

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale.

Corso di Laurea Magistrale

In Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Modellazione idraulica 1D-2D del Torrente Chisola per la valutazione di scenari di pericolosità nelle aree a rischio di alluvione e analisi di proposte di intervento



Relatore

Prof. Carlo Vincenzo Camporeale

Correlatori esterni

Ing. Gianluca Zanichelli

Ing. Sara Serritella

Agenzia Interregionale per il fiume Po

Tesi di laurea di

Andrea Cardella

Luglio 2020

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare va ai miei genitori e a mio fratello Silvio per avermi incoraggiato, seppur da lontano, a perseguire i miei obiettivi. La laurea è un traguardo reso possibile grazie a loro. Che sia il punto di partenza per un futuro che li renda ancora più orgogliosi di me.

Ringrazio il Prof. Carlo Camporeale per avermi dato la possibilità di espandere le mie conoscenze ed esperienze nel campo dell'idraulica fluviale e per avermi guidato in questo lavoro di tesi.

Ringrazio i miei correlatori Ing. Gianluca Zanichelli e Sara Serritella, che con la loro professionalità e disponibilità mi hanno permesso, all'interno dell'Agenzia Interregionale del Fiume Po, di vivere delle esperienze sul campo di grande interesse ingegneristico e avermi dato la possibilità di sviluppare un lavoro di tesi molto interessante e importante mettendo a disposizione tutto il materiale necessario.

Desidero ringraziare il carissimo Prof. Gennaro Bianco per i preziosi consigli e per l'immensa cortesia dimostrata nei miei confronti.

Vorrei ringraziare la mia ragazza Chiara per avermi sempre incoraggiato nei momenti più difficili e avermi dato i giusti consigli per affrontare ogni situazione.

Infine, ringrazio gli amici, i colleghi e i coinquilini che ho avuto modo di conoscere durante questi anni di studio per aver condiviso con loro momenti felici e indimenticabili.

Indice

Abstract	5
1. Introduzione	7
2. Quadro normativo e pianificazione territoriale	10
2.1 Direttiva Europea 2007/60	10
2.2 Evoluzione normativa nazionale in materia di rischio idrologico.....	13
2.2.1 Piano di assetto idrogeologico (PAI) e delimitazione delle fasce fluviali....	16
2.2.2 Fasi del processo di pianificazione.....	19
2.2.3 Valutazione preliminare del rischio di alluvioni	19
2.2.4 Le mappe di pericolosità e le mappe di rischio	22
2.2.5 I Piani di gestione del rischio alluvioni	26
3. INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'AREA DI STUDIO	28
3.1 Il reticolo idrografico dell'alto PO	28
3.1.1 Caratteristiche dei principali affluenti ricadenti in Piemonte.....	30
3.1.1.1 Il bacino idrografico del Torrente Chisola	32
4. Metodologie per la definizione delle mappe di pericolosità	36
4.1 Applicazione del metodo speditivo al caso studio: il torrente Chisola	38
4.1.1 Preparazione dei dati iniziali	39
4.1.2 Elaborazione dei dati altimetrici.....	40
4.2 Modellistica idraulica	43
4.2.1 Richiami di idraulica sulle correnti a superficie libera.....	43
4.2.1.1 Possibili regimi di moto	44
4.2.2 Equazioni alla base dell'idrodinamica naturale.....	49
4.2.2.1 Modello Shallow Water 3D	49

4.2.2.2	Modello Shallow Water 2D	55
4.2.2.3	Modello Shallow Water 1D	57
4.3	Metodi di dettaglio per la definizione delle mappe di pericolosità	58
4.3.1	Il codice di calcolo GeoHecRas	58
4.3.2	La modellazione idraulica combinata 1D-2D	60
4.3.2.1	Cenni sulla modellazione monodimensionale.....	61
4.3.2.2	Cenni sulla modellazione bidimensionale.....	71
5.	Aggiornamento delle mappe di pericolosità del Torrente Chisola a seguito della piena del Novembre 2016	78
5.1	L'evento alluvionale del 23-25 Novembre 2016.....	79
5.1.1	Sintesi degli studi idrologici relativi all'evento	82
5.2	Modellazione idraulica combinata 1D-2D	84
5.2.1	Definizione del modello monodimensionale.....	87
5.2.1.1	Il parametro di resistenza al moto	90
5.2.1.2	Condizioni iniziali e condizioni al contorno	93
5.2.1.3	Parametri di calcolo del modello.....	98
5.2.1.4	Verifica dei dati immessi	100
5.2.2	Definizione del modello bidimensionale.....	102
5.2.2.1	Correzione dei dati topografici.....	102
5.2.2.2	Delimitazione aree 2D.....	104
5.2.2.3	Mesh di calcolo	105
5.2.2.4	Break lines.....	106
5.2.2.5	Inserimento strutture	107
5.2.2.6	Land cover.....	109
5.2.2.7	Condizioni iniziali e al contorno	110

5.2.2.8	Parametri di calcolo.....	111
5.2.3	Connessione dell'area 2D al modello 1D.....	113
5.3	Taratura del modello combinato 1D-2D	114
5.3.1	Dati consultati.....	115
5.3.2	Calibrazione del parametro di scabrezza.....	117
5.4	Mappe di pericolosità del torrente Chisola per scenari di pericolosità: High, Medium, Low	121
5.4.1	Idrogrammi di piena TR20, TR200 e TR500	121
5.4.2	Scenario di pericolosità elevata (H)	125
5.4.2.1	Simulazione Chisola TR20	125
5.4.2.2	Simulazione Po TR20	127
5.4.2.3	Simulazione Po-Chisola TR20.....	128
5.4.3	Scenario di pericolosità media (M)	130
5.4.3.1	Simulazione Chisola TR200	130
5.4.3.2	Simulazione Po TR200	131
5.4.3.3	Simulazione Po-Chisola TR200.....	133
5.4.4	Scenario di pericolosità bassa (L).....	134
5.4.4.1	Simulazione Chisola TR500	134
5.4.4.2	Simulazione Po TR500	136
5.4.4.3	Simulazione Po-Chisola TR500.....	137
5.5	Confronto dei risultati.....	139
5.5.1	Scenario di elevata pericolosità (TR20).....	140
5.5.2	Scenario di media pericolosità (TR200).....	141
5.5.3	Scenario di bassa pericolosità (TR500)	142
6.	Agenzia Interregionale per il fiume Po	144

6.1	Analisi su proposte di intervento per la protezione degli abitati rivieraschi dal Comune di Volvera al Comune di Moncalieri.....	145
6.1.1	Portate di riferimento.....	145
6.2	Scenario TR200: Analisi dello stato di fatto	147
6.3	Scenari di progetto per TR200	154
6.3.1	Analisi sull'assetto di progetto A1	154
6.3.2	Analisi sull'assetto di progetto A2	163
6.3.3	Analisi sull'assetto di progetto A3	171
7.	Conclusione.....	180
	Bibliografia	183
	Sitografia.....	186

Abstract

Gli eventi alluvionali, sempre più frequenti in Italia e nel resto dell'Europa, causano danni ingenti alla popolazione, all'ambiente, agli edifici, alle attività economiche e al patrimonio culturale ed artistico. Il dissesto idrologico impone riflessioni sugli interventi strutturali e non strutturali da realizzare per ridurre le conseguenze negative delle alluvioni e sollecita la definizione di strategie efficaci a sostegno delle fasi del processo di pianificazione auspicate dai legislatori europei e nazionali (Direttiva 2007/60/CE e D. Lgs.23/02/2010 n.49).

Negli ultimi anni si è assistito ad una crescente necessità di impiegare modelli numerici innovativi con l'utilizzo di codici più complessi per avere informazioni utili ed effettuare scelte operative di prevenzione e protezione. In tale contesto è possibile ricorrere a differenti tipologie di modellazioni idrauliche che consentono uno studio accurato della dinamica fluviale fornendo risultati dettagliati sulle grandezze idrauliche coinvolte.

Nel lavoro di tesi è stato utilizzato un modello idrodinamico integrato 1D-2D in grado di sfruttare e combinare all'interno di un unico codice di simulazione le potenzialità offerte sia dallo schema di calcolo monodimensionale e sia dall'analisi bidimensionale. La modellazione è stata condotta con il software "GeoHecRas2D" sviluppato dalla società americana CivilGeo. L'approccio metodologico scelto è finalizzato all'aggiornamento delle aree a potenziale rischio significativo di alluvione, denominate mappe di pericolosità, del bacino del Torrente Chisola, secondo gli scenari di scarsa, media ed elevata probabilità di alluvione. Tali mappe sono un valido strumento per la valutazione e la conseguente gestione del rischio alluvioni. Il tratto fluviale oggetto di studio si estende dal comune di Volvera sino alla confluenza con il fiume Po nel Comune di Moncalieri. Gli scenari analizzati massimizzano la pericolosità poiché sono valutati nelle condizioni più critiche, in particolare per quanto concerne il tratto in prossimità della confluenza del torrente Chisola con il fiume Po.

Tale studio si inserisce all'interno della redazione del secondo ciclo del Piano di Gestione Rischio Alluvioni del fiume Po (PGRA-PO) che terminerà nel 2021, che coinvolge il Politecnico di Torino come consulente, e l'Agenzia Interregionale del fiume Po, Autorità Idraulica competente nel territorio, per un'analisi di alcuni interventi di messa in sicurezza dei territori rivieraschi dal Comune di Volvera al Comune di Moncalieri.

Abstract

Flood events, increasingly frequent in Italy and in the rest of Europe, cause significant damage to the population, the environment, buildings, economic activities and cultural and artistic heritage. The hydrological instability requires reflections on the structural and non-structural interventions to be carried out to reduce the negative consequences of floods and calls for the definition of effective strategies to support the stages of the planning process desired by European and national legislators (Directive 2007/60/EC of the European Parliament and Legislative decree 23/ 02/2010 n.49). In recent years, there has been a growing need to employ innovative numerical models with the use of more complex codes to obtain useful information and make operational prevention and protection choices. In this context, it is possible to resort to different types of hydraulic modeling that allow an accurate study of river dynamics by providing detailed results on the hydraulic quantities involved. In the thesis work, an integrated 1D-2D hydrodynamic model was used, able to exploit and combine within a single simulation code the potential offered both by the one-dimensional calculation scheme and by the two-dimensional analysis. The modeling was carried out with the "GeoHecRas2D" software developed by the American company CivilGeo. The methodological approach chosen is aimed at updating the areas at potential significant risk of floods, called flood hazard maps, of the Chisola torrent basin, according to the scenarios of low, medium and high probability of floods. These maps are a valid tool for the assessment and consequent management of flood risk. The river stretch under study extends from the municipality of Volvera to the confluence with the river Po in the municipality of Moncalieri. The scenarios analyzed maximize the danger since they are assessed in the most critical conditions, in particular as regards the stretch near the confluence of the Chisola torrent with the Po river. This study is part of the preparation of the second cycle of the Flood Risk Management Plan of the river Po (PGRA-PO) which will end in 2021, which involves the Polytechnic of Turin as a consultant, and the Interregional Agency of the river Po (AIPo, the Italian acronym), the competent hydraulic authority in the area, for an analysis of some interventions for the safety of the riverside territories from the Municipality of Volvera to the Municipality of Moncalieri.

1. Introduzione

“Le alluvioni sono fenomeni naturali impossibili da prevenire e possono provocare vittime, l’evacuazione di persone e danni all’ambiente, compromettere gravemente lo sviluppo economico e mettere in pericolo le attività” (Direttiva 2007/60/CE). Le alluvioni si verificano quando le acque di un fiume, un torrente, un ruscello non vengono più contenute dalle sponde e inondano le campagne o i centri abitati. Le cause sono da attribuire alla presenza di bacini idrografici di piccole dimensioni, alla conformazione geologica e geomorfologica del territorio, ma molto spesso ad una sua cattiva gestione: l’urbanizzazione, l’impermeabilizzazione del terreno, la costruzione in aree golenali, la riduzione dello spazio di espansione laterale delle acque che trasformano sempre più i fiumi in canali, la presenza di detriti e di vegetazione che impediscono il normale deflusso delle acque. Inoltre i cambiamenti climatici costituiscono un fattore aggravante perché modificano l’andamento delle condizioni meteorologiche e il regime delle precipitazioni provocando di fatto la piena dei corsi d’acqua. Gli eventi alluvionali sono divenuti più frequenti in Europa dal 1980. Negli ultimi anni, la tendenza mostra che il numero di piene repentine, di entità da media a elevata, è quadruplicato dal 1980 e raddoppiato dal 2004. L’allarme proviene dall’ultimo rapporto dell’EASAC (European Academies Science Advisory Council, marzo 2018) che *“sollecita i Governi ad una maggiore attenzione all’adattamento ai cambiamenti climatici in tutta l’Unione europea”*. Nel nostro Paese sul rischio frane, alluvioni ed esondazioni, una descrizione esauriente è stata effettuata dall’ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la ricerca Ambientale, 2018) dalla quale si evince che per “il rischio alluvione nello scenario di pericolosità media P2 (tempo di ritorno fra 100 e 200 anni): la popolazione esposta è pari a 6.183.364 abitanti (10,4%); le famiglie a rischio sono 2.648.499 (10,8%) e gli edifici a rischio sono 1.351.578 (9,3%)”.¹

Il dissesto idrologico, per le gravi conseguenze che provoca, impone riflessioni sugli interventi strutturali e non strutturali da realizzare per ridurre le conseguenze negative delle alluvioni, e sollecita la definizione di strategie efficaci per attuare nel migliore dei modi la programmazione degli interventi auspicata da legislatori e amministratori a livello

¹Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. (2018) Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio Edizione 2018. ISPRA, Rapporti 287/2018

europeo e nazionale. A supporto delle fasi del processo di pianificazione, oltre ai metodi più semplici per la simulazione di fenomeni idrodinamici negli alvei e nelle aree soggette ad allagamento, si è assistito negli ultimi anni ad una crescente necessità di ricorrere a modelli numerici nuovi. Tali modelli, messi a disposizione dalle innovazioni nell'ambito informatico, con l'utilizzo di codici più complessi forniscono dati utili ad effettuare scelte operative di prevenzione e protezione per la salvaguardia e lo sviluppo del territorio soprattutto quando eventi alluvionali eccezionali evidenziano la necessità di ridefinire nuove linee di intervento. Nel lavoro di tesi, per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità di un tratto del torrente Chisola, interessato dall'evento di piena del novembre 2016, è stato dapprima costruito un modello speditivo e successivamente un modello idrodinamico integrato 1D-2D con il supporto del software "GeoHecRas2D" sviluppato dalla società americana CivilGeo. Tale studio, si inserisce all'interno della redazione del secondo ciclo del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del fiume Po (PGRA-PO) che coinvolge il Politecnico di Torino in qualità di consulente e L'Agenzia Interregionale del fiume Po (AIPO) per un'analisi di alcuni interventi di messa in sicurezza dei territori rivieraschi da Volvera a Moncalieri.

La tesi è strutturata in sette capitoli. Il primo capitolo è di introduzione al lavoro di tesi, il secondo è dedicato ad un'analisi della normativa europea e nazionale sul tema del rischio idrologico e alle fasi del processo di pianificazione previsto dalla Direttiva 2007/60/CE che hanno portato alla realizzazione dei Piani di gestione. Nel terzo capitolo vengono delineate le principali caratteristiche del reticolo idrografico dell'alto Po e del bacino del torrente Chisola, oggetto di interesse per lo studio condotto.

Il quarto capitolo tratta l'applicazione del metodo speditivo con il software *open source* *Quantum QGIS* nella versione 2.18.13 (Las Palmas). Nello specifico, si è proceduto ad una stima dei valori di tirante per ogni scenario di probabilità, combinando l'informazione di quota inclusa nel modello digitale del terreno (DTM) con l'informazione del perimetro delle mappe di pericolosità del primo ciclo della gestione del rischio. Successivamente sono stati illustrati i principi teorici sulle correnti a pelo libero e le equazioni che stanno alla base dei codici di calcolo.

L'approccio metodologico scelto e finalizzato all'aggiornamento delle mappe di pericolosità si è avvalso anche di un modello idrodinamico combinato 1D-2D in regime di

moto vario nelle condizioni di fondo fisso². Questo tipo di modellazione, illustrata nel capitolo quinto, utilizza lo schema monodimensionale per il calcolo dei profili idrici nel canale principale (river-channel) e lo schema bidimensionale per la rappresentazione dettagliata della pianura alluvionale (floodplain) e rispetto al metodo speditivo, oltre a presentare dei vantaggi consente di raggiungere un migliore livello di confidenza. Le regole della modellazione, prevedono la cosiddetta fase di taratura, da eseguire necessariamente prima delle analisi dei risultati. Essa prevede, sulla base di informazioni idrometriche (livelli idrici) registrate da stazioni di misura e dati osservati durante un evento di piena, di calibrare alcuni parametri del modello (in particolare la scabrezza) in modo che vi sia un'accettabile coincidenza tra i risultati ottenuti dalla modellazione e i valori realmente verificati.

Nel presente lavoro, la taratura del modello è avvenuta utilizzando come evento di riferimento l'alluvione verificatasi a Novembre 2016 in Piemonte e come parametro di calibrazione il coefficiente di scabrezza di Gauckler Strickler. Inoltre ai fini di una ricostruzione quanto più fedele dell'evento, è stato considerato nelle simulazioni anche il contributo di portata derivante dal fiume Po per tener conto dell'effetto di rigurgito sui livelli del torrente Chisola in prossimità della confluenza. Verrà, inoltre effettuato un confronto delle mappe di pericolosità del torrente Chisola, espresse in termini di aree allagate e di tiranti idrici, ottenute per ciascun scenario di pericolosità con i due metodi adottati, ovvero quello speditivo e quello di dettaglio. Nel sesto capitolo, sulla base della dinamica della suddetta alluvione (ricostruita con un modello idrodinamico combinato), si analizzeranno, in collaborazione con l'Agenzia Interregionale del fiume Po, Autorità Idraulica competente nel territorio, alcuni interventi di messa in sicurezza dei territori rivieraschi da Volvera a Moncalieri.

Nel settimo capitolo infine sono presenti le conclusioni del lavoro di tesi.

² Nell'ambito della modellazione idraulica per fondo fisso si intende l'assenza dei fenomeni di trasporto solido che caratterizzano la fase solida di una corrente.

2. Quadro normativo e pianificazione territoriale

2.1 Direttiva Europea 2007/60

Due importanti strumenti giuridici sono: la Direttiva 2000/60 e la Direttiva 2007/60 del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'Unione Europea. La Direttiva Quadro Acque adottata nel 2000 ha la finalità di *“promuovere un utilizzo sostenibile dell'acqua basato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche disponibili; assicurare la progressiva riduzione dell'inquinamento delle acque sotterranee e prevenire il loro ulteriore inquinamento; contribuire a mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità”*.

³ Gli Stati Membri affrontano la tutela delle acque a livello di bacino idrografico e l'unità territoriale di riferimento è il distretto idrografico”. I programmi di misure sono indicati nei Piani di Gestione che gli Stati Membri devono predisporre secondo i tempi e le modalità stabilite dalla stessa Direttiva. Tra gli obiettivi la riduzione del rischio alluvioni non figura e neanche il tema dell'impatto dei cambiamenti climatici sulle alluvioni che influiscono sul potenziale incremento di intensità e frequenza delle precipitazioni con conseguenti inondazioni e allagamenti. Questi traguardi sono definiti nella Direttiva 2007/60/CE entrata in vigore il 26 novembre 2007 che intende *“istituire un quadro per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni volto a ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni all'interno della Comunità”*.⁴ Questo provvedimento, detto Direttiva Alluvioni, è stato emanato (anche a seguito di ingenti danni causati da alcuni eventi catastrofici avvenuti in Europa, come quelli di Praga e Dresda nell'agosto 2002) in linea con i principi internazionali di gestione dei bacini idrografici già sostenuti dalla Direttiva Acque e con il preciso scopo di introdurre l'obbligo, per gli Stati membri, della valutazione e della gestione dei rischi di alluvione. Ridurre i rischi di conseguenze negative derivanti da alluvioni, oltre ad essere un'azione concreta deve essere *“coordinata a livello di bacino idrografico e deve prevedere la partecipazione attiva di tutte le parti*

³ Direttiva 2000/60/CE Del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2000

⁴Art. 1 Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 Ottobre 2007.

interessate a livello comunitario, anche con il coinvolgimento del pubblico, attraverso idonei strumenti di informazione e consultazione”.

La Direttiva 2007/60/CE definisce le fasi del processo di pianificazione, le scadenze da rispettare e i contenuti minimi attesi.

Il processo di pianificazione è articolato in tre fasi in successione e collegate fra loro:

- fase 1: valutazione preliminare del rischio (entro il 22 dicembre 2011);
- fase 2: elaborazione delle mappe di pericolosità e rischio alluvione (entro il 22 dicembre 2013);
- fase 3: predisposizione dei piani di gestione del rischio alluvione (entro il 22 dicembre 2015).

Tale processo si ripete ciclicamente ogni 6 anni come sotto rappresentato.

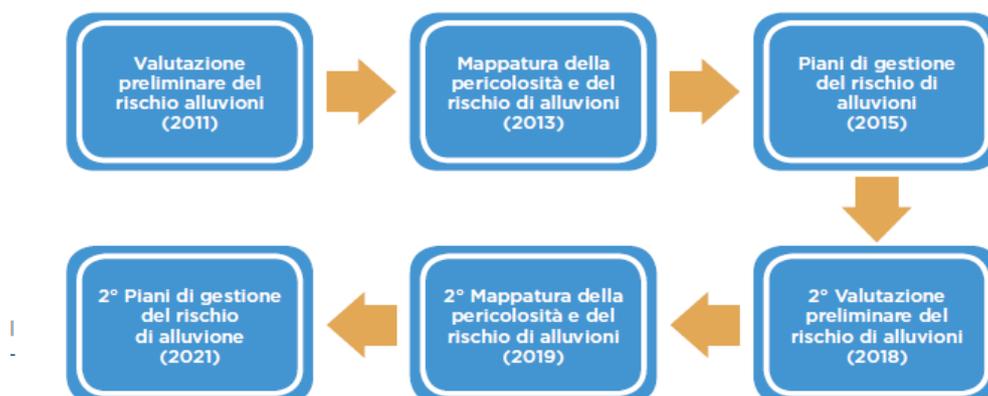


Figura 1: Ciclo di attuazione della direttiva 2007/60/CE (Fonte: Risorsa Internet)

La prima fase serve per conoscere le “potenziali conseguenze negative di future alluvioni” sulla base di studi effettuati, di dati registrati, di informazioni disponibili. Per valutare e gestire il rischio di alluvioni strumenti indispensabili sono le mappe di pericolosità che contengono la perimetrazione delle aree geografiche potenzialmente interessate da alluvioni e le mappe del rischio che segnalano le possibili conseguenze negative sulla popolazione, sulle attività economiche, su impianti che potrebbero provocare inquinamento. I piani di gestione del rischio di alluvioni (PGRA) degli Stati membri “*riguardano tutti gli aspetti della gestione del rischio e in particolare la prevenzione, la protezione e la preparazione, comprese le previsioni di alluvioni e i sistemi di allertamento tenendo conto del bacino idrografico o del sottobacino interessato*”⁵.

⁵ Art. 7 Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 Ottobre 2007.



Figura 2: Il ciclo della gestione del rischio (Fonte: Risorsa Internet)

Devono inoltre mirare al mantenimento e/o al ripristino delle pianure alluvionali, per conferire uno spazio maggiore ai fiumi nonché predisporre misure per prevenire o ridurre danni all'uomo e alle sue attività economiche, all'ambiente e al patrimonio culturale. La Direttiva prevede, altresì, che il riesame della valutazione preliminare del rischio e dei PRGA devono tenere conto “dell’impatto dei cambiamenti climatici sul verificarsi di alluvioni” (art.14) poiché possono influire sull’ aumento di intensità e di frequenza delle precipitazioni causando inondazioni, allagamenti ma anche l’innalzamento del livello del mare. Inoltre, gli Stati membri devono coordinare le loro attività di gestione del rischio di alluvione nei bacini idrografici condivisi con i paesi terzi, prestando attenzione a non attuare misure che ne aumenterebbero il rischio nei paesi limitrofi.

In ambito tecnico-scientifico e amministrativo-istituzionale, precedentemente alla Direttiva Europea, a partire dagli anni 80 il nostro Paese ha emanato una serie di provvedimenti, tra questi la Legge n.183 del 1989 (Istituzione delle autorità di Bacino) e la Legge n. 267 del 1998 (sulla valutazione del rischio determinato da fenomeni idraulici), che hanno favorito l’acquisizione di una consapevolezza utile al recepimento della Direttiva Europea che nell’ordinamento italiano ha trovato attuazione con il decreto legislativo n.49 del 23 febbraio 2010.

2.2 Evoluzione normativa nazionale in materia di rischio idrologico

La normativa italiana sul rischio idrogeologico è molto vasta e articolata. Un'importante legge in materia di difesa di gestione del territorio è stata la legge n. 183 del 18 Maggio 1989 "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo" che ha dato inizio ad un processo di riorganizzazione delle competenze degli organi centrali e delle amministrazioni locali. La legge si occupa di:

-definire i bacini idrografici intesi come unità territoriali di riferimento per valutare e pianificare la difesa del suolo, classificati su tre livelli di rilevazione: regionale, interregionale e nazionale;

-istituire le Autorità di Bacino (AdB);

-indicare il Piano di Bacino per programmare le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo e la corretta utilizzazione delle acque, sulla base delle caratteristiche fisiche ed ambientali del territorio interessato".

(art.7)

Il successivo D.L. n.180/1998, con lo scopo di accelerare l'attuazione della legge dopo i disastri verificatisi a Sarno e Soverato, dispone l'adozione di "Piani Stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico" (PAI) contenenti l'individuazione, la perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico (alluvione, frana o valanga), la definizione delle misure di salvaguardia del suolo per non incrementare pericoli già esistenti e l'individuazione degli interventi di difesa per ridurre il rischio. La legge n. 267 del 1998 "Conversione in legge, con modificazioni del D.L. 11 giugno 1998, n. 180" oltre a contenere "misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania" dispone che le Autorità di Bacino entro il 30 Giugno 1999 adottino i Piani stralcio di Bacino per l'assetto Idrogeologico qualora non abbiano provveduto ai sensi della L.183/89. Dal momento che i P.A.I. tardavano ad essere approvati, la Legge. n. 365/2000, contenenti "Misure urgenti per le aree a rischio, in materia di protezione civile e a favore della regione Calabria colpita da calamità idrogeologiche", estende la validità delle misure di salvaguardia contenute nei Piani

straordinari in attesa dell'approvazione dei P.A.I. e fornisce nuove procedure per la loro stesura che deve avvenire entro il 30 Aprile 2001. Il D. Lgs. 3 aprile 2006 n. 152, di recepimento della Direttiva 2000/60/CE, contiene le principali norme che regolano l'ambiente, abroga la legge 183/89 e disciplina:

- le procedure per la valutazione ambientale strategica (VAS);
- le procedure per la valutazione d'impatto ambientale (VIA);
- le procedure per l'autorizzazione ambientale integrata (IPPC). (art. 1)

Inoltre riorganizza gli ambiti territoriali di riferimento e suddivide il territorio nazionale in otto Distretti Idrografici, ognuno dei quali inteso come "area di terra e di mare costituita da uno o più bacini idrografici limitrofi e dalle rispettive acque sotterranee e costiere" per i quali è necessario redigere il Piano di Gestione. Altresì prevede l'istituzione delle Autorità di Bacino Distrettuali. Successivamente l'art. 64, comma 1 del suddetto Decreto Legislativo viene modificato dall'art.51, comma 5 della Legge221/2015 che ripartisce il territorio nazionale in sette Distretti Idrografici.

Il D.P.C.M 29/9/1998 indica i criteri con i quali individuare e perimetrare le aree a rischio idrogeologico, con priorità di quelle dove ci sono maggiori pericoli per: la popolazione, i centri urbani, le infrastrutture, il patrimonio ambientale e culturale, le attività economiche. Rispetto al tempo di ritorno le aree soggette ad inondazione vengono caratterizzate secondo tre differenti probabilità di evento (Classi di Pericolosità)

Aree ad elevata probabilità di inondazione:

$Tr = 20 - 50$ anni

Aree a moderata probabilità di inondazione:

$Tr = 100 - 200$ anni

Aree a bassa probabilità di inondazione:

$Tr = 300 - 500$ anni.

