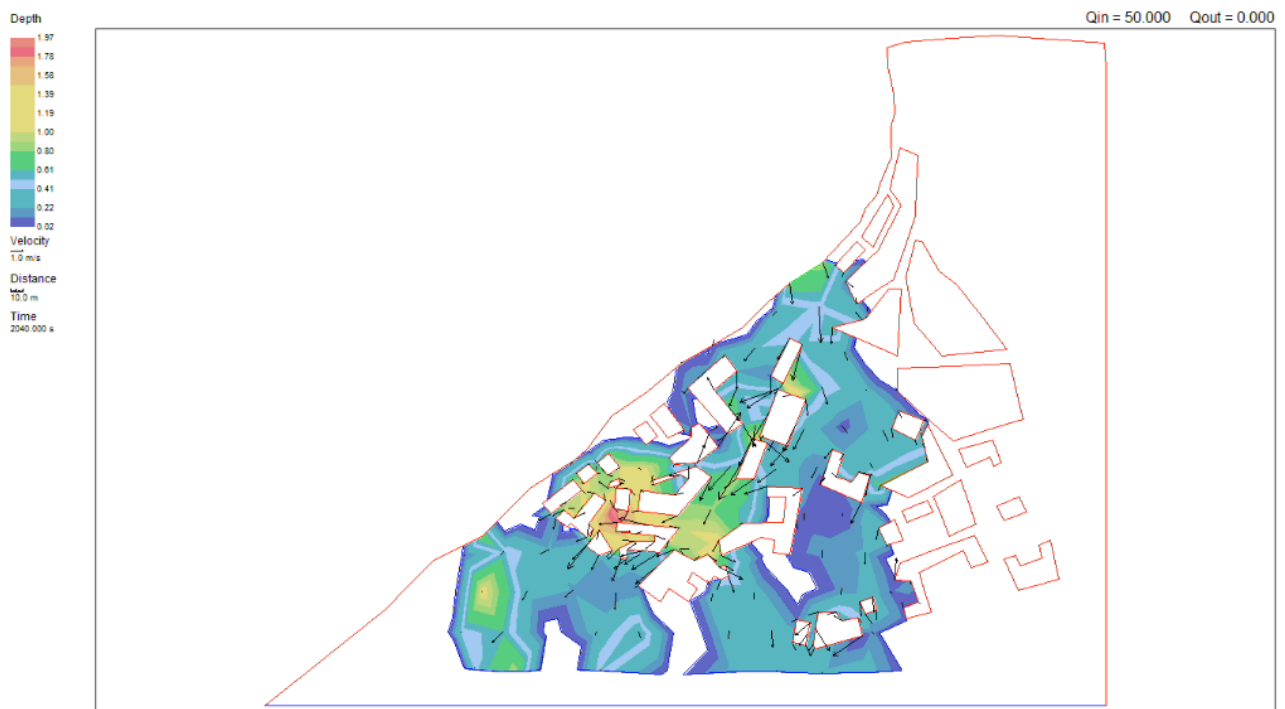


Fig. 4.2.28 Geometria raffinata.  $S=0.001$ . Istante 2000 secondi (33 minuti e 20 secondi)

Il calcolo si arresta dopo 2060 secondi.

L'onda di piena, molto violenta, si propaga rapidamente negli istanti iniziali del processo, il quale tende poi a stabilizzarsi, dopo circa 400 secondi, e rimanere piuttosto stabile fino all'arresto del programma.

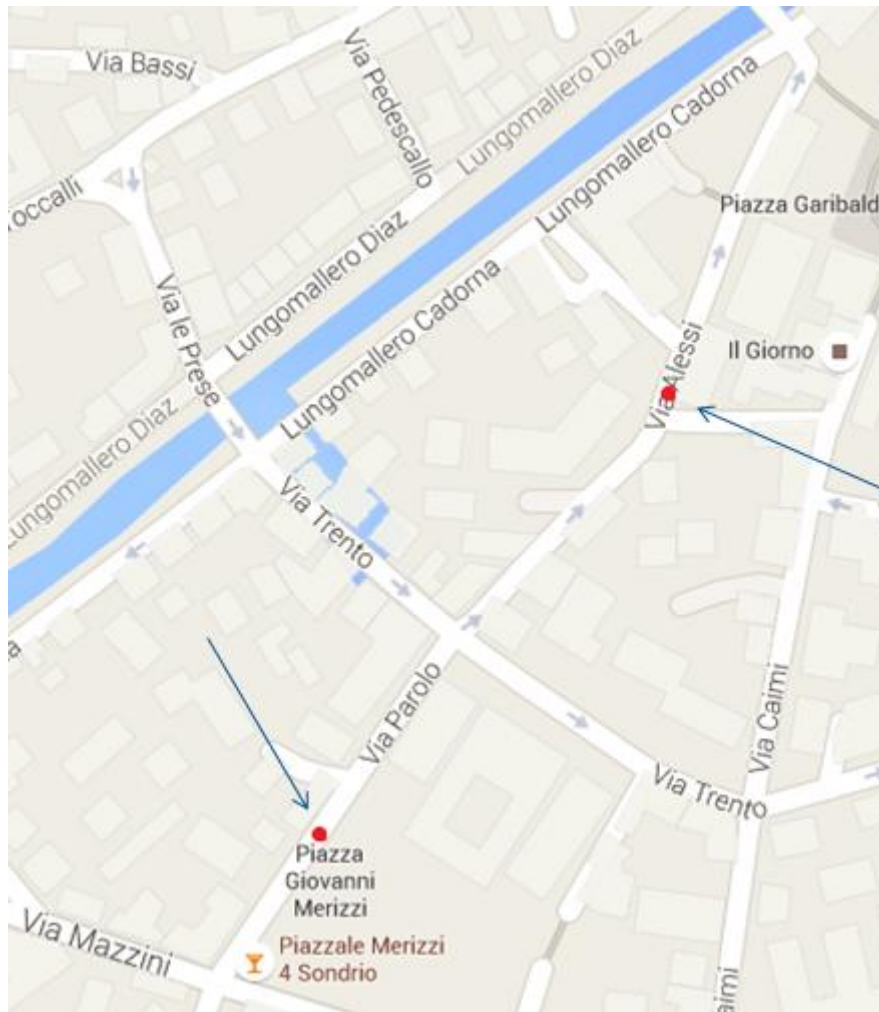
### *Analisi locale lungo Via Alessi-Via Parolo*

Dall'osservazione di entrambi i modelli si nota come l'acqua tenda a propagarsi lungo percorsi preferenziali, soprattutto lungo le strade in direzione Nord-Sud, dove la pendenza è maggiore; in particolare si nota che il percorso principale dell'acqua è lungo Via Alessi, sia a causa della forte pendenza che caratterizza tale via sia a causa della vicinanza dell'imbocco di tale strada allo sfioro del Mallero. Si analizzerà poi in dettaglio la propagazione dell'onda di alluvione lungo tale percorso principalmente per due ragioni: perché Via Alessi è un delle zone colpite più severamente dall'alluvione e perché questa strada rappresenta il percorso preferenziale dell'acqua, come entrambi i modelli mostrano concordemente.



*Fig. 4.2.29 Imbocco di Via Alessi. Notare la pendenza accentuata della strada, che in alcuni tratti sfiora il 5%.*

Via Alessi prosegue verso Sud cambiando il proprio nome in Via Parolo dopo l'incrocio con Via Trento. Si propone un'analisi di dettaglio delle altezze di acqua, delle portate e delle velocità in due punti significativi, uno in Via Alessi e uno in Via Parolo al fine di poter trarre delle conclusioni quantitative e di validità locale lungo tale percorso, mentre finora sono state fatte considerazioni quasi solo a livello globale su larga scala.



*Fig. 4.2.30 Posizione di due punti di controllo: il più a Nord in Via Alessi (circa dove è stata scattata la foto alla pagina precedente), il più a Sud in Via Parolo.*

Si riportano i risultati delle analisi eseguita in questi due punti.

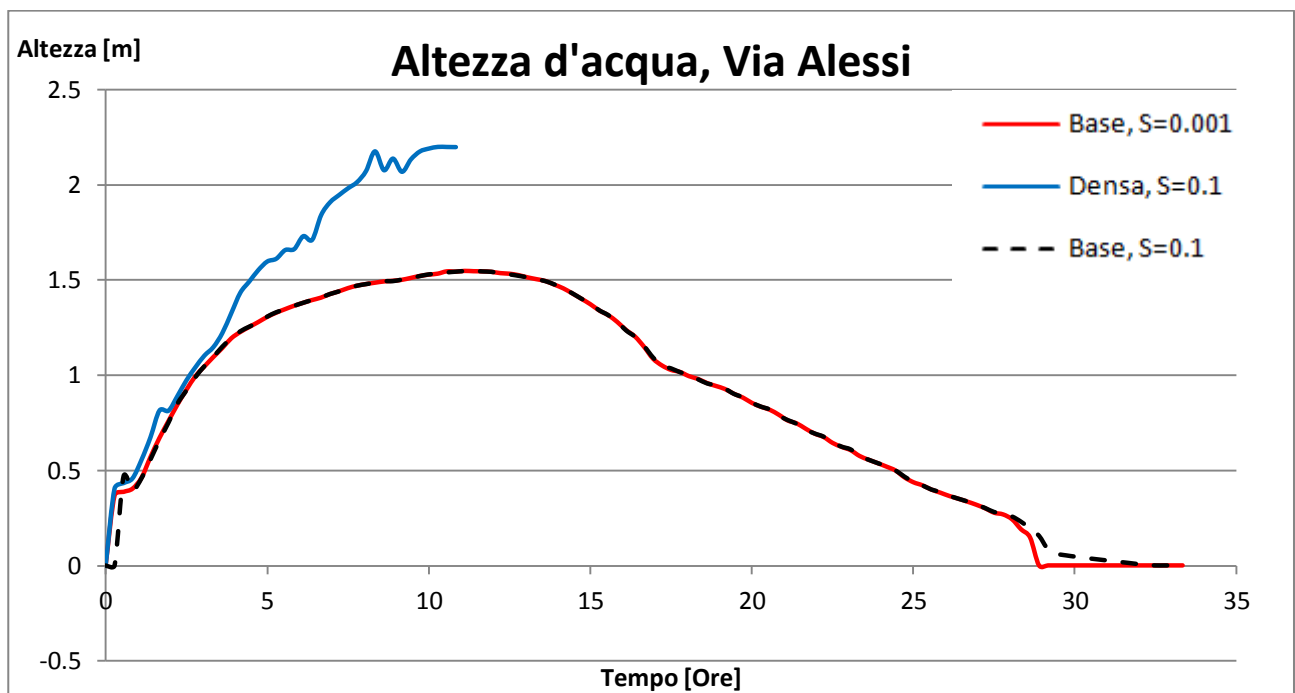


Fig. 4.2.31 Altezza d'acqua al variare del tempo, punto in Via Alessi.

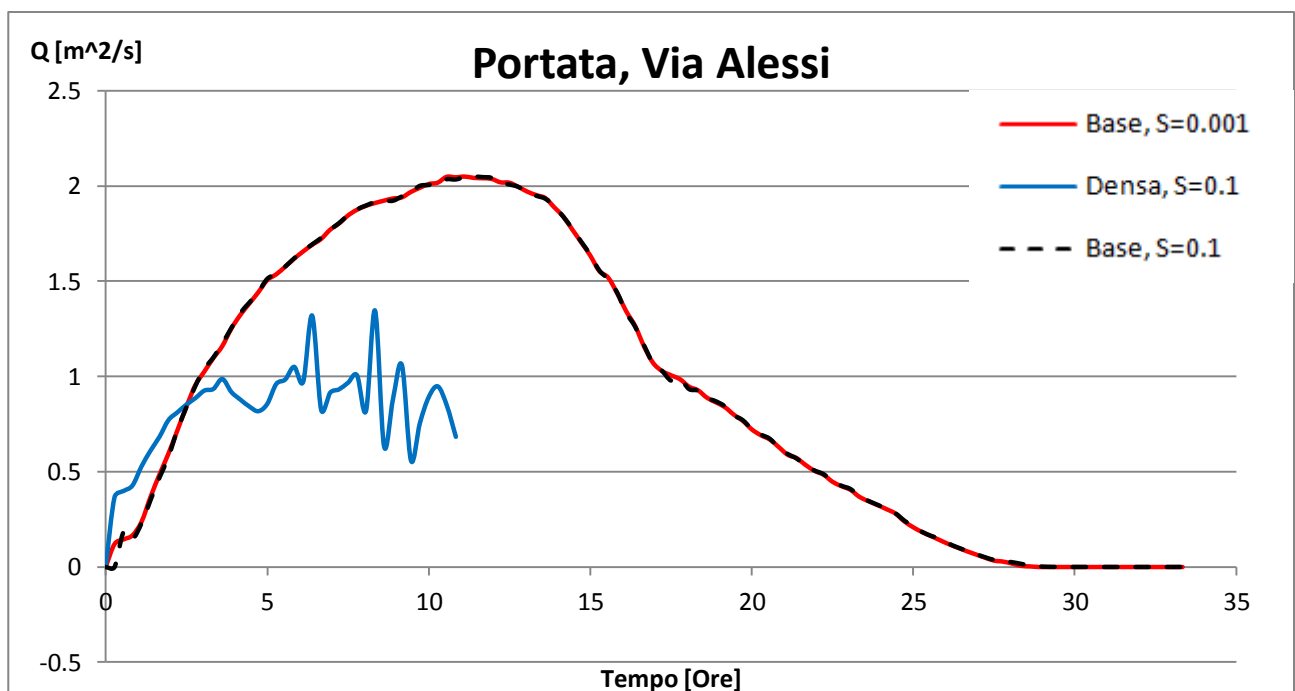


Fig. 4.2.32 Portata al variare del tempo, punto in Via Alessi.

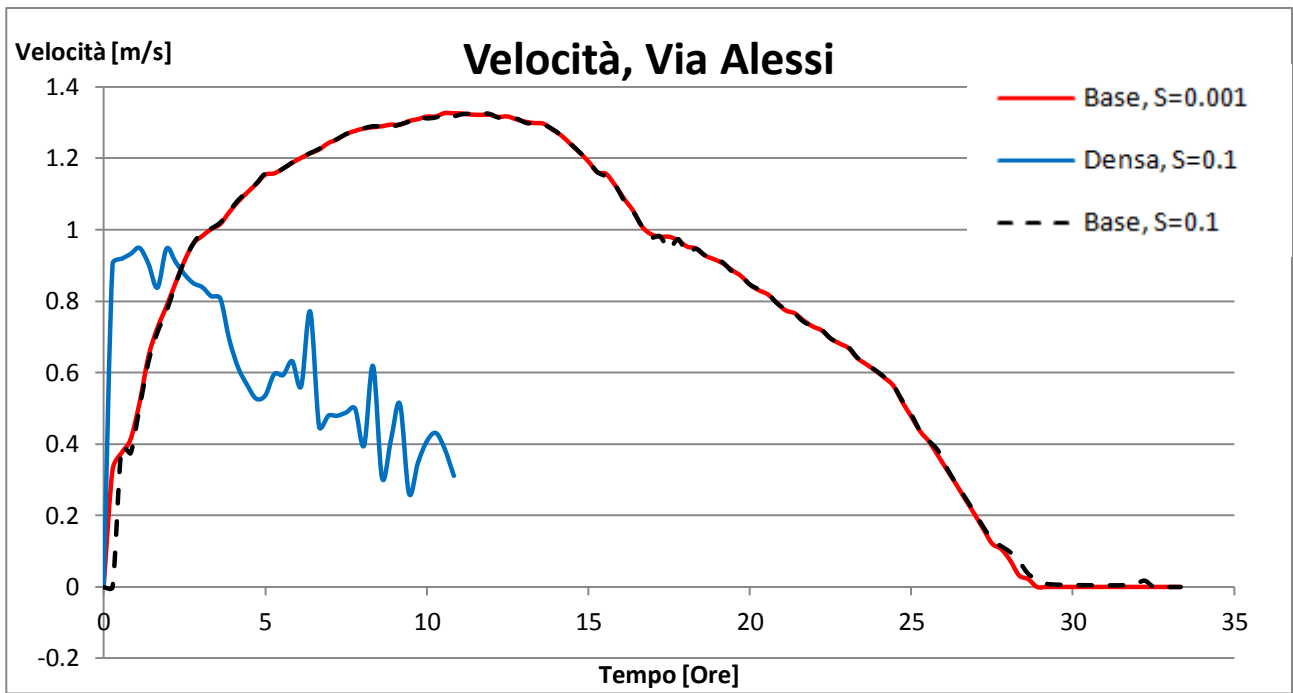


Fig. 4.2.33 Velocità al variare del tempo, punto in Via Alessi.

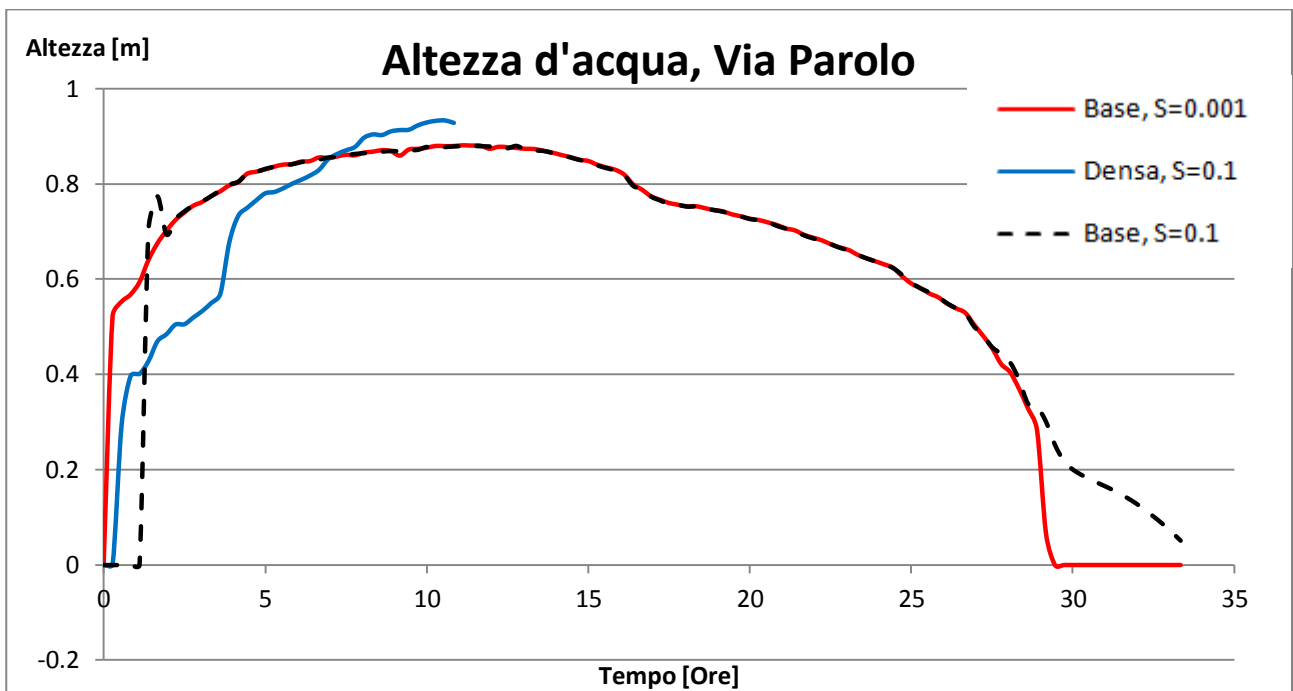


Fig. 4.2.34 Altezza d'acqua al variare del tempo, punto in Via Parolo.

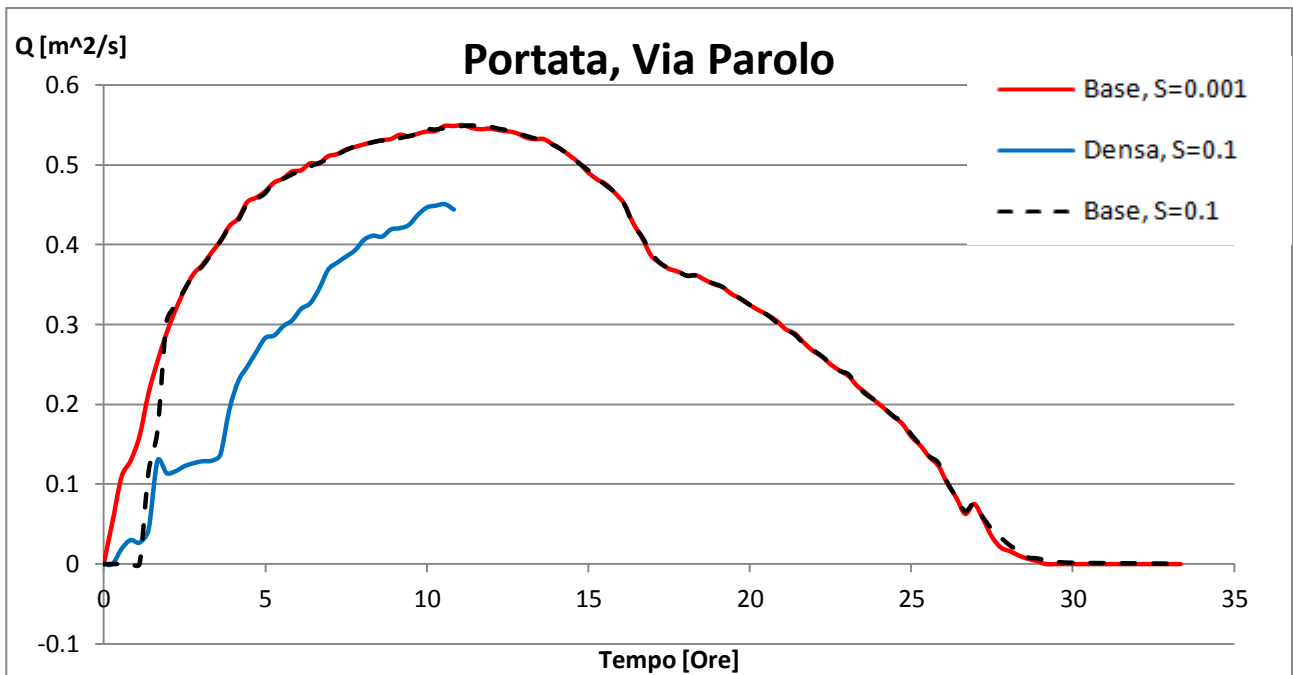


Fig. 4.2.35 Portata al variare del tempo, punto in Via Parolo.

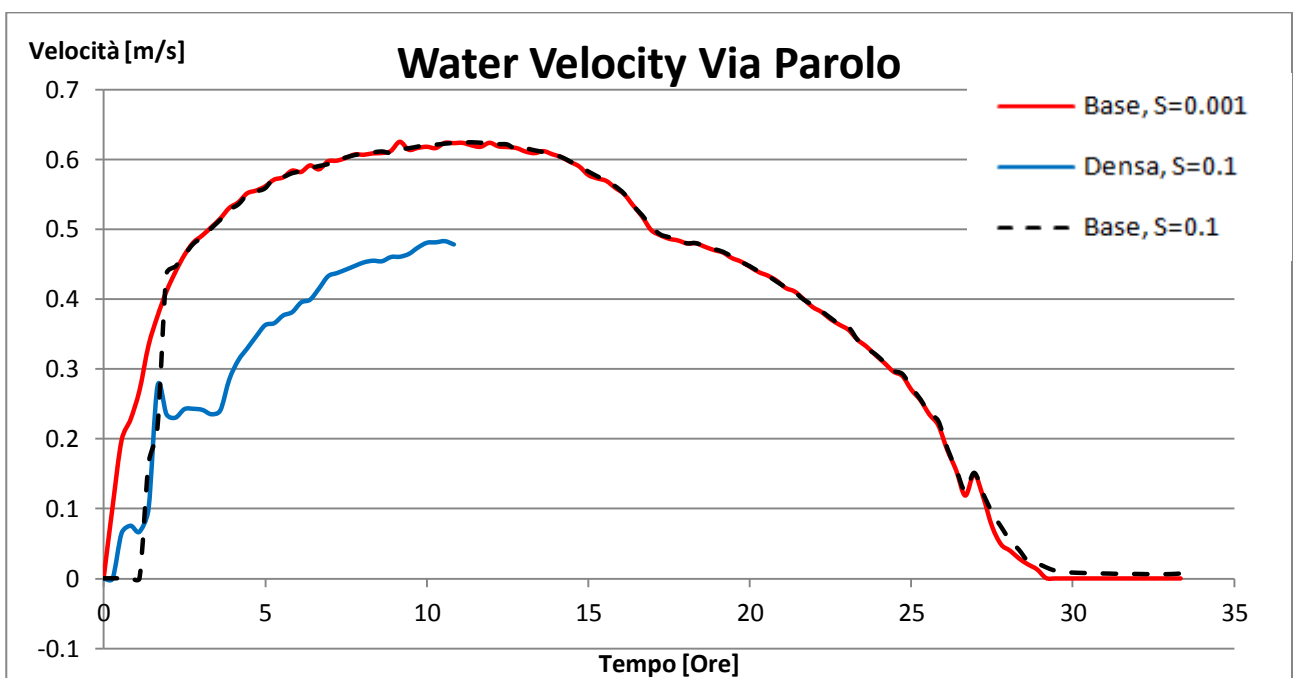


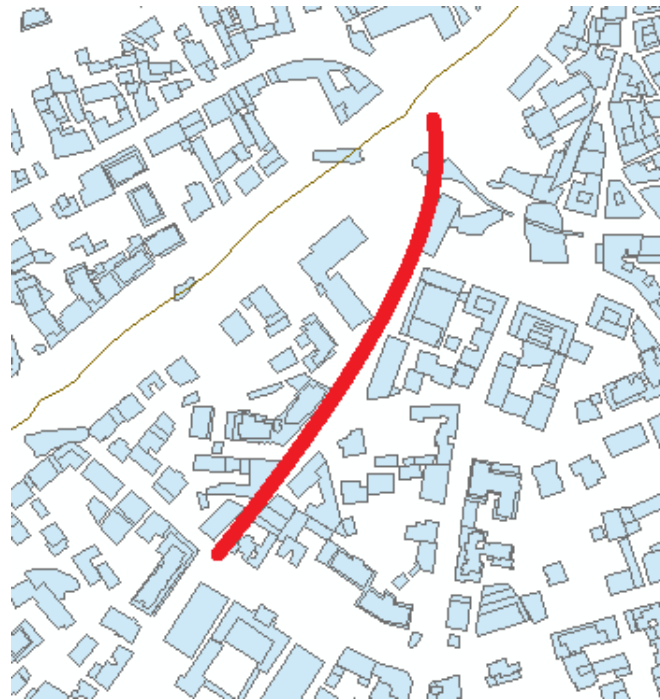
Fig. 4.2.36 Velocità al variare del tempo, punto in Via Parolo.