Sulla base di studi effettuati in precedenza è possibile definire quattro classi di rischio con pericolosità crescente da moderato a molto elevato. La terza fase consiste nell'individuare le tipologie di interventi strutturali e non strutturali da realizzare per la mitigazione o rimozione dello stato di rischio. Il D. Lgs. 23 febbraio 2010 n. 49 recepisce la Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi da alluvione e ne conferma le finalità, le fasi della pianificazione, la partecipazione attiva di tutti i soggetti interessati all'elaborazione, il riesame e l'aggiornamento dei Piani di Gestione che le Autorità di

Bacino Distrettuali redigono per il Distretto Idrografico di propria competenza. In attesa della costituzione delle Autorità di Bacino Distrettuali spetta alle Autorità di Bacino Nazionali provvedere agli obblighi definiti dal D. Lgs. 49/2010 e alle Autorità di Bacino di rilievo Nazionale il compito di coordinare nell'ambito del Distretto Idrografico di appartenenza. Con l'entrata in vigore della Legge 28 dicembre 2015 n. 221, attuata con il D.M. 294 del 25 ottobre 2016, le Autorità di Bacino vengono soppresse e le Autorità di Bacino Distrettuali svolgono "le funzioni e i compiti in materia di difesa del suolo, di tutela delle acque e delle risorse idriche" e con il successivo D.P.C.M. del 4 aprile 2018 viene data definitiva operatività al nuovo riassetto organizzativo. La riforma distrettuale ha semplificato l'organizzazione, dalle 38 Autorità di Bacino esistenti (6 Nazionali, 1 Pilota, 13 Interregionali, 18 Regionali) si passa alle 7 Autorità di Distretto alle quali viene data piena titolarità in tema di pianificazione per la gestione del rischio di alluvioni in ottemperanza delle due Direttive Europee.



Figura 3: Autorità di Bacino Distrettuali (Fonte: risorsa internet)

Tali autorità rappresentano le uniche autorità competenti per aggiornare entro il 2021 i Piani di Gestione delle acque e per la definizione dei secondi Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) ai fini degli adempimenti delle Direttive acque e Alluvioni. Il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del territorio e del mare (MATTM) svolge funzioni d’indirizzo e coordinamento nei confronti delle Autorità di Bacino Distrettuali e stabilisce criteri e indirizzi uniformi su tutto il territorio nazionale avvalendosi dell’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

2.2.1 Piano di assetto idrogeologico (PAI) e delimitazione delle fasce fluviali

La Legge 183/89 introduce il Piano di Bacino per ciascun Bacino Idrografico che può essere redatto anche per stralci a settori funzionali. Si tratta di uno strumento:

- conoscitivo per lo studio dell’ambiente fisico e del sistema antropico;
- normativo e prescrittivo per le attività relative alla tutela del territorio e delle acque;
- programmatico poiché fornisce le eventuali metodologie d’intervento.

Il successivo D.L. n.180/1998, con lo scopo di accelerare l’attuazione della legge n. 183 dispone l’adozione di “Piani Stralcio di bacino per l’assetto idrogeologico” (PAI) per la difesa del suolo dal rischio idrogeologico, per salvaguardare la vita delle persone e ridurre i danni ai beni esposti a rischi idrogeologici attraverso la programmazione di opere strutturali, vincoli, direttive.

Le prescrizioni del Piano, relativamente ad alcune parti del territorio, sono aggiornate in base alle opere realizzate, ad eventi alluvionali, a nuovi dati provenienti da studi o monitoraggi, al variare della situazione morfologica del territorio. Le modifiche apportate vengono effettuate con una procedura di “variante” e possono interessare alcune parti del territorio. Il Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico redatto dall’Autorità di Bacino del Fiume Po e adottato con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 in data 26 Aprile 2001, si propone di garantire un livello di sicurezza adeguato nei territori del bacino del fiume Po e dei suoi affluenti esposti a fenomeni di dissesto idrogeologico. A tal fine le misure individuate consistono nella realizzazione di interventi di difesa e nell’apposizione

di vincoli volti a limitare quei particolari usi del suolo che possono aumentare il rischio idraulico e idrogeologico. A seguito dell'approvazione del PAI anche i piani regolatori comunali devono adeguarsi ad esso. Nel PAI confluisce anche quanto stabilito dal Piano stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF) sui corsi d'acqua principali del bacino idrografico del fiume Po, approvato con Decreto del Presidente del Consiglio del 24/7/1998 affinché si realizzi un quadro organico esteso per l'intero territorio del Bacino Padano. Il PSFF tiene conto delle indicazioni e delle prescrizioni del primo stralcio ed è anch'esso principalmente uno *“strumento conoscitivo normativo, tecnico-operativo, mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso riguardanti le fasce fluviali”* (art.24).

L'ambito territoriale di riferimento per la delimitazione delle fasce fluviali sul sistema idrografico del bacino del Po è costituito dall'insieme dei corsi d'acqua principali di pianura compresa l'asta del Po a cui si aggiungono alcuni fondivalle montani.

L'assetto di progetto di un corso d'acqua, per le componenti fisiche, idrauliche e ambientali, è definito in funzione dei seguenti obiettivi:

- la difesa dal rischio idraulico,
- la salvaguardia della risorsa idrica,
- il mantenimento e recupero dell'ambiente fluviale,
- la conservazione dei valori paesaggistici, storici, artistici e culturali.

Gli interventi programmati per il raggiungimento degli obiettivi consistono in una serie di misure di tipo strutturali (prevalentemente opere idrauliche di difesa e di sistemazione) e non strutturali (attività di monitoraggio, previsione e sorveglianza, regolamentazione dell'uso del suolo per le aree soggette ai fenomeni connessi alla dinamica fluviale). Entrambe le tipologie di misure si applicano con riferimento a un'articolazione dell'alveo fluviale in fasce, definite secondo criteri funzionali di cui all'art. 28 del Piano di assetto Idrogeologico come di seguito riportate.

-Fascia di deflusso della piena (Fascia A) *“costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente del deflusso della corrente per la piena di riferimento, ovvero che è costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena”*

-Fascia di esondazione (Fascia B) *“esterna alla precedente, costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi della piena di riferimento. Il limite di tale fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli*

idrici corrispondenti alla piena di riferimento ovvero alle opere idrauliche esistenti o programmate di controllo di inondazioni”. Il piano indica con apposito segno grafico, denominato limite B di progetto, le opere idrauliche programmate in difesa del territorio -Area di inondazione per piena catastrofica (Fascia C) “costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente fascia, che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quella di riferimento”.⁶

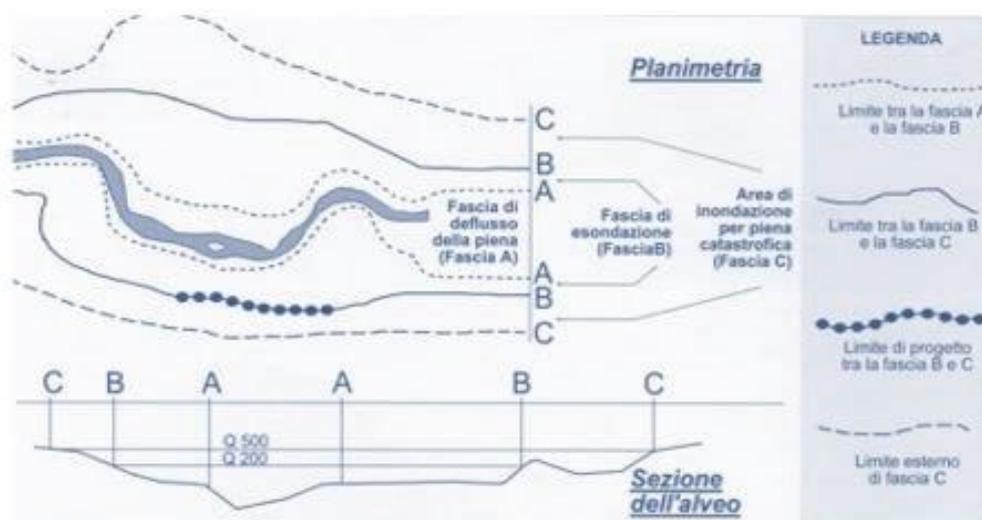


Figura 4: Schema esplicativo per la definizione delle fasce fluviali (Fonte: Risorsa Internet)

La classificazione delle fasce fluviali ancora oggi rappresenta uno strumento fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi prefissati nel P.A.I. ossia:

Per la fascia A: garantire il deflusso della piena, favorire l’evoluzione morfologica naturale dell’alveo e recuperare e mantenere le condizioni di naturalità e la continuità ecologica del sistema fluviale.

Per la fascia B: mantenere e recuperare le aree di espansione della piena e individuare gli interventi di protezione dei centri abitati e delle infrastrutture presenti.

Per la fascia C: segnalare le condizioni di rischio idraulico residuale in rapporto alle funzioni di protezione civile.

⁶ Piano stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PAI) Interventi sulla rete idrografica e sui versanti. Legge 18 Maggio 1989, n. 183, art. 17, comma 6 ter Adottato con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 in data 26 aprile 2001

Sulla base di nuovi elementi conoscitivi derivanti dalle mappe di pericolosità e di rischio si procederà di volta in volta, con priorità per i corsi d'acqua dove si sono verificati recentemente eventi alluvionali, alle varianti delle fasce fluviali.

Prima dell'adozione di ciascun progetto di variante si procederà alla pubblicazione dello schema di progetto per coinvolgere tutte le parti interessate ai sensi dell'art. 66, comma 7, lettera c) del D. Lgs. 152/2006.

2.2.2 Fasi del processo di pianificazione

La Direttiva Europea 2007/60 (Floods Directive- FD) fissa il processo di pianificazione in tre fasi successive che si ripetono ciclicamente ogni sei anni per individuare le zone a rischio alluvione, mappare l'estensione dell'inondazione e gli elementi esposti al rischio e adottare misure adeguate per ridurre le conseguenze negative.

2.2.3 Valutazione preliminare del rischio di alluvioni

L'art. 5 della Direttiva Europea stabilisce che sugli esiti della Valutazione Preliminare del Rischio Alluvioni (Preliminary Flood Risk Assessment -PFRA) si individueranno le aree a potenziale rischio significativo di alluvione (Areas of Potential Significant Flood Risk - APSFR). Il D. Lgs. 49/2010 recepisce a livello nazionale la suddetta Direttiva e stabilisce la scadenza del 22 settembre 2011 per questa prima fase sulla base di: relazioni su alluvioni passate, valutazioni di rischi potenziali di alluvioni future, studi eseguiti specificatamente sulle possibili conseguenze negative di inondazioni a causa dei cambiamenti climatici, cartografie tematiche e dati registrati. Una notevole fonte di informazione è archiviata nel Catalogo Nazionale delle località colpite da frane e da inondazioni nell'ambito del Progetto Aree Vulnerate Italiane (AVI). Il progetto è stato commissionato nel 1989 dal Dipartimento della Protezione Civile sollecitato dalla Commissione Grandi Rischi, al Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche. Il censimento offre una visione accurata ed aggiornata della distribuzione delle inondazioni e delle frane nel territorio Italiano a partire dall'anno 1918. Nel primo ciclo del processo di pianificazione, il nostro

paese (poiché ha ritenuto che i contenuti dei Piani di Assetto Idrologico stilati su tutto il territorio nazionale dalle Autorità di Bacino ai sensi della Legge 183/89 e le mappe prodotte con le indicazioni contenute nel DCPM del 29 settembre 1998 fossero adeguati con quanto richiesto dalla Direttiva), si è avvalso delle misure transitorie previste nell'art.13 non effettuando la valutazione preliminare e passando direttamente alla fase successiva perimetrando sulla base delle conoscenze a disposizione tutte le aree potenzialmente allagabili. A seguito del nuovo assetto organizzativo introdotto dalla L.221/2015 tutto lo strato geografico elaborato, presente sul Geoportale Nazionale costituisce la base cartografica di riferimento per l'aggiornamento del Piano di Gestione delle Acque e del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni ma anche per le relazioni alla Commissione Europea previste dalle medesime direttive. Per l'implementazione della Direttiva Alluvioni e a supporto della PFRA, il Dipartimento di Protezione Civile (DPC) in collaborazione con l'ISPRA e per la parte informatica con la "Fondazione Cima"-Centro Internazionale Monitoraggio Ambiente, ha predisposto una piattaforma informatica web-GIS ad accesso riservato denominata "FloodCat" sulla quale saranno caricati e visualizzati tutti gli eventi alluvionali ed avere informazioni riguardo le aree interessate, i danni causati ai beni esposti e alla popolazione. Il catalogo delle alluvioni, conforme a specifiche richieste, fornisce un quadro unitario a livello nazionale e rappresenta uno strumento di esportazione dati nel reporting alla Commissione Europea.

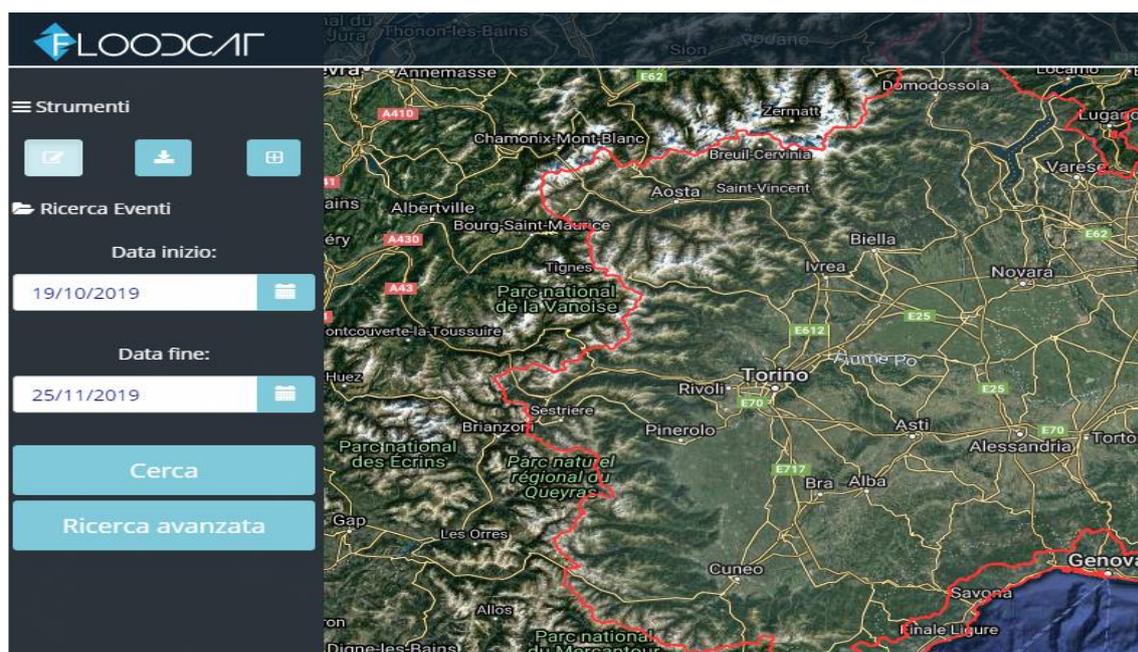


Figura 5: Schermata tratta dalla piattaforma FLOODCAT

Il PFRA deve contenere: la descrizione delle alluvioni avvenute in passato che hanno avuto conseguenze negative per la popolazione e l'ambiente e che con molta probabilità potrebbero verificarsi nuovamente (past flood) e la descrizione delle alluvioni che non hanno causato effetti negativi ma qualora si verificassero in futuro potrebbero causarli (future flood). Le APSFR del Distretto del fiume Po sono quelle aree delimitate con i dati contenuti nel PAI del 2001, nel PGRA 2015 e con le informazioni dei monitoraggi e delle valutazioni preliminari successive, soprattutto a seguito di eventi di piena verificatesi. Attualmente sono suddivise come riportato nella tabella sottostante.⁷

UoMCode-UoMName	N° APSFR distrettuali	N° APSFR regionali
ITN008 - Po	21	95
ITI021 - Reno	1	10
ITI01319 - Marecchia - Conca	0	8
ITI026 - Fissero Tartaro	0	0
ITR081- Bacini romagnoli	0	19
TOTALE	22	132

Tabella 1: Numero delle APSFR suddivise per le diverse UoM del Distretto

Tra le ventuno APSFR distrettuali relative al Bacino del fiume Po (ITN008-Po) ricade l'APSFR della città di Torino che comprende una considerevole parte della città e di alcuni comuni adiacenti, area *“potenzialmente coinvolta da fenomeni alluvionali del fiume Po e dei fiumi Dora Riparia, Stura di Lanzo, Sangone e Chisola che nei tratti terminali, prima della loro confluenza in Po, attraversano la città”*.⁸ L'oggetto di questa tesi riguarderà l'aggiornamento delle mappe di pericolosità del Torrente Chisola, all'interno della APSFR del capoluogo piemontese. Recentemente le suddette mappe sono state oggetto di rivalutazioni, a seguito dell'evento di piena verificatosi nella regione a Novembre 2016 i cui effetti al suolo hanno portato ad un ampliamento delle aree relative

⁷ Fonte: Relazione Metodologica Distretto del fiume Po “Aggiornamento e revisione delle mappe di pericolosità e del rischio di alluvione- Il ciclo di gestione”

⁸Tratto da: Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni - IV A- Aree a rischio significativo di alluvione ARS Distrettuali Marzo 2016- Autorità di Bacino del fiume Po

allo scenario di Media probabilità, laddove le aree inondate sono risultate maggiormente estese di quelle indicate in precedenza.

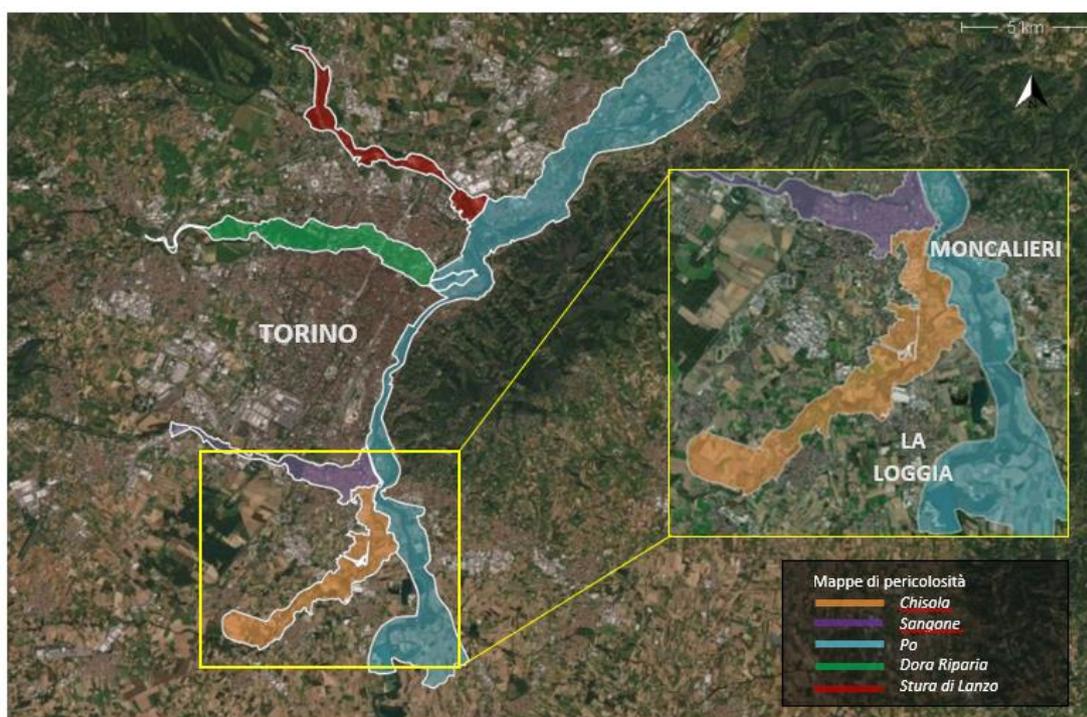


Figura 6: Mappe di pericolosità relative ai corpi idrici del reticolo idrografico del fiume Po ricadenti all'interno dell'APSFR della città di Torino per lo scenario di evento estremo (TR=500 anni)

2.2.4 Le mappe di pericolosità e le mappe di rischio

La Direttiva Europea prevede che gli Stati Membri predispongano per ogni distretto idrografico (River Basin District-RBD) o unità di gestione (Unit of Management-UoM) le mappe di pericolosità e del rischio di alluvioni.

Il D. Lgs 49/2010 prevede che per la loro elaborazione è preferibile utilizzare una scala non inferiore al 1:10.000 ed in ogni caso non inferiore a 1: 25.000.

La pericolosità da alluvione “è la probabilità di accadimento di un evento alluvionale in un intervallo temporale prefissato in una certa area”⁹. Le mappe della pericolosità da alluvione sono finalizzate a delimitare l'estensione delle aree (distinte con tonalità di blu,

⁹ Decreto Legislativo 23 Febbraio 2010, n.49

la cui intensità diminuisce in rapporto alla diminuzione della frequenza di allagamento) che potrebbero essere inondate secondo i seguenti scenari:

-P 1 alluvioni rare di estrema intensità: tempo di ritorno fino a 500 anni (scarsa probabilità)

-P 2 alluvioni poco frequenti: tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (media probabilità)

-P 3 alluvioni frequenti: tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (elevata probabilità).

Direttiva Alluvioni		Pericolosità
Scenario	Tempo di ritorno	
Aree allagabili - scenario frequente Elevata probabilità di alluvioni (H= high)	20-50 anni (frequente)	P3 elevata
Aree allagabili - scenario poco frequente Media probabilità di alluvioni (M = medium)	100-200 anni (poco frequente)	P2 media
Aree allagabili - scenario raro Scarsa probabilità di alluvione o scenari di eventi estremi (L = low)	500 anni o massimo storico registrato	P1 bassa

Tabella 2: Schema esplicativo delle definizioni di livello di pericolosità

Per ogni scenario vanno riportate informazioni relative all'estensione dell'inondazione, alla portata di piena, all'altezza e alla quota idrica, alle caratteristiche del deflusso e, ove necessario, come testo o come tabelle si indicheranno le seguenti informazioni:

- invasi;
- opere idrauliche;
- possibili vie di fuga della corrente;
- aree a ridotte capacità di deflusso;
- tratti tombati;
- sezioni trasversali di calcolo con indicazione di livelli, velocità e portata per assegnati periodi di ritorno.

Per la rilevante estensione e le diverse caratteristiche che presenta l'UoM del fiume Po si è reso necessario suddividerla in diversi ambiti territoriali, di seguito definiti:¹⁰

¹⁰ "Mappatura della pericolosità e valutazione del rischio"- Autorità di Bacino del fiume Po, 2016

-Reticolo principale: costituito dall'asta del fiume Po e dai suoi principali affluenti nei tratti di pianura e nei principali fondivalle montani e collinari (lunghezza complessiva pari a circa 5.000 km).

-Reticolo secondario collinare e montano: costituito dai corsi d'acqua secondari nei bacini collinari e montani e dai tratti montani dei fiumi principali.

-Reticolo secondario di pianura: costituito dai corsi d'acqua secondari di pianura gestiti dai Consorzi di bonifica e irrigui nella medio- bassa pianura padana.

-Aree costiere marine: sono le aree costiere del mare Adriatico in prossimità del delta del fiume Po.

-Aree costiere lacuali: sono le aree costiere dei grandi laghi alpini (Lago Maggiore, Como, Garda, ecc.).

Per la realizzazione delle attività di aggiornamento e/o revisione delle condizioni di pericolosità idraulica andrà valutato il grado e l'affidabilità delle informazioni per la conduzione delle attività in oggetto. In base al tipo di informazioni utilizzate si potrà definire il livello di approfondimento (base, intermedio o avanzato) nello studio in oggetto, a seconda del tipo di approccio più o meno deterministico adottato.

Il livello base è proporzionale al valore degli elementi presenti nelle aree potenzialmente esposte alle alluvioni ed è possibile che nel tempo si potranno effettuare analisi più avanzate.

Il rischio di alluvioni è: " *la combinazione della probabilità di accadimento di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, il territorio, i beni, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche e sociali derivanti da tale evento*".¹¹

Le mappe del rischio segnalano, per ciascuno dei tre scenari di pericolosità, la presenza nelle aree allagabili di elementi potenzialmente esposti e il corrispondente livello di rischio distinto in quattro classi.

Il metodo di valutazione del rischio è presente nel DPCM del 29 settembre 1998 di seguito testualmente riportato.

¹¹ Decreto Legislativo 23 Febbraio 2010, n.49

Rischio moderato (R1) ” per il quale i danni sociali, economici e al patrimonio ambientale sono marginali ”;

rischio medio (R2) ” per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l’incolumità del personale, l’agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche ”;

rischio elevato (R 3) “per il quale sono possibili problemi per l’incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, interruzione delle attività socio-economiche, danni rilevanti al patrimonio ambientale”;

rischio molto elevato (R4) “per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche”.¹²

Le classi sono identificate con colori diversi: giallo (R1), arancione (R2), rosso (R3), viola (R4) e sono espresse in termini di: numero di abitanti; presenza di infrastrutture e strutture strategiche; beni ambientali e culturali di grande interesse; impianti che potrebbero rappresentare un serio pericolo in caso di alluvione.

Il rischio viene generalmente rappresentato come il prodotto di tre fattori.

$$R=P \times E \times V$$

P (pericolosità o *Hazard*): probabilità di accadimento di un evento alluvionale di data intensità in un intervallo di tempo prefissato in una data area.

E (esposizione o *Exposure*): il valore degli elementi a rischio (persone, beni, patrimonio culturale, strutture strategiche, infrastrutture, attività economiche...) presenti nell’area inondabile e individuate in sei macro-categorie.

V (vulnerabilità o *Vulnerability*): il grado di perdita degli elementi a rischio che dipende non solo dall’intensità dell’evento ma anche dalle capacità degli elementi di sopportare le sollecitazioni esercitate dall’evento.

La combinazione dell’esposizione e della vulnerabilità consente di stabilire il livello di danno potenziale (D) valutato in quattro classi omogenee: D4 (Danno potenziale molto elevato), D3 (Danno potenziale elevato), D2 (Danno potenziale medio), D1 (Danno potenziale moderato o nullo). Per ridurre il rischio bisogna agire sui tre fattori, ricercando dove possibile la migliore combinazione in termini di costi/benefici. Tra i diversi tipi di

¹² D.P.C.M. 29 settembre 1998- Gazzetta Ufficiale 1999, Serie generale, n. 3

danno una prima distinzione va fatta tra danni diretti dovuti al contatto fisico dell'acqua con il bene esposto e indiretti, introdotti dai primi, ma che si manifestano dopo l'evento, tra questi l'interruzione del traffico, del commercio e dei servizi pubblici. Un'altra distinzione va fatta tra danni tangibili e intangibili in base al fatto che si possa assegnare o meno un valore monetario alle conseguenze delle alluvioni.

A seguito dell'emanazione della Direttiva Alluvioni le azioni intraprese in un primo momento hanno riguardato un continuo aggiornamento e revisione degli studi, di valorizzazione dei PAI esistenti e di omogeneizzazione e organizzazione delle conoscenze sulla pericolosità e rischio idraulico dei corsi d'acqua, per conseguire un livello comune in tutti i Distretti Idrografici con contenuti coerenti con le indicazioni riportate nella Direttiva Alluvioni e nel D. Lgs. 49/2010.

Attualmente è in corso un nuovo ciclo di pianificazione, che prevede il riesame e l'aggiornamento delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvione, per redigere i nuovi PGRA. Tali riesami devono tener conto degli effetti dei cambiamenti climatici sul verificarsi delle alluvioni per i quali sono necessarie ancora ulteriori azioni di studio e approfondimento.

2.2.5 I Piani di gestione del rischio alluvioni

I Piani di gestione del rischio alluvioni (PGRA) sono gli strumenti operativi, coordinati a livello di Distretto Idrografico (River Basin District – RBD) o Unità di Gestione (Unit of Management – UoM), per gestire il rischio di alluvioni nelle attività di prevenzione, protezione, preparazione, comprese le previsioni di alluvioni e i sistemi di allertamento.¹³

Le autorità competenti per l'elaborazione del PGRA sono le Autorità di Bacino Distrettuali.

L'azione dei singoli piani deve essere orientata al raggiungimento di obiettivi generali quale la riduzione delle conseguenze negative delle alluvioni per la tutela della salute umana, dell'ambiente, del patrimonio culturale, dell'attività economica e delle infrastrutture. Dal momento che le cause e le conseguenze delle alluvioni sono diverse nei paesi europei è necessario considerare le particolari caratteristiche dei territori per adeguare i piani di gestione alle loro esigenze e priorità. Tra le indicazioni e gli indirizzi

¹³ Art. 7 Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 Ottobre 2007.

della Direttiva vi è la necessità di riesaminare e aggiornare periodicamente i piani tenendo presente le probabili ripercussioni dei cambiamenti climatici sul verificarsi delle alluvioni. Inoltre gli Stati Membri devono basare le valutazioni, le mappe e i piani sulle migliori pratiche, sulle migliori tecnologie disponibili purché non implicino costi eccessivi per la gestione del rischio. Le regioni in coordinamento tra di loro e con il Dipartimento Nazionale di Protezione civile sono gli enti responsabili della parte del piano relativa al sistema di allertamento per il rischio idraulico ai fini della protezione civile.

Dato lo spessore strategico dei PGRA la Direttiva Alluvioni ha richiesto agli Stati Membri di incentivare la partecipazione dei cittadini nelle diverse fasi per l'elaborazione dei PGRA. Anche il decreto di recepimento in Italia della suddetta Direttiva riafferma l'indicazione data e nella consapevolezza che la comunità locale ha un ruolo determinante nel localizzare i rischi e nelle modalità di difendersi, in tutto il territorio sono stati previsti momenti di consultazione pubblica mediante incontri aperti e iniziative online (forum, sondaggi, questionari...). Il primo ciclo del PGRA risale al 2015, mentre il secondo ciclo si concluderà entro il 2021 ed è in fase di elaborazione.

Per il PGRA del Po (PGRA-PO) e dei suoi affluenti l'ente deputato alla sua redazione è l'Autorità del Bacino del fiume Po (AdBPo). Il documento è stato approvato con D.P.C.M del 27 ottobre 2016 e pubblicato il 6 febbraio 2017 sulla Gazzetta Ufficiale n. 30. Nel mese di dicembre dell'anno 2018 si è avviato il processo di aggiornamento che terminerà dopo tre anni, nel rispetto della scadenza stabilita.

3. INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'AREA DI STUDIO

L'area di studio a cui si fa riferimento nel lavoro di tesi vede coinvolti due ben noti corsi d'acqua del territorio Piemontese: il Fiume Po e il Torrente Chisola, un affluente in sinistra idrografica del Po che incontra il grande fiume nei pressi dell'abitato di Moncalieri a sud di Torino.



Figura 7: Ortofoto con andamento planimetrico dell'asta del Torrente Chisola e del Fiume Po nel territorio Piemontese

Nei paragrafi successivi sono riportate alcune delle principali informazioni riguardanti i bacini idrografici dei due corsi d'acqua con riferimento alle caratteristiche geomorfologiche e idrografiche tratte dal documento dell'Autorità di Bacino del fiume Po "Linee generali di assetto idrogeologico" e dall' "Atlante dei Bacini Imbriferi Piemontesi".

3.1 Il reticolo idrografico dell'alto PO

Il Po per la sua lunghezza di 652 km è il maggiore corso d'acqua presente nel territorio Italiano. Il suo bacino idrografico è di ben 74000 km², di questi una parte ricade nei

territori francese e svizzero, mentre circa 70000 km si trovano in territorio italiano interessando 3200 comuni e sei Regioni: Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Veneto, Liguria, Emilia Romagna e la Provincia autonoma di Trento. Il fiume attraversa gran parte dell'Italia settentrionale, percorrendo tutta la Pianura Padana, bagnando quattro capoluoghi di provincia (nell'ordine Torino, Piacenza, Cremona e Ferrara) e infine sfocia nel Mare Adriatico in un vasto delta. I confini di questo ampio bacino racchiudono aree di natura ben diversa per molteplici aspetti. Entro questi limiti si sviluppa la rete idrica del Po e dei suoi affluenti, i cui bacini differiscono per situazioni idrologiche e conformazioni geomorfologiche. Il tratto montano del Fiume Po si chiude a Paesana mentre a Saluzzo il fiume si trova a percorrere il territorio dell'alta pianura piemontese, attraversando anche ambiti caratterizzati da scarse pendenze, tanto che nel tratto tra la confluenza del Pellice e Carmagnola il Po si presenta con andamento meandriforme. Poi la pendenza diminuisce, il fiume si arricchisce delle acque di numerosi affluenti importanti e comincia il suo percorso in direzione Ovest-Est, verso il mare.

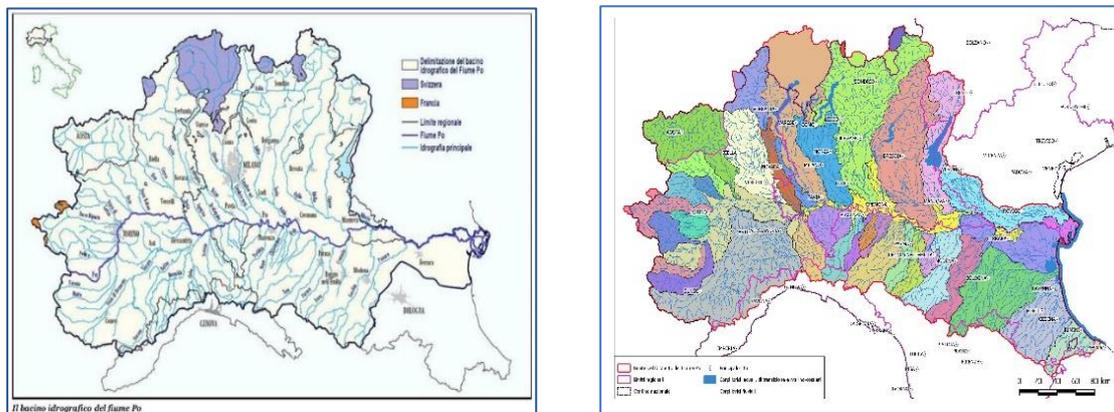


Figura 8: Mappa dei bacini idrografici e degli affluenti principali del fiume Po

Nella tabella 3 vengono sinteticamente riportate le principali caratteristiche del Bacino del Po alle sezioni di Chiusura di Carignano e Moncalieri estratte dall'Atlante dei Bacini Imbriferi Piemontesi.

	Carignano	Moncalieri
Area totale	3955 km ²	5048 km ²
Altitudine massima	3760 m.s.l.m	3760 m.s.l.m
Altitudine media	1101 m.s.l.m	927 m.s.l.m
Altitudine minima	207 m.s.l.m	195 m.s.l.m
Lunghezza asta	109.72 km	125.78 km

Tabella 3: Caratteristiche del bacino Po – Sezioni di Carignano e Moncalieri a sud della città di Torino

3.1.1 Caratteristiche dei principali affluenti ricadenti in Piemonte

In Piemonte i principali affluenti del Fiume Po, procedendo da monte verso valle, possono essere divisi in due grandi gruppi.

In sinistra idrografica:

- Il Pellice (53 km) nasce dalle Alpi Occidentali e precisamente dal Monte Granero. Durante il suo percorso si dirama in svariati bracci minori per andare poi a sfociare nel fiume Po in territorio del Comune di Villafranca Piemonte. Nonostante la denominazione di torrente è un corso d'acqua a flusso perenne soggetto a piene violente in caso di precipitazioni abbondanti ed è caratterizzato da deflussi abbastanza copiosi;
- il Sangone (47 km) è un corso d'acqua a regime torrentizio che bagna la Val Sangone e si trova tra la Val di Susa e la Val Chisone. Nasce nella zona più esterna delle Alpi Cozie a quasi 2.000 m. d'altitudine;
- il Chisola (39.4 km) nasce dalla confluenza di due rami torrentizi, uno che origina dal Monte Freidou e l'altro tra il Monte Brunello e i Tre Denti. Dopo avere bagnato la breve Val Chisola riceve da destra i suoi tributari Noce e Rio Torto più altri torrenti vari fra i quali il Lemina, sfociando poi nel fiume Po nel territorio del comune di Moncalieri;

- la Dora Riparia (125 km) ha origine da due rami: la Dora di Cesana e la Dora di Bardonecchia nella piana di Oulx e percorre la Valle di Susa fino allo sbocco nella pianura torinese;
- la Stura di Ianzo (68.8 km) è un corso d'acqua a regime marcatamente torrentizio che nasce al Pian della Mussa;
- l'Orco (90 km) è un fiume a regime torrentizio che nasce da piccole sorgenti, tra la Punta Leynir e la Punta Rosset, e viene alimentato dalle acque del lago Rosset, del lago Leytà e dalle nevi del versante piemontese del Gran Paradiso;
- la Dora Baltea è un fiume dell'Italia settentrionale lungo quasi 170 km, il 5° per portata d'acqua dopo Ticino, Adda, Oglio e Tanaro;
- il Sesia (138 km) ha origine dal Monte Rosa e sbocca in pianura poco a monte di Vercelli. La confluenza nel Po avviene nei pressi di Breme.

In destra idrografica, troviamo:

- Il Varaita è un corso d'acqua della provincia di Cuneo ed è il primo affluente di destra del Po. Ha regime torrentizio con portate ridottissime in estate e piene autunnali e primaverili;
- il Maira nasce sulle Alpi Cozie bagna la cittadina di Racconigi costeggiando il parco della celebre Residenza Estiva dei Savoia e raggiunge in breve il Po nel quale confluisce da destra nel territorio del comune di Lombriasco;
- il Tanaro (276 km) è il secondo fiume per lunghezza del Piemonte dopo il Po, del quale è anche principale affluente di destra. Nasce alla confluenza tra il Tanarello e il torrente Negrone e sbocca nell'alta Pianura Padana.

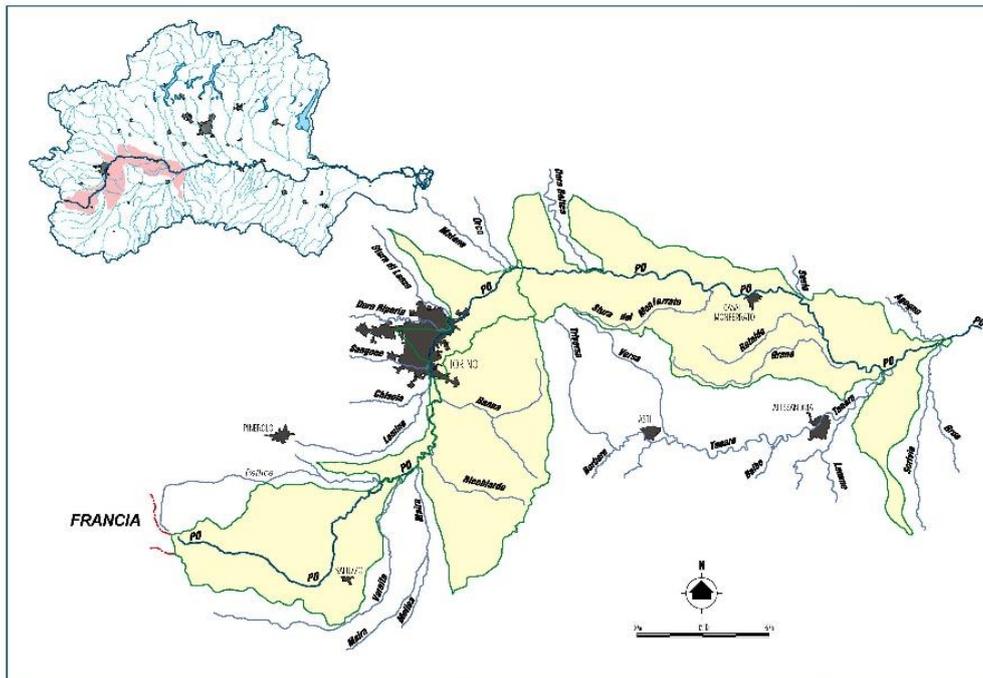


Figura 9: Mappa degli affluenti principali ricadenti nel territorio Piemontese, in destra e sinistra idrografica del fiume dalla sorgente alla confluenza con il Tanaro: ambito fisiografico.

3.1.1.1 Il bacino idrografico del Torrente Chisola

Situato nella parte sud-occidentale della provincia di Torino il Chisola, con uno sviluppo di circa 46 km, attraversa i territori comunali di Cumiana, Piossasco, Volvera, None, Piobesi Torinese, Vinovo, La Loggia, Moncalieri ricevendo il contributo di piccoli corsi d'acqua e canali molti dei quali utilizzati a scopo irriguo. Scendendo dalla valle di Cumiana il Torrente riceve il contributo in destra idrografica del Torrente Noce, del Rio Torto, della Bealera dei Prati, del Rio Essa e infine del Torrente Lemina il cui tratto finale prende il nome di Oitana. Il bacino idrografico presenta un'estensione di circa 464 Km² e si trova compreso tra i bacini del Sangone e del Chisone. In termini di area il bacino idrografico del Chisola ha una superficie pari a circa il 10 % di quella del fiume Po nella sezione di Moncalieri (To). La parte montana del Chisola, nei pressi del monte di Cumiana, dal punto di vista morfologico appare appartenere alle Prealpi pinerolesi con rilievi modesti e fortemente incisi dal reticolo idrografico secondario.

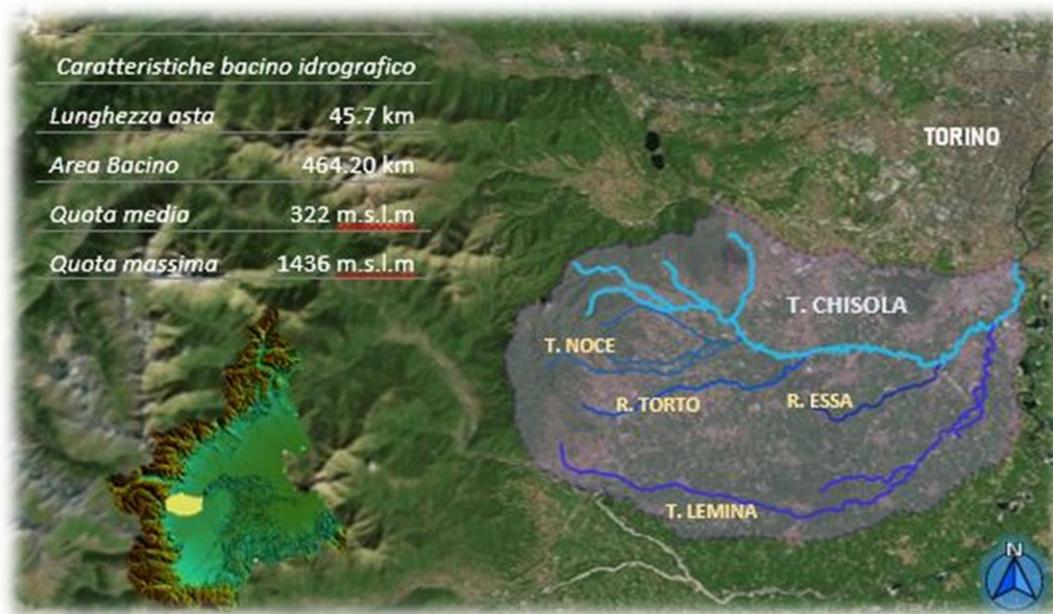


Figura 10: Inquadramento del bacino idrografico del Torrente Chisola

Dall'andamento della curva Ipsografica (che fornisce la distribuzione delle superfici nelle diverse fasce altimetriche del bacino) riportata nella figura 11 osservando la pendenza della curva, si nota la presenza a valle di un'estesa parte pianeggiante che occupa più del 70 % della superficie dell'intero bacino, differendo da quella di monte per un dislivello di oltre 1100 m. Tale risultato è confermato dalla presenza di numerosi insediamenti abitativi nella parte bassa del bacino e da aree con ridotta densità insediativa lungo i versanti, occupati maggiormente da aree boscate.

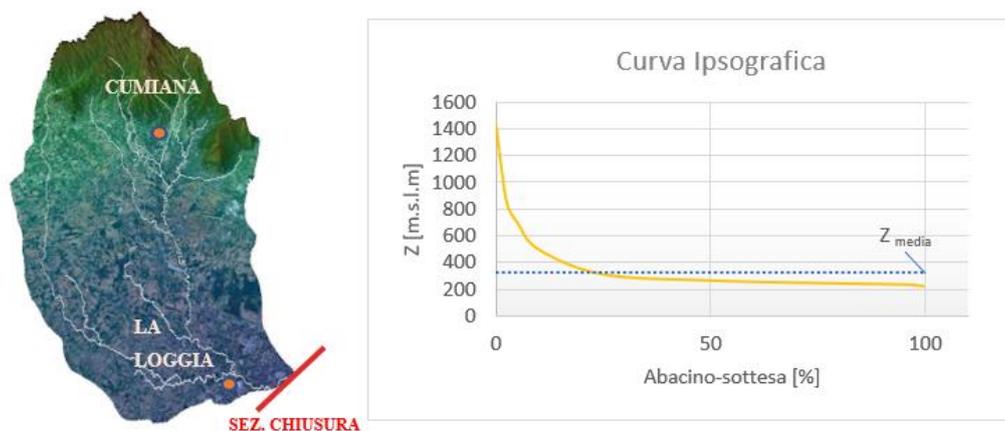


Figura 11: Rappresentazione 3D del bacino idrografico del T. Chisola e relativa curva isopografica con indicazione della sezione di chiusura del Bacino in corrispondenza della confluenza con il fiume Po

Nel tratto che va dalla sorgente a monte di Cumiana sino alla confluenza con il torrente Noce il Chisola presenta un alveo a carattere torrentizio, stretto e profondo per poi allargarsi assumendo un andamento sinuoso, tendente alla pluricursalità con un incremento della vegetazione ripariale. A valle di Volvera sino a La Loggia il corso d'acqua assume invece le caratteristiche di un alveo monocursale, sinuoso con carattere fortemente meandrizzato. Il reticolo idrografico secondario è costituito da piccoli corsi d'acqua, canali, gore, bealere utilizzati a scopo irriguo.



Figura 12: Tratto sinuoso dell'andamento planimetrico del Torrente Chisola

La principale manifestazione di dissesto lungo l'asta principale del Torrente è rappresentata dalla tendenza al sovralluvionamento di alcuni tratti del fondovalle, spesso accompagnata dall'accumulo di vegetazione arborea e arbustiva presente in tutto il tratto, che in eventi di piena è causa di problemi di deflusso e ostruzione in prossimità delle luci dei ponti.



Figura 13: Esempio di vegetazione arborea e arbustiva lungo le sponde del Torrente Chisola

Nella parte finale dell'asta, nei pressi della confluenza con il fiume Po a Moncalieri (TO), l'alveo è stato nel corso dei tempi antropizzato subendo rettifiche, canalizzazioni e restringimenti dovuti all'espansione urbanistica destinando ampie fasce di pertinenza fluviale agli insediamenti agricoli e produttivi della zona. In tutto il tratto di pianura da Cumiana sino a La Loggia le opere arginali sono presenti solo a protezione di alcuni insediamenti urbani come None, Vinovo e nelle aree circostanti il tratto finale, dal comune di La Loggia sino alla confluenza Po, in cui sono presenti su entrambi i lati del torrente le difese arginali costruite negli anni venti del secolo scorso.



Figura 14: Planimetria del Torrente Chisola da None a Moncalieri con indicazione delle difese arginali esistenti

4. Metodologie per la definizione delle mappe di pericolosità

Le mappe di pericolosità da alluvioni (ai sensi della Direttiva Alluvioni e del D. Lgs 49/2010) vanno definite in corrispondenza dei tre diversi scenari di probabilità (L=low, M=medium, H=high) e per ogni scenario vanno riportate le estensioni delle aree che potenzialmente potrebbero essere allagate ma anche i livelli idrici e dove opportuno la velocità o la portata. Per meglio individuare gli elementi esposti al rischio di esondazione, l'area interessata può essere definita da poligoni. Inoltre al fine di garantire uniformità e chiarezza nella rappresentazione dei risultati, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale nel documento "Proposta metodologica per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità e di rischio - 2012" suggerisce come di seguito testualmente riportato: *“assumendo l'ipotesi che sia i layer delle altezze che quelli delle velocità siano dei grid, per quanto riguarda le altezze idriche, si propone di rappresentarle utilizzando delle gradazioni di blu definite mediante un raggruppamento dei valori di altezza in 5 classi con intervallo di variabilità costante e uguale a 0,5 m.* (Tabella 4). Nel caso delle velocità la rappresentazione, ai sensi della Direttiva, non è obbligatoria, ma è prevista dalla nostra normativa, pertanto la proposta è quella di visualizzare le velocità solo nelle aree in cui il valore supera una certa soglia (ad esempio i 2 m/s).

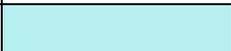
h (m)	colore	R	G	B
$h \leq 0,5$		182	237	240
$0,5 \leq h < 1$		116	180	232
$1 \leq h < 1,5$		31	131	224
$1,5 \leq h < 2$		29	68	184
$h \geq 2$		9	9	145

Tabella 4: Scala dei colori per la rappresentazione delle altezze idriche (ISPRA, 2012)

Le valutazioni per la stima dei tiranti sono state condotte con i dati, le informazioni disponibili e con il contributo di elaborazioni sperimentali che saranno completate negli anni successivi con modellazioni idrauliche in grado di stimare anche le velocità. Attualmente le mappe dei tiranti sono contrassegnate da livelli diversificati di confidenza

che tuttavia rispondono alle finalità del primo aggiornamento delle mappe. Essi saranno migliorati negli anni a venire con studi specifici. Per la stima dei tiranti all'interno delle aree allagabili i metodi utilizzati con associati i livelli di confidenza sono quelli riassunti nella tabella sotto riportata.

	Dati richiesti	Livello di confidenza
<i>Metodi speditivi</i>		
Intersezione GIS fra la superficie idrica di piena, ottenuta mediante interpolazione spaziale delle sole quote del perimetro dell'area allagata e il DTM.	<ul style="list-style-type: none"> • APSFR per i tre scenari di riferimento (L, M, H); • Modello digitale del terreno (DTM). 	Basso
<i>Metodi della soggiacenza</i>		
Intersezione GIS fra la superficie idrica di piena, ottenuta mediante interpolazione spaziale dei livelli di piena in corrispondenza delle sezioni dei modelli idraulici monodimensionali e il DTM.	<ul style="list-style-type: none"> • APSFR per i tre scenari di riferimento (L, M, H); • Modello digitale del terreno (DTM); • Modello idraulico 1D. 	Medio
<i>Metodi di dettaglio</i>		
Modellazione idraulica Bidimensionale	<ul style="list-style-type: none"> • Modello digitale del terreno (DTM); • Modello idraulico 2D 	Alto

Tabella 5: Metodi utilizzati per la stima dei tiranti (Relazione Metodologica-Distretto del fiume Po, 2019)

Per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità (in termini di estensione delle aree potenzialmente allagate, tiranti idrici e velocità) relative al Torrente Chisola sono stati applicate le seguenti metodologie:

- 1) Metodo "speditivo" (basso livello di confidenza) per definire le mappe¹⁴ in termini di tiranti nell'ambito della prima fase di aggiornamento del secondo ciclo di gestione
- 2) Metodo "di dettaglio" (alto livello di confidenza) per aggiornare le mappe precedenti, ai fini della redazione del nuovo PGRA

¹⁴Le mappe ottenute sono state successivamente approvate dalla Conferenza Istituzionale Permanente dell'Autorità di Bacino distrettuale del fiume Po nel Dicembre del 2019 e pubblicate sul sito dell'Autorità il 16 Marzo 2020.

4.1 Applicazione del metodo speditivo al caso studio: il torrente Chisola

La definizione delle mappe di pericolosità in termini di tirante del torrente Chisola, è stata condotta ricorrendo ad un metodo speditivo al quale è stato associato un basso livello di confidenza per via delle approssimazioni e delle incertezze che tale metodo ha comportato. Nello specifico, in assenza di informazioni adeguate riguardanti i profili di piena¹⁵ relativi al Torrente si è proceduto ad una stima dei valori di tirante per ogni scenario di probabilità, combinando l'informazione di quota inclusa nel modello digitale del terreno (DTM) con l'informazione del perimetro delle mappe di pericolosità del primo ciclo di gestione. La procedura adottata, di natura se pur geometrica o topografica si è avvalsa dell'uso del software *open source Quantum QGIS* nella versione 2.18.13 (Las Palmas) che consente di analizzare, visualizzare ed editare dati spazialmente referenziati sotto forma di modelli vettoriali (lineari, puntuali o areali) o modelli raster.

Le informazioni utilizzate sono state le seguenti:

- Modello digitale del terreno (DTM)¹⁶ della Regione Piemonte (2009-2011) acquisito con metodologia LIDAR, avente una risoluzione della griglia (passo) di 5 m e una precisione in quota di ± 0.30 m su tutta l'area tranne che per le aree boscate e densamente urbanizzate in cui la precisione è di ± 0.60 m (Fonte: Geoportale Regione Piemonte);
- Mappe di pericolosità (layer areali) del primo ciclo di pianificazione per i tre scenari di pericolosità (L=low, M=medium e H=high) successivamente aggiornate nello scenario di media pericolosità in seguito all'evento di piena verificatosi in Piemonte nel Novembre 2016.

¹⁵ Le tabelle dei profili longitudinali delle quote idriche medie di massima piena nelle sezioni di deflusso, ove disponibili, sono riportate nel documento "Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale" pubblicato sul sito dell'autorità di Bacino all'interno della sezione Mappe del PGRA 2015.

¹⁶Il modello Digital Terrain Model rappresenta l'andamento della superficie terrestre filtrata dagli elementi antropici e vegetazionali presenti sopra il livello del terreno.

4.1.1 Preparazione dei dati iniziali

La procedura utilizzata ha previsto una serie di operazioni di elaborazioni dei dati iniziali effettuate ricorrendo all'uso di tre geoalgoritmi (*From polygons to lines*, *Points along the geometry* and *Point Sampling Tool*) contenuti nel plugin GdalTools ¹⁷e disponibili nell'interfaccia grafica di QGIS. Per prima cosa è stato caricato nel software QGIS il modello digitale del terreno della Regione Piemonte (raster) e le mappe di pericolosità (vettoriali), relative alla parte terminale del Torrente Chisola, per i tre scenari di pericolosità (Low, Medium, Hight). Il passo successivo è stato quello di estrarre una prima informazione sulla quota idrica dal modello digitale del terreno sfruttando il perimetro dell'area di inondazione presente in ciascuna mappa di pericolosità (fig. 15). Questa operazione è stata eseguita in tre fasi successive:

- Nella prima fase è stato applicato l'algoritmo *From polygons to lines* a ciascuna mappa di pericolosità per poter ricavare il contorno della mappa;
- nella seconda fase è stato applicato l'algoritmo *Points along the geometry*¹⁸ in modo da discretizzare il contorno delle mappe in una serie di punti distanziati tra loro con intervallo assunto pari a 2 metri;
- Nella terza fase è stato applicato il plugin *Point Sampling Tool* che ha consentito di estrarre l'informazione di quota altimetrica presente nel modello digitale del terreno utilizzando come dato di ingresso il layer puntuale ricavato nella fase 2.

¹⁷ Il plugin fornisce l'accesso agli strumenti presenti nella libreria GDAL, che consentono elaborazioni di geoprocessing vettoriali.

¹⁸ Questo algoritmo consente di creare un dato vettoriale di tipo puntuale, con punti distanziati ad una certa distanza gli uni dagli altri a partire da un dato vettoriale di tipo lineare.