Come si nota dall'osservazione dei grafici, al crescere della distanza dalla sezione di ingresso dell'acqua, aumenta anche l'effetto di  $S$ . Infatti se si osserva il confronto, nel punto in Via Alessi, dei profili ottenuti da modelli a geometria base, al variare di  $S$ , si nota che essi sono molto simili, sono invece meno simili se si osserva il confronto nel punto in Via Parolo, almeno nei primi istanti dell'allagamento. I profili ottenuti dal modello a geometria densa sono invece piuttosto diversi da quelli ottenuti dai modelli a geometria base, come atteso.

### *Propagazione dell'onda lungo Via Alessi*

Si studia la propagazione di un'onda di alluvione lungo Via Alessi. Si utilizza una portata costante di  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  come condizione al contorno di monte che permette di osservare con chiarezza un fronte d'onda di buone dimensioni e di poter usare il modello a geometria raffinata, che con una portata entrante variabile non funzionerebbe. Un'analisi di questo tipo non permette considerazioni sui possibili danni agli edifici, dato che è usata una condizione al contorno diversa da quella prevista dallo scenario, ma permette di capire quale tra il modello a geometria base e il modello a geometria densa dà risultati più simili al modello a geometria raffinata. Si suppone che quest'ultimo possa essere il meglio approssimante la realtà in tale ristretta zona della città (quantomeno lo è da un punto di vista geometrico), dunque di avere indicazioni su quale dei due modelli della città intera meglio descrive un comportamento locale e dunque poter essere considerato più accurato, quantomeno in tale zona della città.

Si definisce un percorso lungo Via Alessi, fino all'incrocio con Via Trento, e si fissano 9 punti di controllo lungo quest'ultimo. Tra il primo e l'ultimo punto c'è una distanza, lungo l'ascissa curvilinea che segue tale via, di circa 270 metri.



*Fig. 4.2.37 Percorso in Via Alessi lungo il quale si studia la propagazione dell'onda.*



Si riporta la posizione della piezometrica, ovvero dell'onda di alluvione, lungo tale percorso, per degli istanti di tempo significativi per il modello a geometria base, densa e raffinata del centro città (tempi in secondi e linea tratteggiata indica il livello del suolo).

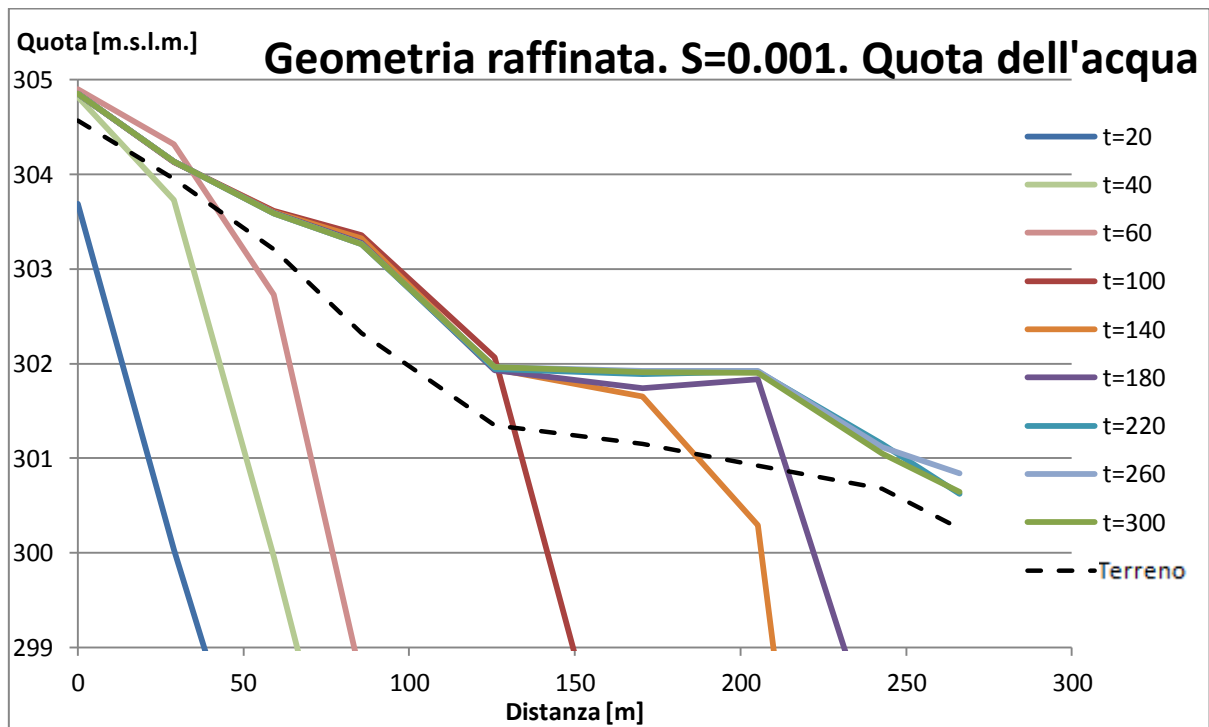


Fig. 4.2.38 Quota dell'acqua lungo Via Alessi in alcuni istanti temporali. Geometria raffinata, S=0.001.

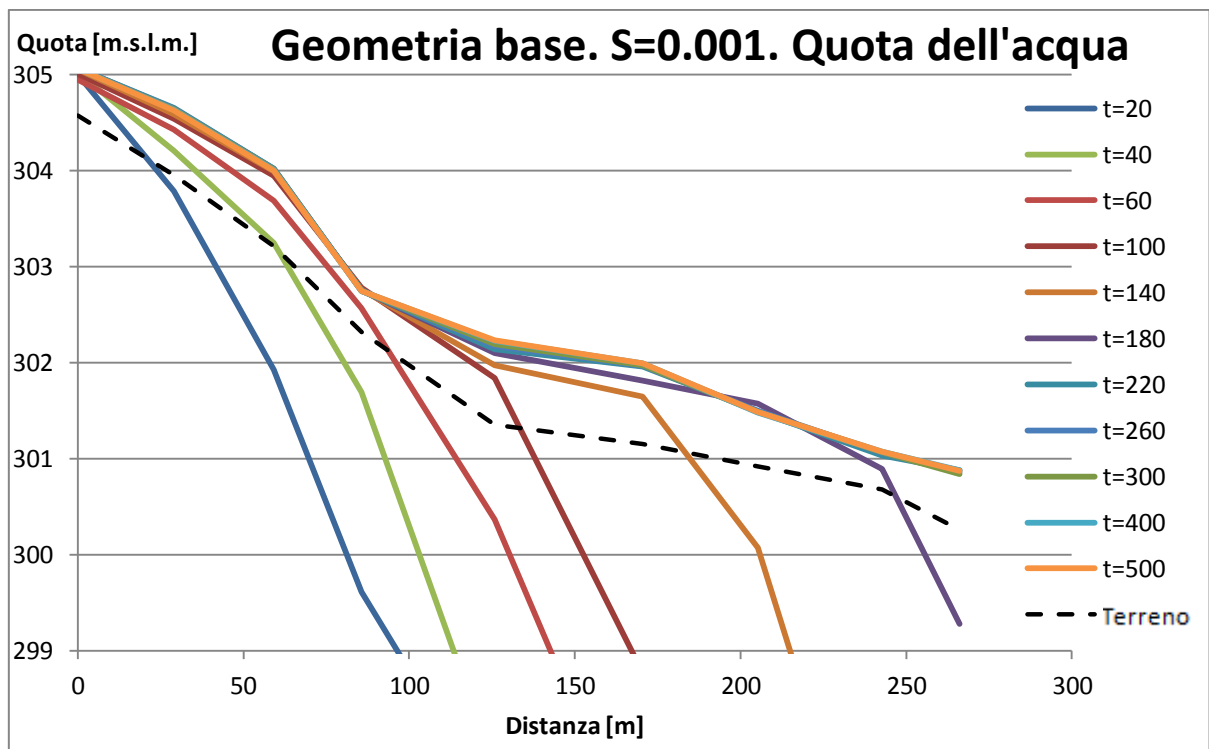


Fig. 4.2.39 Quota dell'acqua lungo Via Alessi in alcuni istanti temporali. Geometria base, S=0.001.

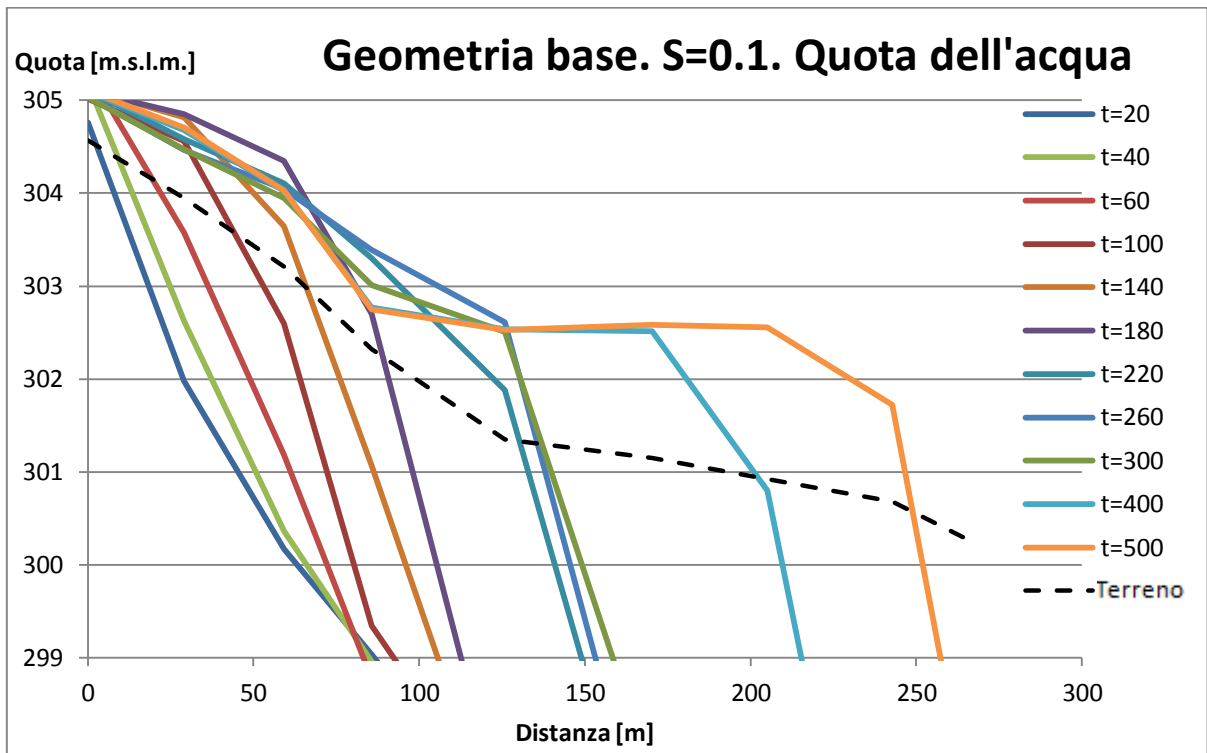


Fig. 4.2.40 Quota dell'acqua lungo Via Alessi in alcuni istanti temporali. Geometria base, S=0.1.

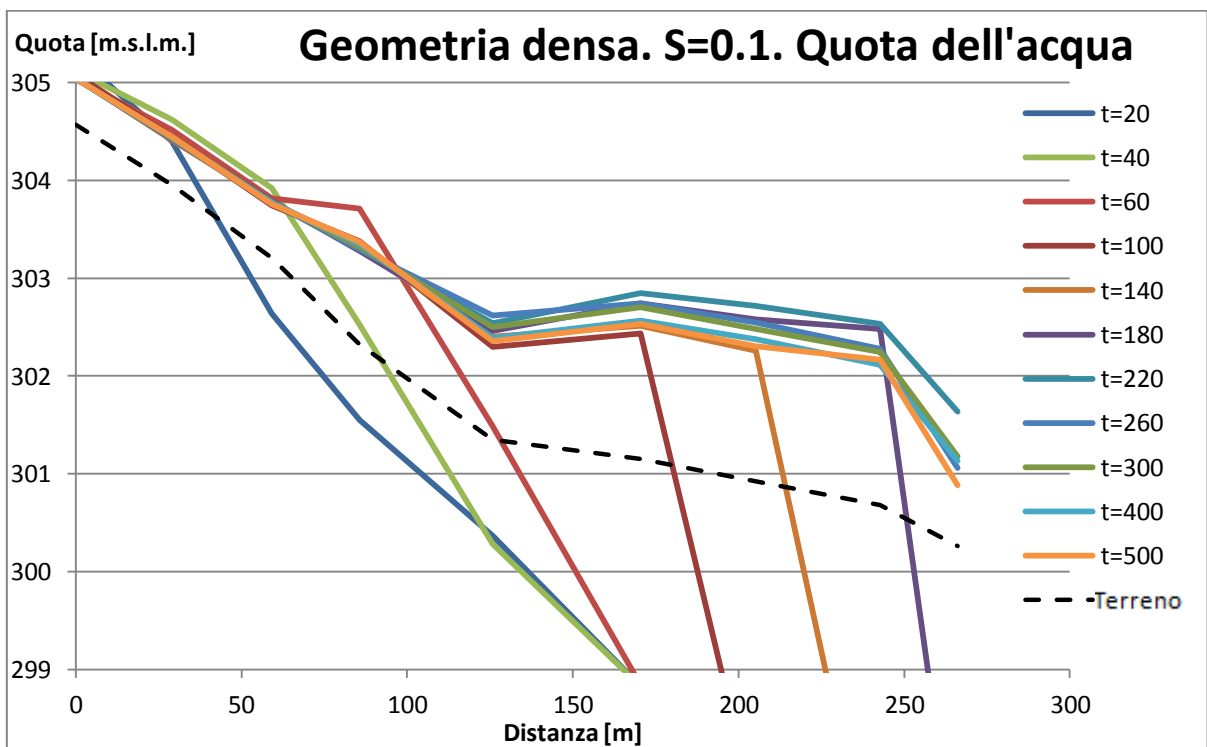


Fig. 4.2.41 Quota dell'acqua lungo Via Alessi in alcuni istanti temporali. Geometria densa, S=0.1.

Si riporta ora un confronto fissato l'istante  $t=180$  secondi (3 minuti).

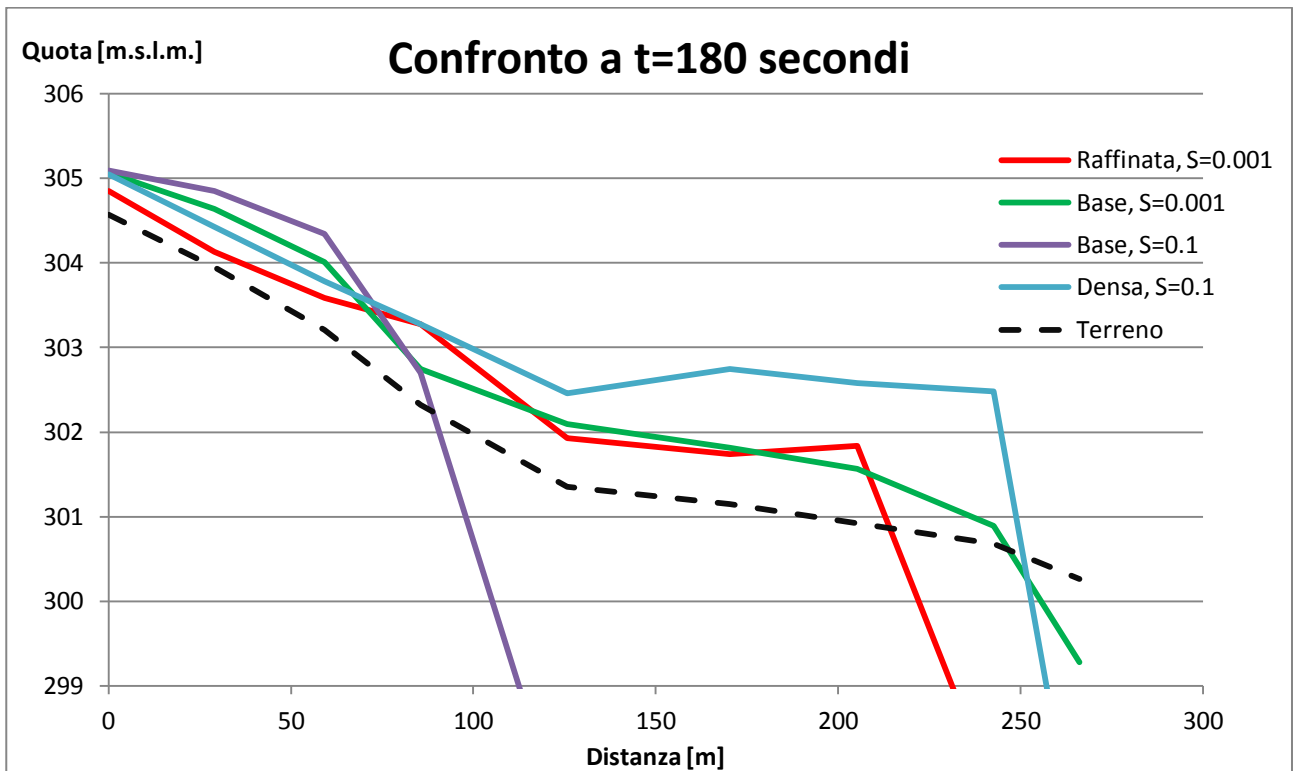


Fig. 4.2.42 Quota dell'acqua lungo Via Alessi all'istante 180 secondi per i diversi modelli.

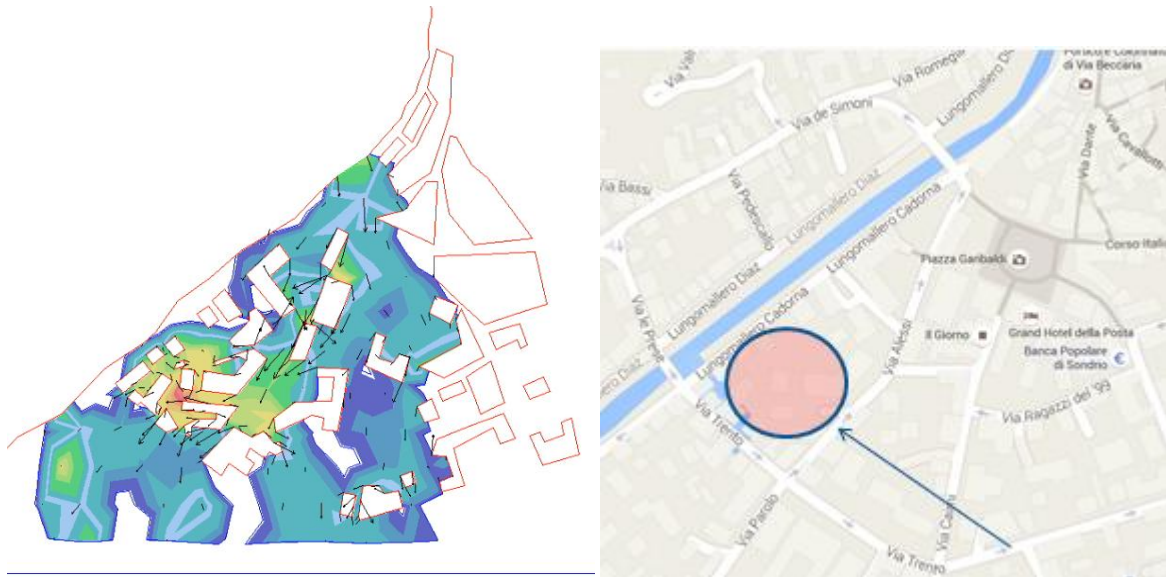
Dall'osservazione, in relazione al modello a geometria raffinata con  $S=0.001$ , dei profili ottenuti dagli altri modelli, si traggono le seguenti conclusioni. Il modello con geometria base e  $S=0.1$  è il meno simile a quello a geometria raffinata con  $S=0.001$ , la propagazione dell'onda risulta infatti essere molto più lenta rispetto al caso di riferimento. I modelli a geometria base con  $S=0.001$  e a geometria densa con  $S=0.1$  approssimano meglio il modello di riferimento, ma entrambi mostrano una propagazione dell'onda più rapida. Il modello con geometria base e  $S=0.1$  sottostima l'altezza d'acqua, ma di poco, dà infatti risultati prossimi a quelli del modello a geometria raffinata e  $S=0.001$ . Il modello a geometria densa e  $S=0.1$  sovrastima le altezze d'acqua commettendo un errore assoluto maggiore rispetto a quello del modello a geometria base e  $S=0.001$ , proponendo altezze d'acqua maggiori di quelle di riferimento.

	Tempo [s]	Velocità media [m/s]
Raffinata, $S=0.001$	217	1,23
Base, $S=0.001$	195	1,36
Base, $S=0.1$	513	0,52
Densa, $S=0.1$	190	1,40

Tab. 4.2.1 Tempo impiegato dall'onda per coprire tutto il percorso e velocità media per ciascuno dei 4 modelli proposti.

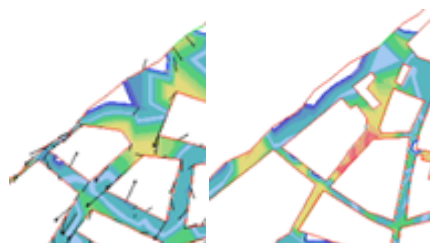
## Effetto della dimensione dei blocchi

Nei due modelli globali della città di Sondrio sono stati inseriti blocchi molto grandi, che coprono interi isolati. Questo non permette dunque di analizzare l'altezza d'acqua all'interno dell'isolato stesso se non interpolando i valori di altezza ottenuti nelle strade immaginando un andamento anche all'interno dell'isolato di altezze d'acqua simile a quello nelle strade circostanti. Analizzando il modello a geometria raffinata ci si rende conto che tale approssimazione, che sarà usata per la produzione di mappe di hazard, non sempre risulta accurata.



*Fig. 4.2.43 Modello a geometria raffinata, altezze d'acqua molto maggiori nella zona nel cerchio rispetto a quelle delle vie circostanti, ma questa informazione, seppur solo a livello qualitativo, si può avere solo da un modello localmente molto raffinato come quello proposto.*

Si nota come l'altezza d'acqua nella parte sud dell'isolato tra Lungomallero Cadorna, Via Trento e Via Alessi presenti altezze d'acqua molto superiori rispetto a quelle nelle strade circostanti lungo le vie appena nominate. Se in un modello globale come quello a geometria densa o geometria base si effettua un'interpolazione delle altezze d'acqua delle strade per approssimare l'altezza d'acqua in una posizione all'interno del blocco si commette quindi un errore piuttosto grande.



*Fig. 4.2.44 Stessa zona rappresentata in modelli a geometria rispettivamente base e densa*

Un modello molto raffinato si può costruire in River2D solo su una zona ristretta della città e comunque presenta forti instabilità e limitazioni sul calcolo. Questo problema di stima dettagliata delle altezze d'acqua in zone degli isolati lontani dalle vie principali non può purtroppo essere risolto se si modella utilizzando questo software. Si tenga presente questa limitazione nella lettura delle mappe di hazard che sono state costruite nell'unica maniera possibile in questo caso ovvero interpolando le informazioni ottenute nelle vie principali. Per il calcolo dei danni negli edifici si sceglieranno solo edifici che si affacciano su tali vie al fine di non avere risultati influenzati dall'interpolazione.

### 4.3 MAPPE DI HAZARD E CONCLUSIONI SUI MODELLI PROPOSTI

Per la creazione delle mappe di hazard sono stati estratti dati puntuali in un campione molto ampio di punti lungo le vie principali, ovvero in posizioni non coperte dagli ostacoli per cui valori di velocità e altezza d'acqua possono essere estratti dal modello. Questa operazione di estrazione dei dati su una densa nuvola di punti viene effettuata per tre modelli: il modello a geometria base con  $S=0.1$ , il modello a geometria base con  $S=0.001$  e il modello a geometria densa con  $S=0.1$ .

I valori di altezza e velocità scelti per ciascun punto sono quelli massimi che si sono registrati lungo tutto l'evento modellato (quindi per il modello a geometria densa solo fino alla fase di picco, ma è sufficiente perché è quella la fase che generalmente dà i valori massimi).

I valori puntuali di altezza e velocità così ottenuti vengono poi inseriti nel software ArcGIS e interpolati. A seguito di un'attenta analisi sul metodo di interpolazione migliore, che qui non è riportata non essendo lo scopo di questa tesi discutere metodi di interpolazione spaziale, si decide di interpolare le altezze utilizzando il metodo geostatistico denominato *kriging*, il quale, mediante un algoritmo basato sull'autocorrelazione spaziale della grandezza (ovvero sull'ipotesi che punti vicini nello spazio abbiano valori simili del parametro in analisi, più che punti lontani), fornisce una superficie generalmente smussata, ideale per un parametro che non subisce brusche variazioni in spazi brevi come l'altezza d'acqua. Le velocità, che variano molto anche in spazi brevi a causa delle irregolarità del percorso, sono interpolate col metodo *natural neighbor* per metterne in risalto questa caratteristica di variabilità, tale metodo è basato sulla costruzione dei poligoni di Thiessen e sull'assunzione che ciascun punto all'interno del poligono abbia lo stesso valore del parametro in analisi del punto al centro del poligono stesso.