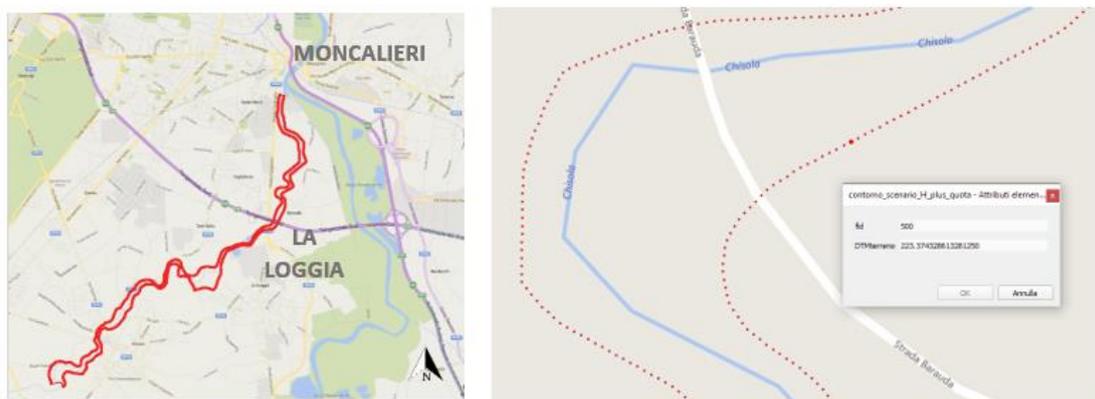


Figura 15: Rappresentazione grafica dei risultati delle fasi di pre-elaborazione dei dati iniziali: contorno della mappa di pericolosità per scenario Low (a sinistra) e layer contenente l'informazione di quota altimetrica (a destra)

4.1.2 Elaborazione dei dati altimetrici

Una volta ricavata l'informazione di quota altimetrica lungo il contorno delle mappe per ognuno dei tre scenari considerati, si è passati alla costruzione vera e propria del raster dei livelli idrici utilizzando prima il plugin *Interpolazione* e poi il *calcolatore Raster*, entrambi presenti sul software QGIS. Attraverso il plugin *Interpolazione*, utilizzando lo schema TIN¹⁹ è stato possibile generare il raster delle quote altimetriche (riferite al livello medio del mare) inserendo come dato di ingresso il layer puntuale (risultato della pre-elaborazione) e definendo come parametri del raster di *output*, le dimensioni di cella (assunte pari a 1 metro) e i limiti dell'area di estensione. Il risultato ottenuto è stato successivamente ritagliato in modo da avere la stessa estensione delle mappe di pericolosità. La procedura è stata eseguita per ogni scenario di riferimento.

¹⁹ L'algoritmo Interpolazione TIN (compreso nel core di QGIS) permette di generare superfici triangolate a partire da dati numerici contenuti in layer puntuali o lineari.

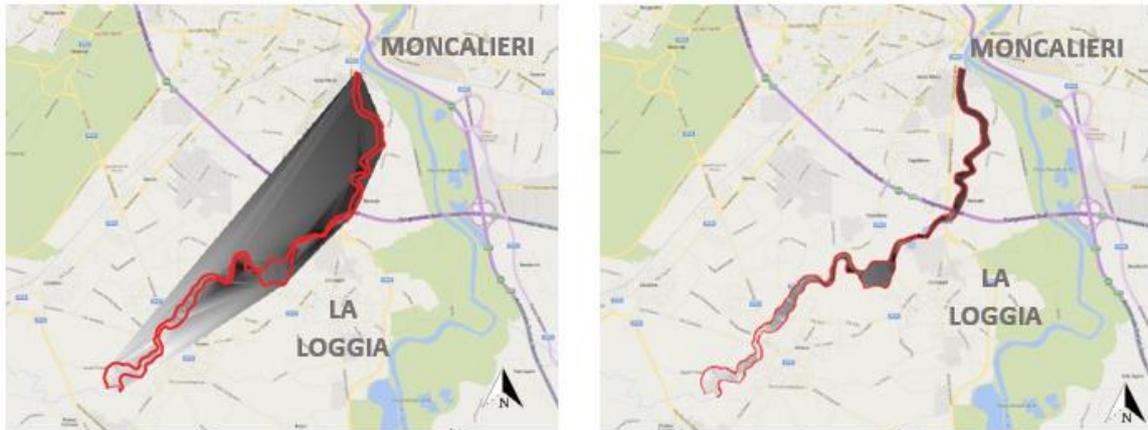


Figura 16: Rappresentazione del raster delle quote idriche ottenuto dall'interpolazione TIN (a sinistra) e ritagliato sull'estensione della mappa di pericolosità per scenario Low (a destra)

Ricavato il raster delle quote idriche si è infine passati all'informazione altimetrica espressa in termini di tirante idrico (altezza d'acqua) eseguendo un'operazione di sottrazione tra il raster delle quote idriche (ottenuto da interpolazione TIN) e il modello digitale del terreno. Tale operazione è stata eseguita ricorrendo all'uso del calcolatore *raster*, uno strumento che permette di eseguire operazioni di calcolo matriciale sulle celle *dei raster* tramite l'uso di costanti e operatori matematici o logici.

Eseguendo la procedura per ogni scenario di riferimento è stato dunque possibile ricavare le mappe di pericolosità dei tiranti (altezze d'acqua) associate al Torrente Chisola, per ogni scenario di pericolosità (High, Medium and Low). Le suddette mappe vengono riportate nelle figure 17, 18 e 19

Va precisato che il livello di confidenza dei risultati ottenuti è da considerarsi al quanto basso, per via delle ipotesi semplificative usate nel metodo conseguente all'aver assunto una distribuzione lineare delle quote idriche su tutta l'area di riferimento senza considerare la presenza di ostacoli (case, muri, rilevati stradali, opere idrauliche, ecc.). I risultati ottenuti con questo metodo saranno confrontati nel capitolo 5, paragrafo 5.5 con quelli ricavati con il metodo di dettaglio, descritto nel quinto capitolo.

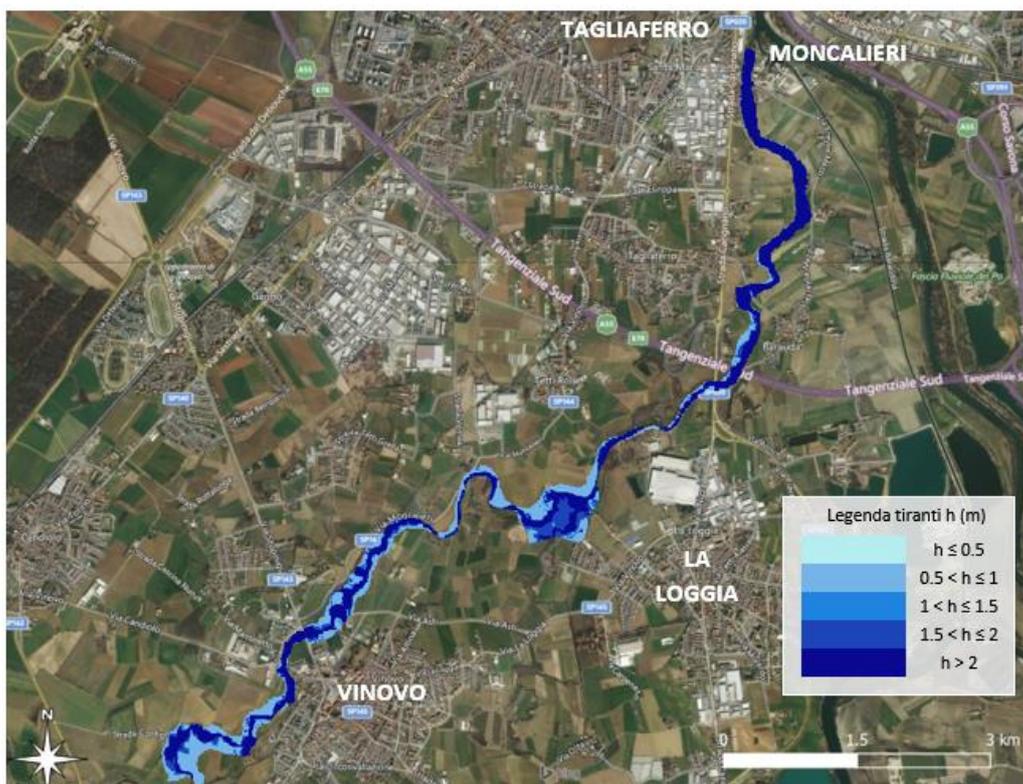


Figura 17: Mappa di pericolosità dei tiranti idrici del Torrente Chisola relativa allo scenario di alta pericolosità (H)

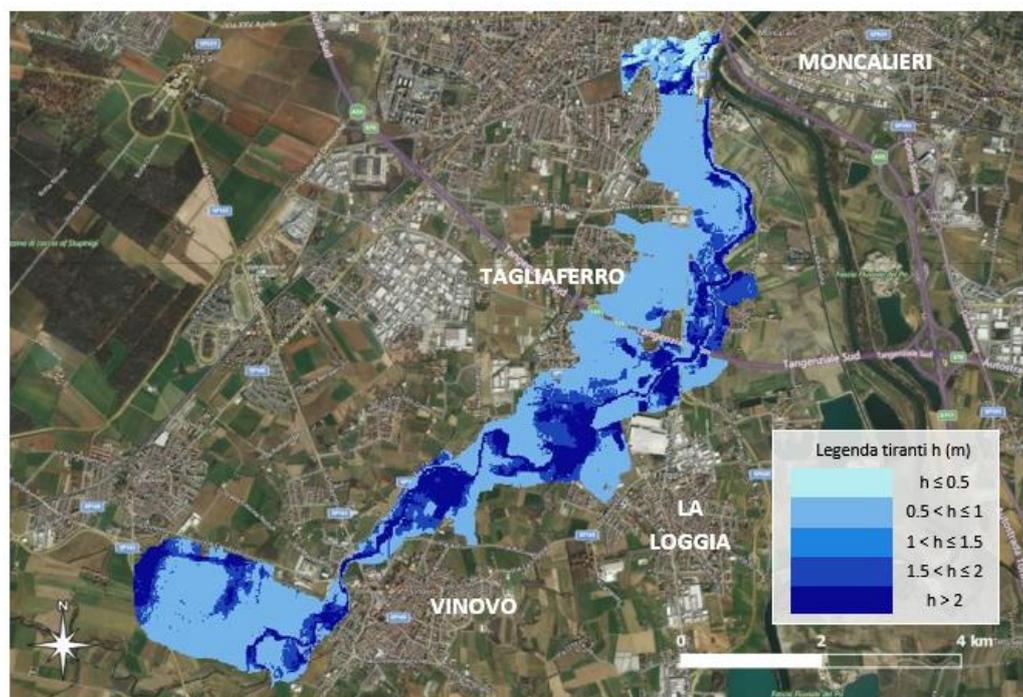


Figura 18: Mappa di pericolosità dei tiranti idrici del Torrente Chisola relativa allo scenario di media pericolosità (M)

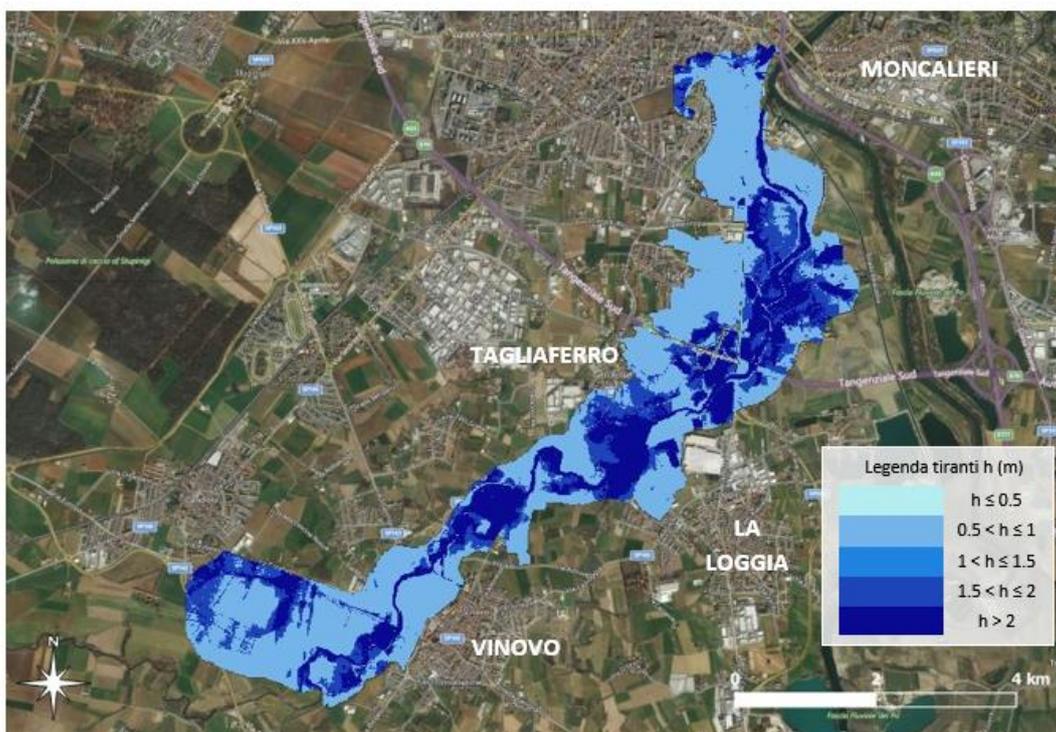


Figura 19: Mappa di pericolosità dei tiranti idrici del Torrente Chisola relativa allo scenario di scarsa pericolosità (L)

4.2 Modellistica idraulica

Prima di affrontare i metodi per valutare e calcolare tiranti e velocità delle aree potenzialmente allagate saranno richiamati i principi teorici sulle correnti a pelo libero e le equazioni matematiche che stanno alla base dei codici di calcolo utilizzati nel campo della modellazione idraulica numerica.

4.2.1 Richiami di idraulica sulle correnti a superficie libera

Le correnti a pelo libero sono quelle correnti che percorrono i corsi d'acqua naturali o i canali artificiali: il loro studio e la conoscenza delle loro caratteristiche sono necessari per poter eseguire una corretta progettazione delle opere idrauliche. La caratteristica principale che contraddistingue questa tipologia di correnti è rappresentata dal fatto di avere la parte superiore della superficie di contorno a contatto con un gas che quasi sempre è l'aria. Tale superficie si definisce superficie libera o pelo libero.

Nel caso delle correnti a pelo libero, la descrizione matematica del moto stesso risulta molto più complessa, poiché a differenza di quanto avviene per i moti in pressione nelle condotte (reti di distribuzione di acqua potabile e non solo), nei canali la sezione trasversale bagnata non risulta essere costante in quanto il tirante idrico h risulta in genere variabile con lo spazio e con il tempo. In queste condizioni anche la velocità varia nella direzione del moto, assumendo nella sezione una distribuzione di tipo tridimensionale.

4.2.1.1 Possibili regimi di moto

Nell'ambito delle correnti a pelo libero è possibile classificare il regime di moto secondo tre condizioni:

- Moto vario
- Moto permanente
- Moto uniforme

Nei canali naturali è abbastanza frequente che il moto di una corrente a superficie libera sia di tipo *vario* (*Unsteady Flow*) per esempio a causa di immissioni di portate variabili nel tempo o a causa di un cambiamento di geometria della sezione. Spesso però la variazione delle grandezze significative è talmente lenta che il moto può, in prima approssimazione considerarsi permanente. Dunque il moto di una corrente si definisce *permanente* (*Steady Flow*) se l'altezza e la velocità in ciascuna sezione trasversale non variano nel tempo pur potendo variare lungo la direzione del moto.

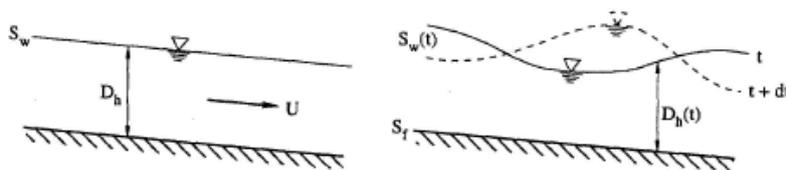


Figura 20: Rappresentazione schematica del moto permanente (Steady-Flow) a destra e del moto Vario (Unsteady-Flow) a sinistra

La condizione di moto uniforme (*Uniform Flow*) è una particolarità del moto permanente e rappresenta una condizione di riferimento nello studio delle correnti a superficie libera. Essa è la condizione alla quale la corrente tenderebbe se il canale fosse di lunghezza indefinita e avesse sezione, pendenza e scabrezza costanti. Quando la corrente si muove di moto uniforme l'altezza e la velocità media della corrente sono costanti in tutte le sezioni,

pertanto il profilo del pelo libero e la linea dei carichi totali sono ambedue paralleli al fondo del canale. In tali condizioni la cadente J (perdita di carico per unità di percorso) è dunque uguale alla pendenza del fondo.

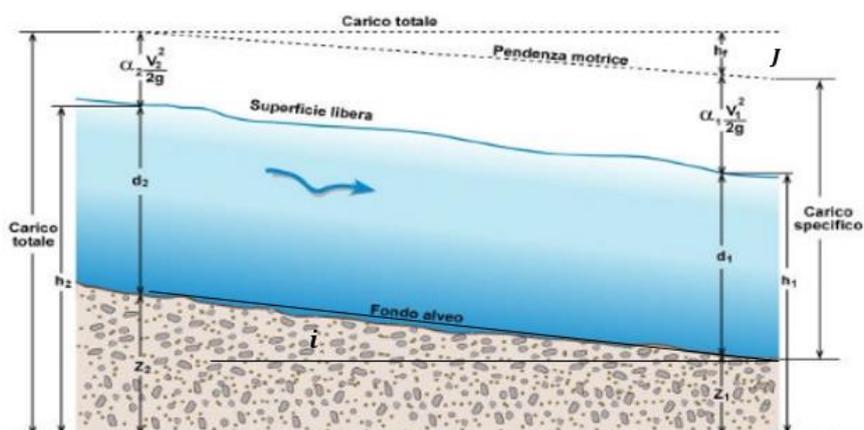


Figura 21: Rappresentazione della linea dell'energia tra due sezioni di una corrente a pelo libero

La corrente a pelo libero assume spontaneamente un regime di moto di tipo uniforme. Tuttavia difficilmente questa condizione risulta verificata nei canali naturali, come i fiumi o i torrenti in quanto una qualunque causa di disturbo, come la presenza di un ostacolo o un cambiamento di pendenza della sezione, imposto dalla morfologia, può provocare una variazione dell'altezza idrica con conseguente allontanamento della corrente dalla condizione di moto uniforme. In tal caso la corrente tende ad un profilo di moto che dipende dalle caratteristiche della corrente uniforme (veloce o lenta) e dalla condizione che ne ha provocato l'allontanamento. Sebbene questo tipo di moto sia a rigore molto raro, è opportuno precisare che per la progettazione dei canali artificiali (es. canali degli impianti di irrigazione), ci si avvale proprio delle leggi del moto uniforme di cui si riportano a seguire alcune formulazioni di pratico utilizzo ingegneristico.

- Velocità di moto uniforme

In condizioni di moto uniforme i valori che l'altezza d'acqua e la velocità assumono in un canale per assegnata portata prendono il nome di altezza di moto uniforme e velocità di

moto uniforme. Ricorrendo all'equazione di Chezy, e ricordando che in condizioni di moto uniforme la cadente J è pari alla pendenza del fondo i , la velocità può essere espressa nel seguente modo:

$$V_0 = C \cdot \sqrt{R_{i,0} \cdot i} \quad (1)$$

dove:

- $R_{i,0}$ rappresenta il raggio idraulico (rapporto tra la superficie e il perimetro bagnato della sezione trasversale del canale) ed è una grandezza caratteristica della sezione; In presenza di alvei rettangolari molto larghi il raggio idraulico può essere approssimato all'altezza della corrente.
- C è il coefficiente di Chèzy ricavabile sperimentalmente e presente in letteratura sotto differenti espressioni introdotte successivamente dagli studiosi Kutter, Bazin Strickler e Manning. Tra queste è certamente preferibile usare la formula monomia di Gauckler-Strickler o quella esponenziale di Manning in cui il coefficiente di Chèzy viene espresso in funzione di un coefficiente di scabrezza moltiplicato per il raggio idraulico della sezione. L'unica differenza tra le due formulazioni sta nella definizione dell'indice di scabrezza, poiché quello introdotto da Manning n altro non è che l'inverso del coefficiente di Strickler.

$$C = K_s \cdot R^{1/6} \quad (\text{Chèzy} - \text{Strickler})$$

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6} \quad (\text{Chèzy} - \text{Manning}) \quad (2)$$

Va tenuto presente che, nonostante in letteratura o nei manuali tecnici siano riportate tabelle a partire dalle quali è possibile ricavare il valore del coefficiente di Gauckler-Strickler, vi è sempre una notevole incertezza nella stima del valore soprattutto in alvei naturali in cui la presenza di vegetazione spontanea (o di altri elementi) può indurre un notevole incremento della scabrezza equivalente e quindi un sensibile aumento della resistenza al moto.

- Scala delle portate di moto uniforme

Moltiplicando la velocità di moto uniforme per l'area della sezione trasversale del canale è possibile ricavare la portata di una corrente che si muove in condizioni di moto uniforme.

$$Q = V_0 \cdot A_0 = C \cdot A_0 \cdot \sqrt{R_{i,0} \cdot i} \quad (3)$$

Introducendo la formula di Strickler, l'espressione della portata (3) diviene la seguente:

$$Q(h_0) = A_0 \cdot K_s \cdot R_0^{2/3} \sqrt{i} \quad (4)$$

Questa espressione prende il nome di scala delle portate o legge del moto uniforme e consente di calcolare la portata Q che defluisce in un canale in condizioni di moto uniforme, nota l'altezza di moto uniforme e la geometria della sezione (area bagnata, raggio idraulico). Anche nei corsi d'acqua naturali, nei quali il moto è permanente, è possibile definire una scala delle portate, in genere ricavata in sezioni di misura in cui viene misurato regolarmente il tirante idrico mediante misuratori di livello (idrometri) dalla cui lettura, conoscendo la scala delle portate in quella sezione, è possibile risalire al valore della portata defluente nella sezione.

4.2.1.2 Corrente lenta e corrente veloce

Nell'ambito dell'idraulica fluviale riuscire a stabilire se una corrente è lenta o veloce è importante perché il suo comportamento dipende proprio da questa caratteristica. Ad esempio, la presenza di un ostacolo sul fondo, quale un tronco o un grosso masso, provoca un innalzamento o un abbassamento del livello idrico a seconda se la corrente è veloce o lenta. Generalmente nei grandi fiumi e nelle reti irrigue la corrente è lenta e assume un carattere di tipo veloce solo quando è costretta a passare attraverso paratoie o in corrispondenza di restringimenti d'alveo o soglie di fondo per poi ritornare lenta attraverso un risalto idraulico.

Il carattere cinematico di una corrente a pelo libero può essere individuato ricorrendo al cosiddetto numero di Froude, un parametro adimensionale che consente di capire se una corrente a superficie libera sia lenta, critica o veloce.

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{g \cdot Y}} = \frac{u}{\sqrt{g \cdot A/B}} \quad (5)$$

Dove: g è l'accelerazione di gravità, u è la velocità media della corrente e L è una grandezza caratteristica data dal rapporto tra l'area A della sezione e la larghezza B che la corrente assume in superficie. In un canale rettangolare tale lunghezza sarà pari all'altezza della corrente. In funzione del valore assunto dal numero di Froude le correnti a superficie libera vengono classificate come:

correnti lente o subcritiche se $F_r < 1$

correnti critiche se $F_r = 1$

correnti veloci o supercritiche se $F_r > 1$

Il numero di Froude è anche proporzionale alla radice quadrata del rapporto tra le forze di inerzia e le forze di gravità. Infatti riprendendo la relazione (1) e manipolandola algebricamente si ottiene che:

$$F_r^2 = \frac{2 \cdot \left(\frac{1}{2} \rho V^2 A\right)}{mg} \approx \frac{\text{forze di inerzia}}{\text{forza di gravità}} \quad (6)$$

Dunque, una corrente a superficie libera si definisce veloce se le forze di inerzia prevalgono sulle forze di gravità e lenta se le forze di gravità risultano essere predominanti. La condizione di passaggio tra i due regimi di moto si ha per un valore di Froude unitario e prende il nome di stato critico. Tale transizione nel caso di passaggio da corrente veloce a corrente lenta, può avvenire solamente se accompagnato da un fenomeno di grande dissipazione energetica, noto come risalto idraulico o salto di Bidone dal nome dell'idraulico italiano che per primo lo ha studiato, per cui si verifica un innalzamento del pelo libero della corrente.

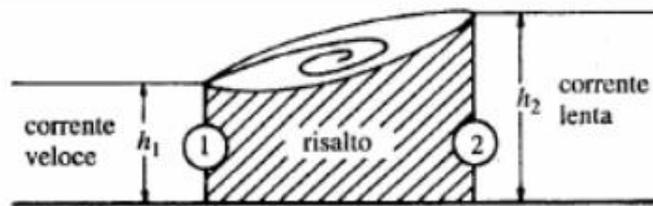


Figura 22: Rappresentazione schematica del risalto idraulico tra due sezioni di una corrente a pelo libero

4.2.2 Equazioni alla base dell'idrodinamica naturale

Il moto dei fluidi nei corsi d'acqua naturali può essere studiato ricorrendo a modelli interpretativi a differente scala investigativa, caratterizzati da differenti gradi di complessità a seconda della fenomenologia fisica che si intende studiare. In certi contesti idrodinamici seguire un approccio rigoroso risulterebbe sconveniente a causa del maggiore peso computazionale associato, dunque si è soliti ricorrere a ipotesi semplificative che consentono di ottenere soluzioni altrettanto valide. A seguire, si riportano i modelli matematici più diffusi (in ordine dal più complesso al più semplificato) con un accenno alle possibili applicazioni nel campo dell'idraulica fluviale. La seguente trattazione farà riferimento alla sola fase liquida della corrente.

4.2.2.1 Modello Shallow Water 3D

I modelli a tre dimensioni vengono utilizzati in tutte quelle situazioni in cui si vuole analizzare nel dettaglio il campo di moto di un fiume meandriforme²⁰ in prossimità della sponda dove si verificano correnti di ricircolazione secondaria di intensità molto più piccola rispetto al flusso principale. La descrizione di tale moto presuppone l'adozione di un set di equazioni che includa le componenti trasversali e verticali della velocità che sono

²⁰ Fonte ISPRA: Alveo a canale singolo (indice di intrecciamento generalmente pari o prossimo a 1), caratterizzato da un andamento sinuoso con la formazione di una successione più o meno regolare di meandri

la principale causa del moto secondario elicoidale che andrà a sovrapporsi al moto principale longitudinale come mostrato nella figura sottostante.

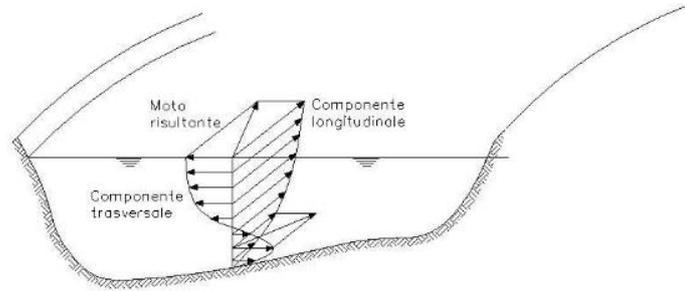


Figura 23: Moto elicoidale secondario in un fiume meandriforme

Le equazioni che rappresentano questo tipo di modello si ottengono da quelle che regolano nel caso più generale la dinamica dei fluidi viscosi e incompressibili, conosciute in Meccanica dei Fluidi come equazioni di *Navier-Stokes*. Tali equazioni in linea teorica dovrebbero consentire di risolvere tutti i problemi del moto dei fluidi reali, tenendo conto della loro viscosità, ma a causa della loro forma complessa risultano di difficile risoluzione. Le stesse sono rappresentate da un sistema alle derivate parziali non lineari in cui il moto della fase fluida è funzione dello spazio e del tempo.

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} = 0 & (7) \\ \nabla \vec{u} = 0 & (8) \end{cases}$$

dove: ρ densità del fluido, ν viscosità cinematica del fluido, \vec{u} vettore delle velocità, \vec{f} termine delle forze di massa e infine p il valor medio del vettore delle pressioni.

La prima equazione del sistema racchiude al suo interno tre equazioni, una per ogni direzione dello spazio tridimensionale (x,y,z) mentre la seconda corrisponde all'equazione di continuità per la fase liquida, in cui compare l'operatore Laplaciano definito nel seguente modo:

$$\nabla^2 \cdot = \frac{\partial^2 \cdot}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \cdot}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \cdot}{\partial z^2} \quad (9)$$

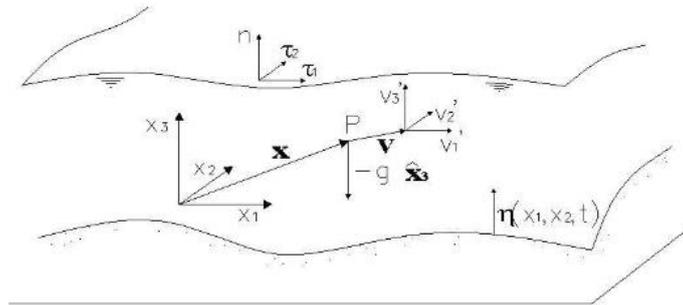


Figura 24: Sistema di riferimento del modello di studio

Il moto dell'acqua nei corpi idrici naturali risulta invariabilmente turbolento, dunque caratterizzato da valori di Reynolds²¹ sufficientemente elevati ($Re \cong 10^7$). In queste circostanze la velocità del fluido assume valori estremamente fluttuanti che in campo ingegneristico possono essere trascurati facendo riferimento ad una descrizione mediata del campo di moto su una finestra temporale superiore rispetto alla scala della turbolenza. Questa operazione di media, conosciuta come "Decomposizione di Reynolds" permette di ridefinire il vettore velocità \vec{u} in funzione del suo valor medio \vec{V} sul periodo della turbolenza e quindi di riscrivere le equazioni di Navier-Stokes giungendo così ad un nuovo sistema di equazioni chiamate equazioni di Reynolds. In esse l'accelerazione della particella fluida viene espressa in funzione di variazioni di pressione, di dissipazioni viscosi, della gravità e infine di sforzi di natura turbolenta.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p + \nu \cdot \nabla^2 \vec{V} - \nabla(g\vec{z}) - \nabla(T) = 0 \\ \nabla \cdot \vec{V} = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

dove: ρ densità del fluido, ν viscosità cinematica del fluido, \vec{u} il vettore delle velocità, \vec{f} termine delle forze di massa, g accelerazione di gravità e p il valor medio del vettore delle pressioni.

²¹ Il numero di Reynolds è un parametro adimensionale definito dal rapporto tra la forza di inerzia e la forza di resistenza viscosa che regola la transizione fra un regime di tipo laminare (bassi valori di Reynolds) e turbolento (valori elevati di Reynolds).

Nel mediare nel tempo l'equazione (7) i termini non lineari dovuti alla turbolenza aggiungono all'equazione un ulteriore termine (12), la divergenza del Tensore degli sforzi di Reynolds, i cui elementi sono funzione delle fluttuazioni del campo di moto. Il problema così definito risulta aperto, dunque di difficile trattazione.

$$T_{ij} = -\rho(\overline{v_i v_j}), \quad (12)$$

In letteratura sono presenti differenti procedimenti di chiusura (procedimenti semi empirici) che permettono di risolvere il problema tra questi quello che risulta più adeguato, in presenza di un moto medio lentamente variabile nello spazio e nel tempo, è la chiusura di Boussinesque, con il quale è possibile esprimere le tensioni di Reynolds utilizzando valori di velocità mediati nel tempo. L'espressione è simile alla legge che descrive il comportamento di un fluido Newtoniano

$$\frac{T_{ij}}{\rho} = -\overline{v_i v_j} = \nu_T \cdot \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (13)$$

In essa la variabile k rappresenta l'energia cinetica turbolenta definita pari alla media delle fluttuazioni di velocità al quadrato, ν_T è la viscosità turbolenta (*Eddy Viscosity*) una proprietà del flusso e non del fluido, mentre δ_{ij} è la funzione delta di Kronecker.

La chiusura tuttavia non risolve completamente il problema, in quanto risulta ancora incognita la viscosità turbolenta ν_T la quale può essere modellata secondo il metodo della lunghezza di mescolamento che prevede l'assunzione di una legge parabolica con valore nullo al fondo e in corrispondenza della superficie libera. In alternativa è possibile utilizzare ulteriori metodi (approccio LES, DSN, *modello k-ε*) che ricorrono ad una risoluzione numerica delle equazioni di Navier Stokes.

Per poter risolvere le equazioni di Reynolds (10) e (11) definite in precedenza occorre imporre delle condizioni al contorno (vincoli) che possono essere di natura cinematica (si assume la velocità e lo spostamento di un punto del modello), o dinamica (si assumono relazioni di forze e tensioni).

- Per il fondo alveo, viene adottata la condizione di NON SLITTAMENTO (*no slip*) che assume la componente tangenziale della velocità nulla nel punto di contatto fluido-parete e in aggiunta a questa la condizione di IMPERMEABILITÀ DELLA

PARETE dove anche la componente della velocità normale al fondo viene assunta nulla.

- Per la superficie libera, viene definita una condizione cinematica imponendo che la velocità della particella liquida sul pelo libero sia uguale a quella di traslazione della superficie libera stessa.

Nell'ambito dell'idraulica fluviale le equazioni fino ad ora considerate vengono ulteriormente semplificate introducendo l'ipotesi *Shallow Water Approximations* (o di acque basse) che consente di agevolare la trattazione matematica del problema e di giungere alle equazioni dei modelli tridimensionali (modelli 3D *Shallow Water*) utilizzati dai codici di calcolo. Tale ipotesi fa sì che il rapporto tra la scala delle profondità e la scala delle lunghezze sia sufficientemente piccola

$$\frac{Y_0}{L} = \delta \ll 1$$

Questa condizione risulta quasi sempre verificata in ambito fluviale, poiché i fiumi sono in genere caratterizzati da una profondità molto più bassa della larghezza. Dunque, applicando l'ipotesi SW alle equazioni di Reynolds (10) e (11), è possibile trascurare i termini di dissipazione viscosa rispetto a quelli dovuti alla turbolenza e riscrivere l'equazione del moto nella sola direzione verticale.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \vec{v} \nabla W + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g \cos \theta \right) + \nabla \cdot (\overline{w \vec{v}}) = 0 \quad (14)$$

$$A + B + C + D = 0 \quad (15)$$

Applicando l'ipotesi WS, ovvero un'analisi degli ordini di grandezza sui termini indicati nell'equazione (15) si può concludere che per valori non elevati di Froude i termini A, B e D possono essere trascurati rispetto al termine gravitativo C, riducendo l'equazione alla seguente espressione:

$$\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g \cos \theta \right) = 0 \quad (16)$$

La relazione (14) rappresenta l'equazione del bilancio della quantità di moto nella direzione verticale, che se integrata rispetto alla verticale consente di ricavare la Legge di Stevino dell'idrostatica che consente di esprimere la pressione in funzione dell'altezza d'acqua Y .

$$p = \gamma \cdot (Y(x, y) - z) \quad (17)$$

Sostituendo tale legge all'equazione di Reynolds (10) riscritta lungo le direzioni x e y è possibile eliminare l'incognita della pressione dal sistema di equazioni ottenendo così le equazioni dei moti su basse profondità del modello 3D Shallow Water.

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\overline{u \vec{v}}) = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\overline{v \vec{v}}) = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla w + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g \cos \theta \right) + \nabla(\overline{w \vec{v}}) = 0 \\ \nabla \vec{V} = 0 \end{cases} \quad \rightarrow \quad p = \rho g (Y(x, y) - z)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\overline{u \vec{v}}) = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\overline{v \vec{v}}) = 0 \\ \nabla \vec{V} = 0 \end{cases} \quad \text{Equazioni Shallow Water 3D} \quad (18)$$

Le equazioni appena ricavate esprimono la conservazione della quantità di moto nelle direzioni x e y e l'equazione di continuità della fase liquida. Le stesse sono equazioni tridimensionali perché nonostante si sia ridotto il numero di equazioni, la componente verticale della velocità W è ancora un'incognita.

4.2.2.2 Modello Shallow Water 2D

I modelli bidimensionali vengono usati maggiormente per la determinazione del profilo di velocità mediata sulla verticale. Un esempio di applicazione è lo studio dei fenomeni erosivi che si verificano tipicamente in prossimità della sponda esterna dei fiumi o delle pile dei ponti. In presenza di fiumi meandriiformi molto larghi è buona regola usare il modello *Shallow Water 2D* completo, che tiene conto della presenza degli sforzi di Reynolds e di quelli dispersivi consentendo la descrizione del moto lungo un sistema di riferimento curvilineo. In altre situazioni, come nello studio delle barre fluviali risulta più utile utilizzare il modello *Shallow Water 2D* semplificato, depurato per semplicità dagli sforzi di Reynolds e dagli sforzi dispersivi.

Le equazioni del modello bidimensionale su basse profondità si ottengono direttamente da quelle (18) del modello *Shallow Water 3D* eseguendo un'operazione di media sulla verticale delle componenti di velocità nelle due direzioni principali: longitudinale (x) e trasversale (y).

$$\hat{U} = \frac{1}{Y} \int_{\eta}^h U(x, y, z, t) dz \quad (19)$$

$$\hat{V} = \frac{1}{Y} \int_{\eta}^h V(x, y, z, t) dz \quad (20)$$

A tale scopo si utilizza la regola di Integrazione di Leibniz che permette di effettuare la derivata di un integrale nel caso in cui gli estremi di integrazione dipendano dalla variabile sulla quale si sta effettuando la derivazione. Integrando l'equazione di continuità (11) sulla verticale e ricordando le condizioni cinematiche sul fondo e sulla superficie libera introdotte in precedenza si giunge all'equazione di continuità *Shallow water 2D* contenente solo variabili mediate lungo la verticale.

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Y\hat{U}) + \frac{\partial}{\partial y}(Y\hat{V}) = 0 \quad (21)$$

Ripetendo gli stessi ragionamenti anche per le equazioni di bilancio della quantità di moto (relative una alla direzione trasversale e l'altra alla direzione longitudinale) si ottengono

dei termini in cui agli sforzi di Reynolds (dovuti alle fluttuazioni del campo di velocità) presenti nel modello tridimensionale, si aggiungono sforzi di natura viscosa (rilevanti solo in prossimità delle pareti) e di natura dispersiva (ottenute da operazioni di media spaziale e non temporale). Sviluppando le derivate dei termini dispersivi e introducendo l'equazione di continuità (21) è possibile giungere con ulteriori manipolazioni al sistema di equazioni del modello Shallow water 2D:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + \tilde{V} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial y} = -g \frac{\partial Y}{\partial x} + \frac{\tau_x^s + \tau_x^F}{Y\rho} + \frac{1}{Y\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (Y\widehat{T_{xx}}) + \frac{\partial}{\partial y} (\widehat{T_{xy}}) \right] \\ \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial x} + \tilde{V} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y} = -g \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\tau_y^s + \tau_y^F}{Y\rho} + \frac{1}{Y\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\widehat{T_{xy}}) + \frac{\partial}{\partial y} (\widehat{T_{yy}}) \right] \\ \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Y\tilde{U}) + \frac{\partial}{\partial y} (Y\tilde{V}) = 0 \end{cases} \begin{array}{l} \text{Equazioni} \\ \text{Shallow} \\ \text{Water 2D} \\ \text{complete} \end{array} \quad (22)$$

Le equazioni appena ricavate per poter essere utilizzate richiedono una chiusura sulle tensioni. In particolare le tensioni sulla superficie libera τ_x^s e τ_y^s possono essere trascurate, mettendosi in condizioni di assenza di vento. Al contrario non potendo trascurare l'attrito con il fondo le tensioni τ_x^F e τ_y^F vanno valutate ricorrendo a formulazioni empiriche. Tra queste, un esempio è la generalizzazione della legge di Chèzy ad un campo di moto bidimensionale, per cui:

$$\begin{cases} \tau_x^F = -\rho r \tilde{U} \sqrt{\tilde{U}^2 + \tilde{V}^2} \\ \tau_y^F = -\rho r \tilde{V} \sqrt{\tilde{U}^2 + \tilde{V}^2} \end{cases} \quad (23)$$

Dove: il termine r è un coefficiente di attrito strettamente legato al coefficiente di Chezy relativo al caso monodimensionale.

In questo modo le equazioni del modello bidimensionale delle acque basse possono essere applicate per lo studio dei fiumi meandriformi, in applicazioni ove i fenomeni di circolazione secondaria richiedono la presenza di sforzi di natura dispersiva. Tuttavia non sempre lo studio del campo di moto richiede la trattazione delle circolazioni secondarie, come accade ad esempio in presenza di barre fluviali. In queste situazioni le equazioni

Shallow Water 2D “complete”, possono essere ulteriormente semplificate e ridotte alla seguente forma

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \nabla V = -g \nabla Y - \frac{r}{Y} \vec{V} |\vec{V}| \\ \frac{\partial Y}{\partial t} + \nabla(\vec{V} Y) = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Equazioni Shallow Water 2D} \\ \text{semplificate} \end{array} \quad (24)$$

4.2.2.3 Modello Shallow Water 1D

La trattazione monodimensionale si rende necessaria quando si vogliono avere delle equazioni più agevoli da trattare. In campo fluviale, le equazioni del modello 1D consentono la descrizione dei profili di rigurgito o lo studio della propagazione delle onde di piena nei corsi d’acqua. Per ottenere le equazioni del modello monodimensionale, come fatto per il modello bidimensionale, si introduce l’ipotesi di Shallow Water (o di acque basse) e in aggiunta a questa un’ulteriore condizione secondo cui il rapporto ε tra la scala delle grandezze trasversali sia sufficientemente piccola rispetto a quella longitudinale.

$$\frac{Y_0}{L} = \delta \ll 1 \quad (\text{Ipotesi Shallow Water}), \quad \frac{b}{L} = \varepsilon \ll 1 \quad (25)$$

Sotto queste ipotesi risulta lecito trascurare la seconda equazione del moto, la variazione del tirante Y e la velocità \vec{V} lungo la direzione trasversale (direzione y). Infine, eseguendo un’operazione di media delle equazioni prima lungo la verticale e poi in direzione trasversale è possibile ottenere le equazioni del modello *Shallow Water 1D* note anche come equazioni di *De Sant Venant*.

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{\Omega} \right) + g \Omega \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{B}{\rho} \bar{\tau}^F = 0 \\ \frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Equazioni Shallow Water} \\ \text{1D} \\ \text{o di De Sant Venant} \end{array} \quad (26)$$

Avendo indicato con B il contorno bagnato della sezione, con Ω l’area della sezione, con $\bar{\tau}^F$ la tensione media al fondo, con Q la portata e con β un coefficiente di ragguglio che fornisce informazioni circa la forma del profilo di velocità della sezione trasversale al

deflusso. Se il valore assunto da beta è unitario il profilo di velocità sarà uniforme (forma tendente al rettangolo).

$$\beta = \frac{1}{\bar{U}^2 \Omega} \int_{\Omega} \bar{U}^2 d\Omega \quad \text{con} \quad \bar{U} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} U d\Omega \quad (\text{velocità media}) \quad (27)$$

4.3 Metodi di dettaglio per la definizione delle mappe di pericolosità

La modellazione idraulica per la delimitazione delle mappe di pericolosità del Torrente Chisola, è stata condotta utilizzando il software GeoHecRas2D sviluppato dall'azienda americana CivilGeo.

4.3.1 Il codice di calcolo GeoHecRas

GeoHECRAS è un wrapper²² di dati basato sul software Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) del Corpo degli ingegneri dell'esercito americano, in grado di integrare in un'unica interfaccia 2D/3D le funzionalità di modellazione fluviale, presenti nel software HecRas e le funzioni derivanti dalla tecnologia CAD e GIS. Le modalità di modellazione e le principali funzionalità che il software è in grado di fornire sono:

- Modellazione bidimensionale delle pianure alluvionali in ambiente 2D;
- Modellazione idraulica monodimensionale della corrente in alveo per diversi regimi di moto (moto vario e moto permanente);
- Modellazione combinata in moto vario con modello 1D in alveo e aree di deflusso 2D in zone esterne all'alveo;
- Analisi dettagliate su strutture di dam breach;
- Visualizzazione statica e animata di scenari di esondazione;
- Correzione automatica degli errori durante la generazione delle celle nella mesh 2D;

²² Nel linguaggio informatico il wrapper è un programma o uno script che 'prepara il terreno' per un programma importante che viene eseguito successivamente.

- Differenti tipologie di mesh di calcolo 2D: rettangolari, esagonali o adattive;
- Strumenti GIS per la gestione dei modelli digitali del terreno e dei dati vettoriali;
- Inserimento di ostruzioni (pile di ponti, edifici, traverse fluviali, soglie) in aree di flusso 2D;
- Assegnazione automatica dei dati geometrici caratteristici dell'alveo mediante dati vettoriali.

Le tipologie di modellazione idraulica offerte dal software si adattano a differenti scenari di studio. Nel campo dell'idraulica fluviale i principali utilizzi riguardano le analisi delle dinamiche di propagazione del deflusso negli alvei naturali ed artificiali, la simulazione di eventi di piena in estese piane alluvionali, l'analisi dei fenomeni di deflusso localizzati in prossimità dei ponti e molto altro ancora. La scelta dello schema geometrico da usare può essere monodimensionale, bidimensionale, quasi bidimensionale o combinato e dipende principalmente dal livello di approfondimento e dal genere di fenomenologia che si intende rappresentare.

Solitamente l'approccio più usato per simulare il flusso nei canali fluviali è la modellazione idraulica 1D che consente di descrivere in modo dettagliato e preciso tutti i processi idrodinamici che avvengono lungo il canale principale anche in presenza di opere idrauliche e in condizioni di trasporto solido. Tuttavia, sono presenti degli svantaggi tra cui l'incapacità di simulare la diffusione laterale dell'onda di alluvione (Hunter et al., 2007). Più completo risulta lo schema bidimensionale mediante il quale è possibile simulare dettagliatamente il deflusso (tiranti, velocità, direzione della corrente) in ogni punto del dominio di calcolo bidimensionale, a patto di impiegare un modello digitale del terreno che abbia una risoluzione quanto più elevata possibile dell'area interessata. Una rappresentazione intermedia tra le due è lo schema quasi-bidimensionale che consente di simulare in modo approssimato il deflusso anche nella direzione trasversale del canale principale, mediante l'inserimento di canali di collegamento ramificati (a maglia aperta o chiusa) connessi idraulicamente con il reticolo principale e tra loro. Infine è possibile adottare la modellazione combinata 1D-2D in grado di offrire il più elevato grado di dettaglio nell'analisi dei processi idrodinamici sia del sistema fluviale che della pianura alluvionale. Sebbene l'adozione di uno schema integrato sia più onerosa, in termini di tempistiche riguardanti la creazione del modello, rispetto ad uno schema bidimensionale,

tale approccio consente un'analisi accurata dell'ambiente fluviale anche in presenza di fenomenologie e condizioni di deflusso estese e complesse. I vantaggi di questa schematizzazione modellistica sono davvero notevoli.

4.3.2 La modellazione idraulica combinata 1D-2D

Nel lavoro di tesi l'approccio metodologico scelto e finalizzato all'aggiornamento delle mappe di pericolosità del Torrente Chisola, si è avvalso di un modello idrodinamico combinato 1D-2D in regime di moto vario nelle condizioni di fondo fisso²³.

Questo tipo di modellazione, ampiamente descritta in numerosi contributi scientifici con applicazioni in tutto il mondo, utilizza lo schema monodimensionale per il calcolo dei profili idrici nel canale principale (river-channel) e lo schema bidimensionale per la rappresentazione dettagliata della pianura alluvionale (floodplain). La presenza di entrambi gli schemi, ha un duplice vantaggio:

- *Il modello 1D* permette di ricavare le proprietà idrauliche del flusso idrico in ogni sezione trasversale dell'asta principale, di valutare nel dettaglio gli effetti indotti sulla corrente da parte di ostacoli e infrastrutture presenti in alveo (ad esempio, ponti, traverse, restringimenti...), di simulare il funzionamento di organi di regolazione (saracinesche) e di considerare il contributo dell'idrografia secondaria.;
- *Il modello 2D consente di simulare in modo fedele* la propagazione dei deflussi nella piana alluvionale anche in presenza di ostruzioni (edifici, argini, rilevati stradali...) e di rappresentare le aree allagabili mediante mappe di tiranti idrici e velocità.

Altro vantaggio della modellazione combinata 1D / 2D è l'algoritmo di soluzione delle equazioni del moto che permette per ciascun passo temporale, in regime di moto vario, di calcolare le grandezze idrauliche tra gli elementi di flusso 1D e 2D. L'interazione dinamica tra i due modelli viene garantita dalla presenza di una opportuna struttura

²³ Nell'ambito della modellazione idraulica per fondo fisso si intende l'assenza dei fenomeni di trasporto solido che caratterizzano la fase solida di una corrente.

laterale (Lateral Structure) che favorisce il trasferimento della corrente dal fiume alla piana alluvionale.

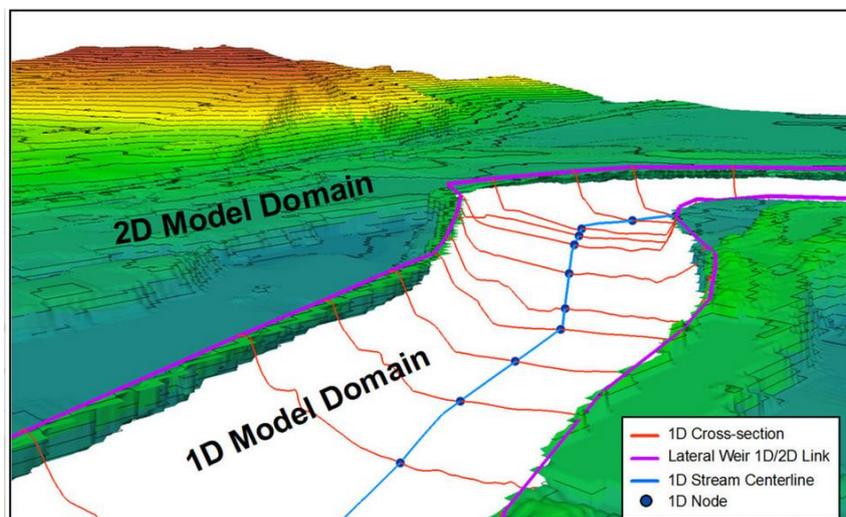


Figura 25: Schema rappresentativo di una modellazione combinata 1D-2D

4.3.2.1 Cenni sulla modellazione monodimensionale

Nel modello 1D la corrente può muoversi solo lungo una direzione prevalente (quella longitudinale) e l'asta fluviale viene rappresentata attraverso la successione di sezioni poste trasversalmente rispetto alla direzione del moto. In questo schema il profilo idrico e le grandezze idrauliche, vengono mediate nella direzione verticale assumendo un unico valore per ogni sezione. Il software infatti suddivide le sezioni di calcolo in tre aree differenti, una centrale (*main channel*) e due laterali poste rispettivamente a destra (*right overbanks*) e a sinistra (*left-overbanks*) del *channel* e per ciascuna di esse ricava la porzione di flusso che servirà ad effettuare una media pesata sulle singole grandezze idrauliche. Il modello monodimensionale, può essere applicato in due differenti scenari di studio: in regime di moto stazionario (*Steady Flow*) o in regime di moto Vario (*Unsteady Flow*) le cui caratteristiche sono state già state discusse nei paragrafi precedenti. In questa trattazione ci si soffermerà solo sul regime di moto vario in assenza di trasporto solido.

✚ Equazioni del deflusso idrico

In condizioni di moto vario (*UnSteady flow*) il software nel ricavare il profilo di corrente, si avvale della risoluzione delle leggi fisiche che governano il moto delle correnti a pelo libero nei canali, note in letteratura come equazioni di De Sant Venant. Esse esprimono il principio di conservazione della massa (equazione di continuità) e il principio di conservazione della quantità di moto (equazione di equilibrio dinamico) della fase liquida della corrente e vengono ricavate assumendo le seguenti ipotesi:

- Distribuzione delle pressioni di tipo idrostatica;
- Pendenza bassa del fondo alveo (in questa condizione è possibile considerare la sezione trasversale normale alla corrente);
- Alveo prismatico;
- Perdite di carico distribuite calcolate mediante le formule valide per il moto permanente (equazione di Chezy-Manning);
- Velocità e accelerazioni trascurabili lungo la verticale rispetto alle stesse lungo la direzione del moto;
- variazioni sulla densità del fluido trascurabili.

Le equazioni del moto sono:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + g A \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_h \right) = 0 \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_L = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Equazioni di} \\ \text{De Sant Venant} \end{array} \quad (28)$$

dove:

Q è la portata, definibile come prodotto tra la velocità U e l'area A della sezione

A è l'area della sezione liquida;

q_L è la portata laterale (assunta positiva se entrante)

h è il tirante idrico

g è l'accelerazione di gravità

U è la velocità della corrente mediata lungo la verticale

S_f sono le perdite di carico distribuite per unità di lunghezza

S_f sono le perdite di carico concentrate

Tali equazioni, nel campo dell'idraulica fluviale, sono fondamentalmente le equazioni Shallow Water 1D con qualche differenza nella forma per via della metodologia di calcolo adottata dal software. Accoppiando alle equazioni della fase liquida (28) le equazioni caratteristiche della fase solida, si ottengono le Equazioni di De Sant Venant- Exner che consentono di studiare i processi idrodinamici delle correnti solide-liquide in moto vario su fondo mobile. Le suddette equazioni non saranno oggetto di questo studio.

Poiché le equazioni di De Sant Venant non presentano una soluzione analitica, il software ricorre all'uso di uno schema implicito²⁴ alle differenze finite per ottenere i valori di tirante e portata in ogni sezione di calcolo ad ogni passo temporale. La procedura adottata consiste nell'ipotizzare un valore iniziale di tirante e di confrontarlo con il valore calcolato dalla risoluzione delle equazioni, successivamente viene controllata che la differenza tra il valore di primo tentativo e quello calcolato rispetti la tolleranza numerica. In caso affermativo il software ha trovato la soluzione per quel passo temporale e può passare al time step successivo, in caso negativo procede iterativamente facendo una nuova stima delle derivate e risolvendo nuovamente le equazioni. Il numero massimo di iterazioni che può eseguire il software è 40, mentre la massima tolleranza accettata è di 1 metro.

Perdite di carico distribuite e concentrate

In regime di moto vario, in presenza di una brusca variazione della forma della sezione o per la presenza di ostacoli al deflusso, il codice di calcolo non sempre riesce a risolvere l'equazione della conservazione della quantità di moto. In questi casi ricorre alla valutazione delle perdite energetiche provocate dai fenomeni di contrazione ed espansione dei filetti fluidi, mediante l'introduzione nelle equazioni di opportuni coefficienti. Il valore

²⁴La risoluzione del sistema di equazioni non lineare è ottenuta attraverso il metodo di linearizzazione proposto da Preissmann-Cunge-Chen che prevede l'uso di uno schema di calcolo implicito a 4 punti.

da attribuire ai coefficienti di espansione e di contrazione dipende dal tipo di regime (veloce o lento) assunto dalla corrente e può essere definito utilizzando le tabelle fornite dal software.

	CORRENTE VELOCE		CORRENTE LENTA	
	Coeff. di Contrazione	Coeff. di Espansione	Coeff. di Contrazione	Coeff. di Espansione
Nessuna transizione (no cambio di geometria tra sezioni consecutive)	0,0	0,0	0,0	0,0
Transizione graduale di geometria tra sezioni consecutive	0,01	0,03	0,1	0,3
Transizione localizzata in presenza di un ponte o altra struttura idraulica	0,03	0,05	0,3	0,5
Transizione brusca	0,05	0,2	0,6	0,8

Tabella 6: Valori dei coefficienti di contrazione e di espansione per correnti veloci e lente

Le perdite di carico concentrate sono invece dovute alla contrazione e all'espansione della vena liquida a monte e a valle di ostacoli alla corrente (ad esempio pile di ponti, briglie e traverse) e alle perdite localizzate in corrispondenza della struttura. In presenza dei ponti tali perdite possono essere valutate utilizzando il metodo *Energy* quando il livello idrico è inferiore alla quota di intradosso del ponte (low chord) e il metodo *Pressure and Weir flow*, quest'ultimo nella forma *Pressure*, quando il livello idrico supera la quota dell'intradosso (deflusso attraverso una luce a battente) o nella forma *Weir* quando il livello idrico supera la quota dell'impalcato del ponte (hight cord).

✚ Modellazione delle strutture laterali e trasversali

Nella modellazione monodimensionale è possibile inserire strutture longitudinali (*Lateral Structure*) e trasversali (*Inline Structure*) rispetto alla direzione del deflusso, che consentono di modellare la presenza di stramazzi e sbarramenti. Inoltre il software dà la possibilità di inserire all'interno delle strutture delle aperture (*gate*) che possono essere regolate da differenti tipi di saracinesche: paratoie piane (*Sluice*), paratoie a settore (*Radial*), paratoie con o senza copertura. Il trasferimento del flusso idrico dal canale principale (*main channel*) verso delle celle di accumulo o aree di deflusso bidimensionale

è descritto mediante equazioni tipiche delle leggi di efflusso. Si riporta a seguire uno schema di rappresentazione schematica di entrambe le strutture.