Proprio a causa della diversità dei metodi di interpolazione usati, i confini delle aree di allagamento, che nello stesso modello devono essere uguali da un punto di vista logico, sono invece mostrati leggermente diversi a seconda se la mappa si basa sulle altezze massime o sulle velocità massime.

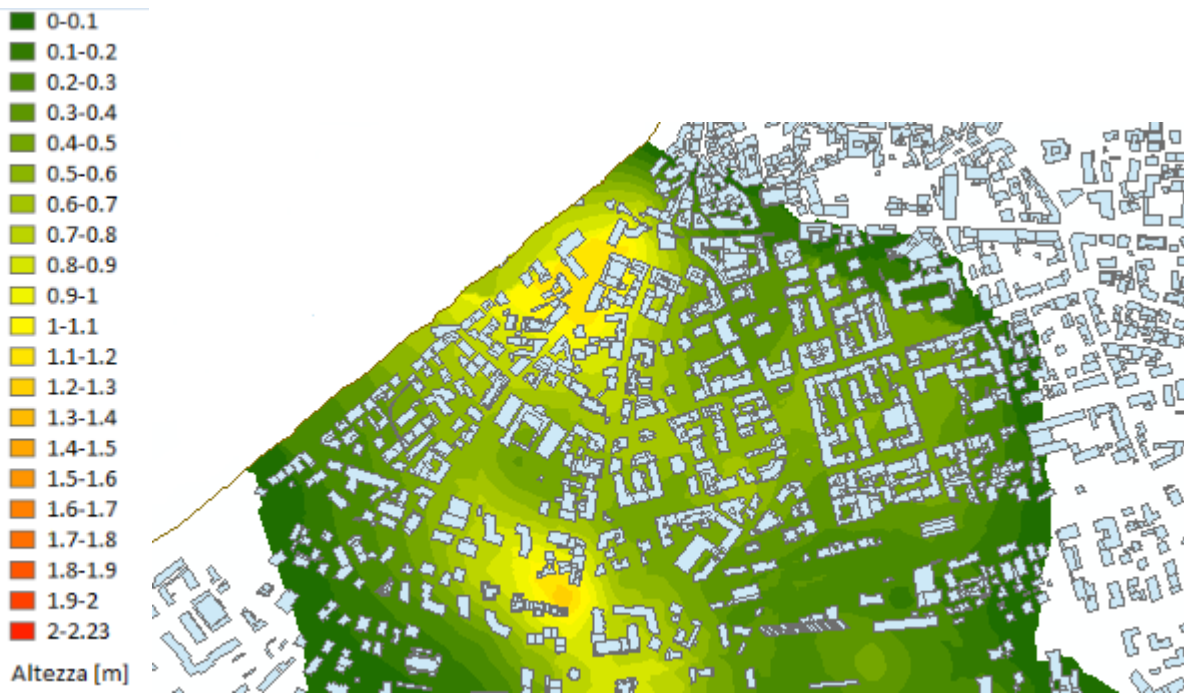


Fig. 4.3.1 Altezza massima raggiunta dall'acqua durante l'allagamento. Geometria base,  $S=0.001$ .



Fig. 4.3.2 Velocità massima raggiunta dall'acqua durante l'allagamento. Geometria base,  $S=0.001$ .

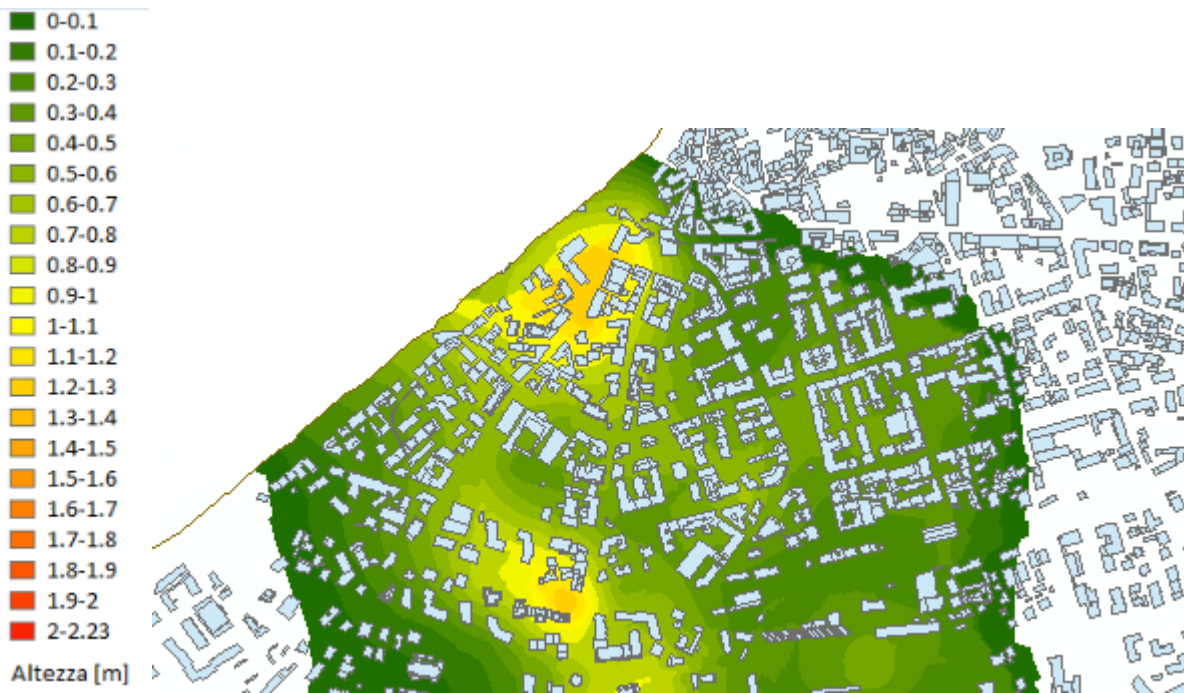


Fig. 4.3.3 Altezza massima raggiunta dall'acqua durante l'allagamento. Geometria base,  $S=0.1$ .

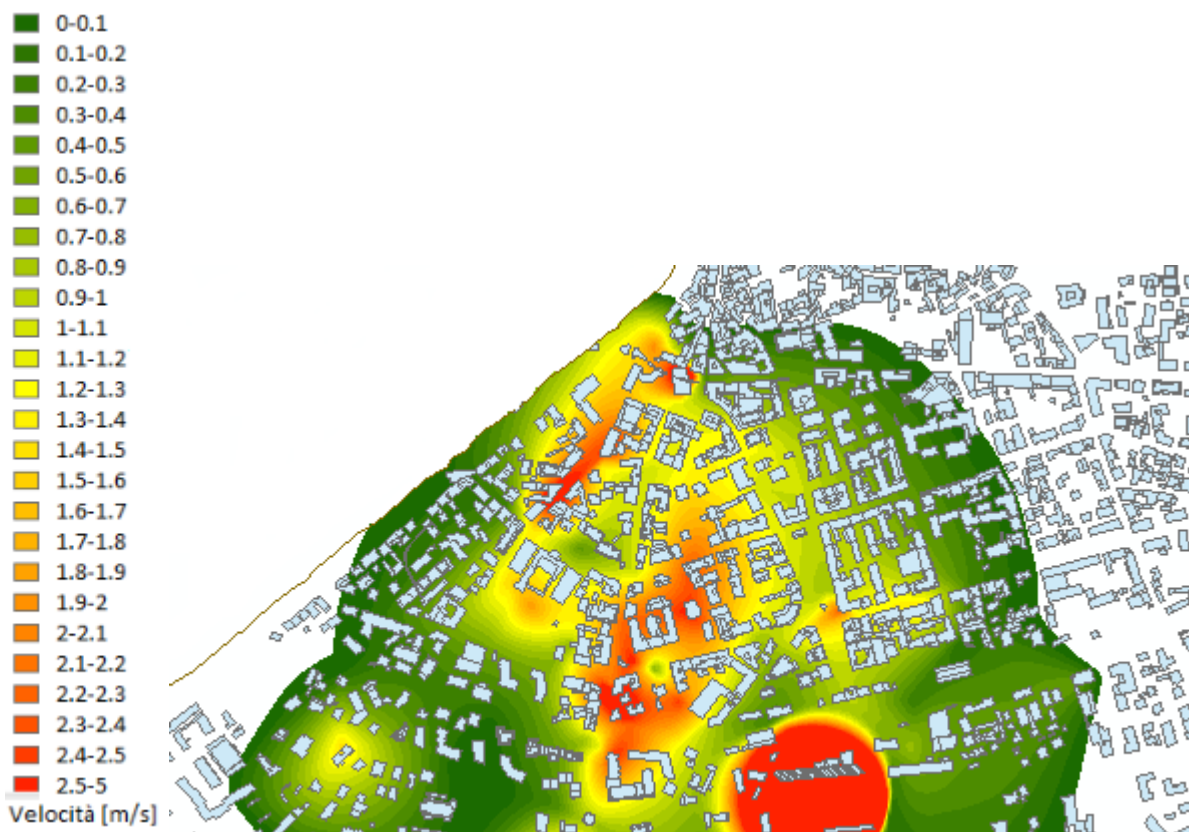


Fig. 4.3.4 Velocità massima raggiunta dall'acqua durante l'allagamento. Geometria base,  $S=0.1$ .



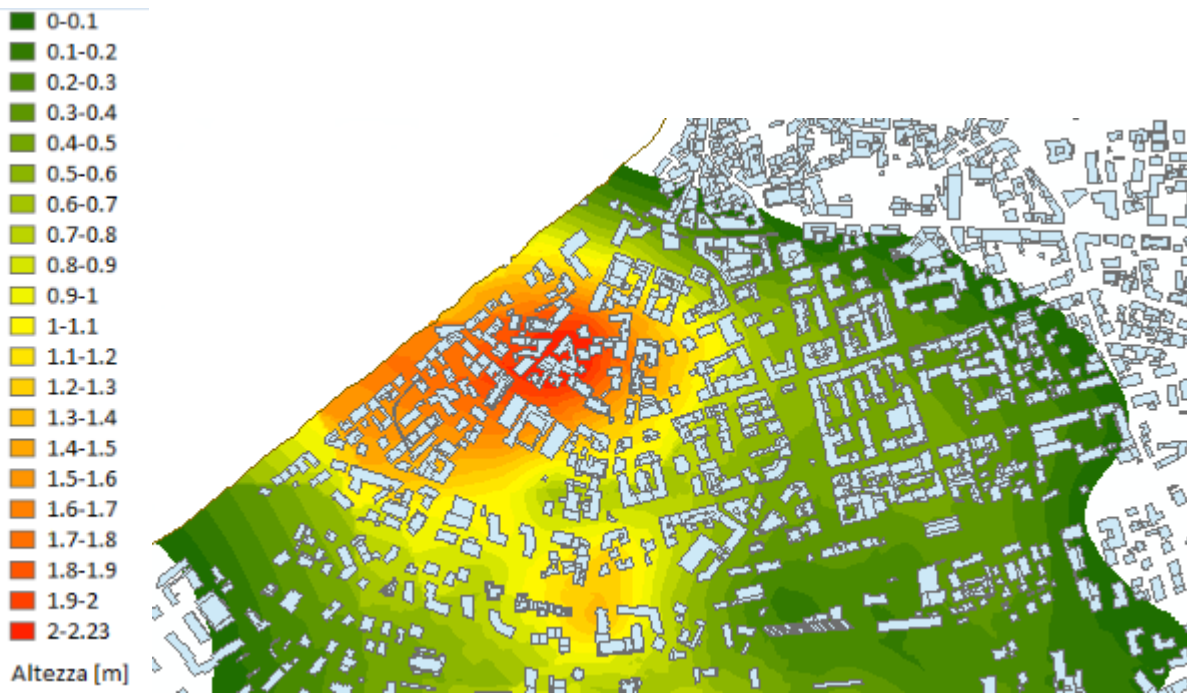


Fig. 4.3.5 Altezza massima raggiunta dall'acqua durante l'allagamento. Geometria densa,  $S=0.1$ .

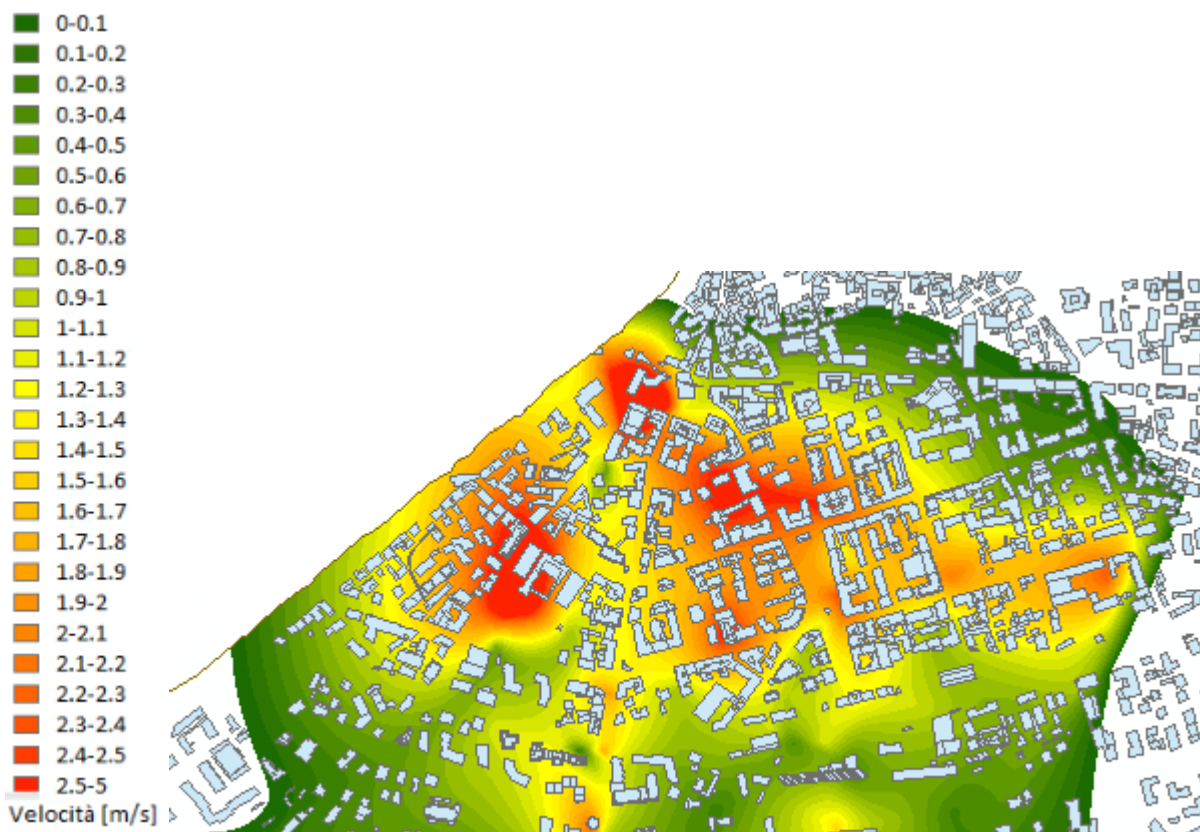


Fig. 4.3.6 Velocità massima raggiunta dall'acqua durante l'allagamento. Geometria densa,  $S=0.1$ .

Dall'osservazione delle mappe di hazard si nota che tra i risultati dei modelli a geometria base con  $S=0.1$  e  $S=0.001$  c'è ben poca differenza. Questo è dovuto al fatto che, come già ampiamente discusso, l'effetto del coefficiente di immagazzinamento è considerevole solo su tempi brevi, ovvero fino a saturazione del terreno. Si noti, per rafforzare questa considerazione, come, osservando le figure da 4.2.31 a 4.2.32, l'effetto di  $S$  su tempi lunghi diventi trascurabile, al contrario, osservando le figure 4.2.39 e 4.2.40, su tempi brevi tale effetto sia rilevante. Quindi per un processo così lungo, come quello modellato nello scenario, i valori massimi di altezza e velocità, che si verificano diverse ore dopo la saturazione del terreno, sono molto poco influenzati dal valore scelto di  $S$ . Per questa ragione d'ora in poi si parlerà di modello a geometria base indipendentemente dal valore di  $S$  scelto almeno per quanto riguarda le considerazioni sui valori massimi di altezze e velocità.

Sia il modello a geometria base che quello a geometria densa cercano di rappresentare un sistema "poroso", ma in modi diversi, ovvero con configurazioni geometriche diverse: il modello a geometria densa descrive meglio la capacità di convogliamento del sistema con strade di dimensioni reali, ma al prezzo di un calcolo più instabile e col rischio di sovrastimare di molto le altezze d'acqua, come visto.

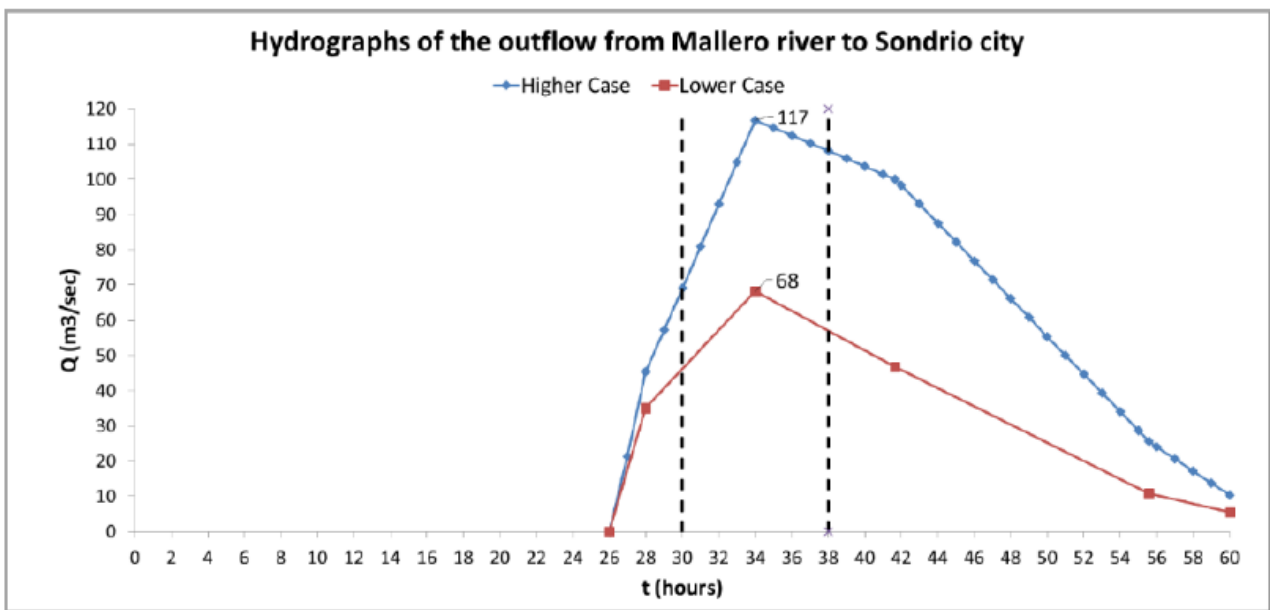
I modelli con diverse configurazioni geometriche propongono stime della propagazione dell'onda piuttosto diverse. La maggior differenza tra i due modelli è proprio legata alle aree di città colpite o no dall'allagamento. Nel modello a geometria densa infatti, essendoci meno spazio per l'acqua nelle strade centrali della città, l'alluvione tende a espandersi di più in zone a Est rispetto che nel modello a geometria base.

Si può pensare che il comportamento reale dell'alluvione possa essere a metà tra quelli proposti nei due modelli. La stima delle altezze d'acqua ottenuta dal modello a geometria base si potrebbe anche ipotizzare essere più accurata (o quantomeno affetta da errori di calcolo minori legati all'instabilità numerica), ma non essere a favore di sicurezza rispetto a quella ottenuta dal modello a geometria densa. Per questo, tra i due modelli con geometria base, si sceglie di considerare, per la stima dei danni, quello con  $S=0.001$  che propone altezze e velocità massime leggermente maggiori (ma solo di alcuni millimetri, al massimo di un paio di centimetri in particolari punti).

Al termine di queste analisi si conclude che il modello da ritenersi meglio utilizzabile è quello a geometria base perché permette un calcolo stabile e di utilizzare tutto l'idrogramma, quindi di osservare anche l'esaurimento, inoltre permette diverse analisi al variare di alcuni parametri, cose che il modello a geometria densa non permette. Comunque non si trascurino i risultati ottenuti dal modello a geometria densa, che danno importanti informazioni su un possibile comportamento alternativo dell'alluvione con effetti più gravosi sulla città.

#### 4.4 CONFRONTO CON TESI PRECEDENTE

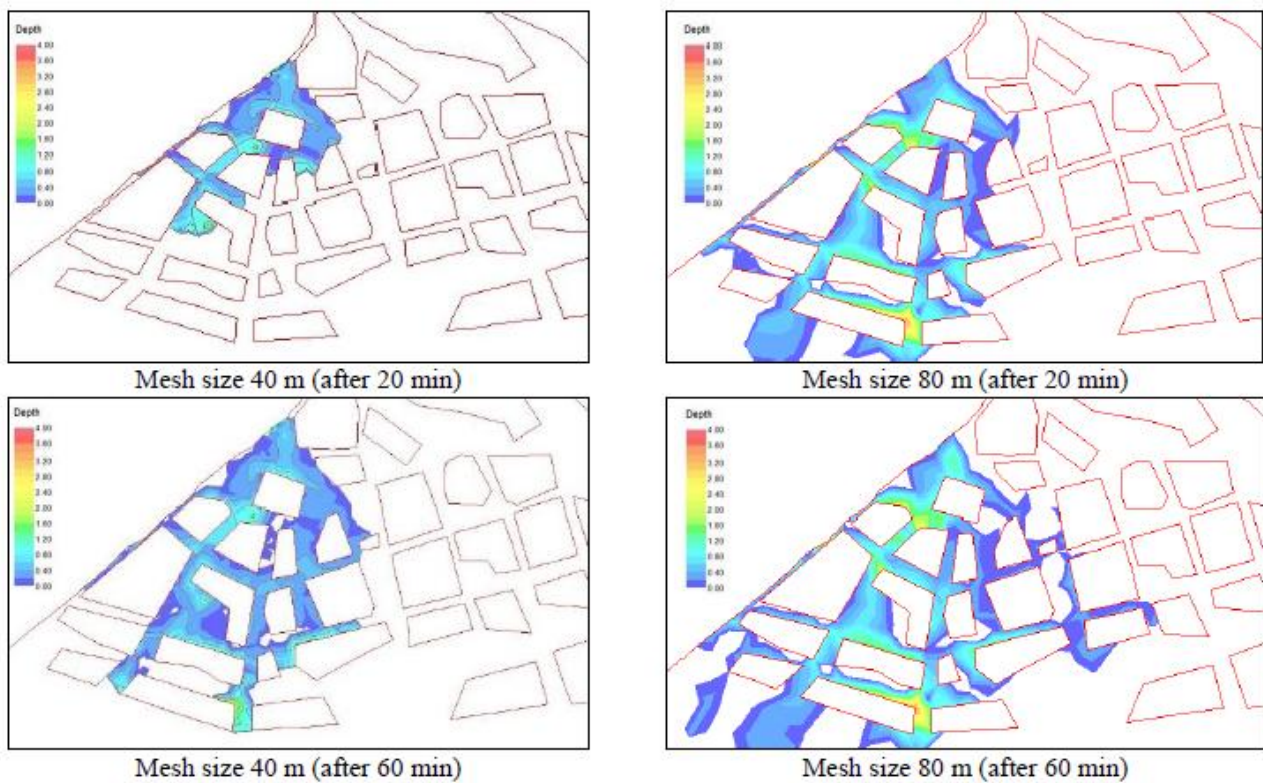
Izadifar e Babae (2015), modellando l'allagamento di Sondrio, avevano usato solo il modello a geometria base (il modello a geometria densa e il modello a geometria raffinata sono invece stati costruiti e usati in questa tesi), inoltre in tale modello non si riusciva a eseguire il calcolo usando come condizione al contorno l'intero idrogramma, si era quindi scelto di usarne solo una parte, come mostrato in figura, mentre in questa tesi si è stati in grado di utilizzare tutto l'idrogramma. Risulta quindi non immediato un confronto tra risultati ottenuti con condizioni al contorno di monte così diverse.



*Fig. 4.4.1 Idrogrammi usati come condizione al contorno di monte da Izadifar e Babae (2015). Utilizzata per il calcolo solo la parte tra le linee tratteggiate.*

Non essendo stato possibile utilizzare l'idrogramma di sfioro completo ricavato dai calcoli del modello monodimensionale, Izadifar e Babae (2015) avevano effettuato un'analisi di sensitività alla portata entrante. In questa tesi si è preferito eseguire uno studio completo con tutto l'idrogramma di sfioro, dall'inizio alla fine, piuttosto che diversi studi con diversi idrogrammi di cui però nessuno fosse quello realmente ottenuto dal modello monodimensionale. Come si è osservato nel corso dello studio, l'alluvione modellata nella città di Sondrio presenta una forte tendenza dell'acqua a scorrere via dalla città e una scarsa tendenza all'accumulo. In questo modo, al fine di valutare le altezze e velocità massime raggiunte dall'acqua, diventa fondamentale la portata di picco entrante nel sistema imposta dell'idrogramma di monte, dato che il legame tra la fase più critica dell'allagamento e quella di picco dell'idrogramma è molto stretto. Al contrario, al fine di una stima della durata dell'allagamento in ciascun punto, poter eseguire il calcolo con l'idrogramma completo è fondamentale.