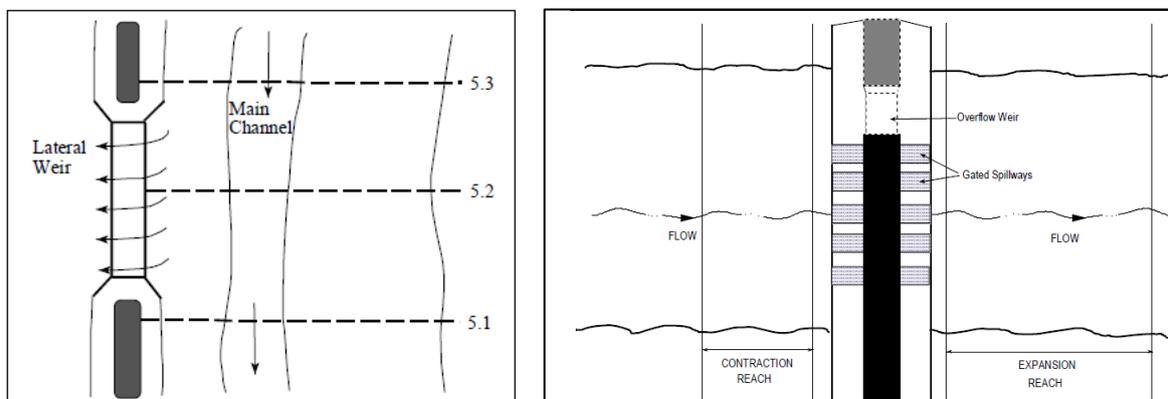


Figura 26: Immagine schematica di uno sfioratore laterale (a destra) e di una traversa fluviale (a sinistra) tratta dal manuale di HecRas

Le leggi di efflusso utilizzate, discendono direttamente dalle equazioni delle luci a stramazzo delle correnti a pelo libero, con la differenza che rispetto a queste possono essere usate anche quando il profilo del livello idrico sfiorante non è parallelo al fondo della soglia sfiorante. Dunque nel caso più generale, prese due sezioni x_1 e x_2 di uno sfioratore laterale, la legge di efflusso è la seguente:

$$Q_{x_1-x_2} = \frac{2C_{weir}}{5a_1} \left((a_1 x_2 + C_1)^{5/2} - (a_1 x_1 + C_1)^{5/2} \right) \quad (29)$$

Dove: C_{weir} rappresenta il coefficiente di efflusso, C_1 una costante e a_1 un parametro che consente di tener conto della diversa angolazione del profilo idrico rispetto alla pendenza della soglia sfiorante. Nel caso in cui il profilo della corrente risulti parallelo al profilo della soglia, il parametro a_1 diventa nullo e l'equazione (29) si riduce a quella tipica delle luci a stramazzo.

$$Q = C_{weir} L H^{3/2} \quad (30)$$

Dove: L è la larghezza della soglia ed H il carico idraulico del pelo libero rispetto alla soglia.

Per il calcolo della portata è richiesta dunque la definizione del coefficiente di efflusso C_{weir} , il cui valore dipende dal tipo di struttura che si intende simulare e dalla forma della soglia sfiorante. In letteratura sono presenti molti studi e tabelle dai quali è possibile ottenere una stima del suddetto coefficiente anche se a rigore il coefficiente andrebbe calibrato al fine di ottenere i migliori risultati. Nella scelta dei valori da assumere, il manuale del software consiglia di usare per le strutture laterali un coefficiente di efflusso inferiore rispetto alle strutture trasversali per tener conto delle perdite di energia indotte dal cambio di direzione della corrente in prossimità della struttura. A seguire vengono riportati i valori del coefficiente di efflusso consigliati dal software in caso di Struttura Laterale (v. tabella 6) e in caso di Struttura trasversale (v. figure 27 e 28), attraverso i quali è possibile definire il coefficiente di efflusso da usare nell'equazione (29) per ricavare la portata sfiorante. In presenza di una struttura trasversale il valore assunto dal coefficiente dipende dalla tipologia di stramazzo, che può essere in parete sottile (*Sharp Crested*) o in parete grossa (*Broad-Crested*) e dalla forma della soglia sfiorante (*Weir*).

What is being modeled with the Lateral Structure	Description	Range of Weir Coefficients
Levee/Roadway – 3ft or higher above natural ground	Broad crested weir shape, flow over levee/road acts like weir flow	1.5 to 2.6 (2.0 default) SI Units: 0.83 to 1.43
Levee/Roadway – 1 to 3 ft elevated above ground	Broad crested weir shape, flow over levee/road acts like weir flow, but becomes submerged easily.	1.0 to 2.0 SI Units: 0.55 to 1.1
Natural high ground barrier – 1 to 3 ft high	Does not really act like a weir, but water must flow over high ground to get into 2D flow area.	0.5 to 1.0 SI Units: 0.28 to 0.55
Non elevated overbank terrain. Lat Structure not elevated above ground	Overland flow escaping the main river.	0.2 to 0.5 SI Units: 0.11 to 0.28

Tabella 6: Tabella con valori del coefficiente di efflusso – Strutture laterali (Fonte: manuale HecRas)

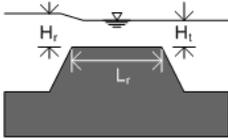
Weir Type	Equation	Coefficients
Broad (Side View)		
	$Q = CL_r H_r^{3/2}$	US Units: C = 2.63 - 3.40 Metric (SI) Units: C = 1.45 - 1.88

Figura 27: Valori del coefficiente di efflusso- Strutture trasversali con sfioratore in parete grossa (fonte: Streeter, V. L. and Wylie, E. B., Fluid Mechanics, Second Edition, McGraw-Hill, New York)

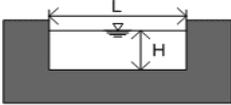
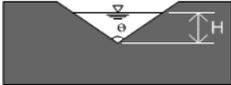
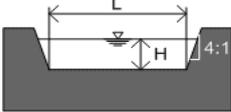
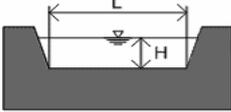
Weir Type	Equation	Coefficients
Rectangular (Cross Section View)		
	Contracted: $Q = C(L - 0.1iH)H^{3/2}$ Suppressed: $Q = CLH^{3/2}$	US Units: C = 3.33 Metric (SI) Units: C = 1.840 i = Number of Contractions
V-Notch (Triangular)		
	$Q = C \tan \frac{\theta}{2} H^{5/2}$	US Units: C = 2.40 - 2.80 Metric (SI) Units: C = 1.35 - 1.55
Cipoletti		
	$Q = CLH^{3/2}$	US Units: C = 3.367 Metric Units: C = 1.840
Trapezoidal		
	$Q = C_w LH^{3/2} + C_{ws} \tan \frac{\theta}{2} H^{5/2}$	US Units: C _w = 3.33 C _{ws} = 1.84 Metric (SI) Units: C _w = 2.40 - 2.80 C _{ws} = 1.35 - 1.55

Figura 28: Valori del coefficiente di efflusso – Strutture trasversali con sfioratore in parete sottile (fonte: Gupta, R. S., Hydrology and Hydraulic Systems, Second Edition, Waveland Press, Long Grove, Illinois).

✚ Modellazione degli attraversamenti

Oltre all'inserimento delle strutture trasversali (briglie, soglie e traverse fluviali) e laterali (sfioratori) lo schema monodimensionale consente anche la modellazione di attraversamenti, quali ponti e tombini. L'inserimento di queste strutture nel modello

avviene definendo quattro sezioni trasversali, collocate a opportune distanze dall'attraversamento, come mostrato nelle figure 29 e 30

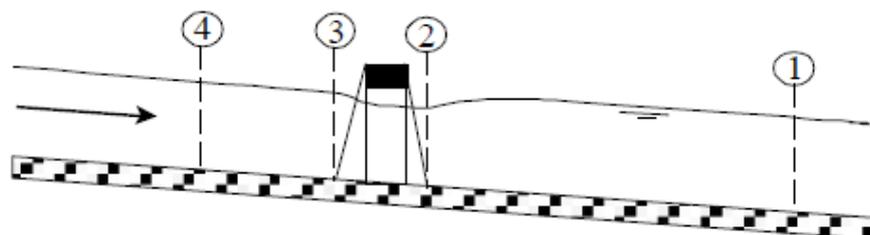


Figura 29: Profilo longitudinale della corrente in presenza di un attraversamento stradale (ponte)

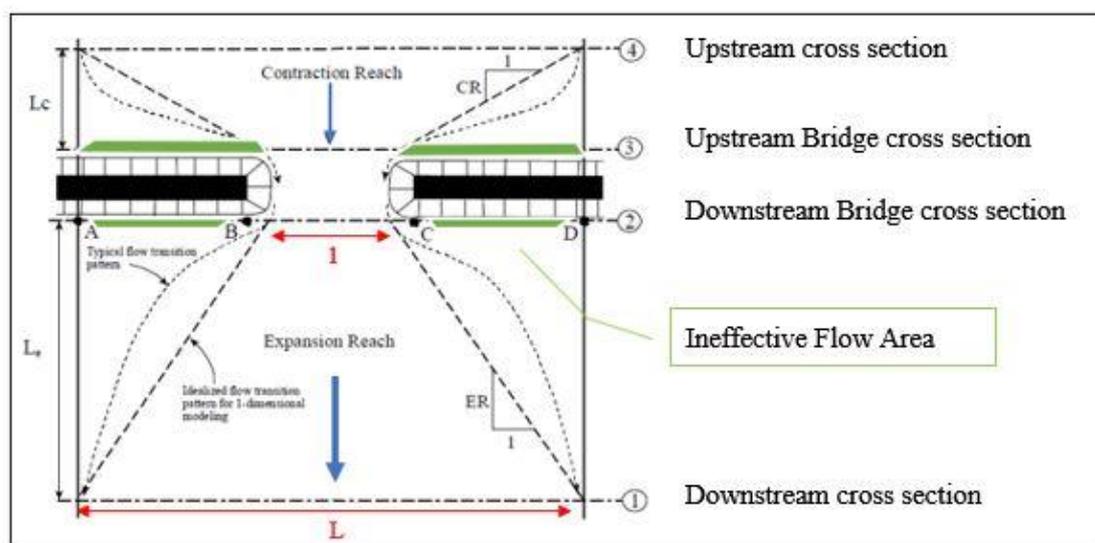


Figura 30: Schema di riferimento per l'inserimento delle sezioni di un ponte in HecRas.

Con riferimento alla figura precedente la distanza tra le sezioni poste più a valle (L_e) è definita come prodotto tra la lunghezza media di ostruzione (media geometrica tra AB e CD) ed il rapporto di espansione (L_e), quest'ultimo può essere ricavato in funzione del rapporto di restringimento ($1/L$), del rapporto tra la scabrezza delle golene (K_g) e quella dell'alveo attivo (K_a) e infine della pendenza (s) del tratto considerato. La distanza tra le due sezioni di monte (L_c) invece è assunta pari alla media geometrica tra AB e CD.

		Kg / Ka = 1	Kg / Ka = 2	Kg / Ka = 3
l/L = 0.10	0.0002 m/m	1.4 – 3.6	1.3 – 3.0	1.2 – 2.1
	S = 0.0009 m/m	1.0 – 2.5	0.8 – 2.0	0.8 – 2.0
	0.0019 m/m	1.0 – 2.2	0.8 – 2.0	0.8 – 2.0
l/L = 0.25	0.0002 m/m	1.6 – 3.0	1.4 – 2.5	1.2 – 2.0
	S = 0.0009 m/m	1.5 – 2.5	1.3 – 2.0	1.3 – 2.0
	0.0019 m/m	1.5 – 2.0	1.3 – 2.0	1.3 – 2.0
l/L = 0.50	0.0002 m/m	1.4 – 2.6	1.3 – 1.9	1.2 – 1.4
	S = 0.0009 m/m	1.3 – 2.1	1.2 – 1.6	1.0 – 1.4
	0.0019 m/m	1.3 – 2.0	1.2 – 1.5	1.0 – 1.4

Tabella 7: Rapporto di espansione, (Corso HecRas, RUWA,2016l)

In questo modo, il software è in grado di tener conto dei fenomeni di contrazione ed espansione della vena liquida che avvengono a monte e a valle del restringimento di sezione e della presenza di vortici che riducono l'energia della corrente, rallentandone il deflusso.

Per una modellazione idraulica più accurata il software consente l'inserimento di aree di inattività del deflusso (*Ineffective flow areas*), l'inserimento delle pile del ponte e la possibilità di utilizzare tre differenti metodologie di calcolo: deflusso libero (*Low-flow*), deflusso in pressione (*High-flow*) e una combinazione del deflusso in pressione e del deflusso libero. La condizione per cui si ha il deflusso libero si verifica quando il flusso idrico attraversa il ponte con un livello del pelo libero inferiore alla massima quota di intradosso del ponte stesso. In queste condizioni i metodi di calcolo utilizzati dal software sono l'equazione dei momenti (*Momentum Balance*), la formula di Yarnell e l'equazione dell'energia (*Standard step metod*). Nel caso in cui si sceglie di utilizzare il metodo di Yarnell e l'equazione dei momenti è richiesto l'inserimento di un coefficiente che dipende dalla forma della pila (tabella 8 e 9). La condizione di deflusso in pressione, si verifica solo quando la corrente entra in contatto con l'intradosso del ponte. In questa situazione i metodi di calcolo previsti sono il metodo dell'energia e l'equazione delle luci in pressione e a stramazzo. Ulteriori informazioni a riguardo sono contenute all'interno del manuale del software HecRas.

Pier Shape	Yarnell K Coefficient
Semi-circular nose and tail	0.90
Twin-cylinder piers with connecting diaphragm	0.95
Twin-cylinder piers without diaphragm	1.05
90 degree triangular nose and tail	1.05
Square nose and tail	1.25
Ten pile trestle bent	2.50

Tabella 8: Coefficienti di forma delle pile dei ponti da utilizzare nella formula di Yarnell
(Fonte: manuale HecRas)

Pier Shape	Drag Coefficient C_D
Circular pier	1.20
Elongated piers with semi-circular ends	1.33
Elliptical piers with 2:1 length to width	0.60
Elliptical piers with 4:1 length to width	0.32
Elliptical piers with 8:1 length to width	0.29
Square nose piers	2.00
Triangular nose with 30 degree angle	1.00
Triangular nose with 60 degree angle	1.39
Triangular nose with 90 degree angle	1.60
Triangular nose with 120 degree angle	1.72

Tabella 9: Coefficienti di forma delle pile dei ponti da utilizzare nell'equazione dei momenti
(Fonte: manuale HecRas)

✚ Modellazioni di confluenze

In presenza di confluenze da parte di affluenti secondari o di altri corsi d'acqua, è importante inserire nel modello dei punti di giunzione (*Junction*) attraverso i quali il programma riesce a determinare la ripartizione della portata nei vari tronchi. Di default, il programma per simulare la giunzione, utilizza il metodo dell'energia basato sull'equazione di Bernoulli che tiene conto dell'equazione di continuità delle portate. Quando però si ritiene che l'inclinazione dei tronchi fluviali convergenti nella giunzione possa influenzare il deflusso della corrente, il software dà l'opportunità di utilizzare il metodo dei momenti, in cui è possibile definire l'angolo di inclinazione dei tronchi fluviali.

Interpretazione dei risultati

A seguito del completamento della simulazione, il software consente di visualizzare i risultati sia in forma grafica che tabellare. Infatti per ogni step temporale, il codice di calcolo determina un set di proprietà idrauliche (tiranti idrici, velocità, portata, raggio idraulico, area bagnata, profilo idrico, e altre ancora) in corrispondenza di ciascuna sezione (*cross section*) e in prossimità delle strutture trasversali e laterali. Inoltre consente di visualizzare la variazione delle grandezze in funzione del tempo, ovvero per ogni step computazionale.

4.3.2.2 Cenni sulla modellazione bidimensionale

A differenza di quanto accadeva nella modellazione monodimensionale, in cui il deflusso poteva muoversi solo lungo una direzione preferenziale (quella longitudinale), nel bidimensionale il flusso idrico può liberamente muoversi sia in direzione longitudinale che trasversale. I modelli bidimensionali utilizzano l'informazione altimetrica contenuta nei modelli digitali del terreno per definire in tutto il dominio di calcolo grandezze come il livello idrico, la velocità e la direzione della corrente. Con questa modellazione si possano ottenere informazioni molto dettagliate sull'estensione delle aree allagabili, sui fenomeni di propagazione delle onde di piena nei corsi d'acqua naturali e sulla rappresentazione del deflusso in zone urbane. Tuttavia nell'ultima versione del software HecRas (5.07) sono ancora presenti dei limiti sulla modellazione come ad esempio l'impossibilità di inserire strutture trasversali come traverse, soglie, ponti e tombini lungo il canale principale. In questi casi un buon compromesso è lo schema combinato 1D-2D che consente di sfruttare le potenzialità di entrambi i modelli senza avere limitazioni sulla modellazione delle strutture idrauliche. È bene precisare che il grado di dettaglio dei risultati ottenuti con questo tipo di modellazione oltre che dai parametri di calcolo dipende essenzialmente dalla risoluzione del dato di ingresso, il DTM. Dunque l'uso di modelli digitali di elevazione con alto grado di dettaglio è un grande vantaggio sebbene ciò comporti un notevole incremento dei tempi computazionali.

Equazioni del deflusso idrico

La modellistica bidimensionale prevede la risoluzione numerica delle equazioni differenziali 2D di De Sant Venant note anche come equazioni Shallow Water 2D, già trattate nei paragrafi precedenti e di seguito riportate a meno di qualche variazione nella forma, dovuta principalmente alla metodologia di calcolo utilizzata dal software. È utile ricordare che tali equazioni sono state ricavate dalle equazioni tridimensionali di Navier Stokes assumendo le ipotesi di:

- fluido incomprimibile;
- scala delle profondità \ll scala delle lunghezze (*Ipotesi Shallow Water*);
- componente verticale della velocità trascurabile;
- distribuzione della pressione idrostatica lungo la verticale.

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Y\tilde{U}) + \frac{\partial}{\partial y}(Y\tilde{V}) = Q_{in} - Q_{out} \\ \frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} + \tilde{V} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial y} = -g \frac{\partial Y}{\partial x} + v_t \left[\frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial y^2} \right] - c_f \tilde{U} + f \tilde{V} \\ \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial x} + \tilde{V} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y} = -g \frac{\partial Y}{\partial y} + v_t \left[\frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial y^2} \right] - c_f \tilde{V} + f \tilde{U} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Equazioni 2D di} \\ \text{De Sant Venant} \end{array} \quad (31)$$

dove:

\tilde{U} e \tilde{V} sono le componenti di velocità mediate sulla verticale rispettivamente nelle due direzioni principali longitudinale (x) e trasversale (y)

g è il termine legato all'accelerazione di gravità

Y è la quota piezometrica (*water surface elevation*)

v_t rappresenta il coefficiente di viscosità turbolenta in direzione orizzontale (*Horizontal Eddy Viscosity*)

c_f è il coefficiente di attrito sul fondo (*bottom friction coefficient*)

f è il parametro di Coriolis (*Coriolis parameter*)

Q_{in} e Q_{out} rappresentano le eventuali portate localizzate in ingresso e in uscita

La prima delle tre equazioni differenziali è l'equazione di continuità mentre le restanti due sono le equazioni che esprimono la conservazione del moto. Nello specifico in quest'ultima troviamo:

$$\underbrace{\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial y}}_{\substack{\text{Accelerazione locale} \\ \text{e convettiva}}} = \underbrace{-g \frac{\partial Y}{\partial y}}_{\substack{\text{Gradiente} \\ \text{della} \\ \text{pressione} \\ \text{idrostatica}}} + \underbrace{v_t \left[\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial y^2} \right]}_{\substack{\text{Termini legati} \\ \text{alla viscosità} \\ \text{turbolenta}}} \underbrace{- c_f \tilde{v}}_{\substack{\text{Resistenza} \\ \text{del fondo} \\ \text{alveo}}} + \underbrace{f \tilde{u}}_{\substack{\text{Parametro} \\ \text{di Coriolis}}}$$

In aggiunta alle equazioni 2D di De Sant Venant il software per ridurre la complessità della trattazione consente di adottare un altro set di equazioni ricavate andando a trascurare i termini dovuti all'accelerazione locale e convettiva, quelli legati alla viscosità e il parametro di Coriolis. Il risultato di queste semplificazioni sono le equazioni di Diffusione dell'onda (o Diffusive Wave) in cui compaiono solo i termini gravitativi e di tensione al fondo.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Y\tilde{u}) + \frac{\partial}{\partial Y}(Y\tilde{v}) = Q_{in} - Q_{out} \\ c_f \tilde{u} = g \frac{\partial Y}{\partial x} \\ c_f \tilde{v} = g \frac{\partial Y}{\partial y} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Equazioni dell'onda diffusiva} \\ (diffusive wave) \end{array} \quad (32)$$

La scelta del tipo di set di equazioni da usare nella modellazione bidimensionale dipende dallo scenario che si intende studiare. Usare le *Diffusive Wave equations* consente di ridurre i tempi computazionali di modellazione aumentando la stabilità di calcolo del modello, rispetto alle equazioni complete di De Sant Venant (*Full momentum*) che richiedono tempi di gran lunga superiori.

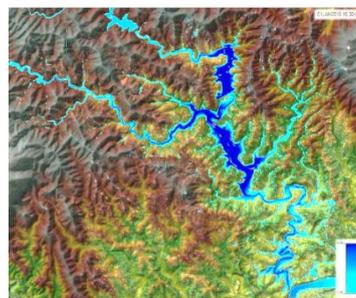
Secondo alcuni studiare equazioni di diffusione dell'onda sono più adatte a studiare i fenomeni di propagazione del deflusso in vaste aree alluvionali in cui la corrente presenta

variazioni graduali di portata e basse pendenze²⁵; mentre è consigliato usare le Equazioni di *Full momentum* quando si ricade in una delle seguenti situazioni:

- Propagazione di onde alluvionali dinamiche a seguito del crollo di una diga (*Dam breach analisys*) o dell'apertura rapida di una saracinesca;
- Espansioni e contrazioni improvvise del flusso con variazioni di velocità elevate (in presenza di opere idrauliche quali pile di ponti, pilastri, aperture)
- Modellazione in cui il deflusso è influenzato da cicli di marea (in prossimità di estuari o baie);
- Distribuzioni di velocità dettagliate in prossimità di una struttura idraulica.

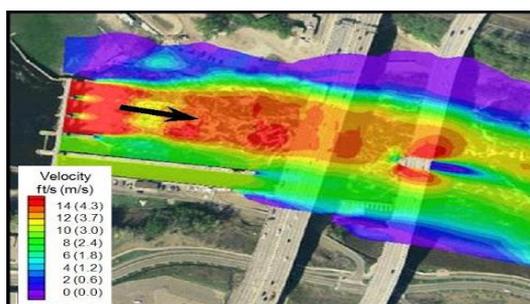


Mappe di inondazione in ambiente urbano

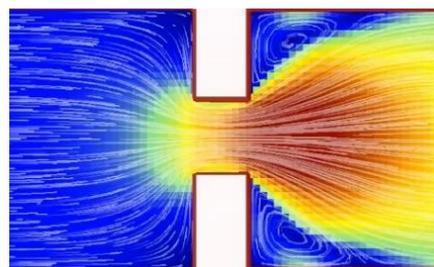


Mappe di inondazione in ambiente montano

Figura 31: Esempi di applicazione delle equazioni Diffusive Wave in una modellazione 2D (fonte:HecRas)



Propagazione di un'onda di piena a seguito di un collasso di una diga



Fenomeni di contrazione ed espansione del flusso idrico in prossimità di un'apertura

Figura 32: Esempi di applicazione delle equazioni Full Momentum nella modellazione 2D (fonte: Kleinschmidt Group , The Ras Solution blog)

²⁵ There are several reasons to prefer the diffusive form to the fully-dynamic one for the simulation of natural floods. The most important one is simple treatment of wetting-drying processes. Linear stability analysis allows one to evaluate the range of confidence of the diffusive models for regular waves and for an error, with respect to the complete model, smaller than 5%. Tratto da "2D diffusive model for flood prediction on domains with triangular Delaunay unstructured meshes" (Aricò, C.; Sinagra, M.; Begnudelli, L.; Tucciarelli, T. MAST-. Adv. Wat. Res. **2011**, 34, 1427–1449).

Per riuscire ad applicare i metodi numerici che portano alla risoluzione delle equazioni (31) e (32) il software ricorre alla definizione di uno schema in cui il dominio di calcolo viene suddiviso in una sotto griglia (Casulli, 2009) contenente celle aventi una dimensione maggiore rispetto alle celle del DTM. La griglia può essere strutturata o non strutturata. La differenza tra le due tipologie riguarda essenzialmente l'ortogonalità tra le celle. Se queste sono ortogonali tra loro, la maglia viene definita strutturata ottenendo un aumento dell'efficienza della discretizzazione numerica e quindi dei tempi di calcolo. All'interno della griglia le celle di calcolo possono essere triangoli, quadrati, rettangoli e anche poligoni con un massimo di 8 lati che presentano dimensioni anche diverse tra loro. Nella figura 33 viene illustrato un esempio di griglia sovrapposta al terreno. In essa le celle computazionali sono rappresentate da poligoni con linee nere spesse, mentre i centri di calcolo di ogni cella sono rappresentati dai nodi. Ogni faccia della cella viene elaborata come una sezione trasversale dettagliata basata anch'essa sul terreno sottostante.

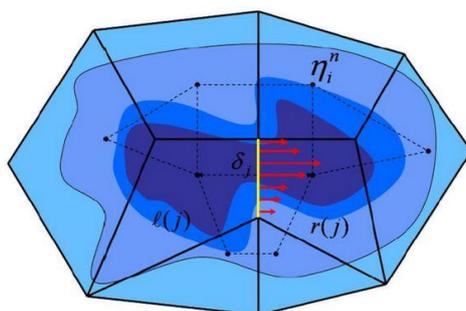


Figura 33: Schema di una griglia di calcolo non strutturata (Manuale HecRas, RUWA,2016)

Prima della simulazione il software esegue un'elaborazione su ogni faccia della cella al fine di sviluppare dettagliate tabelle contenenti le proprietà idrauliche (altezza idrica, raggio idraulico, area bagnata) ricavate dall'informazione altimetrica presente sul modello digitale del terreno. In questo modo a ogni cella viene associata una curva altezza/volume che consente una rappresentazione fedele del flusso idrico da celle con punti a quota maggiore verso celle a quote inferiori. Allo stesso tempo il software è in grado di riconoscere la presenza di celle parzialmente bagnate o asciutte in funzione dell'informazione del pelo libero e della morfologia della cella, quest'ultima ricavata dal modello digitale del terreno (*wet-dry model*). La creazione della maglia di calcolo, le condizioni al contorno e quelle iniziali saranno descritte nel capitolo successivo.

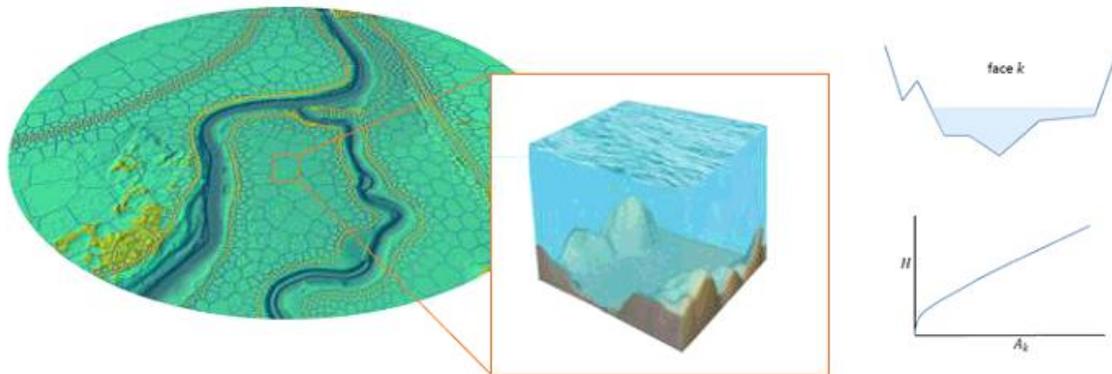


Figura 34: rappresentazione di una cella computazionale 2D in HecRas con il relativo schema su area bagnata e curva di invaso

Il risolutore delle equazioni utilizza un algoritmo implicito ai volumi finiti che a differenza delle tecniche tradizionali (differenze finite) consente l'uso di passi temporali di calcolo maggiori e dei miglioramenti in termini di stabilità della soluzione. L'implementazione dell'algoritmo consente, in presenza di modello combinato 1D-2D, il trasferimento dei flussi tra i due modelli attraverso elementi di connessione laterale (*lateral structures*) per ogni step di calcolo, tenendo conto dei cambi di regime da veloce a lento e viceversa (presenza di risalto idraulico). In questo modo è possibile avere un riscontro del risultato su entrambi i domini di calcolo. La procedura seguita dal calcolatore è la stessa di quella vista per il moto vario monodimensionale, ma con la differenza che le equazioni vengono risolte dall'algoritmo ai volumi finiti in ogni cella del dominio di calcolo, confrontando l'altezza idrica ipotizzata inizialmente con quella calcolata all'istante precedente. Se tale differenza rientra nella tolleranza numerica il calcolatore passa al time step successivo altrimenti procede in modo iterativo risolvendo nuovamente le equazioni.