Izadifar e Babae (2015) avevano eseguito una lunga analisi di sensitività alla griglia numerica, cosa che qui non è stata eseguita sfruttando le informazioni ottenute dal caso sintetico, ovvero che utilizzare una griglia meno densa conduce a propagazioni dell'onda più veloci, dunque è a favor di sicurezza. Tale informazione è coerente con quanto trovato da Izadifar e Babae (2015) con l'analisi alla griglia numerica eseguita sull'intero modello della città di Sondrio, che però aveva richiesto tempi di calcolo molto lunghi. Si tenga presente che il software interpola automaticamente anche i punti ai vertici degli edifici, quindi fissare una griglia numerica con spaziatura scelta dall'utente (come ad esempio 40 o 80 metri) non significa che si avrà quella spaziatura, ma che oltre ai vertici degli edifici saranno inseriti punti equidistanti di tale spaziatura, dunque la griglia numerica è fortemente imposta dalla geometria degli ostacoli e la scelta dell'utente in realtà ha scarso peso in zone con molti blocchi.



*Fig. 4.4.2 Analisi di sensitività alla griglia numerica eseguita da Izadifar e Babae (2015).*

La propagazione dell'onda lungo Via Alessi risulta difficilmente confrontabile a causa delle diverse condizioni al contorno di monte scelte, si riportano i risultati ottenuti da Izadifar e Babae (2015).

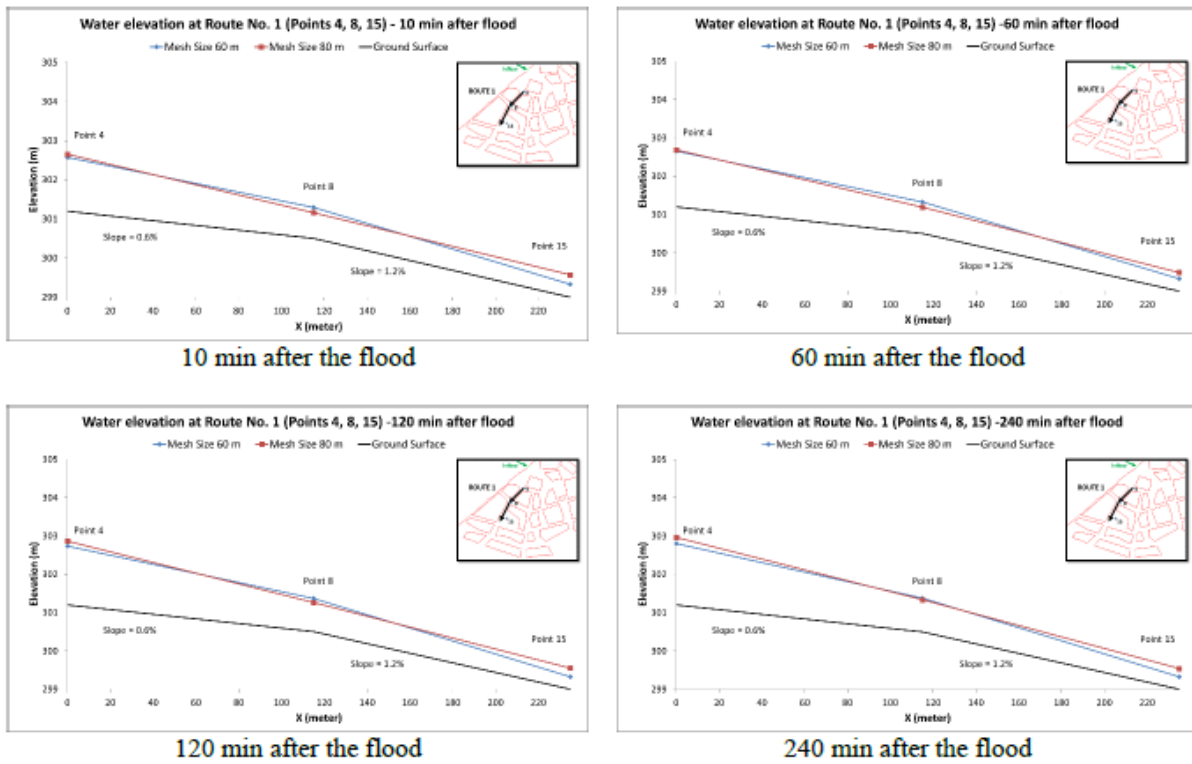
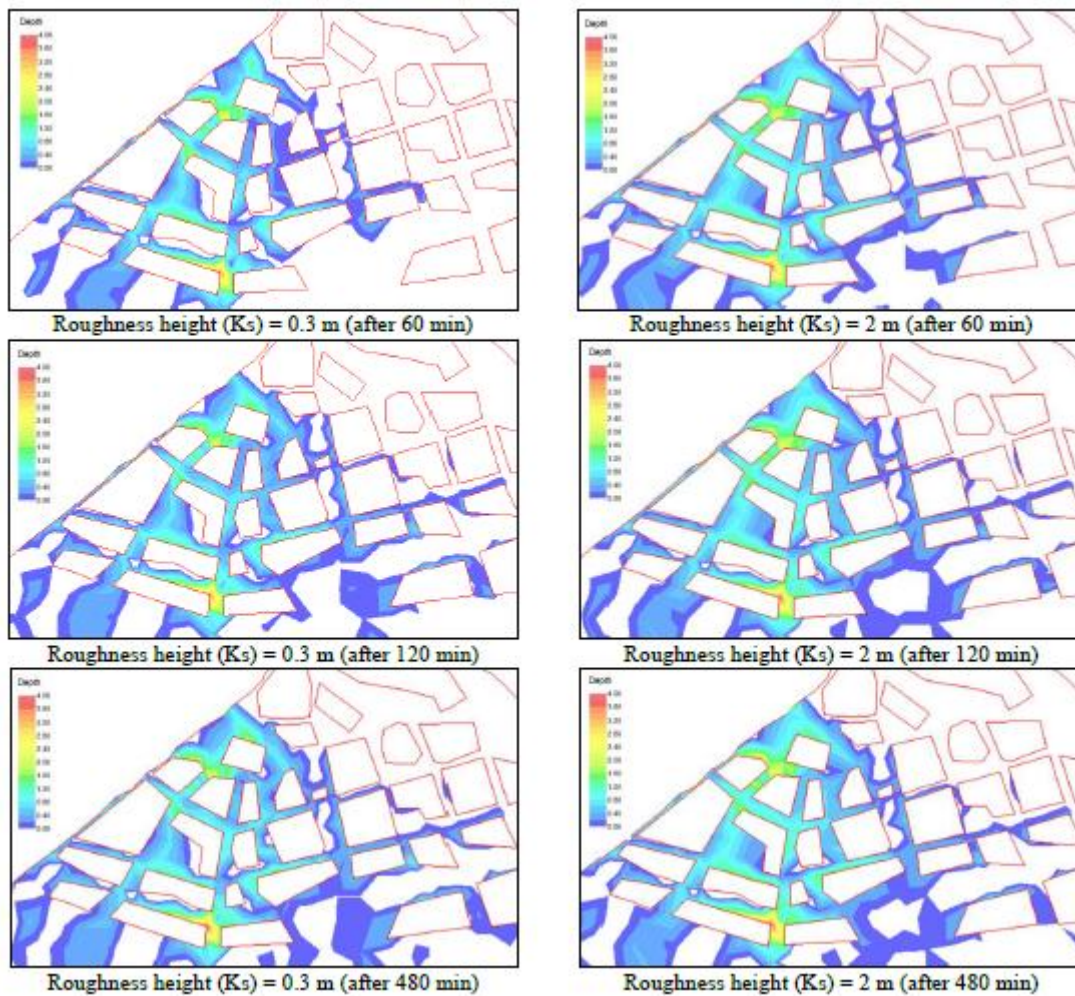


Fig. 4.4.3 Izadifar e Babae (2015): propagazione dell'onda lungo Via Alessi.

Izadifar e Babae (2015) avevano eseguito un'analisi di sensitività alla scabrezza. In questa tesi tale analisi è stata eseguita nel caso sintetico portando a utili considerazioni qualitative estendibili anche a questo caso anche perché, dopo aver osservato i risultati ottenuti nella tesi precedente, si è notato che è necessario inserire valori molto grandi di scabrezza (come 2 metri) per ottenere variazioni osservabili in maniera evidente di altezza d'acqua e velocità nel modello della città di Sondrio. Si è dunque preferito concentrare le analisi di sensitività sui modelli geometrici a cui il software è molto più sensibile, rispetto che a questi altri parametri come scabrezza e griglia numerica. Anche se non si può eseguire un confronto diretto, entrambe le trattazioni risultano concordi nel ritenere che all'aumentare della scabrezza aumenti l'altezza d'acqua ma si riduca la velocità di quest'ultima.



*Fig. 4.4.4 Izadifar e Babae (2015): analisi di sensitività alla scabrezza.*

L'informazione di altezza d'acqua e velocità non era stata utilizzata da Izadifar e Babae (2015) su molti punti, ma solo su un numero molto limitato di essi e nel centro città, ottenendo una mappa di hazard molto grezza e semplificata. Le mappe di hazard proposte in questa tesi sono molto più dettagliate, anche se soffrono anch'esse del problema dell'interpolazione, precedentemente discusso, inevitabile se si esegue lo studio con River2D che fornisce come output risultati puntuali.

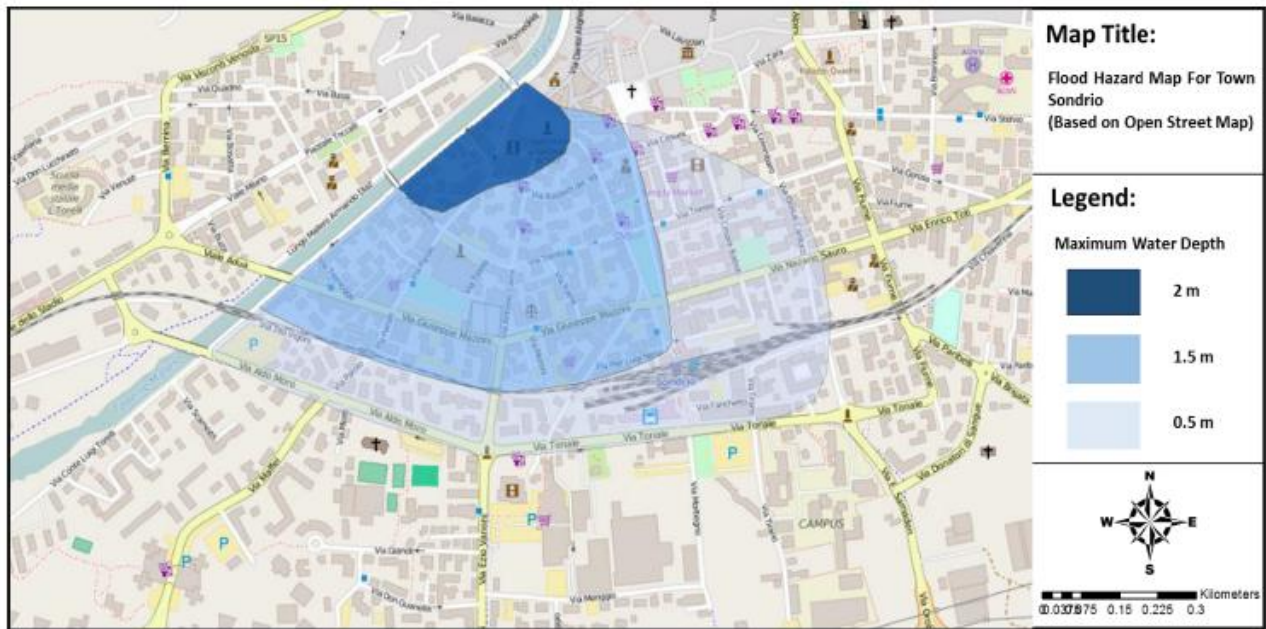


Figure 5.46: Water depth for flood scenario in Sondrio on Open Street map

*Fig. 4.4.5 Mappa di hazard proposta da Izadifar e Babae (2015):*

### *Conclusione sul confronto tra le tesi*

Molte analisi di sensitività sono state effettuate nelle due tesi andando a studiare la sensibilità dei modelli costruiti in River2D quasi a ogni parametro, rendendo esauriente lo studio dell'allagamento di Sondrio con questo programma di calcolo.

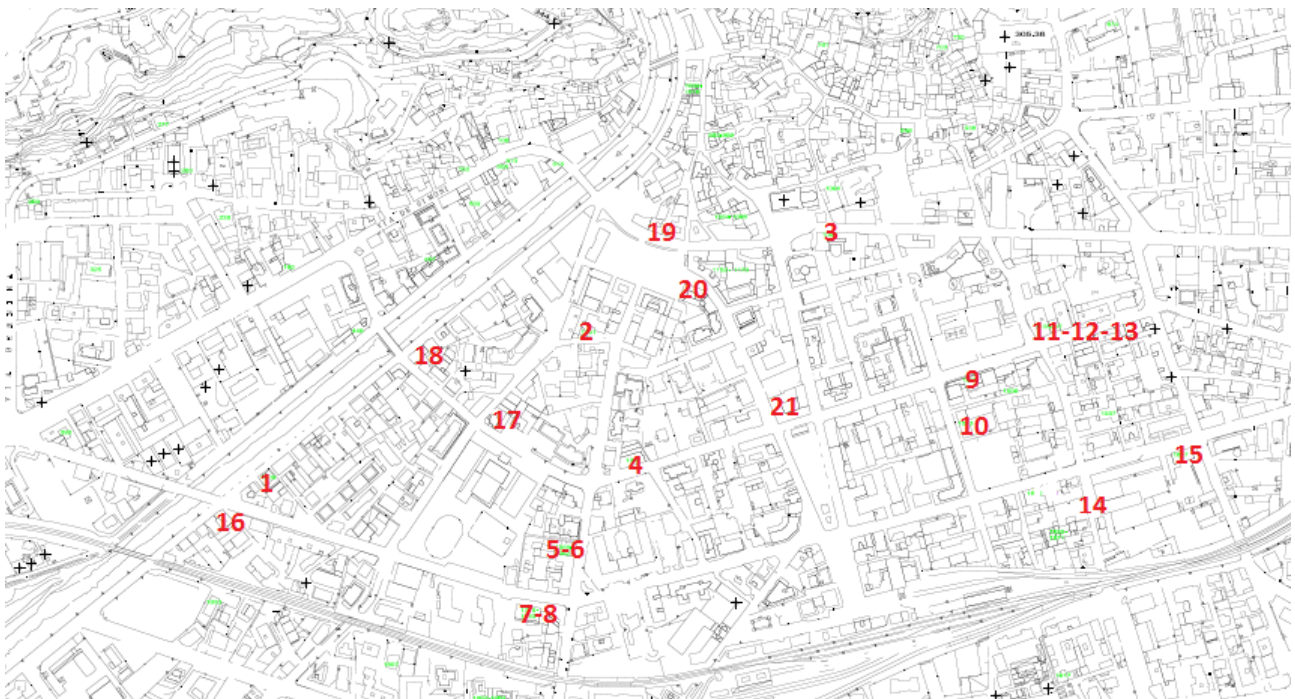
C'è concordanza tra le tesi nel ritenere Via Alessi il percorso principale dell'acqua e le strade in direzione Nord-Sud percorsi privilegiati rispetto alle strade in direzione Ovest-Est.

Si ritiene al momento fortemente improbabile mediante tale software costruire un modello, più accurato di quelli proposti, nel quale sia possibile eseguire il calcolo per tutto l'idrogramma e ottenere risultati affidabili all'interno degli isolati modellati come blocchi, quantomeno per le altezze d'acqua.

# 5 DANNI PROVOCATI DALL'ALLUVIONE AGLI EDIFICI

## 5.1 INTRODUZIONE

L'analisi dei danni è effettuata su un campione di 21 edifici nel nucleo urbano di Sondrio scelti in posizioni prossime alle strade principali, le quali sono modellate nel modello idraulico di allagamento, in modo da poter estrarre i parametri di hazard (altezza massima di acqua, velocità massima e durata dell'allagamento) per la facciata frontale di ciascun edificio. Tale campione propone edifici ben distribuiti nel centro della città, per i quali si avranno parametri di hazard in generale abbastanza diversi in ragione delle diverse posizioni. E' inoltre ragionevole supporre, trattandosi di edifici costruiti in diversi periodi, alcuni ristrutturati e alcuni no, e con caratteristiche diverse tra loro, che anche la vulnerabilità di ciascun edificio selezionato sia molto diversa da quella di tutti gli altri; basti pensare per esempio che due edifici, anche se molto vicini tra loro, possono avere al loro interno impianti e livelli di finiture molto differenti e questo si ripercuote sia sul valore dell'edificio che sul livello di danno.



*Fig. 5.1.1 Edifici selezionati per la stima dei danni causati dall'alluvione numerati in rosso. Non si considerino le croci nere e i piccoli numeri in verde presenti nell'immagine.*



Per ciascun edificio sono estratti dal modello idraulico di allagamento i parametri di altezza massima di acqua nel corso dell'alluvione, velocità massima e durata per entrambe le configurazioni geometriche della città proposte. Lo scopo dell'analisi è mostrare come, al variare di parametri di hazard provenienti da un modello idraulico possa variare il danno stimato su un edificio qualunque. Per fare ciò si fissano dei parametri di riferimento per le caratteristiche fisiche di ciascun edificio, secondo criteri che saranno discussi nel prossimo paragrafo, e si stima il danno causato dall'alluvione all'edificio nei seguenti otto casi, ciascuno di essi con diversi parametri di hazard:

1. Altezza massima da modello a geometria base;
2. Altezza massima e velocità massima da modello a geometria base;
3. Altezza massima e durata dell'allagamento da modello a geometria base;
4. Altezza massima, velocità massima e durata allagamento da modello a geometria base;
5. Altezza massima da modello a geometria densa;
6. Altezza massima e velocità massima da modello a geometria densa;
7. Altezza massima e durata dell'allagamento da modello a geometria densa;
8. Altezza massima, velocità massima e durata allagamento da modello a geometria densa.

Nel modello idraulico di allagamento con geometria densa non è possibile ottenere direttamente un valore per il parametro di durata dell'allagamento, perché il software non è in grado di portare a termine il calcolo, arrestandosi bruscamente pochi istanti di tempo dopo la fase di picco dell'alluvione. Dunque i casi 7 e 8 sono meno significativi dei sei precedenti, nei quali tutti i parametri di hazard sono ricavati direttamente dal modello idraulico, poiché la durata dell'allagamento in ciascun edificio è stata calcolata come somma del tempo che intercorre tra l'inizio dell'allagamento in tale punto e l'istante di picco dell'alluvione, ottenuto dal modello idraulico a geometria densa, e del tempo che intercorre tra la fase di picco e la fine dell'allagamento nel punto, ricavato dal modello a geometria base, non avendo informazioni su tale periodo di tempo ricavabili dal modello a geometria densa.

Le analisi effettuate con la medesima configurazione geometrica ma valutazione dell'hazard via via più ricca, aggiungendo altri parametri oltre all'altezza massima (parametro imprescindibile per la stima dei danni), hanno lo scopo di mostrare quanto un modello di danno può essere sensibile a una stima dell'hazard più o meno ricca di parametri, dunque ad avere importanti indicazioni sulla necessità o meno di un modello idraulico che restituisca molti parametri come output (ciò al prezzo di una maggiore complessità del modello idraulico).

Le stesse analisi effettuate invece variando la configurazione geometrica adottata nel modello idraulico hanno lo scopo di mostrare quanto la differente scelta di una geometria piuttosto che un'altra nel modello idraulico possa influenzare la stima del danno.

Si rimarca che il fine di questo studio è valutare la sensitività del modello di danno, cioè di un modello classificato come modello di rischio, alle scelte fatte in fase costruzione di un modello di hazard. Questo significa valutare il peso che può avere scegliere un modello idraulico invece di un altro, piuttosto che una diversa parametrizzazione, sul valore stimato del danno agli edifici.

## 5.2 MODELLO PER LA STIMA DEL DANNO

Il danno relativo e il danno assoluto su ciascun edificio sono calcolati utilizzando il modello *INSYDE* (IN-depth-SYnthetic-model-for-flood-Damage-Estimation, Dottori et al. 2016). Questo modello è stato studiato per l'analisi del danno a seguito di alluvione su edifici residenziali, adattabile per edifici con spazi commerciali, bar o uffici al massimo al piano terra. Il modello è disponibile gratuitamente ed è costantemente aggiornato e raffinato grazie alle nuove conoscenze provenienti da studi sui danni a seguito ad alluvioni, ed è al momento uno dei pochi modelli di danno a tenere in considerazione altri parametri di hazard oltre all'altezza massima di acqua. E' un modello basato su una esplicita analisi dei costi. Partendo dai parametri di hazard ed esposizione dell'edificio il modello permette una stima del danno relativo e del danno assoluto all'edificio. Il danno fisico che l'edificio può subire è valutato componente per componente, utilizzando funzioni di danno calibrate su dati provenienti da eventi alluvionali avvenuti negli ultimi anni in Italia. Il modello riceve quindi come input due tipi di parametri:

-parametri di hazard

-parametri di esposizione

Tutti i parametri riguardanti caratteristiche fisiche, di costruzione, di finitura dell'edificio sono chiamati nel modello "parametri di esposizione".

Ora verranno discussi i parametri di input del codice con particolare attenzione ai parametri di hazard, essendo scopo dello studio valutare la sensibilità a tali parametri.

### *Parametri input di hazard*

Il modello riceve come input i seguenti parametri di hazard per ciascun edificio, qui si riporta l'elenco e come sono considerati:

-ALTEZZA MASSIMA dell'acqua raggiunta nel corso dell'alluvione, misurata dal livello della strada esterna all'edificio;

-VELOCITA' MASSIMA dell'acqua nel corso dell'alluvione, misurata sulla strada esterna all'edificio [valore di default 0.8 m/s];

-DURATA DELL'ALLAGAMENTO dell'edificio, ovvero per quanto tempo c'è acqua nella strada esterna all'edificio [valore di default 20 ore];

-CONCENTRAZIONE DI SEDIMENTI di cui si assume un valore di default, uguale per tutti gli edifici, pari al 5%, non potendo stimare dal modello idraulico tale parametro;

-QUALITA' DELL'ACQUA che indica la presenza o meno di inquinanti, si sceglie di effettuare tutte le analisi nell'ipotesi di acqua non inquinata.

## *Parametri input di esposizione degli edifici*

I parametri richiesti dal modello riguardanti le caratteristiche fisiche, di esposizione, di costruzione e di finitura degli edifici necessarie al calcolo dei danni sono di seguito riportati. Tutti questi parametri denominati dal modello "parametri di esposizione". Per alcuni di essi sono state effettuate misure in loco dall'autore di questa tesi, gli altri non sono stati specificati e dunque il codice ha assunto i valori di default.

- AREA ESTERNA IN PIANTA DEL PIANO TERRA DELL'EDIFICIO ricavata per ciascun edificio dalla misurazione delle dimensioni geometriche della base del fabbricato;
- AREA INTERNA PAVIMENTATA DEL PRIMO PIANO assunto valore di default pari a 80% dell'area esterna;
- PERIMETRO ESTERNO ricavato da misurazione dei lati esterni dell'edificio;
- ALTEZZA DELL'INTERPIANO direttamente misurata in loco per il piano terra e assunta costante dal codice per eventuali altri piani (l'allagamento nello scenario considerato non supera comunque mai l'altezza del piano terra);
- ALTEZZA PIANO CANTINA/GARAGE utilizzato valore di default di -3 metri rispetto al piano stradale;
- AREA PIANO CANTINA/GARAGE assunto valore di default pari a 50% dell'area del primo piano;
- ALTEZZA PIANO TERRA RISPETTO A PIANO STRADALE direttamente misurato in loco;
- NUMERO DI PIANI direttamente osservato in loco;
- TIPO DI COSTRUZIONE proposti i seguenti 3 tipi: casa singola, villetta a schiera, condominio; parametro osservato in loco;
- MATERIALE DI COSTRUZIONE proposti i seguenti 4 tipi: calcestruzzo armato, muratura non rinforzata, muratura rinforzata, legno; parametro osservato in loco;
- DISTRIBUZIONE IMPIANTI ELETTRICI assunto parametro di default 'impianto centralizzato', in alternativa il codice permette la scelta dell'opzione 'impianto distribuito';
- TIPO DI SISTEMA DI RISCALDAMENTO assunto parametro di default 'a radiatori' essendo gli edifici in prevalenza di costruzione non recente, in alternativa il codice propone l'opzione 'a pavimento';
- LIVELLO DI FINITURA proposti i seguenti 3 livelli: alto, medio, basso; parametro valutato in loco da osservazione degli esterni dell'edificio;
- ANNO DI COSTRUZIONE-RISTRUTTURAZIONE stimato osservando le condizioni dell'edificio;
- LIVELLO DI MANUTENZIONE assunto parametro di default 'alto', in alternativa il codice propone i livelli 'medio' o 'basso'.

A tali parametri si aggiunge poi il valore stimato di vendita al metro di un edificio a Sondrio, non è facile fare una stima essendo diverse le tipologie di edificio presenti nello studio e diverse le zone di città considerate. Si sceglie un valore indicativo di 2000 Euro al metro quadrato in pianta che il codice applica a tutti gli edifici studiati.

### *Danno assoluto*

Il danno assoluto viene definito nel modello come la stima, in Euro, del costo di riparazione dei danni causati dall'alluvione all'edificio. Questo valore non è previsto come output del software, ma è possibile ricavarlo con semplici modifiche al codice. Tale dato è ritenuto meno significativo del danno relativo poiché è fortemente influenzato dai valori di mercato, sui quali c'è molta incertezza e che non è lo scopo della tesi valutare. Può però essere utile per meglio comprendere il funzionamento del modello riportare la stima dei danni assoluti e analizzare come è ricavata. Si ritiene inoltre tale valore possa essere di interesse per il proprietario o il gestore dell'edificio, per il quale può essere importante una stima, in termini assoluti, ovvero di costo totale in Euro, del danno atteso a seguito dell'alluvione.

Il danno assoluto è calcolato come somma di 7 componenti, ciascuna calcolata singolarmente. Queste 7 componenti contribuiscono ciascuna a una spesa e sommando ciascuna di queste spese si ottiene il danno assoluto, ovvero il costo stimato di riparazione dei danni causati dall'allagamento.

Ciascuna di queste 7 componenti è quantificata in Euro usando relazioni ricavate da studi sull'argomento che presuppongono come input alcuni parametri di hazard o esposizione. Esse sono qui in breve descritte.

- **PULIZIA** (Cleanup): la spesa per la pulizia dell'edificio è data dalla somma dei costi di pompaggio dell'acqua all'esterno dell'edificio (soprattutto dalla cantina/garage), dei costi di smaltimento dei rifiuti che inevitabilmente si generano per il danneggiamento di oggetti all'interno dell'edificio in seguito all'allagamento, soprattutto al piano terra o sotterraneo, il costo di pulitura dell'edificio e degli oggetti che non vengono smaltiti come rifiuti e il costo di deumidificazione dell'edificio:

$$C = C1 + C2 + C3 + C4 \quad [Euro]$$

Dove, nell'ordine, sono indicati rispettivamente:

$$\begin{aligned} C &= \textit{Cleanup Cost} = \textit{Costo Pulizia} \\ &= \textit{Costo pompaggio} + \textit{Costo Smaltimento Rifiuti} + \textit{Costo Pulitura} \\ &+ \textit{Costo Deumidificazione} \quad [Euro] \end{aligned}$$

- **RIMOZIONE** (Removal): la spesa per la rimozione di elementi dell'edificio danneggiati (se ritenuta necessaria dal software in relazione al superamento o meno di una soglia di danno prefissata) è data dalla somma della spesa di rimozione del massetto, di rimozione del pavimento, di rimozione degli zoccoli, di rimozione dei muri di separazione non strutturali, di rimozione dei cartongessi, di rimozione degli intonaci esterni e interni, di rimozione delle porte, di rimozione delle finestre e di rimozione di boiler o caldaie:

$$R = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6 + R7 + R8 + R9 + R10 \quad [Euro]$$

Dove, nell'ordine, sono indicati rispettivamente:

$$\begin{aligned} R = \text{Removal Cost} = \text{Costo di Rimozione} = \\ \text{Costo Rimozione Massetto} + \text{Costo Rimozione Pavimento} + \\ \text{Costo Rimozione Zoccoli} + \text{Costo Rimozione Muri di Partizione} + \\ \text{Costo Rimozione Cartongessi} + \text{Costo Rimozione Intonaci Esterni} \\ + \text{Costo Rimozione Intonaci Interni} + \text{Costo Rimozione Porte} \\ + \text{Costo Rimozione Finestre} + \text{Costo Rimozione Boiler o Caldaia} \quad [Euro] \end{aligned}$$

- **RICOSTRUZIONE ELEMENTI NON STRUTTURALI** (Non-Structural): la spesa per la ricostruzione di elementi non strutturali rimossi (a seguito del superamento di una soglia di danno) è data dalla somma dei costi di ricostruzione stimati dei muri di separazione non strutturali, del massetto e dei cartongessi:

$$N = N1 + N2 + N3 \quad [Euro]$$

Dove, nell'ordine, sono indicati rispettivamente:

$$\begin{aligned} N = \text{Non Structural Elements Replacement Cost} \\ = \text{Costo Ricostruzione Elementi Non Strutturali} \\ = \text{Costo Ricostruzione Muri di Separazione} + \text{Costo Ricostruzione Massetto} \\ + \text{Costo Ricostruzione Cartongessi} \quad [Euro] \end{aligned}$$

- **RIPRISTINO ELEMENTI STRUTTURALI** (Structural): la spesa per il ripristino di elementi strutturali è stimata come somma dei costi di consolidazione del suolo sotto l'edificio, di riparazioni di danni locali a elementi portanti e di ristrutturazione o manutenzione dei pilastri (se ritenuta ciascuna di queste spese necessarie dal software in seguito al superamento di una soglia di danno):

$$S = S1 + S2 + S3 \quad [Euro]$$

Dove, nell'ordine, sono indicati rispettivamente:

$$\begin{aligned} S = \text{Structural Elements Retrofitting Cost} = \text{Costo di Ripristino Elementi Strutturali} \\ = \text{Costo Consolidamento Suolo} + \text{Costo Riparazione Danni Locali} \\ + \text{Costo Ristrutturazione o Manutenzione Pilastri} \quad [Euro] \end{aligned}$$

- **FINITURE** (Finishing): la spesa per le finiture è stimata come somma dei costi di intonacatura esterna e interna, imbiancatura esterna e interna, pavimentazione e zoccolatura (se ritenuta ciascuna di queste spese necessarie dal software in seguito al superamento di una soglia di danno):

$$F = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6 \text{ [Euro]}$$

Dove, nell'ordine, sono indicati rispettivamente:

$$\begin{aligned} F &= \textit{Finishing Cost} = \textit{Costo delle Finiture} \\ &= \textit{Costo Intonacatura Esterna} + \textit{Costo Intonacatura Interna} \\ &+ \textit{Costo Imbiancatura Esterna} + \textit{Costo Imbiancatura Interna} \\ &+ \textit{Costo Pavimentazione} + \textit{Costo Zoccolatura} \quad \text{[Euro]} \end{aligned}$$

- **RIPRISTINO PORTE E FINESTRE** (Windows and Doors): la spesa per il ripristino di porte e finestre è stimata come somma dei costi di ripristino delle porte e dei serramenti come finestre e ante o tapparelle (se ritenuta ciascuna di queste spese necessarie dal software in seguito al superamento di una soglia di danno):

$$W = W1 + W2 \quad \text{[Euro]}$$

Dove, nell'ordine, sono indicati rispettivamente:

$$\begin{aligned} W &= \textit{Windows and Door Cost} = \textit{Costo di Ripristino Porte e Finestre} \\ &= \textit{Costo Ripristino Porte} + \textit{Costo Ripristino Serramenti} \text{ [Euro]} \end{aligned}$$

-**RIPRISTINO IMPIANTI** (Plants): la spesa per il ripristino degli impianti elettrici, di riscaldamento e idraulico è fortemente influenzata dal tipo di impianti presenti e dalle soglie di danno utilizzate dal software, in particolare essa è la somma delle spese per le possibili necessità installazione di un nuovo boiler o caldaia, di pitturazione dei radiatori, di ripristino di impianto di riscaldamento a pavimento, di ripristino impianto elettrico e di ripristino di impianto idraulico (se ritenuta ciascuna di queste spese necessarie dal software in seguito al superamento di una soglia di danno):

$$P = P1 + P2 + P3 + P4 + P5 \quad \text{[Euro]}$$

Dove, nell'ordine, sono indicati rispettivamente:

$$\begin{aligned} P &= \textit{Plants Cost} = \textit{Costo Ripristino Impianti} \\ &= \textit{Costo Installazione Boiler o Caldaio} + \textit{Costo Pitturazione Radiatori} \\ &+ \textit{Costo Ripristino Riscaldamento a Pavimento} \\ &+ \textit{Costo Ripristino Impianto Elettrico} \\ &+ \textit{Costo Ripristino Impianto Idraulico} \quad \text{[Euro]} \end{aligned}$$

Il danno totale assoluto è quindi calcolato come somma di queste 7 componenti:

$$\textit{Danno Assoluto} = C + R + N + S + F + W + P \quad \text{[Euro]}$$

## *Danno relativo*

Il danno calcolato su ciascun edificio è calcolato anche come danno relativo:

$$Danno\ Relativo = \frac{Danno\ Assoluto}{RVN}$$

Dove:

*Danno Assoluto* = stima in Euro del costo di riparazione dei danni causati dall'alluvione all'edificio, stimato come sopra;

*RVN* = costo di rimpiazzo dell'edificio con un edificio nuovo identico.

Il valore di *RVN* è stimato dal software per ciascun edificio come:

$$RVN = \text{valore di mercato di un edificio in zona} \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{mq}} \right] \cdot \text{area in pianta} \cdot \text{numero piani}$$

Questa divisione permette un sorta di normalizzazione del danno rispetto al valore dell'edificio e quindi di ottenere risultati confrontabili tra i vari edifici. Un confronto tra i valori di danno assoluto non sarebbe stato di facile interpretazione perché il danno assoluto, calcolato in Euro, è influenzato fortemente dalle dimensioni e dal valore dell'edificio stesso, basti pensare a confrontare il costo totale di riparazione dei danni su un grande condominio di 30 appartamenti o su una villetta singola di un solo piano di 100 mq.



### 5.3 DANNI CALCOLATI

Lo scopo di questa tesi è valutare la sensitività del modello di danno ai parametri di hazard, dunque non ci si sofferma su una stima esatta dei valori di mercato, da cui dipendono sia il danno assoluto che  $R/VN$ , per la quale, come detto, servirebbero molte informazioni ulteriori sull'edificio, sul mercato e sul valore degli edifici in centro Sondrio. Si fissano dei valori di mercato e si mantengono costanti per ogni analisi, quindi anche il valore di  $R/VN$  per ogni edificio rimane costante per ogni analisi.

La sensibilità può quindi essere valutata ai soli parametri di hazard mantenendo per tutte le analisi sia gli stessi parametri di esposizione che gli stessi valori di mercato.

#### *Parametri input di hazard utilizzati*

Fissato il parametro di concentrazione di sedimenti al 5% e scelto "no" per il parametro acqua inquinata, infatti tali parametri non possono essere stimati da River2D, si procede all'estrazione dal modello idraulico dei parametri di hazard legati a altezza massima dell'acqua, velocità massima e durata dell'allagamento. Si eseguiranno quindi le 8 analisi proposte utilizzando tali parametri al completo o solamente alcuni di essi, lasciando operare il codice con valori di default per i parametri non inseriti; infatti, nel caso alcuni parametri non siano specificati in input, vengono sempre utilizzati valori di default.

Si riportano i parametri di hazard ricavati da River2D per ciascun edificio per entrambe le configurazioni geometriche, ricordando che per il modello a geometria densa la stima della durata è effettuata in modo indiretto dato che il codice non è in grado di effettuare l'analisi fino a esaurimento della portata entrante, come discusso nel capitolo precedente.

GEOMETRIA BASE				
Codice	Indirizzo	H max [m]	V max [m/s]	Durata [ore]
1	Via Mazzini 70	0.27	1.07	29.0
2	Via Gavazzeni 6	0.78	1.24	19.7
3	Corso XXV Aprile 1	0	0	0
4	Via Caimi 41	0.68	2.37	20.0
5	Via Caimi 76	0.43	2.09	24.7
6	Via Caimi 80	0.43	2.09	24.7
7	Piazzale Merizzi 16	0.36	2.20	26.4
8	Piazzale Merizzi 15	0.36	2.20	26.4
9	Via Trieste 64-70	0	0	0
10	Via Cesare Battisti 29	0.12	0.58	8.3
11	Via Trieste 82	0	0	0
12	Via Trieste 92	0	0	0
13	Via Trieste 112-120	0	0	0
14	Via Carducci 35	0	0	0
15	Via Nazario Sauro 72	0.13	0.14	11.9
16	Via Lungo Mallero Cadorna 73	0.11	0.21	29.0
17	Via Alessi 39	0.44	3.02	28.1
18	Via Lungo mMallero Cadorna 42	0.32	1.24	27.2
19	Piazza Garibaldi 9	0.99	1.16	26.9
20	Corso Vittorio Veneto 16	0.23	1.29	12.8
21	Corso Vittorio Veneto 81	0.70	1.00	25.0

Tab. 5.3.1 Parametri di hazard, per i 21 edifici selezionati, ricavati dal modello idraulico a geometria base

GEOMETRIA DENSA				
Codice	Indirizzo	H max [m]	V max [m/s]	Durata [ore]
1	Via Mazzini 70	0.61	1.96	25.27
2	Via Gavazzeni 6	1.65	1.61	28.05
3	Corso XXV Aprile 1	0	0	0
4	Via Caimi 41	0.80	0.81	28.88
5	Via Caimi 76	0.52	3.65	29
6	Via Caimi 80	0.52	3.65	29
7	Piazzale Merizzi 16	0.84	3.07	28.88
8	Piazzale Merizzi 15	0.84	3.07	28.88
9	Via Trieste 64-70	0.05	1.50	8.33
10	Via Cesare Battisti 29	0.46	2.00	8.33
11	Via Trieste 82	0.11	0.40	5.55
12	Via Trieste 92	0.11	0.40	5.55
13	Via Trieste 112-120	0.11	0.40	5.55
14	Via Carducci 35	1.51	2.05	8.33
15	Via Nazario Sauro 72	0.69	0.87	8.05
16	Via Lungo Mallero Cadorna 73	0.65	1.22	26.66
17	Via Alessi 39	1.13	5.07	29
18	Via Lungo mMallero Cadorna 42	0.55	0.84	27.78
19	Piazza Garibaldi 9	0.52	1.70	25.10
20	Corso Vittorio Veneto 16	0.18	1.62	22.88
21	Corso Vittorio Veneto 81	0.43	2.21	22.04

Tab. 5.3.2 Parametri di hazard, per i 21 edifici selezionati, ricavati dal modello idraulico a geometria densa

### Parametri input di esposizione utilizzati

I parametri di esposizione qui riportati sono tenuti fissi per tutte le analisi, il cui fine è valutare la sensitività solo ai parametri di hazard; si può comunque notare la sensitività del modello ai parametri di caratteristiche degli edifici osservando i risultati ottenuti per edifici adiacenti che quindi hanno parametri di hazard pressoché uguali ma diverse caratteristiche dell'edificio (esempio gli edifici 5-6, 7-8, 11-12-13).

Si tiene a sottolineare che, per quanto è stato possibile rilevare sul campo, le analisi sono effettuate con caratteristiche degli edifici reali nelle condizioni reali in cui si trovavano il giorno 6 aprile 2016, giorno del sopralluogo svolto dall'autore della tesi.

ID	Area Est. [m <sup>2</sup> ]	Per. Est. [m]	H interpiano	Altezza PT [m]	N. piani	Tipo costruzione	Materiale	Finiture	Anno	Manutenzione
1	600	100	3	0.1	5	condominio	M.R.	medio	1990	alto
2	1200	162	3	0.5	6	condominio	M.R.	medio	2000	medio
3	1147	76	4	0.2	4	condominio	M.R.	alto	2010	alto
4	288	72	3.5	0.1	3	singola	C.A.	alto	2010	alto
5	700	106	3	0.3	3	condominio	C.A.	basso	1960	basso
6	750	130	3	0.1	2	condominio	C.A.	medio	1960	medio
7	500	120	3	0	5	condominio	M.R.	alto	2000	alto
8	800	120	3	0	5	condominio	M.R.	alto	2000	alto
9	600	110	3	0	6	condominio	M.R.	alto	1990	alto
10	360	84	3	0.4	6	condominio	M.R.	alto	2000	alto
11	150	50	3.5	0.4	3	condominio	C.A.	alto	1990	medio
12	360	78	3.5	0.1	6	condominio	M.R.	alto	1990	alto
13	408	92	2.6	0	3	condominio	C.A.	basso	1970	basso
14	361	76	3.5	0.1	3	condominio	M.R.	alto	2010	alto
15	2368	202	3.5	0.3	3	condominio	C.A.	alto	1990	alto
16	400	80	3	0.2	4	condominio	M.R.	basso	1990	medio
17	336	74	3.5	0.3	2	singola	C.A.	alto	1990	alto
18	170	54	3	0	3	condominio	M.R.	alto	2010	alto
19	500	90	3	0	4	condominio	M.R.	alto	2000	alto
20	1680	202	4	0	3	condominio	M.R.	alto	2010	alto
21	500	120	3	0.1	3	condominio	M.R.	alto	2000	alto

*Tab. 5.3.3 Parametri di esposizione degli edifici rilevati sul campo. Le sigle C.A. e M.R. indicano rispettivamente calcestruzzo armato e muratura rinforzata come materiali di costruzione.*

I valori scelti di default non sono qui riportati, essi sono stati scelti sulla base di quanto descritto in precedenza nel paragrafo 5.2. Gli edifici rilevati hanno caratteristiche molto differenti l'uno dall'altro, da edifici molto grandi formati da diverse scale di condomini unite a edifici molto più piccoli come le due ville singole.

## Risultati ottenuti

Al fine di comprendere il peso di ciascun parametro di hazard nella valutazione del rischio, scopo di questo lavoro, è importante studiare le curve di danno, le quali mostrano chiaramente quali dipendenze sono più forti. Saranno però mostrate in seguito perché sono fortemente dipendenti dall'edificio scelto (figure 5.3.16, 5.3.17 e 5.3.18). I primi risultati mostrati sono i danni stimati su ciascun edificio.

Si riportano per ciascuno degli otto casi analizzati al variare dei parametri di hazard le stime del danno relativo a ciascun edificio in seguito all'alluvione:

DANNO RELATIVO STIMATO SUGLI EDIFICI								
BASE					DENSE			
COD	h Base	h,v Base	h,d Base	h,v,d Base	h Densa	h,v Densa	h,d Densa	h,v,d Densa
1	0.174	0.174	0.251	0.251	0.193	0.196	0.243	0.245
2	0.152	0.152	0.150	0.150	0.191	0.205	0.265	0.281
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.416	0.428	0.416	0.428	0.428	0.428	0.610	0.610
5	0.289	0.290	0.355	0.356	0.299	0.304	0.428	0.433
6	0.465	0.466	0.570	0.572	0.478	0.483	0.683	0.689
7	0.188	0.190	0.245	0.247	0.213	0.228	0.303	0.321
8	0.187	0.188	0.244	0.246	0.212	0.224	0.302	0.316
9	0	0	0	0	0.140	0.141	0.061	0.062
10	0.137	0.137	0.059	0.059	0.141	0.143	0.061	0.063
11	0	0	0	0	0.281	0.281	0.087	0.087
12	0	0	0	0	0.139	0.139	0.042	0.042
13	0	0	0	0	0.289	0.289	0.088	0.088
14	0	0	0	0	0.407	0.441	0.181	0.206
15	0.274	0.274	0.165	0.165	0.313	0.313	0.133	0.133
16	0.207	0.207	0.298	0.298	0.241	0.241	0.318	0.318
17	0.541	0.547	0.752	0.758	0.662	0.695	0.948	0.981
18	0.311	0.312	0.417	0.419	0.331	0.331	0.454	0.454
19	0.276	0.287	0.367	0.381	0.245	0.250	0.305	0.310
20	0.300	0.302	0.196	0.198	0.292	0.294	0.333	0.335
21	0.334	0.334	0.414	0.414	0.310	0.313	0.340	0.344

Tab. 5.3.4 Danno relativo stimato su ciascun per ciascun caso di combinazione di parametri di hazard.

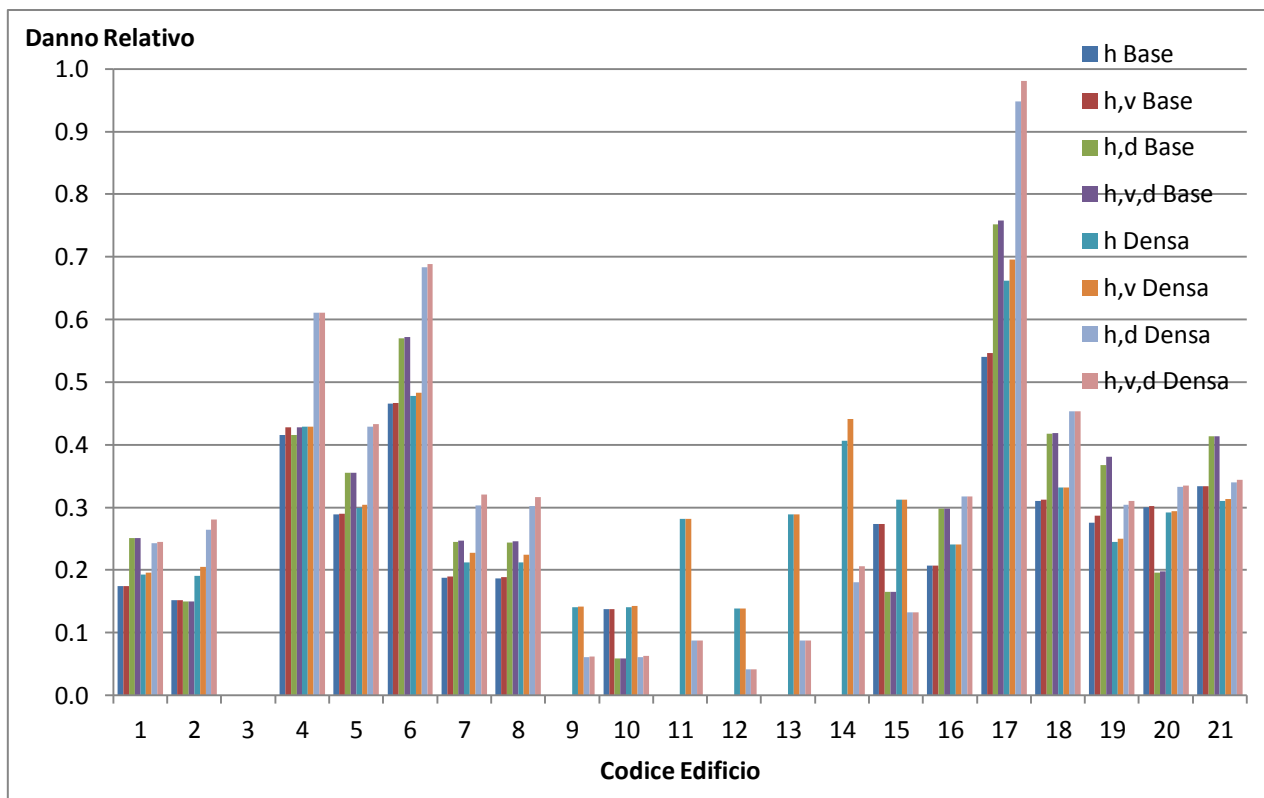


Fig. 5.3.1 Danno relativo su ciascun edificio (1,2,...21) per ogni combinazione di parametri di hazard scelta (colore in legenda).

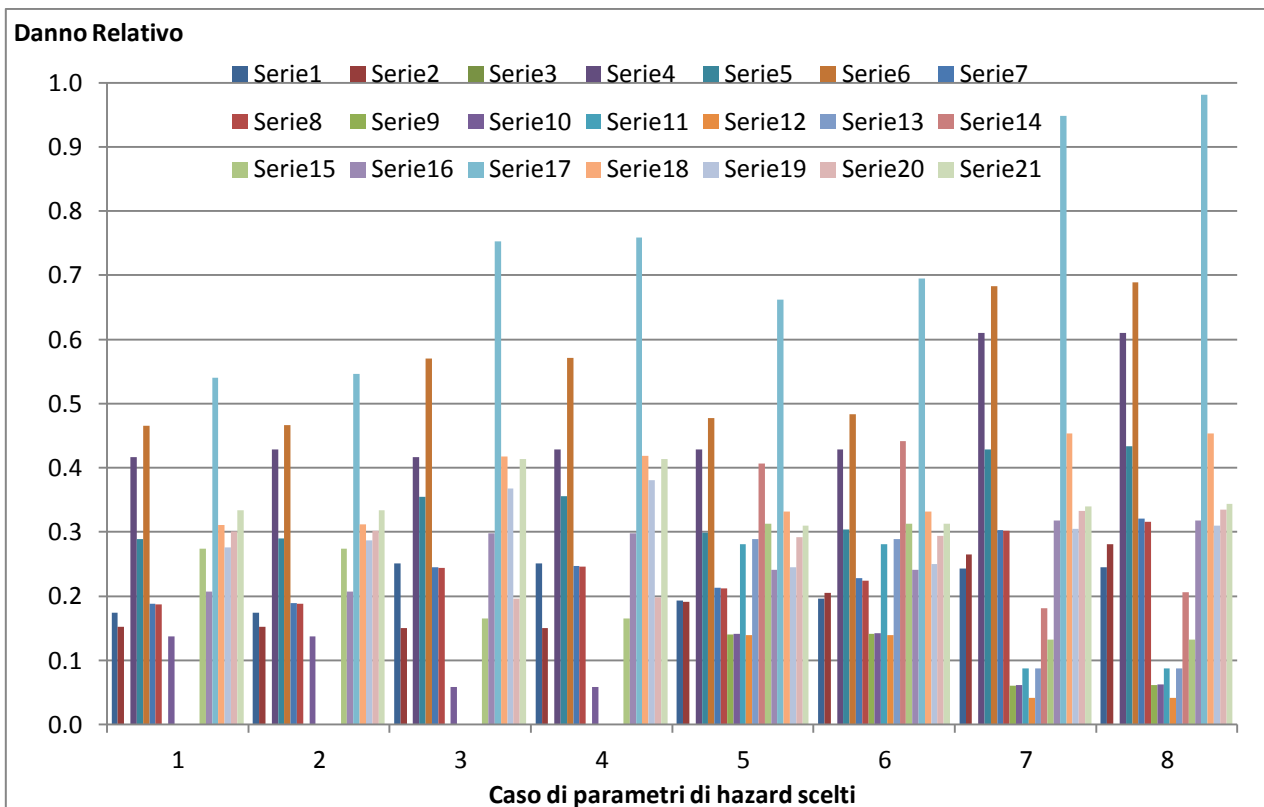


Fig. 5.3.2 Danno relativo per ogni combinazione di parametri di hazard scelta (1,2,...8) per ciascun edificio (denominato in legenda colorata come: Serie+codice edificio).

Si riportano per ciascuno degli otto casi analizzati al variare dei parametri di hazard le stime del danno assoluto a ciascun edificio in seguito all'alluvione:

DANNO ASSOLUTO STIMATO ALL'EDIFICIO IN EURO								
BASE					DENSA			
COD	h Base	h,v Base	h,d Base	h,v,d Base	h Densa	h,v Densa	h,d Densa	h,v,d Densa
1	1046645	1046740	1505779	1505874	1159662	1173842	1455284	1469464
2	2191117	2193705	2161901	2164489	2753353	2948244	3812282	4039450
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	718980	739729	718980	739729	740441	740441	1054622	1054622
5	1213241	1216508	1490796	1494063	1256726	1277311	1799685	1820270
6	1395800	1399301	1711031	1714532	1433297	1450364	2049060	2066126
7	938382	948067	1225123	1234807	1063275	1138925	1515302	1604379
8	1494601	1506950	1953386	1965735	1694264	1792004	2417508	2528675
9	0	0	0	0	1009694	1018719	436230	445254
10	592472	592472	253784	253784	609107	616238	263970	271101
11	0	0	0	0	253183	253183	78396	78396
12	0	0	0	0	600712	600712	179912	179912
13	0	0	0	0	706486	706486	214722	214722
14	0	0	0	0	881310	955320	391892	445814
15	3886398	3886398	2348145	2348145	4444294	4444294	1884266	1884266
16	663427	663427	953731	953731	771181	772031	1016216	1017066
17	726636	734630	1011149	1019143	890198	934594	1274079	1318476
18	316783	318499	425659	427375	337964	337964	462950	462950
19	1102468	1148227	1468858	1523893	979663	1001385	1218710	1240432
20	3027818	3043474	1977932	1993587	2940170	2962735	3352286	3374850
21	1002386	1002415	1241786	1241815	930029	939974	1020764	1030709
TOTALE	20317153	20440539	20448039	20580702	25455009	26064766	25898138	26546935

Tab. 5.3.5 Danno assoluto stimato su ciascun per ciascun caso di combinazione di parametri di hazard.