✚ Strutture idrauliche all'interno di aree a deflusso 2D

La modellazione bidimensionale consente la modellazione di strutture idrauliche all'interno del dominio attraverso l'inserimento di opportuni elementi (*SA/2D connections*). Le novità introdotte dal software GeoHecRas consentono anche la modellazione di pennelli e soglie lungo il canale principale. Allo stesso modo di una

Lateral structure nelle *connections* è possibile definire una legge di efflusso e la forma della soglia sfiorante e inserire delle aperture (*gate*) regolate da saracinesche.

✚ Mappe dinamiche dei risultati

Il software consente di visualizzare in ciascuna delle celle di calcolo del dominio sia in forma grafica che tabellare le informazioni idrauliche processate. Il software GeoHecRas consente l'elaborazione di differenti tipologie di mappe (mappe di velocità, mappe di tirante, mappe sulla % di area inondata, e altro ancora) che possono essere esportate in differenti formati (raster, google hearth, vettoriali, CAD).

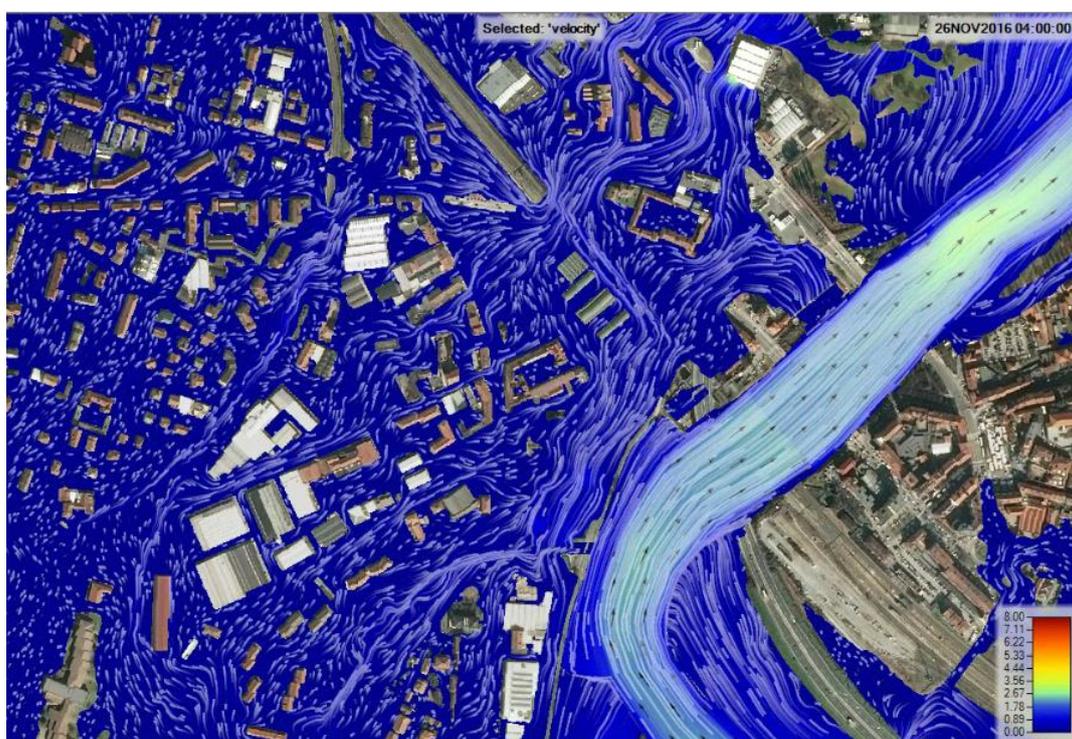


Figura 35: Esempio di mappa delle velocità in prossimità di un centro urbano- visualizzazione basata sui traccianti del flusso (Particle tracing)

5. Aggiornamento delle mappe di pericolosità del Torrente Chisola a seguito della piena del Novembre 2016

L'evento di piena che ha interessato il Piemonte tra il 21 e il 25 Novembre 2016 ha evidenziato, sulla base delle criticità verificate, la necessità di ridefinire nuove linee di intervento per la difesa del territorio, in quelle zone in cui l'uso del suolo si è dimostrato non compatibile con le dinamiche di allagamento. Gli effetti al suolo, largamente diffusi su tutto il territorio piemontese, hanno riguardato in particolar modo le aree attraversate dal torrente Chisola dove l'estensione degli allagamenti è risultata generalmente più estesa rispetto a quelle cartografata dal PGRA-2015 anche nello scenario avente tempo di ritorno di 500 anni (fig. 35). Proprio a seguito del suddetto evento è infatti emersa la necessità (come anche sottolineato nel Rapporto d'evento della Regione Piemonte) di aggiornare per il corso d'acqua gli scenari di pericolosità individuati dal Piano di gestione del rischio alluvioni.

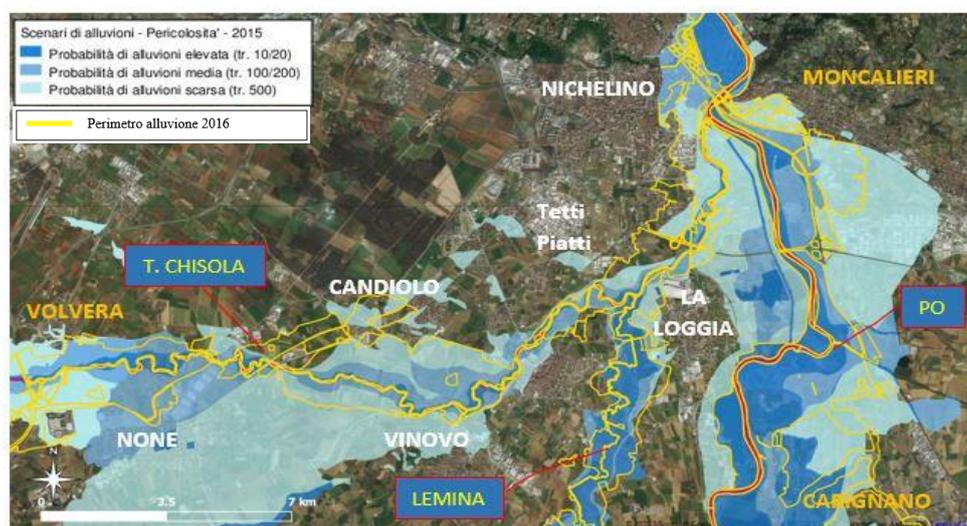


Figura 35: Mappe di pericolosità di alluvione per differenti scenari di pericolosità (PGRA-2015)

Nel presente lavoro la revisione delle mappe di pericolosità del Torrente Chisola, è stata condotta avvalendosi di una modellazione idraulica combinata 1D-2D in grado di descrivere dettagliatamente il campo di moto sia lungo l'asta del corso d'acqua sia nelle

piane alluvionali. Rispetto al metodo speditivo utilizzato in precedenza (di cui al capitolo 4) con questo tipo di modellazione è stato possibile raggiungere un migliore livello di confidenza. L'attendibilità del modello è stata confermata dalla fase di taratura che ha consentito di ricostruire in modo fedele la dinamica dell'evento di piena del 2016. A seguire vengono riportate le fasi che hanno portato alla costruzione e alla taratura del modello idraulico.

5.1 L'evento alluvionale del 23-25 Novembre 2016

L'ondata di maltempo che ha investito il Piemonte nel Novembre del 2016 ha generato una delle alluvioni più importanti degli ultimi 20 anni. L'incontro tra una vasta area di bassa pressione di origine Nord-Atlantica scesa dalle isole Britanniche verso le coste del Nord Africa e un campo di alta pressione presente sull'Europa orientale ha favorito abbondanti e diffuse precipitazioni che hanno determinato allagamenti, frane e hanno colpito centri abitati con interruzione della viabilità. Le piogge iniziarono a interessare la regione il 21 Novembre, raggiunsero il picco di intensità tra il 22 e il 23 e si esaurirono nella giornata del 25 facendo registrare in alcune località altezze di pioggia cumulate di carattere eccezionale.

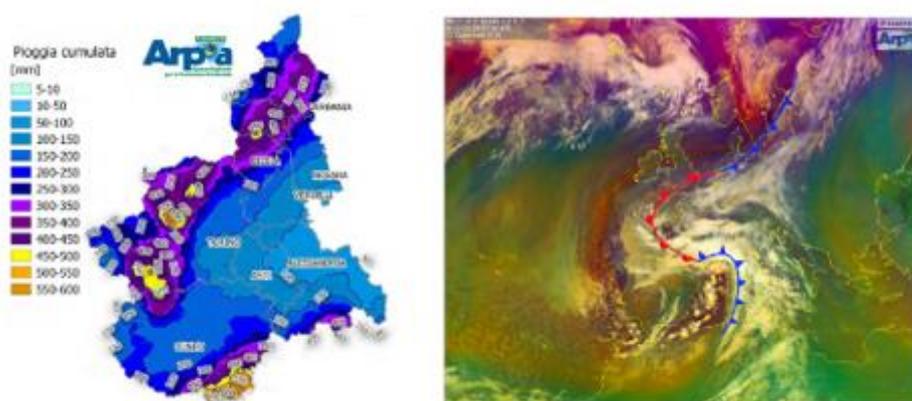


Figura 36: Pioggia cumulata in Piemonte dal 21 al 26 novembre 2016 (a sinistra) e mappa dei fronti (a destra) (ARPA-2016)

Durante l'evento quasi tutti i corsi d'acqua piemontesi entrarono in piena: a sud di Torino il Pellice e il Chisone superarono la soglia di pericolo nella sera del 24 registrando una portata al colmo con TR compreso tra 20 e 50 anni; il torrente Chisola superò il livello di

pericolo alle 12:50 del 25 Novembre registrando il suo massimo storico di 7,54 metri all'idrometro di La Loggia mentre sul fiume Po a Carignano la piena raggiunse il colmo tra il pomeriggio e la notte del 25 registrando un livello massimo di 6,71 metri all'idrometro di Carignano. Aspetto di particolare interesse idrologico è stato il fenomeno di rigurgito, in prossimità della confluenza tra i due corsi d'acqua, i cui effetti si pensa abbiano influenzato la lettura dei livelli idrometrici a La Loggia e nel contempo determinato la tracimazione degli argini del Chisola con l'innescò di rotte arginali.

La dinamica dell'evento ampiamente documentata da rilievi di campo, foto, video e rilievi satellitari ha consentito una valutazione più approfondita degli effetti al suolo e una stima dei danni ad esso associati. Dai rapporti ufficiali redatti dalla Regione Piemonte e da AIPo è emerso che la prima fase dell'evento ha visto coinvolti i comuni di Volvera, Candiolo, None, La Loggia, Piobesi Torinese e Carignano con ampi allagamenti e danni agli edifici civili, alle attività agricole e alle aziende dovuti principalmente alle acque provenienti dal torrente Chisola e dal reticolo secondario (Rio Torto, Rio Essa, Lemina, Bealera) a quali si aggiunse il contributo delle acque dei canali agricoli e della fognatura bianca comunale. I rilevati arginali, a protezione degli abitati di None e Vinovo, realizzati nel 2010 e 2012 riuscirono a contenere i livelli di piena evidenziando in alcuni punti dell'argine destro di None il raggiungimento del franco idraulico (stimato inferiore al metro). A Candiolo l'area allagata risultò più estesa di quella della fascia C del PAI. A valle della confluenza con il torrente Lemina, le acque del Chisola allagarono le campagne di Tetti Rolle con tiranti inferiori al mezzo metro per poi proseguire, attraverso i fornicati del rilevato della A 55, verso le borgate di Tagliaferro e Tetti Piatti dove gli allagamenti coinvolsero le aree urbanizzate con livelli localmente anche superiori al metro e mezzo. Un incremento delle aree allagate in quelle zone, si ebbe a seguito della formazione, a monte e a valle di strada Barauda, di due rotte arginali in sinistra idrografica del Chisola, formatesi la prima per sormonto e la seconda per erosione della scarpata. I volumi di piena riversati dalle due rotte rimasero confinati lungo un primo tratto dal rilevato di strada Carignano, fino a raggiungere e sormontare il rilevato stesso proseguendo in direzione Nord.

Durante l'evento non è da escludere che la presenza di canali di derivazione a scopo irriguo possa aver contribuito anche in modo rilevante all'estensione degli allagamenti,

soprattutto in aree urbane. Un esempio è il canale dei Molini che lungo il suo percorso alimenta una fitta rete di canali irrigui e attraversa ampi territori passando per le borgate di Tetti Rolle e Tagliaferro fino a entrare nella zona industriale di Moncalieri.



Figura 37: Comune di Moncalieri, allagamenti in Borgata Tetti Piatti con rotta arginale in sinistra idrografica a nord di strada Barauda. (www.youtube.com, Giorgio Ferraris)



Figura 38: Rotta Arginale a valle di strada Barauda (AIPo.,2016)

5.1.1 Sintesi degli studi idrologici relativi all'evento

L'evento del 2016 è stato oggetto di studi idrologici atti a ricostruirne la dinamica e i valori di portate al colmo transitati lungo il fiume Po e i suoi affluenti. In questa sede ai fini della modellazione idraulica che sarà condotta nel paragrafo successivo verranno citati gli studi ritenuti propedeutici alla fase di taratura del modello.

- il dipartimento di Sistemi Previsionali dell'ARPA Piemonte, a seguito di una valutazione idrologica²⁶ condotta con il metodo ARPIEM²⁷, ha aggiornato la stima dei valori di portata al colmo sul Torrente Chisola nelle sezioni di chiusura di Volvera (a valle della confluenza con il Rio Torto) e La Loggia definendo i valori di portata al colmo per differenti TR (fig. 39). La valutazione ha permesso quindi di attribuire all'evento di piena del 2016 una portata al colmo nella sezione di La Loggia di circa 440 m³/s e una portata al colmo nella sezione di Volvera di circa 320 m³/s, corrispondenti a un TR≈75 anni.

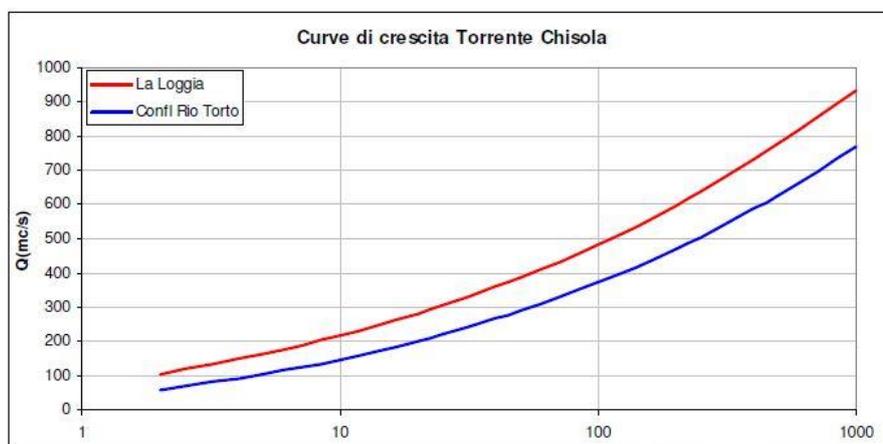


Figura 39: Curve di crescita Q (TR) generate con metodo ARPIEM per il T. Chisola (Barbero,2018)

²⁶ Valutazione idrologica richiesta da AIPo

²⁷ Analisi Regionale delle Piene dei Bacini Montani (2012 Arpa Piemonte)

- il Politecnico di Torino, nella “*Consulenza tecnica relativa all’evento alluvionale del 23-26 Novembre 2016 nei comuni di Moncalieri e Torino*”²⁸ avvalendosi di un modello idraulico monodimensionale calibrato, si è occupato della ricostruzione dell’evento di piena del 2016 sul torrente Chisola riuscendo a definire l’idrogramma di piena transitato a La Loggia al quale è stato attribuito un valore di portata al colmo compreso tra i 435 e i 462 m³/s per tenere in conto l’effetto di rigurgito del Fiume Po alla confluenza con il torrente Chisola.

- il dipartimento Sistemi Previsionali nel documento “*Analisi preliminare di Evento 21-26 Novembre 2016*” riporta oltre ai valori dei colmi di piena e i massimi livelli registrati durante l’evento per le stazioni idrometriche del fiume Po e del Torrente Chisola anche gli idrogrammi per le stazioni idrometriche per le quali si sono verificate condizioni di deflusso significative. Tra queste si riportano nella tabella 10 e figure 40 e 41 gli idrogrammi del T. Chisola a La Loggia e del fiume Po a Carignano e Moncalieri.

<i>bacino</i>	<i>comune</i>	<i>Prov.</i>	<i>stazione</i>	<i>Data e ora del colmo</i>	<i>Max [m]</i>	<i>Quota [m.s.l.m]</i>	<i>Qmax [m³/s]</i>
PO	La Loggia	TO	La loggia Chisola	25/11/2016 12:30	7,41	223,66	440
PO	Carignano	TO	Carignano Po	25/11/2016 17:00	6,71	228,36	2200
PO	Moncalieri	TO	Moncalieri Po	25/11/2016 23:00	8,72	221,29	2400

Tabella 10: colmi di piena e massimi valori idrometrici registrati durante l’evento del 2016 (ARPA 2016)

²⁸“Consulenza tecnica relativa all’evento alluvionale del 23-26 Novembre 2016 nei comuni di Moncalieri e Torino” (Laio, Ganora, Giugno 2017)

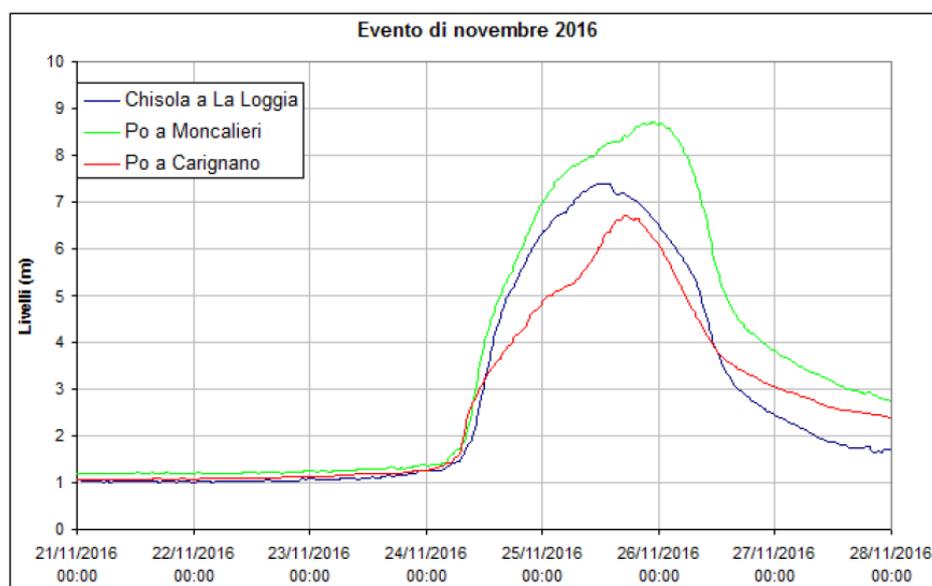


Figura 40: Idrogrammi in termini di livelli idrometrici nelle stazioni più significative per l'evento 21 – 28 Novembre 2016 (ARPA Piemonte)

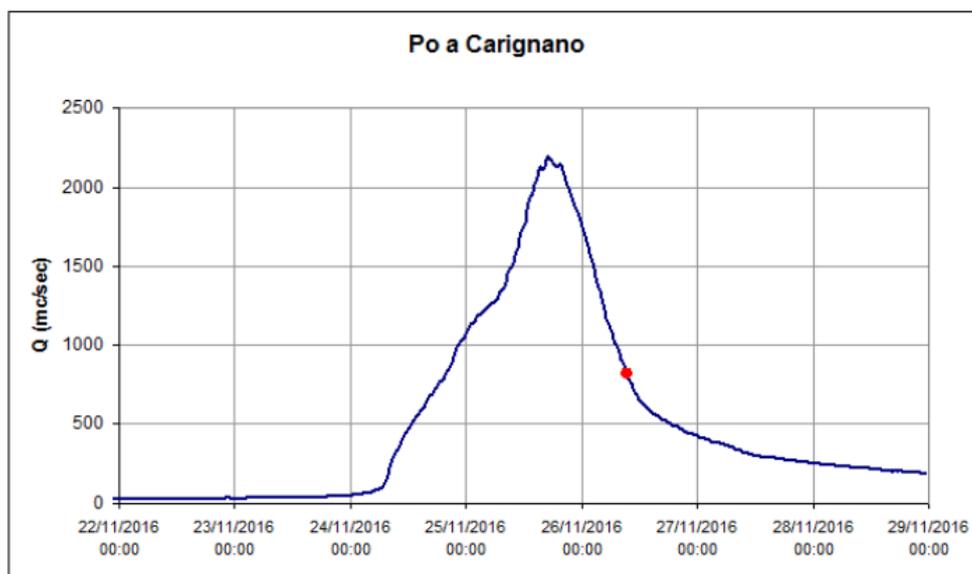


Figura 41: Idrogramma di portata a Carignano con misura diretta di portata in rosso per l'evento 21 – 28 Novembre 2016 (ARPA Piemonte)

5.2 Modellazione idraulica combinata 1D-2D

Nella seconda parte del lavoro di tesi, per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità è stato costruito un modello idrodinamico integrato 1D-2D, in grado di sfruttare e combinare all'interno di un unico codice di simulazione le potenzialità offerte sia dallo schema di

calcolo monodimensionale sia dall'analisi bidimensionale. La modellazione è stata condotta con il Software GeoHecRas2D sviluppato dalla società americana CivilGeo. L'area di studio in cui ricade il modello presenta un'estensione di circa 120 km² e comprende al suo interno due ben noti corsi d'acqua del territorio Piemontese: il torrente Chisola e il fiume Po.

Il tratto del torrente Chisola oggetto di studio presenta una lunghezza d'asta di circa 24 km e si estende dal ponte SP 139 del comune di Volvera sino alla confluenza con il Po a Moncalieri; bagna i comuni di None, Candiolo, Piobesi Torinese, Vinovo, La Loggia e le frazioni di Tetti Rolle, Tagliaferro, Tetti Piatti e Brauda. Il tratto del Po invece si estende dal ponte di Carignano (TO) sino al parco fluviale Le Vallere ubicato nel comune di Moncalieri e presenta una lunghezza d'asta di circa 17 km.

Nella modellazione si è tenuto conto anche degli affluenti in sinistra idrografica del Torrente quali il Rio Essa, la Bealera e il torrente Lemina nonché di una serie di canali di derivazione che dal Chisola si diramano in una ampia rete di canali secondari per poi disperdersi tra le campagne della pianura. Tale scelta si è dimostrata necessaria per poter ottenere nella fase di taratura del modello una ricostruzione quanto più fedele dell'evento accaduto nel 2016.

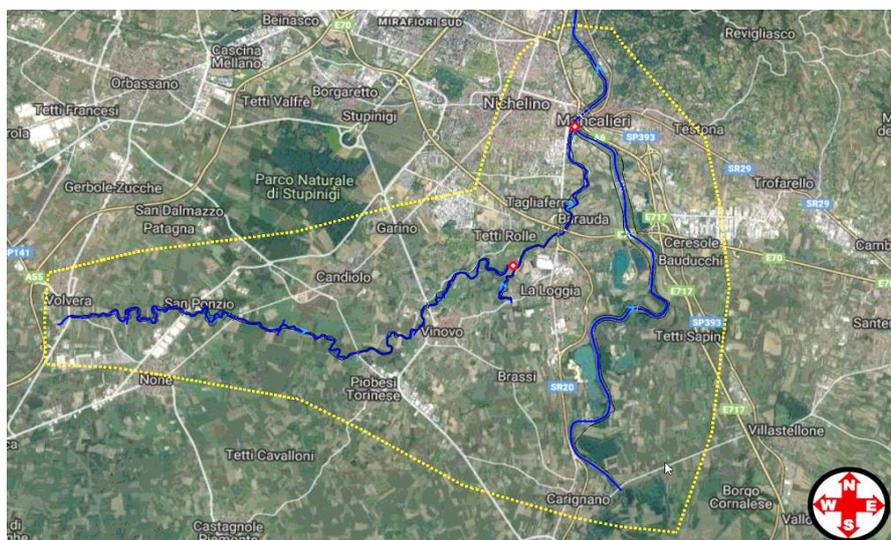


Figura 42: Inquadramento dell'area oggetto di studio contrassegnata dal colore giallo

La presenza di due differenti tipologie di modellazione collegate tra loro mediante opportune strutture laterali ha richiesto un lungo lavoro: una prima fase con la definizione

del modello 1D e l’inserimento in alveo delle sezioni trasversali e dei manufatti di ostacolo al deflusso (ponti, traverse fluviali) e una seconda fase per la definizione del dominio 2D con la creazione della griglia di calcolo, l’inserimento delle linee di discontinuità (*Break-lines*), degli edifici e l’assegnazione dell’uso del suolo (*Land Cover*).

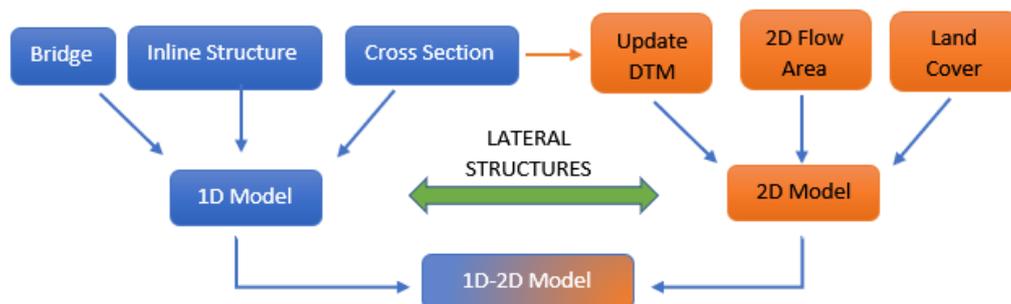


Figura 43: Schema di riferimento per la costruzione di un modello 1D-2D

Lo step di partenza di ogni modellazione è il reperimento di informazioni che consentono una descrizione quanto più accurata possibile dell’area di studio. Nel caso in esame la descrizione del territorio (alveo fiume, aree allagabili, centri abitati, infrastrutture viarie, ecc…) ha fatto riferimento ai seguenti dati:

- Modello digitale del terreno (DTM) della Regione Piemonte (2009-2011) acquisito con metodologia LIDAR, avente una risoluzione della griglia (passo) di 5 m;
- Modello digitale del terreno (DTM) acquisito da rilievo LIDAR realizzato da AIPo (2012) a griglia regolare a passo 1 metro, riguardante il bacino del Torrente Chisola nel tratto compreso dal comune di Volvera sino alla confluenza in Po a Moncalieri;
- Modello idraulico monodimensionale dell’alveo del Torrente Chisola commissionato da AIPo e datato Marzo 2015 comprensivo di attraversamenti stradali in alveo;
- Land Cover Piemonte con approfondimento al 4° livello di classificazione in formato ESRI *Shapefile* reperibile dal portale della Città metropolitana di Torino²⁹;
- Mappa catasto con piante degli edifici del comune di Moncalieri in formato ESRI *Shapefile*;
- Rilievo topografico sezioni fluviali del Fiume Po (2000) da Geo-portale AIPo;

²⁹ Fonte: <http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/territorio-urbani>

- Documentazione fotografica dei manufatti presenti sul territorio (rilevati arginali, fornici stradali e irrigui, ponti e opere idrauliche) acquisita dal sottoscrittore mediante sopralluoghi di campo insieme a tecnici AIPo (2020).