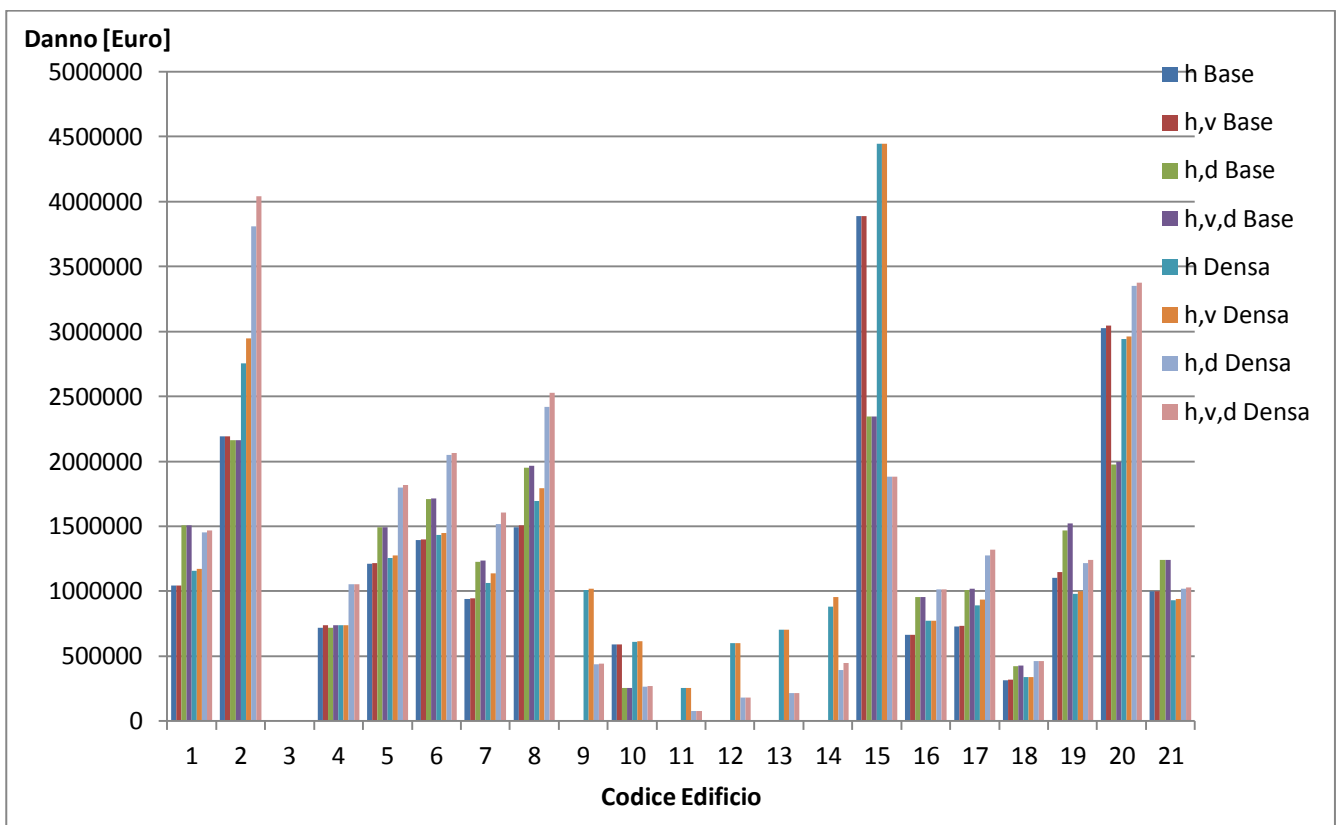


Fig. 5.3.3 Danno assoluto su ciascun edificio (1,2,...21) per ogni combinazione di parametri di hazard scelta (colore in legenda).

Come si nota il danno assoluto non è un parametro di facile lettura, essendo fortemente influenzato dai valori di mercato e dalle dimensioni dell'edificio e presentando valori molto alti per edifici come l'edificio 15, che è strutturato come diversi edifici adiacenti che formano un unico complesso molto ampio, o l'edificio 2, che è costituito da 3 condomini collegati formando un complesso residenziale con un gran numero di appartamenti.

Per poter osservare in maniera visivamente chiara alcuni risultati si mostrano ora i parametri di hazard e il danno (sia assoluto che relativo) calcolato per ciascun edificio solo nell'ipotesi di scenario modellato con geometria base; si sceglie tale configurazione perché permette il calcolo diretto della durata dell'allagamento e ha una modellazione numericamente più stabile. Tutti i parametri di hazard sono stati utilizzati.



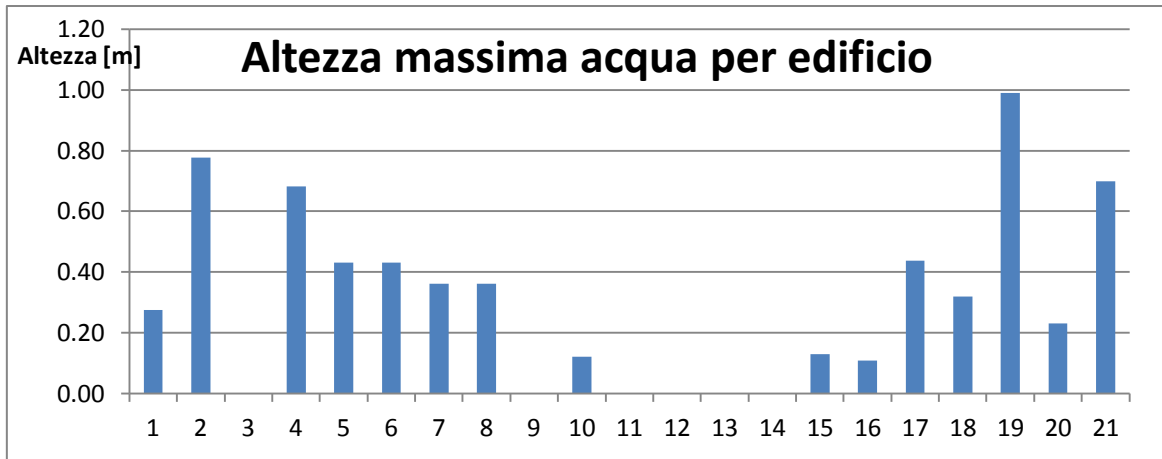


Fig. 5.3.4 Altezza massima d'acqua per ciascun edificio, configurazione geometrica base.

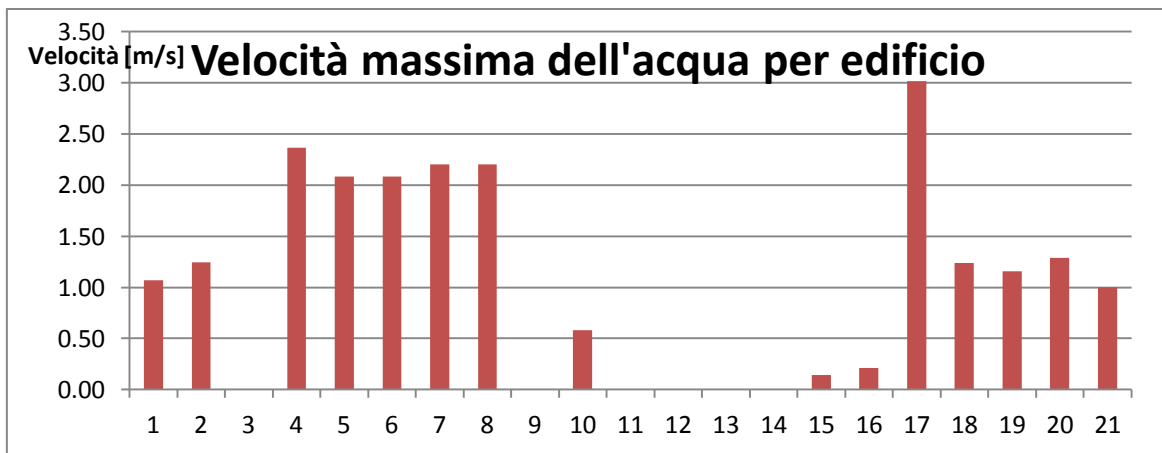


Fig. 5.3.5 Velocità massima dell'acqua per ciascun edificio, configurazione geometrica base.

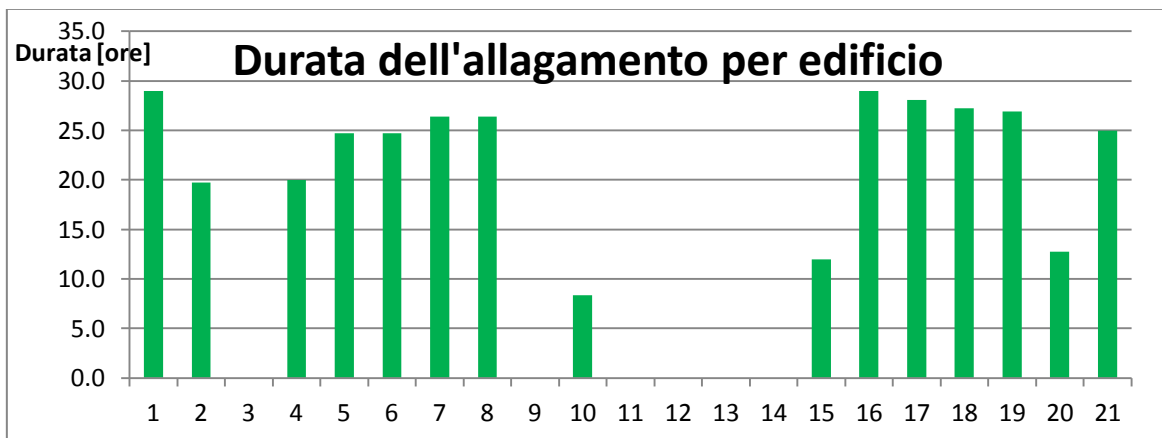


Fig. 5.3.6 Durata allagamento per ciascun edificio, configurazione geometrica base.

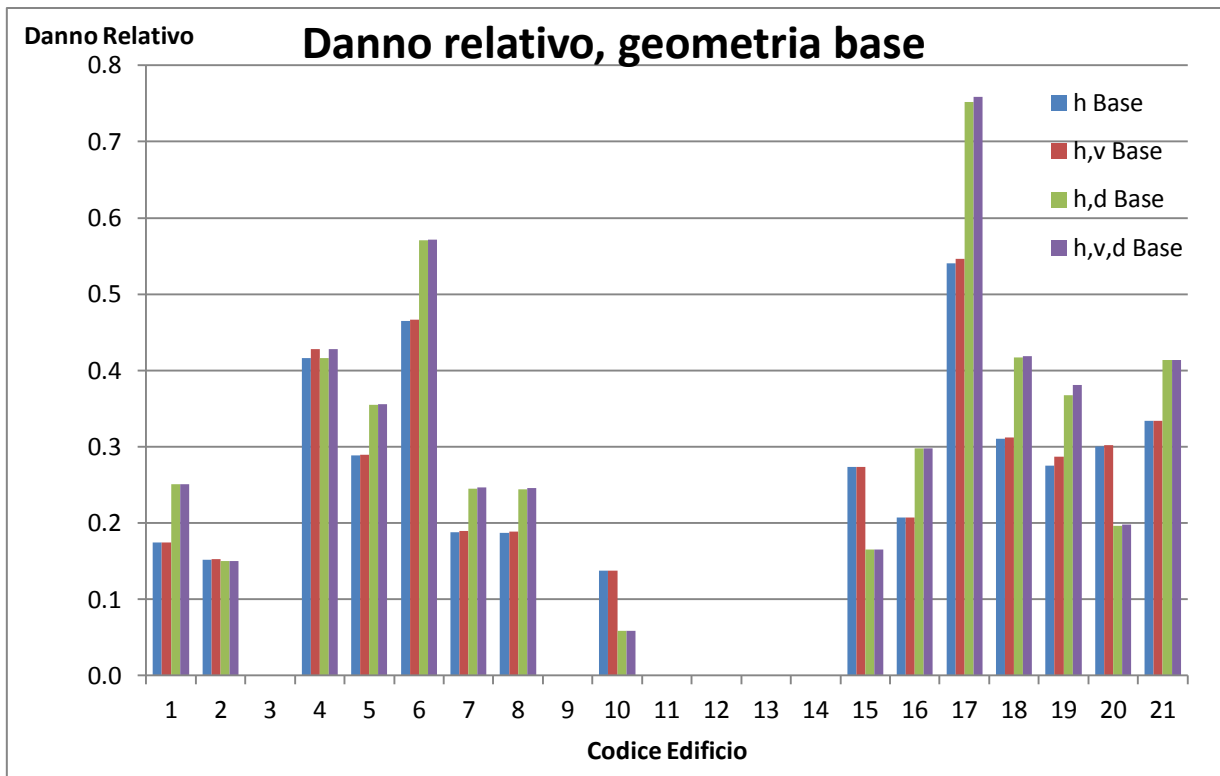


Fig. 5.3.7 Danno relativo per ciascun edificio, configurazione geometrica base.

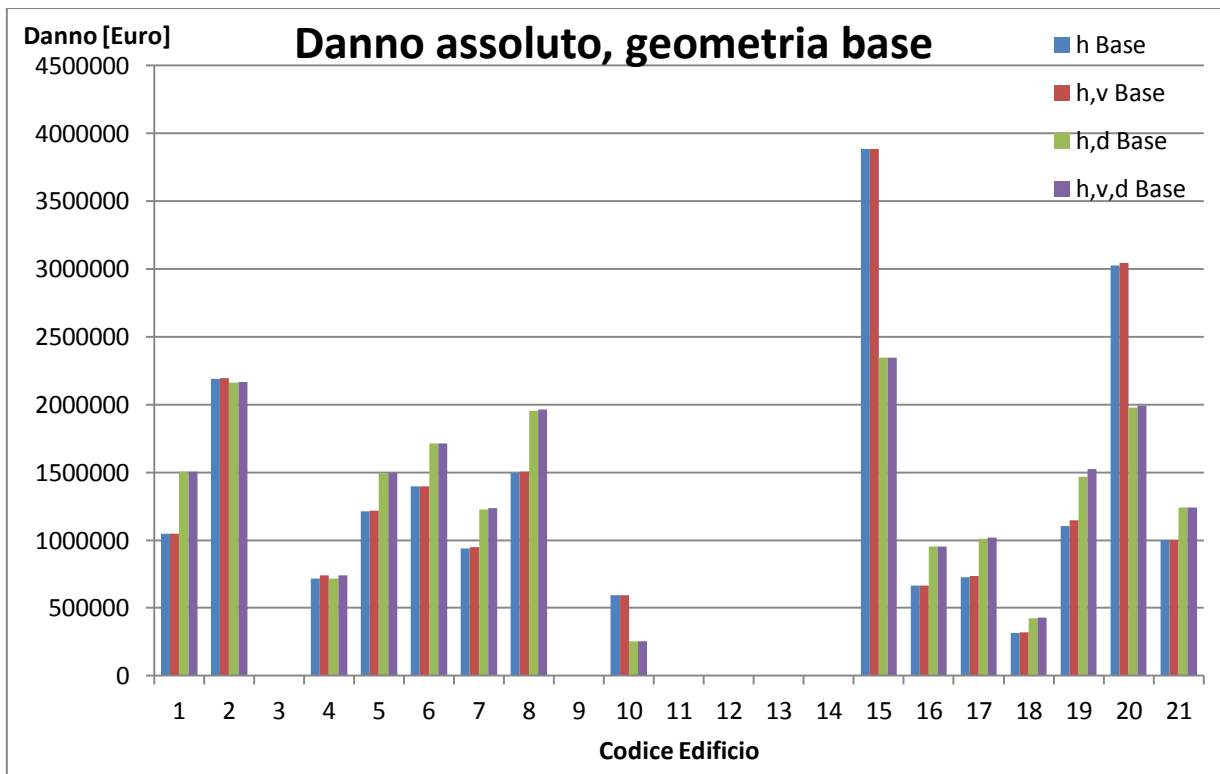


Fig. 5.3.8 Danno assoluto per ciascun edificio, configurazione geometrica base.

## *Interpretazione dei risultati*

Il danno relativo è una quantità sempre maggiore o uguale a zero poiché definita come rapporto tra una quantità che non è mai negativa, il danno assoluto, e una quantità sempre positiva,  $R/V$ . Avere danno relativo uguale a 1 significa che il costo di riparazione dei danni subiti dall'edificio è uguale al costo che si avrebbe a sostituire l'edificio con uno identico nella stessa zona. Avere danno relativo minore di 1 significa che riparare i danni costa meno che sostituire l'edificio con uno nuovo identico, ma si noti che avere danno relativo maggiore di 0.1 significa comunque avere danni ingenti sull'edificio, per esempio su una villa con valore di rimpiazzo di 1 Milione di Euro significa avere 100000 Euro di costo di riparazione dei danni. Avere danno relativo maggiore di 1 significa avere un costo di riparazione dei danni superiore al costo che si avrebbe a sostituire l'edificio con uno identico nella stessa zona. Dall'osservazione dei risultati, soprattutto in relazione alla valutazione del danno relativo, di più facile lettura rispetto a quella del danno assoluto per il fine di valutare la sensitività del modello di danno ai parametri di hazard, che è lo scopo di questa analisi, si può notare che:

-se per un certo edificio il parametro di hazard di altezza d'acqua è nullo allora il danno assoluto (e di conseguenza anche il relativo) su tale edificio è ovviamente nullo, questo infatti significa che l'edificio non è stato allagato e dunque non può aver subito alcun danno a seguito dell'alluvione;

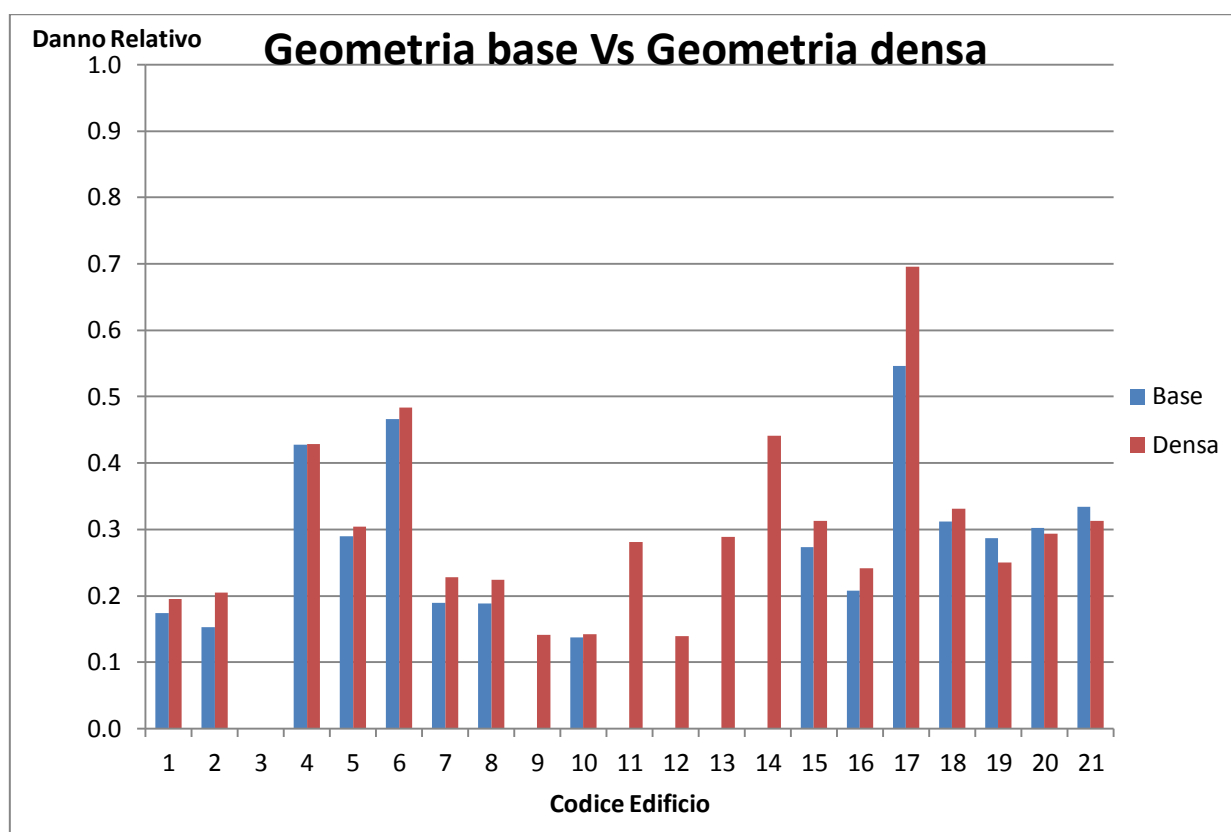
- l'altezza massima è il parametro di hazard fondamentale per il modello. I grafici però che mostrano le altezze d'acqua massime raggiunte in corrispondenza di ciascun edificio e i danni relativi su ciascun edificio hanno andamenti non sempre molto simili da un punto di vista qualitativo; infatti è piuttosto forte l'influenza di altri parametri, come quelli di esposizione, sul calcolo del danno relativo, nonché della durata dell'allagamento. Si prendano come esempio gli edifici 1 e 2. Per l'edificio 1 l'altezza d'acqua è minore che per l'edificio 2, ma il danno stimato è maggiore per l'edificio 1 che per l'edificio 2;

-il parametro di hazard di velocità massima ha un peso inferiore del parametro di altezza massima raggiunta, come si nota dalla scarsa variazione che caratterizza valori di danno relativo atteso se oltre al parametro di altezza massima si considera anche la velocità dell'acqua, nonostante tale parametro sia per alcuni edifici molto diverso dal valore di default;

-il parametro di hazard di durata dell'allagamento ha un peso inferiore all'altezza d'acqua, che comunque è il parametro che determina il trend generale del danno relativo atteso, ma mostra un peso decisamente superiore rispetto alla velocità, come si nota dalla variazione non trascurabile nel danno atteso su alcuni edifici se si aggiunge il parametro di durata.

Dall'osservazione dei grafici in figura 5.3.7 e in figura 5.3.8 si conclude che scegliere un modello idraulico per mezzo del quale è possibile valutare, oltre all'altezza massima dell'acqua, anche la velocità, non produce sostanziali differenze per quanto riguarda i risultati ottenuti dal modello di danno. Al contrario avere un modello idraulico per mezzo del quale si è in grado di stimare, oltre all'altezza massima, anche la durata dell'allagamento, permette una stima visibilmente diversa del livello di danno, assoluto o relativo.

Si propongono ora due grafici di confronto tra i risultati di danno (sia relativo che assoluto) ottenuti con parametri di hazard provenienti da modelli idraulici con diverse configurazioni geometriche al fine di dare una valutazione della sensitività del modello di danno alla geometria scelta per il modello idraulico. Solo l'altezza d'acqua e la velocità sono usate come parametri di input, per la durata si utilizza il valore di default, non potendola stimare in maniera diretta dal modello idraulico a geometria densa.



*Fig. 5.3.9 Confronto tra danni relativi stimati su ciascun edificio con i modelli a geometria base e geometria densa utilizzando in entrambi i casi i parametri di hazard di altezza massima e velocità massima ottenuti dal modello idraulico (casi 2 e 6).*

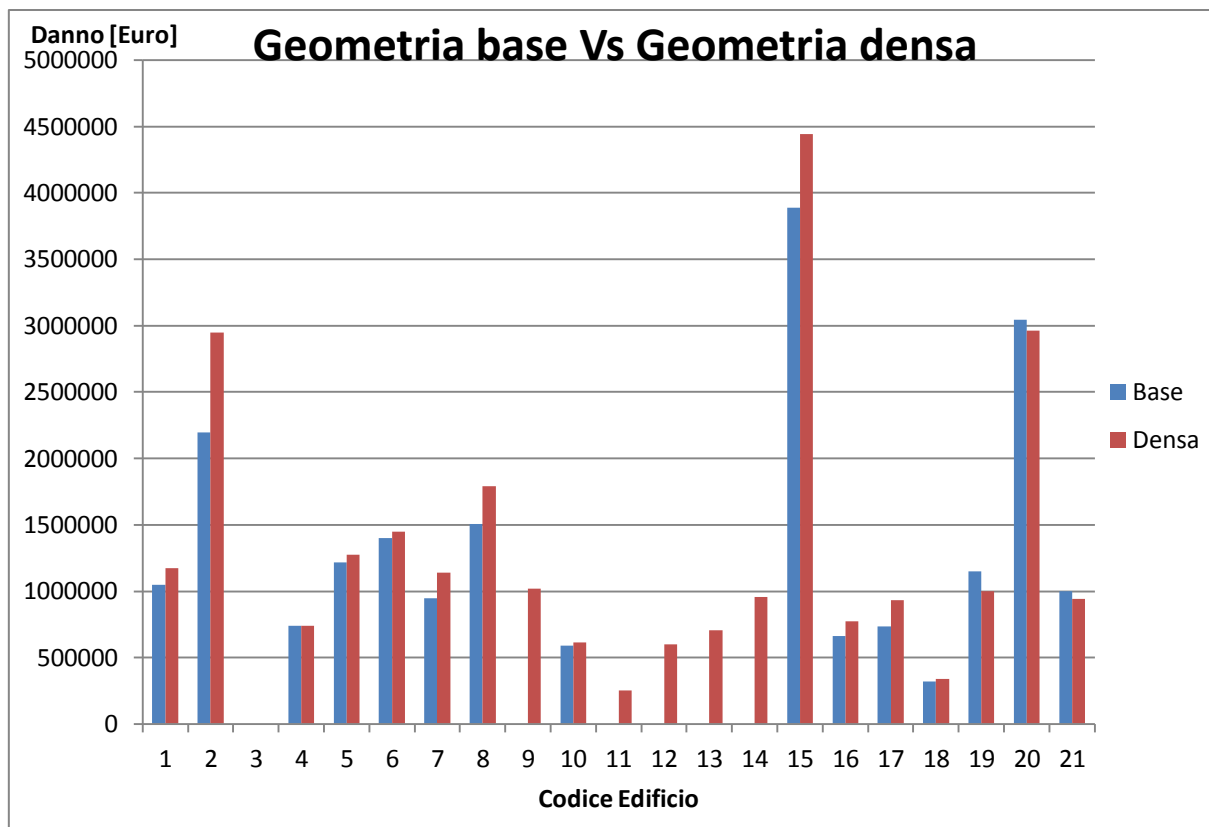


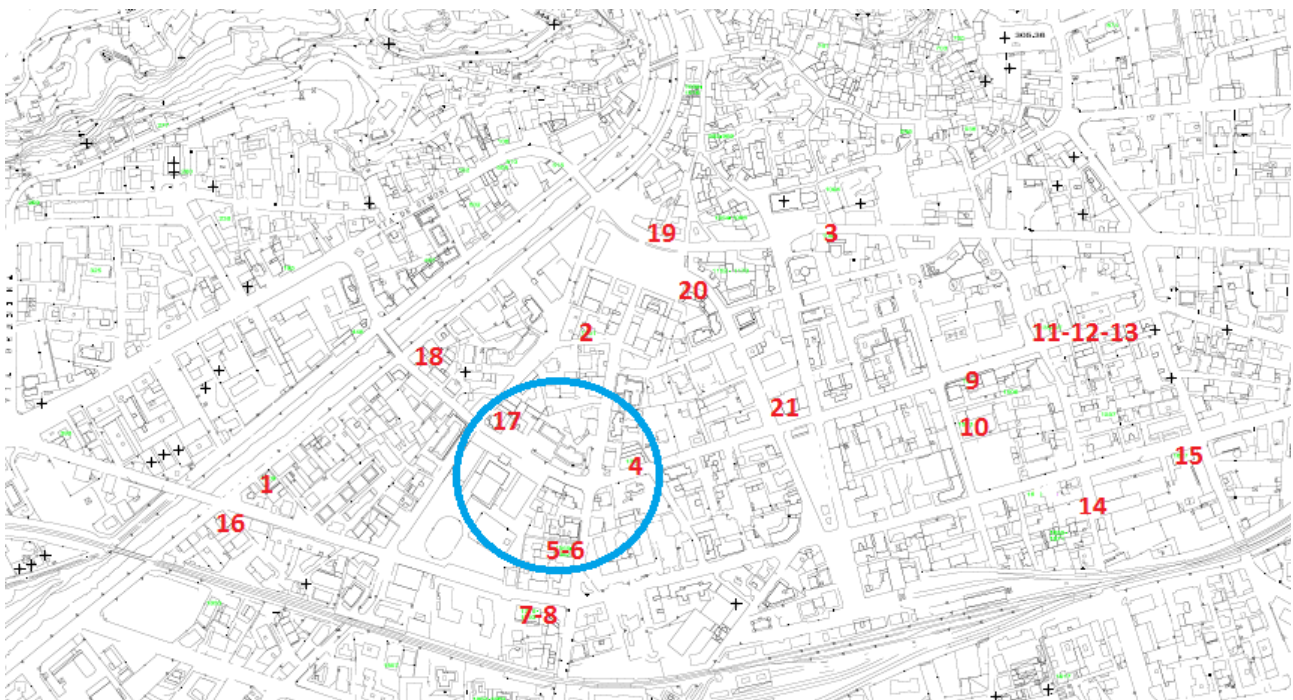
Fig. 5.3.10 Confronto tra danni assoluti stimati su ciascun edificio con i modelli a geometria base e geometria densa utilizzando in entrambi i casi i parametri di hazard di altezza massima e velocità massima ottenuti dal modello idraulico (casi 2 e 6).

La scelta di un modello idraulico di allagamento piuttosto che un altro conta molto per identificare le zone colpite dall'alluvione e quelle non colpite e di conseguenza gli edifici che subiscono allagamento oppure no. Si nota infatti, per esempio per gli edifici 11-12-13-14 che il danno assoluto (e di conseguenza anche il relativo) è nullo se si usa il modello idraulico a geometria base che non prevede allagamento in tale zona, ma è molto grande se si usa il modello a geometria densa che lo prevede. La sensibilità del modello di danno alla configurazione geometrica scelta per il modello idraulico risulta molta quando l'edificio in analisi si trova in una zona che secondo un modello con una configurazione geometrica può essere allagata mentre con un altro con una configurazione geometrica differente no. Meno accentuata risulta essere per edifici che in entrambi i modelli risulterebbero allagati.

Risulta piuttosto utile stimare in maniera accurata i parametri di esposizione se si desidera calcolare il danno su un determinato edificio. I parametri di esposizione pesano molto, come si nota per gli edifici 11-12-13 per i quali sono stimati, dati gli stessi parametri di hazard, danni sia assoluti che relativi molto differenti, addirittura si nota che il danno relativo stimato sull'edificio 12 è circa la metà di quello stimato sugli edifici 11 e 13.

### *Edifici maggiormente danneggiati*

Per gli edifici 4-6-17 si osservano, per entrambe le configurazioni geometriche proposte, danni relativi stimati decisamente superiori grandi rispetto a molti degli altri edifici studiati e quindi costi di riparazione che si avvicinano al costo che si avrebbe a rimpiazzare l'edificio con un nuovo identico. Questi edifici si trovano in una zona colpita molto severamente dall'alluvione, infatti l'edificio 17 si affaccia su Via Alessi, il percorso principale dell'acqua, mentre gli edifici 4 e 6 su Via Caimi, che assieme a Via Alessi, è un percorso preferenziale del flusso. Anche l'edificio 14 subisce danno relativo molto alto se si considera il modello idraulico a geometria densa, ma secondo quello a geometria base non subisce allagamento: a causa di questa discordanza si sceglie di non considerarlo per questa analisi.



*Fig. 5.3.11 Posizione in Sondrio degli edifici per cui si stima un danno relativo maggiore (4-6-17)*

Si noti anche che gli edifici 4 e 17 sono gli unici due edifici studiati a non essere condomini ma bensì ville singole, la tipologia di costruzione considerata influenza molto la stima del danno relativo, infatti edifici come ville singole di uno o due piani presentano solitamente danni relativi più alti rispetto a condomini con molti piani per gli stessi parametri di hazard, anche perché hanno generalmente valori di  $R/VN$  più bassi. Si riporteranno ora dei confronti dettagliati tra le ville 4 e 17 poiché sono tra gli edifici più severamente colpiti, hanno la stessa tipologia strutturale quindi un confronto è più significativo, sono sui due percorsi principali dell'acqua e sono edifici completamente residenziali (si ricorda che il codice di calcolo nasce per edifici completamente residenziali ed è adattato per edifici residenziali con negozi al piano terra come in gran parte dei condomini in centro Sondrio). Sono riportate anche alcune foto degli edifici 4 e 17 scattate in data del sopralluogo, le foto di alcuni altri edifici sono in allegato alla tesi.



*Fig. 5.3.12 Edificio 4, Via Caimi 41, Sondrio. Vista frontale.*



*Fig. 5.3.13 Edificio 4, Via Caimi 41, Sondrio. Altezza del piano terra a filo del marciapiede, solo 10 cm al di sopra del piano stradale.*

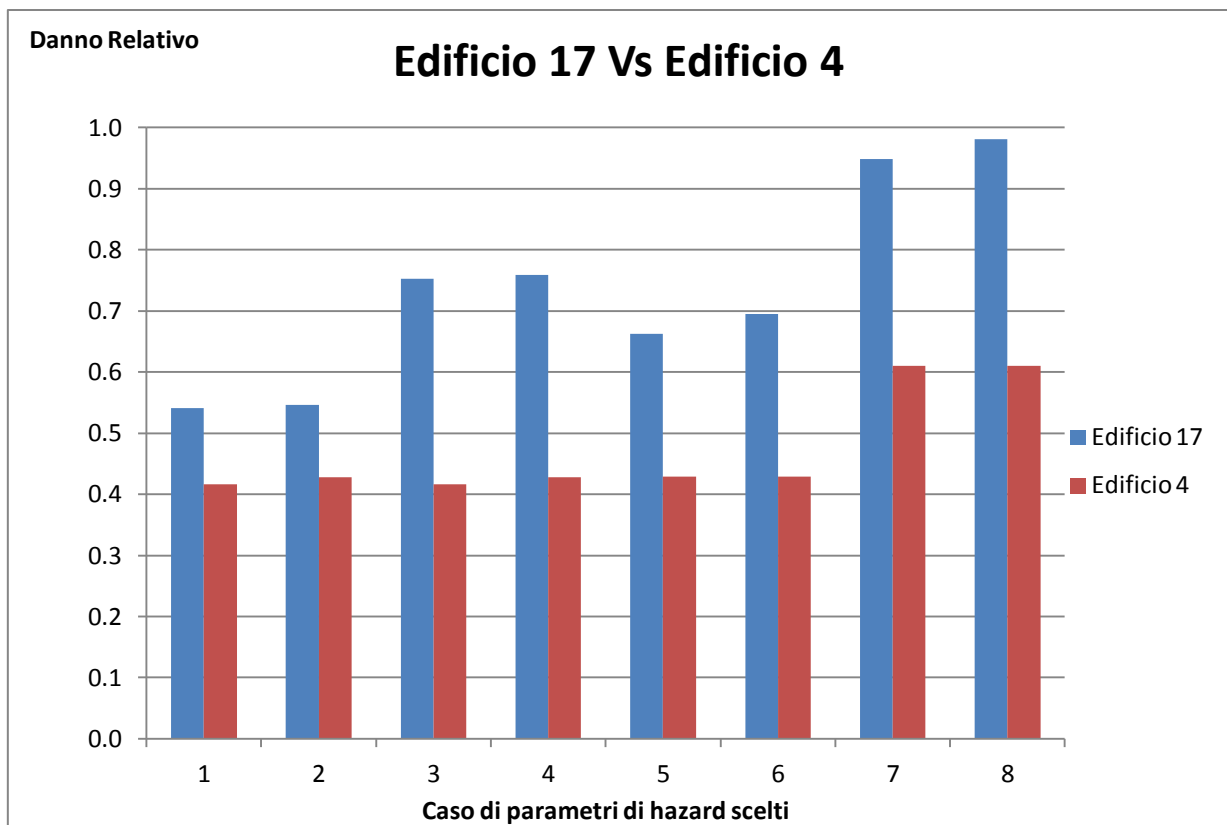


*Fig. 5.3.14 Edificio 17, Via Alessi 39, Sondrio.*



*Fig. 5.3.15 Edificio 17, Via Alessi 39, Sondrio. Altezza del piano terra a circa 30 cm dal piano stradale.*





*Fig. 5.3.16 Danni relativi stimati agli edifici 4 e 17 al variare dei casi di parametri di hazard scelti.*

Dall'osservazione dettagliata dei danni su questi due edifici che si trovano in zone molto severamente colpite dall'allagamento si nota quanto il danno previsto sia grande, nel caso dell'edificio 4 esso si aggira attorno al 50% mentre nel caso dell'edificio 17, che si trova in Via Alessi, esso sfiora, sotto alcune combinazioni di parametri di hazard il 100% del costo stimato dell'edificio stesso nuovo. E' anche in questo caso mostrato quanto sia l'altezza d'acqua il parametro fondamentale per la stima del danno, seguito dalla durata dell'allagamento, mentre molto meno influente è la velocità.

Si nota che per l'edificio 17, per queste analisi, la durata dell'allagamento ha un peso superiore alla configurazione geometrica scelta (anche perché la durata di default è piuttosto diversa da quella proposta dal modello idraulico a geometria base). Infatti se si prende come riferimento il danno relativo stimato nel caso 1 e si osservano i casi 3 e 5 si nota che il danno relativo stimato nel caso 3 (inserendo il valore di durata ottenuto dal modello idraulico) si discosta da quello stimato nel caso 1 più di quello stimato nel caso 5 (cambiando configurazione geometrica).

## Curve di danno

Sempre fissando come riferimento gli edifici 4 e 17, viste le loro caratteristiche che li rendono ideali, essendo completamente residenziali, per il calcolo del danno con il modello utilizzato, si tracciano le curve di danno per entrambi, ovvero grafici che mostrano il valore stimato di danno (in questo caso si considera il danno relativo) al variare del parametro di hazard scelto, tenendo fissi tutti gli altri. Per i parametri di hazard di velocità massima e durata dell'allagamento, quando essi devono essere fissati, si utilizzano i valori di default. Per costruire le curve di danno al variare della velocità massima e della durata dell'allagamento si fissa un'altezza d'acqua massima di 1 metro.

Le curve di danno sono uno strumento interpretativo importante, che permette una lettura critica dei risultati finora ottenuti. A causa della loro dipendenza dall'edificio scelto è possibile mostrarle solo ora.

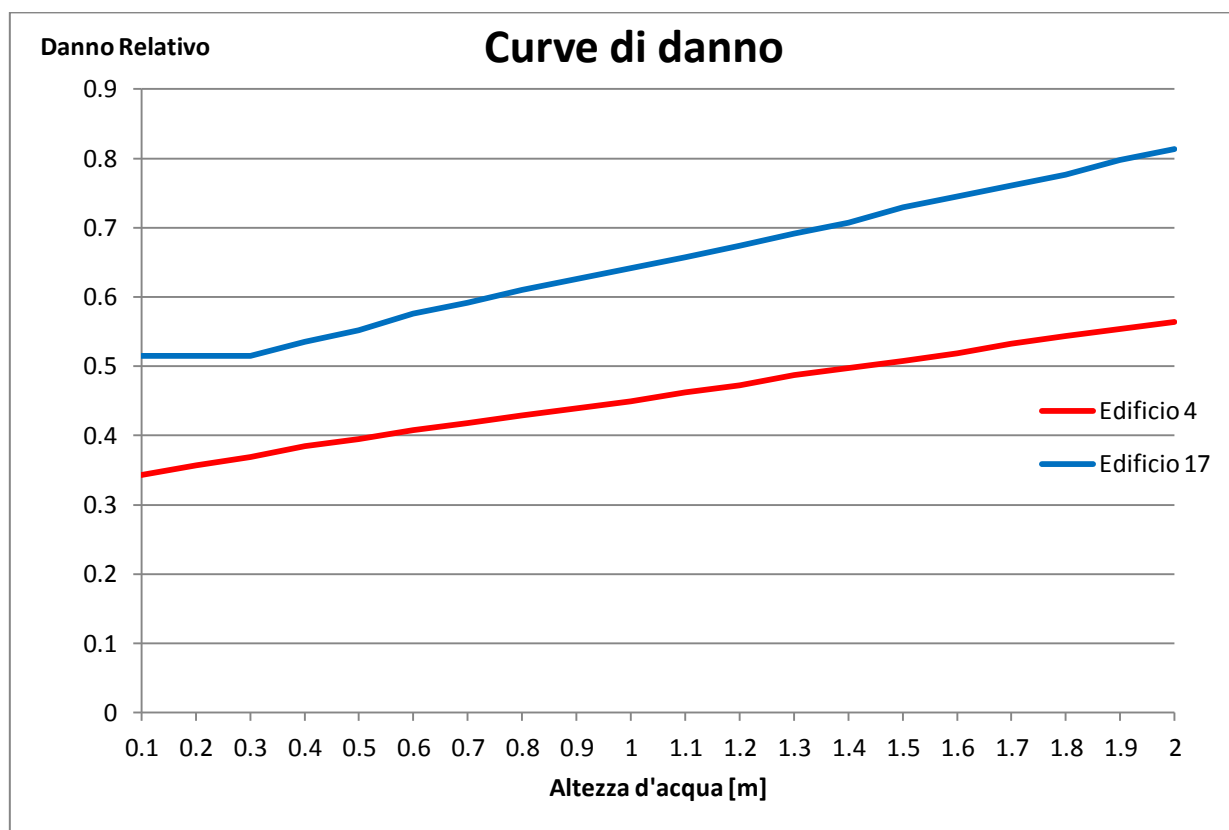


Fig. 5.3.17 Danno relativo atteso, al variare dell'altezza massima d'acqua, sugli edifici 4 e 17.

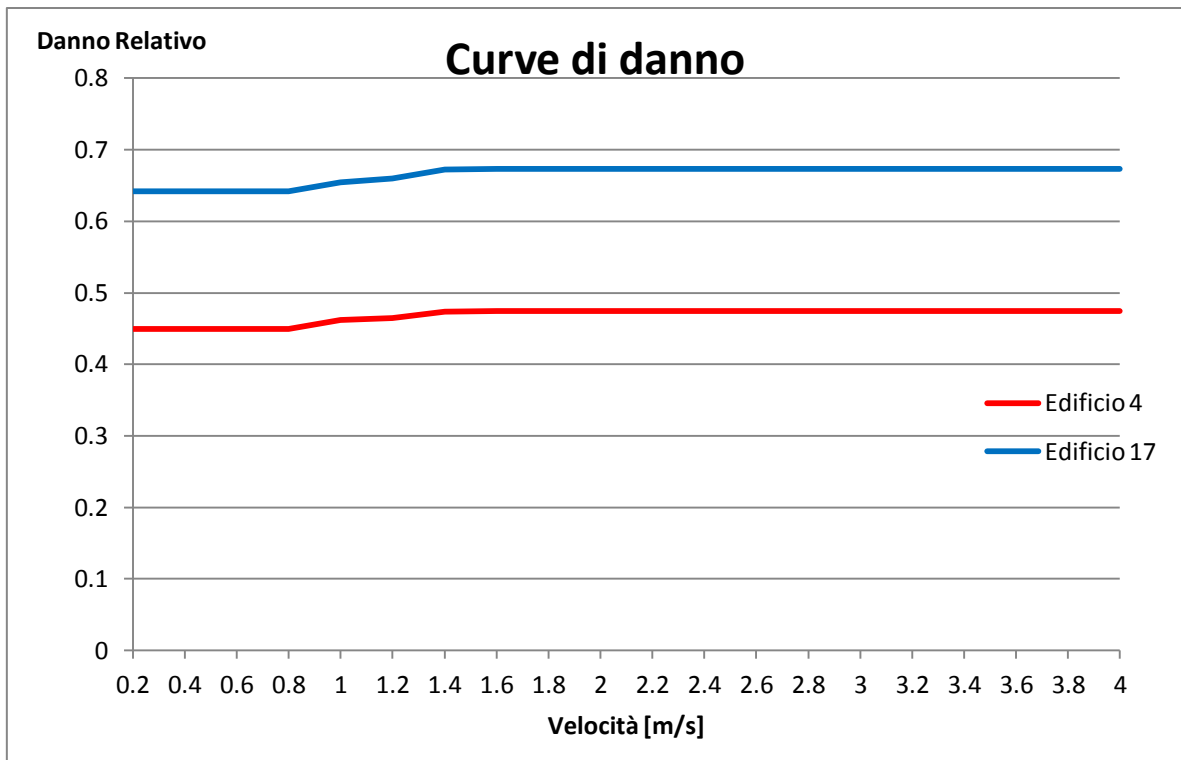


Fig. 5.3.18 Danno relativo atteso, al variare della velocità massima dell'acqua, sugli edifici 4 e 17.

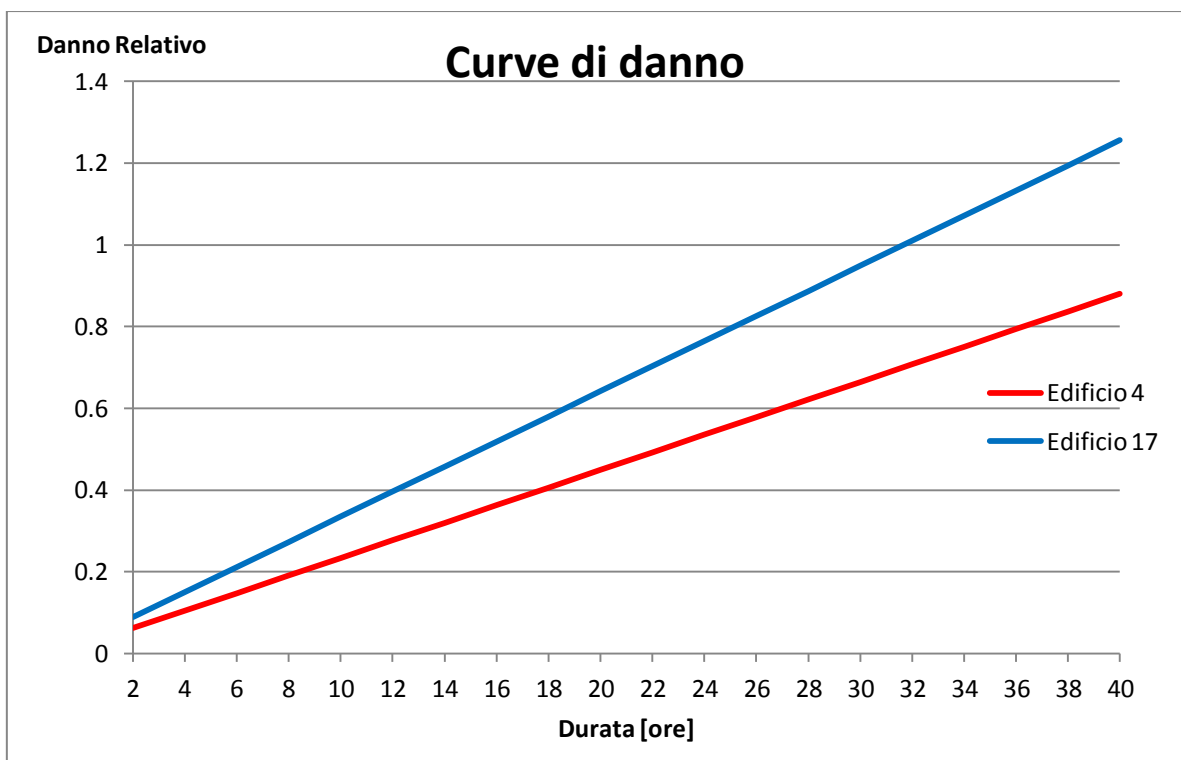


Fig. 5.3.19 Danno relativo atteso, al variare della durata dell'allagamento, sugli edifici 4 e 17

Il danno relativo previsto sull'edificio 17, a parità di parametri di hazard, è maggiore di quello previsto per l'edificio 4. Questo è dovuto alle differenze nei parametri chiamati dal modello di esposizione dei due edifici. La differenza è dovuta soprattutto al numero di piani degli edifici, infatti l'edificio 17 ha due piani, quindi il piano terra sarà fortemente colpito dall'allagamento e quello superiore meno, mentre l'edificio 4 ha tre piani, se per i primi due si presuppone un impatto simile ai primi due dell'edificio 17 per il terzo, trovandosi più alto rispetto al suolo, si presuppongono meno danni e quindi un danno relativo all'edificio inferiore se si valuta l'edificio nella sua completezza. Si consideri inoltre che essendo l'edificio 4 di superficie maggiore al 17 perché ha un piano in più avrà anche un valore  $R/VN$  maggiore e questo contribuisce ad avere un danno relativo minore. L'edificio 17 ha il piano terra a 30 cm di altezza rispetto al suolo, quindi, fino a che l'acqua non supera i 30 cm di altezza, solo la cantina e il garage saranno allagati, ma non il piano terra, dunque si avrà valore costante di danno relativo fino a un'altezza di 30 cm, mentre per l'edificio 4 ciò non si nota poiché l'altezza del piano terra rispetto al suolo è solo 10 cm quindi non appena essa è superata inizierà l'allagamento del piano terra.

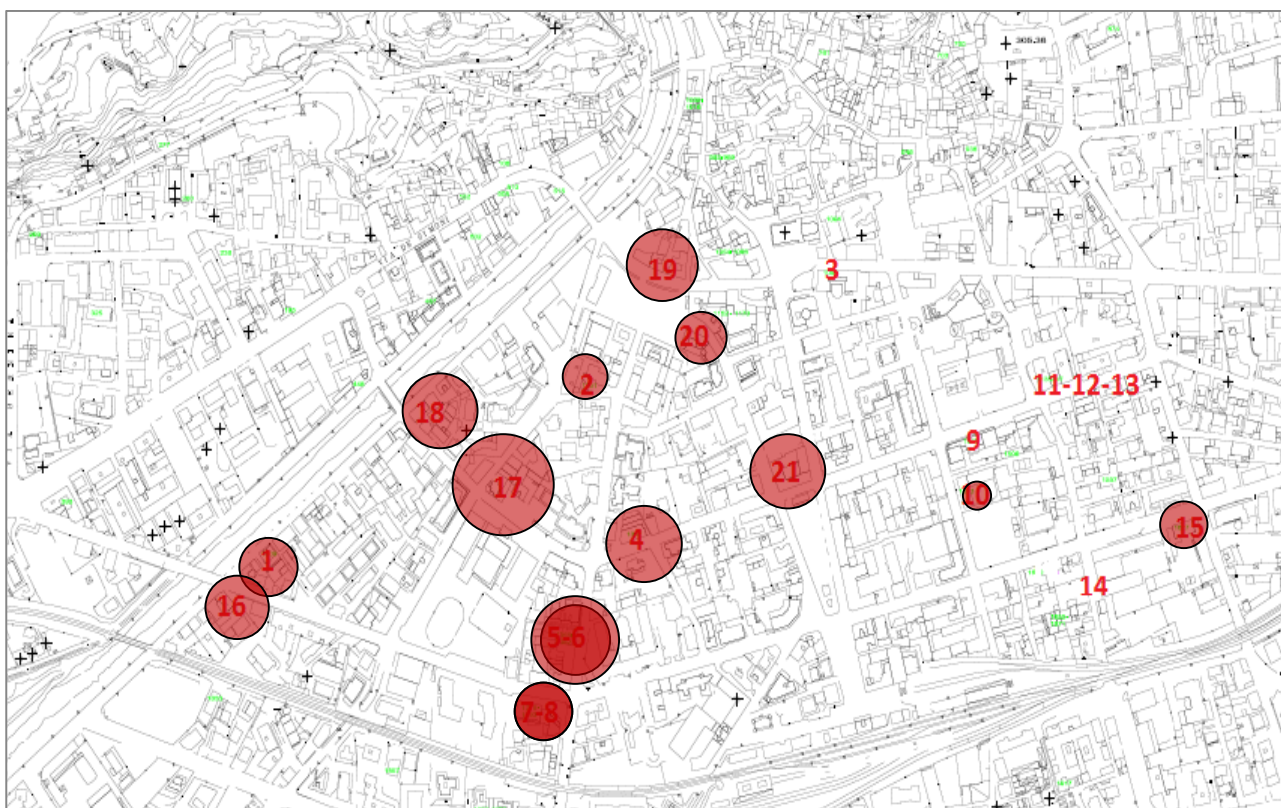
L'andamento delle curve di danno mostra chiaramente che il danno relativo aumenta all'aumentare dell'altezza massima d'acqua raggiunta, questo è ragionevole e intuitivo da un punto di vista qualitativo. Lo stesso vale all'aumentare della velocità massima o e della durata. Osservando le curve di danno al variare dell'altezza massima si nota che la crescita del danno relativo, una volta iniziato l'allagamento del piano terra è quasi lineare, solo leggere oscillazioni sono mostrate, probabilmente dovute ai superamenti delle diverse soglie di danno ai diversi elementi della struttura. Si nota inoltre una crescita più rapida per la curva di danno relativa all'edificio 17, questo è giustificato dal fatto che esso ha un valore minore, rispetto all'edificio 4, di  $R/VN$ , che essendo a denominatore (e costante) nella formula di calcolo del danno relativo ha influenza inversa rispetto alla pendenza.

Osservando le curve di danno al variare della velocità massima si può notare, ancora una volta, che il peso di tale parametro nel modello è piuttosto limitato, infatti per velocità massime anche molto diverse si ottengono danni stimati piuttosto simili.

Le curve di danno costruite al variare della durata dell'allagamento mostrano che questo parametro pesa molto nel modello e per variazioni di durata di poche ore si possono avere stime di danno relativo diverse in maniera significativa.

## 5.4 CONCLUSIONI RIGUARDANTI LA MODELLAZIONE DEL DANNO E CONFRONTO CON TESI PRECEDENTE

Al fine di mostrare, da un punto di vista qualitativo, dove sono posizionati spazialmente gli edifici più o meno colpiti si propone un grafico in cui, scelto il modello idraulico a geometria base e utilizzati tutti i tre parametri di hazard ottenibili da esso, si rappresenta il danno relativo su ciascun edificio in corrispondenza della sua posizione.



*Fig. 5.4.1 Rappresentazione spaziale delle stime di danno relativo ottenute. Modello idraulico a geometria base, utilizzati i parametri di altezza massima, velocità massima e durata (caso 4).*

A causa della forte variabilità spaziale dei parametri di esposizione degli edifici, che pesano molto sulla stima del danno, risulta difficile trovare una relazione tra danno relativo atteso e posizione dell'edificio. Si noti che edifici molto vicini possono presentare caratteristiche di esposizione completamente diverse tra loro.

Il modello di danno proposto funziona puntualmente, ovvero sul singolo edificio, è quindi necessario, se si vuole una stima il più possibile accurata del danno di quest'ultimo a seguito di un'alluvione, avere a disposizione dati per i parametri di esposizione di quest'ultimo, che contano molto nel calcolo del danno, e soprattutto di avere la possibilità di estrarre da un modello idraulico i parametri di hazard in corrispondenza di quest'ultimo.

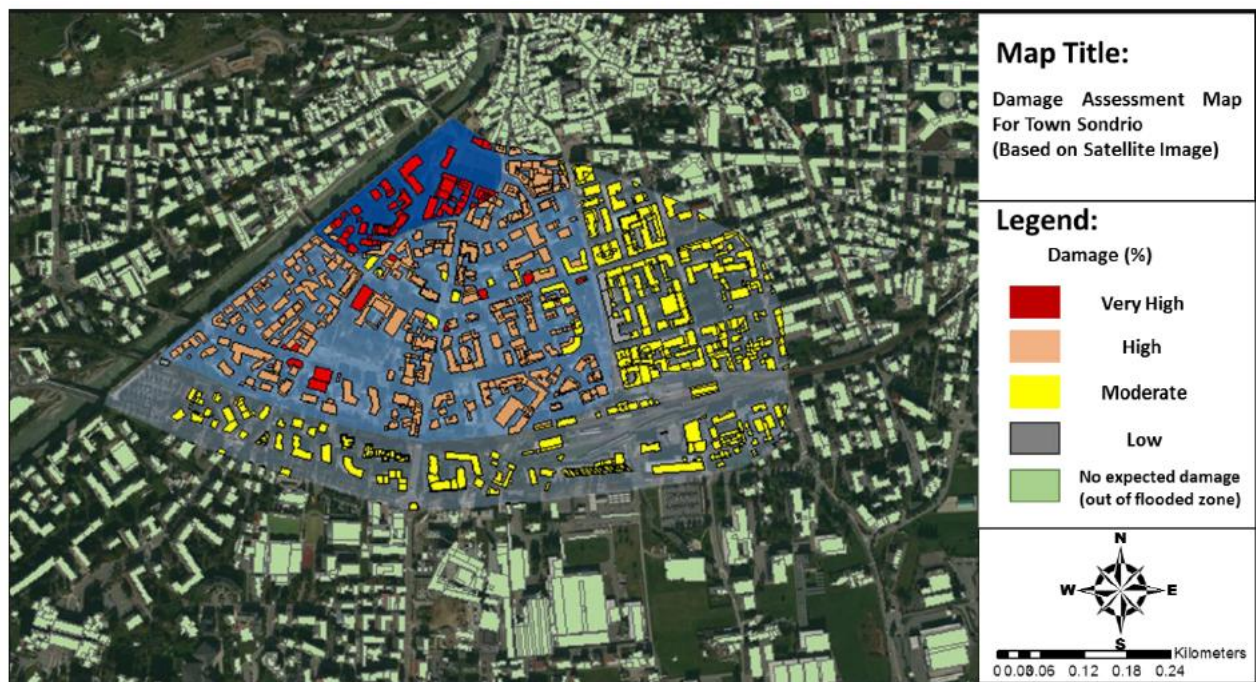
Come l'interpolazione spaziale dei risultati del modello idraulico di allagamento introduce un errore, come si era discusso al capitolo precedente a proposito della costruzione delle mappe di hazard, così anche l'interpolazione spaziale dei risultati ottenuti dal modello di danno può produrre un errore. Tale errore può diventare molto grande se l'edificio si dovesse trovare in una posizione per cui già nel modello idraulico non è possibile estrarre i parametri di hazard per questo punto senza ricorrere all'interpolazione dei risultati idraulici. Per interpolare invece i risultati di danno ottenuti puntualmente, in modo da avere stime sul danno per interi isolati, sarebbe necessario uno studio approfondito dei metodi di interpolazione che è lecito usare in un contesto come questo, in cui si possono avere stime del danno molto diverse anche a partire da parametri di hazard uguali a causa delle grosse differenze nei parametri di esposizione di edifici anche adiacenti, come per esempio gli edifici 5 e 6. Questo tema non è stato trattato in questa tesi, in cui ci si è limitati a una stima puntuale del danno, mentre l'interpolazione spaziale è stata studiata solo per il modello idraulico.

Si può concludere che puntualmente il modello di danno, usato in relazione al modello idraulico, può presentare una stima del danno atteso su un edificio se esso è in una posizione favorevole; se la posizione non fosse favorevole bisognerebbe ricorrere all'interpolazione spaziale dei risultati, problema non banale da affrontare.

E' importante sottolineare anche un limite di questo modello: la dimensione temporale dell'allagamento è tenuta conto solo con il valore di durata dell'alluvione, per altri parametri di hazard (altezza e velocità) il software usa i valori massimi, ma altezza e velocità variano nel tempo durante un allagamento. Questo introduce una grossa semplificazione della realtà, che può essere ritenuta ragionevole al fine della stima dei danni, ma è giusto tener presente che il modello idraulico può restituire l'andamento di altezza e velocità al variare del tempo mentre il modello di danno non sa sfruttare questa informazione che dunque va persa.

### *Risultati ottenuti nella tesi precedente*

Izadifar e Babae (2015) hanno trattato la modellazione del danno a seguito di un'alluvione a Sondrio utilizzando il modello HAZUS. In tale lavoro il problema della valutazione del danno è stato affrontato in maniera più semplificata, limitandosi a classi di edifici e ottenendo una corrispondenza quasi 1:1 tra mappe di hazard e mappe di rischio.



*Fig. 5.4.2 Mappa di rischio proposta da Izadifar e Babae (2015).*

In questa tesi invece il modello di danno proposto è più sofisticato ed è applicato in maniera puntuale, ovvero sul singolo edificio. Questo da un lato ovviamente fa presupporre una maggiore accuratezza della stima del danno, ma dall'altro apre a una serie di problemi legati all'interpolazione spaziale dei risultati.

## 6 CONCLUSIONE

Il rischio alluvionale, come mostrano i fatti più o meno recenti, è un problema diffuso e crescente, anche a causa dei cambiamenti climatici. Una sua quantificazione non è sempre facile e richiede strategie modellistiche complesse e approcci spesso multidisciplinari, ma la concretezza del problema rende necessaria una stima. Non si può quindi prescindere dalla messa a sistema di conoscenze provenienti da diverse discipline e dei relativi strumenti modellistici.

Le alluvioni in zona montana sono spesso conseguenza di piene di torrenti piuttosto pendenti e sono caratterizzate da flussi molto maggiori di quelli in regime normale, dotati di grande energia e capacità di trasporto di sedimenti. In tali eventi, oltre alla portata liquida, bisogna considerare anche la presenza di una significativa componente solida, come richiesto anche dalle relative normative (European Floods Directive).

In questa tesi è stato studiato l'allagamento della città di Sondrio, che si trova alle porte della Valmalenco, in un'area montana in Nord Italia. All'interno di questa valle nasce e scorre il torrente Mallero, il quale sfocia nel fiume Adda nei pressi della città di Sondrio, dopo averne attraversato il centro.

In questo studio, fissato un evento meteorico con tempo di ritorno di 100 anni, è stato per prima cosa modellato uno scenario di alluvione del torrente Mallero. Il bacino della Valmalenco è stato diviso in due parti, una a monte di un certo punto, denominato breakpoint, per la quale si considera opportuno effettuare una modellazione con modello geologico di erosione, e una a valle, per la quale si effettua una modellazione idraulico-morfologica monodimensionale, considerando la componente di trasporto solido di maggior importanza rispetto a quella erosiva. Utilizzando il modello di erosione di Gavrilovic è stato stimato un volume di sedimenti nell'ordine di un milione di metri cubi che, a causa dell'intensità del fenomeno, supera il breakpoint nel corso dell'evento. Tale dato è usato come punto di partenza, assieme all'idrogramma stimato per l'evento, per la modellazione idraulico-morfologica. Diverse analisi sono state eseguite al fine di valutare il peso dei diversi parametri e per poter effettuare scelte ritenute ragionevoli di questi ultimi per la modellazione dello scenario: in particolare si osserva che, al fine di valutare la quantità di sedimenti che giungono nel tratto di torrente all'interno di Sondrio, il modello idraulico-morfologico è poco sensibile all'apporto totale di sedimenti, qualora esso sia particolarmente grande, a causa della limitata capacità di trasporto del Mallero; quindi è stata ritenuta quasi ininfluenza la stima, molto grossolana, ottenuta dal modello di Gavrilovic per la modellazione dello scenario considerato.

E' stata identificata la posizione lungo il letto del torrente Mallero, nei pressi del ponte in Via De Simoni, nel centro di Sondrio, come la zona dove può avvenire lo straripamento ed è stato stimato un idrogramma di sfioro.



Per scegliere come modellare lo scenario di allagamento della città di Sondrio è stato studiato un caso sintetico. Da tale studio è stato possibile scegliere River2D come software più adatto tra quelli a disposizione e ottenere diverse indicazioni su come costruire il modello dell'inondazione della città. Il software HEC-RAS, che permetterebbe la creazione di un modello unico comprendente sia la modellazione monodimensionale del Mallero che l'allagamento di Sondrio, grazie alla possibilità di creare modelli ibridi, in parte 1D e in parte 2D, non è ancora sufficientemente sviluppato. Riguardo la costruzione di modelli di inondazione con River2D, in particolare, si è notato che il coefficiente di immagazzinamento è un parametro piuttosto influente nella modellazione della propagazione di un'onda di allagamento. Tra le altre cose si è inoltre notato che una configurazione a blocchi chiusi permette una modellazione semplice e ragionevole degli edifici di una città e che i modelli rispondono secondo le attese a condizioni al contorno di monte di portate variabili nel tempo.

E' stato quindi possibile procedere alla modellazione dello scenario di allagamento di Sondrio e valutarne i parametri di hazard. Sono stati usati tre diversi modelli geometrici, dei quali due comprendenti il territorio della città nella sua quasi interezza; a seconda della configurazione geometrica scelta e dei parametri usati nella modellazione si ottengono diversi possibili impatti dell'alluvione sulla città, soprattutto per quanto riguarda l'estensione dell'area allagata. La pericolosità è stata rappresentata prendendo come riferimento i parametri di hazard di altezza massima dell'acqua, velocità massima del flusso idrico e durata di allagamento nei punti dove in ciascun modello si prevede inondazione. Sono state costruite sei mappe di hazard, rappresentanti altezza massima e velocità massima relative a tre diversi modelli.

Infine sono stati valutati il danno relativo ed assoluto su alcuni edifici. Per farlo è stato usato il modello INSYDE, mai applicato prima su edifici della città di Sondrio. Nello studio del danno particolare attenzione è stata data alla sensitività del modello di danno ai parametri di hazard, ovvero quelli ottenuti dalla modellazione idraulica dell'allagamento, nonché alla scelta del modello idraulico stesso. Ne è risultato che il modello di danno, il cui parametro fondamentale è l'altezza massima raggiunta dall'acqua, è molto più sensibile alla durata dell'allagamento che alla velocità massima raggiunta. Il modello di danno è inoltre molto sensibile alla configurazione geometrica scelta per la modellazione idraulica, soprattutto se si studiano edifici che con un modello idraulico con una configurazione geometrica sono allagati mentre con uno con una configurazione geometrica diversa no.

Per lo scenario considerato in alcune zone si possono supporre altezze d'acqua di un metro o più, o velocità del flusso idrico superiori ai 2 metri al secondo. Per alcuni edifici si possono stimare danni con un costo di riparazione addirittura prossimo al valore dell'edificio stesso. Si possono comunque prevedere danni non trascurabili per molti edifici nella città.

Dopo aver presentato i risultati, è possibile procedere a una revisione critica dell'intera modellazione. In questo lavoro si possono distinguere chiaramente 5 blocchi modellistici:

- Modello di erosione nel bacino della Valmalenco;
- Modello idraulico-morfologico del torrente Mallero;
- Modello di sfioro del torrente in centro città;
- Modello di allagamento di Sondrio;
- Modello di danno agli edifici.

Di ciascun modello è stata valutata la sensibilità, sia in relazione al modello stesso che, a volte, con riferimento al modello successivo.

Sono di cruciale importanza, quando si applicano modelli relativi a discipline diverse, il trasferimento dell'informazione e gli eventuali effetti del modello successivo sul precedente.

Si riportano alcuni esempi.

#### *Modello di erosione → Modello idraulico-morfologico*

Il modello geologico non fornisce informazioni sulla dimensione dei sedimenti e sulla distribuzione temporale della portata solida, che sarebbero utili alla modellazione idraulico-morfologica. Fornisce solo il volume totale di sedimenti, quantità che per eventi relativamente rapidi come quello considerato e in torrenti con capacità di trasporto relativamente basse risulta ininfluenza.

#### *Modello idraulico-morfologico → Modello di sfioro*

In questo caso non vengono considerati gli effetti "all'indietro" del modello di sfioro sul modello idraulico-morfologico (feedback), che potrebbe essere importanti, o quantomeno non da trascurare a priori. Il modello di sfioro prevede una perdita di portata, cosa che è però impossibile implementare nel modello idraulico-morfologico col software utilizzato, producendo risultati inaffidabili per istanti successivi all'inizio dello sfioro nel tratto a valle della sezione di fuoriuscita. Inoltre il disaccoppiamento dei due modelli può generare effetti non fisici come idrogramma uscente maggiore di quello entrante nel torrente.

#### *Modello di sfioro → Modello di allagamento*

In alcuni casi, per alcune configurazioni geometriche, è stato necessario rinunciare in parte (modello a geometria densa) o completamente (modello a geometria raffinata) all'informazione ottenuta dall'idrogramma di sfioro, a causa di problemi di instabilità numerica del software.

### *Modello allagamento → Modello di danno*

Il modello di allagamento proposto si può considerare, per certi versi, di gran dettaglio, poiché tiene conto di diversi parametri (l'altezza dell'acqua e la velocità massima del flusso al variare del tempo, oltre alla durata dell'allagamento, non sono comunemente usate nella modellazione del danno a seguito di alluvione), per altri grezzo, poiché non si hanno informazioni riguardo edifici all'interno dei blocchi proposti nel modello e un'interpolazione spaziale introduce errori. La variabilità temporale di altezza e velocità d'acqua non è però un'informazione che può essere sfruttata completamente nel modello di danno, per il quale è richiesta solo una stima dei valori massimi che assumono queste due grandezze nel corso dell'alluvione; il tempo nel modello di rischio è tenuto in considerazione solo per mezzo del parametro di durata dell'allagamento.

### *Modello di danno → Oltre*

Nasce il problema dell'interpolazione dei risultati di danno ottenuti puntualmente: per avere stime sul danno per interi isolati, sarebbe necessario uno studio approfondito dei metodi di interpolazione utilizzabili in questo caso di studio, nel quale si possono avere stime del danno molto diverse anche a partire da parametri di hazard uguali a causa delle grosse differenze di parametri di esposizione di edifici anche vicini tra loro. Questo tema non è stato trattato in questa tesi, nella quale ci si è limitati a una stima puntuale del danno.

In definitiva nessuna interfaccia si può ritenere davvero soddisfacente, e ci si rende conto di questa limitazione. Si considera però molto positivo essere riusciti a eseguire la modellazione da cima a fondo, avendo quindi portato a termine la modellazione di uno scenario che richiedeva conoscenze e strumenti anche molto diverse tra loro.

In questa tesi sono perciò emerse alcune problematiche che potrebbero portare a sviluppi futuri di questo studio, due in particolare:

- 1) Diversi modelli sono stati utilizzati, spesso uno di seguito all'altro. I parametri di output di un modello sono spesso diventati di input per il seguente: alla modellazione geologica dell'erosione è seguita quella idraulico-morfologica, seguita a sua volta dal modello di sfioro; dopo di questo si è usato un modello di allagamento e infine uno di danno. E' chiaro che in ogni modellazione viene accumulata un'ulteriore incertezza, che in una catena logica così lunga può diventare considerevole. Sarebbe quindi utile in futuro eseguire un'attenta analisi dell'incertezza e quindi l'eventuale introduzione di un approccio probabilistico.
- 2) Sia i risultati del modello idraulico di allagamento che quelli del modello di danno non coprono tutta la città, ma solo alcune zone; si pensi alle strade o agli edifici all'interno dei blocchi che non sono modellati nel modello idraulico di inondazione o alla difficoltà di estendere i risultati di danno ottenuti sui singoli edifici all'isolato circostante a causa della forte variabilità dei parametri di esposizione. E' quindi emerso il problema dell'interpolazione spaziale dei risultati, la quale è stata trattata per quanto riguarda i risultati del modello idraulico (per la creazione delle mappe di hazard), ma non per i risultati del modello di danno. Questa è una possibile tematica da sviluppare in futuro.

# BIBLIOGRAFIA

Bettiga, A., Kocoglu, B., Redaelli, D., Tsinopoulou C. & Turksezer Zehra, I., 2016. *Hydrogeological risk in mountain area*. Integrated study. Lecco. Politecnico di Milano, Italy.

Brunner, G. W., 2014. *Combined 1D and 2D Modeling with HEC-RAS*. Software manual.

Colombo, S. & Giuriani, G.L., 2011. *Evoluzione morfologica dei fiumi montani. Propagazione della condizione di alimentazione solida imposta a monte*. Lecco: MSc Thesis. Politecnico di Milano, Italy.

Dottori, F., Figueiredo, R., Martina, M., Molinari, D., and Scorzini, A. R.: *INSYDE: a synthetic, probabilistic flood damage model based on explicit cost analysis*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., doi:10.5194/nhess-2016-163, in review, 2016.

Elsayed, S. M., 2014. *Comparative study of different scenarios for the morphological evolution in a river stream*. Lecco: MSc Thesis. Politecnico di Milano, Italy.

European Floods Directive. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union* 2007, 288, 27–34.

Filippetti, P. & Zoppi, A. M., 2012. *Evoluzione morfologica di un alveo montano*. Lecco, Italy: MSc Thesis. Politecnico di Milano.

ISMES & CAE. *Lineamenti per un piano di intervento per la protezione della città di Sondrio*. Associazione temporanea di imprese nell'ambito dei 'Piani di allarme connessi alla situazione di rischio idrometeorologico nella Val Malenco', 1988a.

ISMES & CAE. *Modello di simulazione dell'inondazione in Sondrio*. Associazione temporanea di imprese nell'ambito dei 'Piani di allarme per situazioni di rischio idrometeorologico del torrente Mallero', 1988b.

ITALTEKNA, BONIFICA, SPEA & LOMBARDIA RISORSE. *Stima delle portate di piena centenarie, bacino del torrente Mallero*. Associazione temporanea di imprese nell'ambito del 'Piano Programma di Ricostruzione e Sviluppo della Valtellina e delle zone adiacenti delle Provincie di Como, Bergamo e Brescia colpite dalle avversità atmosferiche dei mesi di luglio e agosto 1987', 1989.

ITALTEKNA, BONIFICA, SPEA & LOMBARDIA RISORSE. *Aspetti idraulici ed idrologici, studi idraulici e sul trasporto solido*. Associazione temporanea di imprese nell'ambito del 'Piano Programma di Ricostruzione e Sviluppo della Valtellina e delle zone adiacenti delle Provincie di Como, Bergamo e Brescia colpite dalle avversità atmosferiche dei mesi di luglio e agosto 1987', 1990.

Ivanov, V., 2014. *Hydro-geological process chain for building a flood scenario*. Lecco, Italy: MSc Thesis. Politecnico di Milano.

Izadifar, M. & Babaei, A., 2015. *Hazard Modelling and Risk Assessment for Urban Flood Scenario*. Lecco, Italy: MSc Thesis. Politecnico di Milano.

Mauri, M. & Spagnolatti, M., 2009. *Modellazione dell'evoluzione morfologica del torrente Mallero durante un evento alluvionale e ripercussioni sulla città di Sondrio*. Lecco, Italy: MSc Thesis. Politecnico di Milano.

Radice, A. & Elsayed, S. M., 2014. *Hydro-morphologic modelling for different calamitous scenarios in a mountain stream*. In: S. A., G. de Cesare, M. J. Franca & M. Pfister, eds. *River Flow 2014*. London: Taylor & Francis Group, p. 1603–1610.

Radice A., Giorgetti E., Brambilla D., Longoni L. & Papini M., 2012. On integrated sediment transport modelling for flash events in mountain environments.. *Acta Geophysica*, Volume 60, pp. 191-213.

Radice, A. & Rosatti, G., 2012. *Sulla modellazione idraulico-morfologica dei corsi d'acqua: il torrente Mallero e la propagazione dell'incertezza legata all'alimentazione solida*. Brescia, XXXIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche.

Radice, A., Rosatti, G., Ballio, F., Franzetti, S., Spagnolatti, M. & Garegnani, G., 2013. Management of flood hazard via hydro-morphological river modelling. The case of the Mallero in Italian Alps. *Journal of Flood Risk Management*, 6(3), pp. 197 - 209.

Soares-Frazão, S. & Zech, Y. (2008). *Dam-break flow through an idealized city*. Journal of Hydraulic Research.

Steffler, P. & Blackburn, J., 2002. *River2D. Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat. Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual*. Software manual. University of Alberta, Canada.

# RINGRAZIAMENTI

Tengo a esprimere la mia più sincera gratitudine al Prof. Ing. Alessio Radice per tutto il tempo che ha dedicato a me, alla scelta attenta delle tematiche da affrontare e alla continua revisione di questa tesi, nonché per il continuo supporto e incoraggiamento nel corso di tutto l'anno accademico in cui questo lavoro è stato fatto.

Per l'aiuto nella modellazione dell'erosione nel bacino della Valmalenco si ringraziano Laura Longoni e Davide Brambilla, per quello nella modellazione idraulico-morfologica del Mallero e nella modellazione idraulica dell'allagamento della città di Sondrio, oltre ad Alessio Radice, si ringrazia Francesco Ballio.

Per i preziosi consigli sull'utilizzo delle potenzialità di modellazione 2D del software HEC-RAS si ringrazia Riccardo Beretta.

Si ringraziano inoltre Daniela Molinari per il suo aiuto nella modellazione dei danni e Rui Figueiredo per i consigli su come utilizzare il modello INSYDE, da lui stesso implementato.

Infine, uno speciale ringraziamento ad Alessio Radice e a Francesca Penna per l'attenta rilettura di tutto l'elaborato al fine di migliorarne la forma linguistica rendendola il più possibile priva di errori ed elegante.