5.2.1 Definizione del modello monodimensionale

Nel codice di calcolo 1D la geometria del corso d'acqua è rappresentata da una parte centrale (*Main channel*) e da due parti laterali (*Overbanks*). La definizione dell'alveo richiede l'inserimento di sezioni trasversali rappresentate da una progressiva geometrica (*River station*) e da una serie di coppie di punti (*Station, Elevation*) che ne permettono la definizione nel piano trasversale. A completare il quadro degli elementi richiesti troviamo i coefficienti di contrazione ed espansione della vena liquida, il coefficiente di scabrezza (*Manning's value*) e infine i limiti di golena (*Banks station*) che vengono usati dal software per dividere la sezione in tre porzioni: golena destra, alveo centrale e golena sinistra. Una volta definite le sezioni trasversali è possibile proseguire con l'inserimento delle strutture trasversali interferenti con il deflusso, come i ponti e le opere idrauliche (traverse, soglie, briglie). In presenza di più tonchi fluviali che confluiscono in uno di valle, il software consente di modellare il nodo idraulico inserendo delle giunzioni (*Junctions*). Nel caso in esame, per gentile concessione di AIPo, è stato utilizzato come dato di base il modello idraulico monodimensionale del Torrente Chisola datato Marzo 2015 contenente al suo interno la geometria del corso d'acqua con le sezioni trasversali e gli attraversamenti stradali. Tale modello è stato successivamente integrato con l'aggiunta di ulteriori sezioni interpolate, manufatti idraulici³⁰ (traverse fluviali a scopo irriguo) e l'inserimento di due ulteriori tronchi fluviali quali il Torrente Lemina (affluente destro del Chisola) e un tratto del fiume Po. Sul finire delle modifiche il modello contava più di 1000 sezioni trasversali, 14 attraversamenti stradali, 3 traverse fluviali e 2 giunzioni (nodi idraulici). La presenza preponderante di un numero di sezioni così elevato nasce in risposta alla richiesta da parte del codice di calcolo di ulteriori sezioni a fronte di note e avvisi riguardanti le difficoltà nel raggiungimento della soluzione numerica durante la simulazione.

³⁰ Informazioni prese dall'elaborato "Rilievi Topografici del torrente Chisola dall'abitato di Volterra a confluenza Po" fornito da AIPo.



Figura 44: Estensione del modello idraulico monodimensionale “rifinito” con indicazione in arancione delle sezioni trasversali presenti nel modello.

La definizione del tronco del fiume Po è avvenuta utilizzando i dati topografici delle sezioni fluviali presenti sul Geo-portale AIPo, successivamente infittite mediante interpolazione geometrica e le informazioni (sezioni tipo, ortofoto e rilievi di campo) sugli attraversamenti stradali (ponti) presenti lungo il tratto studiato. I ponti sono stati inseriti seguendo la procedura indicata dal software, già esposta nel capitolo 4 paragrafo 4.3.2.1



Figura 45: Rappresentazione dei ponti presenti nel modello idraulico monodimensionale (GeoHecRas2D) nel tratto del fiume Po a valle della confluenza con il torrente Chisola



Figura 46: Inquadramento della 1°Traversa fluviale sul T. Chisola ubicata tra i comuni di Volvera e None



Figura 47: Inquadramento 2°Traversa fluviale sul T. Chisola ubicata a monte dell'attraversamento stradale della SP 142 nel comune di Piobesi Torinese con rappresentazione della suddetta nel modello monodimensionale GeoHecRas2D

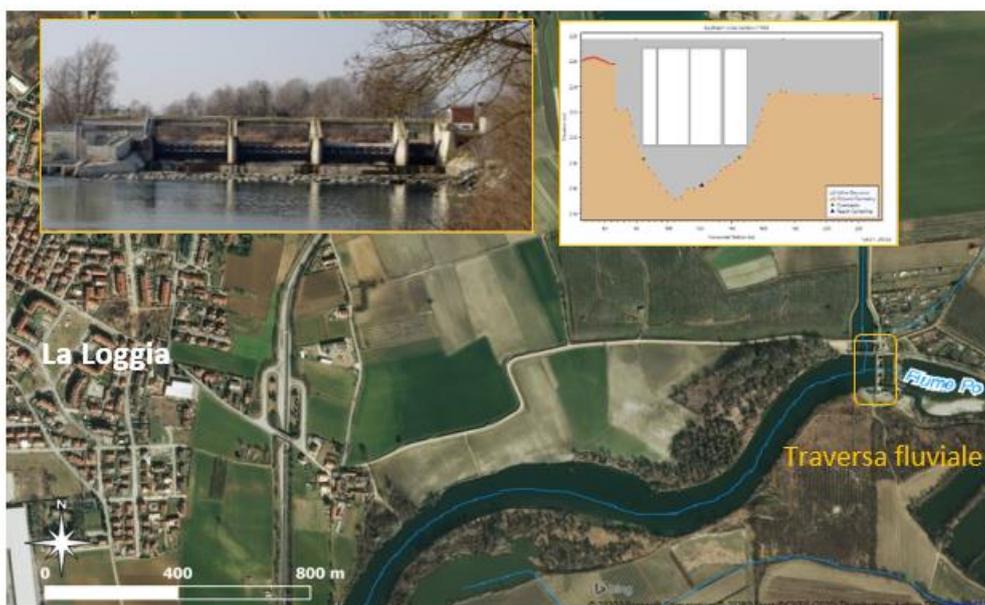


Figura 48: Inquadramento Traversa fluviale La Loggia sul fiume Po ubicata nel comune di La Loggia con rappresentazione della suddetta nel modello monodimensionale GeoHecRas2D

Completata la definizione della geometria si è passati a impostare le condizioni richieste dal software per la risoluzione delle equazioni del moto monodimensionali (De Saint Venant 1D) riguardanti:

- Coefficiente di scabrezza da assegnare alle tre porzioni dell'alveo;
- Coefficienti di contrazione ed espansione per ogni sezione trasversale;
- Coefficienti di forma delle pile dei Ponti;
- Condizioni al contorno (*Boundary Conditions*);
- Condizioni iniziali (*Initial Conditions*);
- Parametri di simulazione (Regime di moto, tolleranze, iterazioni massime, ecc.)

5.2.1.1 Il parametro di resistenza al moto

Il coefficiente di scabrezza è uno dei parametri più sensibili nelle modellazioni idrauliche e pertanto va opportunamente tarato ricorrendo a simulazioni di calibrazione sulla base di eventi noti. Esso rappresenta l'insieme di tutti i meccanismi di dissipazione energetica legati alla forma della sezione, alle caratteristiche granulometriche del materiale di fondo, alla presenza di *bed-forms* (dune, *ripples*, antidune) e alla vegetazione presente.

Nel software di calcolo GeoHecRas il coefficiente di scabrezza va definito attraverso il parametro di Manning (n) pari all'inverso del parametro di Gauckler Strickler (Ks). In letteratura esistono molte formulazioni o tabelle che consentono di stimare tale coefficiente, ad esempio in presenza di fondo piano (assenza di *bed-forms*) e conoscendo le caratteristiche granulometriche delle particelle costituenti il fondo alveo (d_{90}) è possibile ricorrere all'espressione proposta da Strickler:

$$k_s = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \quad (\text{Strickler}) \quad \rightarrow \quad n = \frac{1}{k_s} \quad (\text{Manning}) \quad (22)$$

dove: d_{90} [m] è il diametro caratteristico del fondo alveo a cui corrisponde un passante pari al 90%

Nel presente modello, in assenza di informazioni riguardanti la granulometria dei corsi d'acqua, il coefficiente di scabrezza è stato stimato, a titolo orientativo, ricorrendo ai valori riportati nella tabella 2 “*Valori del coefficiente di scabrezza per i corsi d'acqua naturali*” contenuti nel PAI. I suddetti valori, assunti in questa fase della modellazione, vanno intesi come valori di primo tentativo poiché necessari a verificare la presenza di eventuali errori o avvisi (*Warnings*) nella simulazione calcolo. Infatti i valori finali del coefficiente di scabrezza saranno definiti solo nella fase di taratura della modellazione idraulica, descritta nei paragrafi successivi, che terrà conto delle classi di uso del suolo (foreste, zone urbane, campi coltivati, ecc..) presenti nell'area bidimensionale.

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
CORSI D'ACQUA MINORI (Raggio idraulico \cong 2 m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
CORSI D'ACQUA MAGGIORI (Raggio idraulico \cong 4 m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tabella 11: Valori del coefficiente di scabrezza per i corsi d'acqua naturali (Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico, PAI)

<i>Corso d'acqua</i>	<i>Golena sinistra</i>	<i>Alveo inciso</i>	<i>Golena destra</i>
Torrente Chisola	Ks=25 (n=0.040)	Ks=27 (0,037)	Ks=25 (n=0.040)
Torrente Lemina	Ks=26 (n=0.038)	Ks=27 (0,037)	Ks=26 (n=0.038)
Fiume PO	Ks=32 (n=0.031)	Ks=34 (0,029)	Ks=32 (n=0.031)

Tabella 12: Valori iniziali del coefficiente di Strikler [$m^{1/3}/s$] e di Manning [$s/m^{1/3}$]

Nella stessa finestra in cui va assegnato il coefficiente di scabrezza, il software richiede anche l'inserimento dei coefficienti di contrazione e di espansione che consentono di tener conto delle perdite energetiche subite della corrente nel passaggio tra una sezione e la successiva. Nel caso in questione si è scelto di adottare dei valori molto bassi, tipici delle correnti veloci, in modo da non sovrastimare le perdite energetiche. Nel caso di cambiamenti graduali nelle sezioni fluviali i valori assunti sono stati di 0.01 (coeff. contrazione) e 0.03 (coeff. espansione) mentre in presenza di ponti e strutture idrauliche (traverse fluviali) sono stati utilizzati valori più alti pari a 0.03 (coeff. di contrazione) e 0.05 (coeff. di espansione).

In presenza di attraversamenti stradali (ponti) il software per poter applicare i metodi di calcolo (*Momentum e Yarnell*) previsti per la modellazione idraulica, richiede la definizione di un coefficiente che tenga conto della forma delle pile del ponte. Nel caso dei 15 attraversamenti stradali presenti nel modello, sono stati definiti sia il coefficiente C_d del metodo dei Momenti che il coefficiente K del metodo di Yarnell scegliendo tra i valori presenti nel manuale del software GeoHecRas (fig. 49) quelli relativi al caso studio. Le tipologie di forma riscontrate sono state pile circolari (*Circular Piers*), pile con spigolo triangolare (*Triangular nose with 90° angle*) e pile rettangolari (*Square nose piers*).

Yarnell's Pier Shape Coefficients	
Yarnell's pier coefficient, K, for various pier shapes	
Pier Shape	Yarnell K Coefficient
Semi-circular nose and tail	0.90
Twin-cylinder piers with connecting diaphragm	0.95
Twin-cylinder piers without diaphragm	1.05
90° angle triangular nose and tail	1.05
Square nose and tail	1.25
Ten pile trestle bent	2.50

Drag Coefficients	
Typical drag coefficients for various pier shapes	
Pier Shape	Drag Coefficient C_D
Circular piers	1.20
Elongated piers with semi-circular ends	1.33
Elliptical piers with 2:1 length to width ratio	0.60
Elliptical piers with 4:1 length to width ratio	0.32
Elliptical piers with 8:1 length to width ratio	0.29
Square nose piers	2.00
Triangular nose with 30° angle	1.00
Triangular nose with 60° angle	1.39
Triangular nose with 90° angle	1.60
Triangular nose with 120° angle	1.72

Figura 49: Valori del coefficiente di Yarnell e del coefficiente di Drag

Una volta completato l'inserimento di tutti i dati geometrici e dei relativi coefficienti, sono state definite le condizioni iniziali e al contorno del modello, le quali sono differenti a seconda del regime di moto selezionato (moto permanente o moto vario). In questa modellazione si è fatto uso del regime di moto vario.

5.2.1.2 Condizioni iniziali e condizioni al contorno

Nella modellazione in moto vario (*Unsteady Flow Data*) l'inserimento delle condizioni al contorno (*Boundary Conditions*) risulta essere più complessa rispetto al caso permanente poiché i valori di portata non sono più costanti ma variano nel tempo e vanno definiti per tutta la durata della simulazione. Le condizioni che il software mette a disposizione sono davvero molte e possono essere sia variazioni di portata (*Flow Hydrograph*) che variazioni di livello (*Stage Hydrograph*) oppure altre tipologie come: scale di deflusso (*Rating curve*), altezza di moto uniforme (*Normal Depth*), immissioni concentrate di portata (*Lateral Inflow Hydrograph*), grado di apertura delle saracinesche (*Controlled Gates*) e altre ancora. Oltre alle condizioni al contorno, vanno anche definite le condizioni

di portata all'istante iniziale della simulazione (*Initial Conditions*). A seguire si riportano le condizioni usate in questa modellazione.

➤ *Boundary Conditions*

Nei tratti terminali e intermedi dei corsi d'acqua presenti nel modello sono state assegnate le seguenti condizioni:

1) Variazioni di portata (*Flow Hydrograph*) nelle sezioni di monte dei corsi d'acqua principali:

- sezione del T. Chisola a valle della confluenza con il Rio Torto (RS 2556);
- sezione del T. Lemina a La Loggia (RS6596);
- sezione del fiume Po a Carignano (RS6363)

2) Immissioni di portata concentrata (*Lateral Inflow Hydrograph*) nelle sezioni dove gli affluenti Rio Essa e Bealera si immettono nel Torrente Chisola.

- sezione (RS 12779.1) per la Bealera;
- sezione (RS 11552) per il Rio Essa.

3) Altezza di moto uniforme (*Normal Depth*) nella sezione di valle del modello idraulico (RS 660.4) corrispondente all'ultima sezione del fiume Po. Questa condizione, equivalente all'altezza di moto uniforme ricavata dal software mediante formula di Manning, richiede l'inserimento della pendenza dell'energia che in condizioni di moto uniforme coincide con la pendenza del fondo. Sulla base di quanto riportato nel rapporto "*Analisi e valutazione degli aspetti morfologici*" (2015-2016) del Dipartimento Geologia e Dissesto, la pendenza del fiume Po nel tratto finale è stata assunta pari allo 0,044 %.

La scelta dei valori di portata per le condizioni 1) e 2) è avvenuta combinando le informazioni delle analisi idrologiche precedentemente illustrate nel paragrafo 5.1.1 con le

informazioni derivanti dallo studio “*Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola*” del Prof. Natale³¹.

In tale contesto, per la sezione di monte del modello del Torrente Chisola nota la stima del tempo di ritorno dell’evento del 2016, pari a $TR \approx 75$ anni e del relativo valore di portata al colmo transitato a Volvera, secondo la relazione “*Valutazione portata di progetto Torrente Chisola*” (Barbero, 2018); tenuto conto della curva di crescita $Q(TR)$ e dell’idrogramma per TR pari a 100 anni, derivante dalla relazione “*Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola*” (Prof. Natale) nell’intorno della medesima, è stato possibile ricavare l’idrogramma di portata (v. graf. 1) da assegnare a tale sezione (Volvera) per un tempo di ritorno di circa 75 anni, supponendo una quasi proporzionalità di volumi tra i vari periodi di ritorno.

Un ragionamento analogo è stato fatto per gli idrogrammi degli affluenti Rio Essa, Bealera e Torrente Lemina, ricavando nelle sezioni di riferimento i rispettivi idrogrammi associati a un TR pari a 75 anni.

Per la sezione iniziale del fiume Po a Carignano invece è stato utilizzato l’idrogramma ricostruito da ARPA Piemonte tramite scala di deflusso per l’evento di piena di Novembre 2016. L’idrogramma presenta una portata al colmo di $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ corrispondente a un tempo di ritorno di circa 50 anni.

³¹ Studio eseguito dal Professore Luigi Natale dell’università di Pavia su commissione di AIPo.

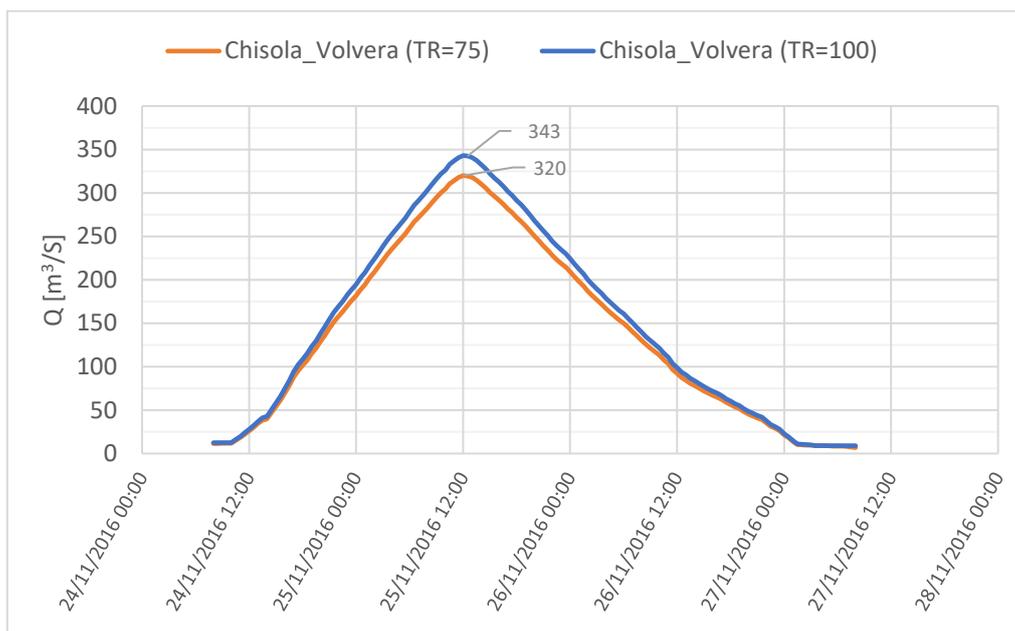


Grafico 1: Confronto Idrogrammi relativi alla sezione di monte del modello (Volvera) per diversi TR

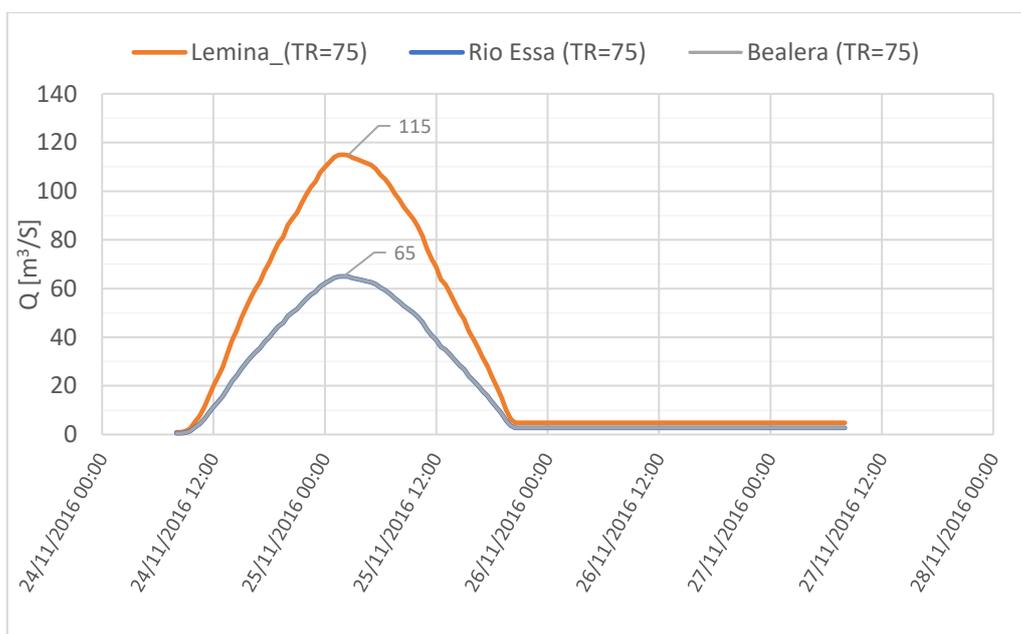


Grafico 2: Idrogrammi relativi agli affluenti Rio Essa, Lemina e Bealera per un TR=75 anni

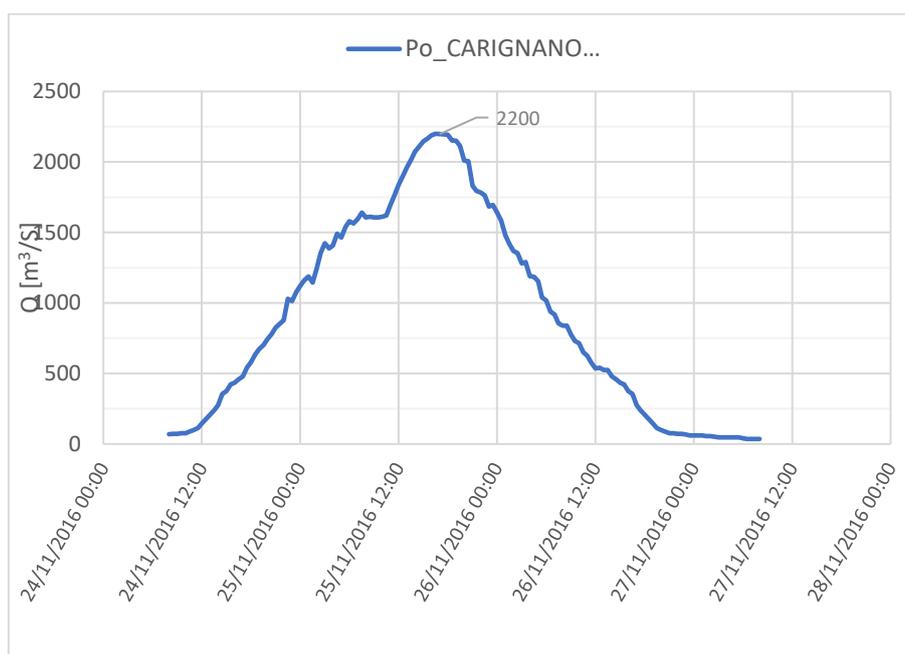


Grafico 3: Idrogramma relativo alla sezione di monte (Carignano) del fiume Po, per TR=50 anni

➤ *Initial Conditions*

Le condizioni iniziali sono un'altra informazione richiesta dal software senza le quali non è possibile eseguire la simulazione. Esse rappresentano i valori iniziali di portata che il codice di calcolo all'avvio della simulazione in moto vario usa per valutare³² le caratteristiche idrauliche di ogni elemento presente nel modello.

Il codice di calcolo HecRas dà la possibilità di scegliere due metodi per definire tali condizioni: impostare dei valori di portata costanti nelle sezioni di monte di ogni tronco fluviale (scelta preferibile in presenza di simulazioni in moto permanente) oppure utilizzare come stato iniziale i risultati ottenuti da una precedente simulazione (*Restart File*). Per ridurre i problemi di instabilità del modello idraulico si è deciso di adottare come condizione iniziale del modello i risultati di una seconda simulazione, definita assegnando lo stesso idrogramma di portata alle sezioni di monte dei tratti fluviali considerati.

³² La valutazione avviene usando le equazioni del moto permanente.

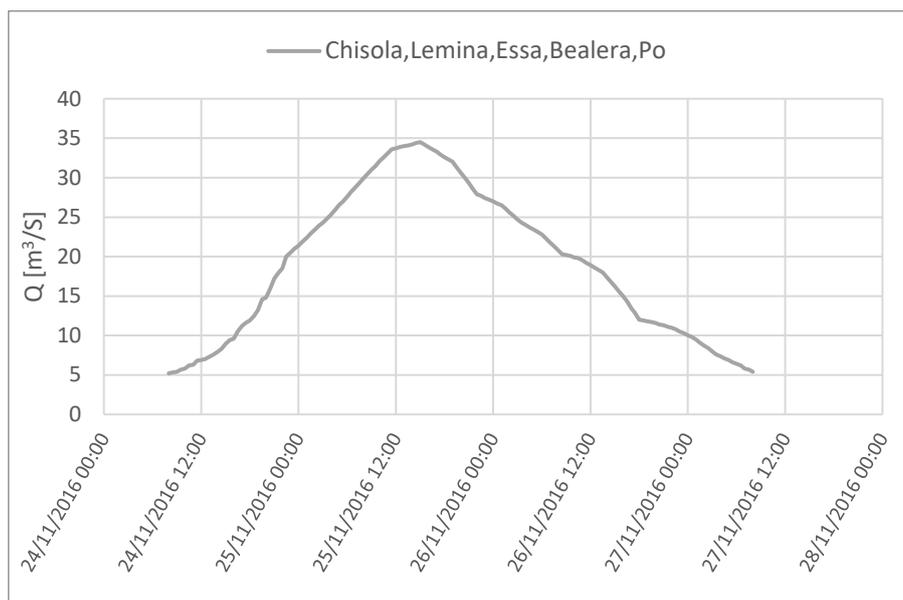


Grafico 4: Idrogramma utilizzato nella fase di riscaldamento del modello (Initial Conditions)

5.2.1.3 Parametri di calcolo del modello

Dopo aver inserito le condizioni al contorno e quelle iniziali non resta che definire i parametri del modello di calcolo da cui dipenderà la precisione dei risultati ottenuti e la stabilità del modello.

Accedendo alla finestra di avvio della simulazione di moto vario sono disponibili una serie di opzioni attraverso le quali è possibile definire i parametri di seguito elencati³³:

- *Theta (implicit weighting factor)*: fattore utilizzato nella risoluzione delle equazioni alle differenze finite. Il suo valore varia tra 1, che garantisce una maggiore stabilità a scapito della precisione e 0,6 che garantisce una maggiore precisione;
- *theta for warm up (implicit weighting factor)*: fattore utilizzato nella fase di riscaldamento del modello prima dell'avvio della simulazione vera e propria;

³³ Vengono riportati solo i parametri utilizzati nella presente modellazione. Ulteriori approfondimenti sono presenti nel manuale del programma HecRas.

- *water surface calculation tolerance*: rappresenta il valore di tolleranza sul tirante idrico che il codice di calcolo utilizza per arrestare il ciclo di iterazioni per la convergenza della soluzione;
- *maximum number of iterations*: numero massimo di iterazioni che possono essere utilizzate nel calcolo dei tiranti;
- *inline flow stability Factor*: parametro che permette di aumentare se necessario la stabilità del procedimento di calcolo in prossimità di una struttura in linea (traversa fluviale, briglia, soglia). Alti valori aumentano la stabilità a scapito della precisione mentre bassi valori ne aumentano la precisione;
- *lateral flow stability Factor*: parametro che permette di aumentare se necessario la stabilità del procedimento di calcolo in prossimità di una struttura laterale (sfioratore). Alti valori aumentano la stabilità a scapito della precisione mentre bassi valori aumentano la precisione;
- *weir flow submergence decay exponent*: parametro che permette di aumentare la stabilità o la precisione del procedimento di calcolo in prossimità di una *inline structure* in condizioni di rigurgito;
- *gate spillway flow submergence decay exponent*: parametro che permette di aumentare la stabilità o la precisione del procedimento di calcolo in prossimità di uno sfioratore in condizioni di rigurgito;
- *ID Equation Solver*: il software consente di scegliere tra due risolutori delle equazioni del moto. Quello di default è *Skyline* che utilizza il metodo gaussiano per ridurre le dimensioni della matrice di calcolo, ma è presente anche il metodo Pardiso da preferire nelle modellazioni bidimensionali poiché è ancora in fase di sperimentazione per quelle monodimensionali.

I valori assunti sono riportati nella tabella seguente con indicazione dell'intervallo di variabilità e del valore di default raccomandato dal Software.

Parametri e opzioni di calcolo	Variabilità o default	Valore usato nella modellazione 1D
<i>Theta</i>	0.6 - 1.0	1
<i>Theta for warm up</i>	0.6 - 1.0	1
<i>Water surface calculation tolerance (m)</i>	0.006 - 0.1	0.006
<i>Maximum number of iterations</i>	20 - 40	40
<i>Inline flow stability Factor</i>	1.0 - 3.0	1.0
<i>Lateral flow stability Factor:</i>	1.0 - 3.0	1.0
Weir flow submergence decay exponent	1.0 - 3.0	1.0
Gate spillway flow submergence decay exponent	1.0 - 3.0	1.0
<i>1D equation solver</i>	-	Skyline

Tabella 13: Parametri di calcolo utilizzati nella simulazione in moto vario

5.2.1.4 Verifica dei dati immessi

Al fine di eseguire un controllo sui dati geometrici inseriti nel modello, sono state condotte una serie di simulazioni *test* atte a risolvere avvisi e problemi di instabilità riscontrati durante il lancio delle simulazioni in moto vario. I messaggi di attenzione (*Warnings*) sono dovuti a problemi di coerenza nei dati, che però non impediscono l'esecuzione della simulazione, lasciando che termini in modo regolare. A fine di ogni simulazione è consigliato andare a leggere con attenzione il contenuto di questi avvisi verificando e correggendo i dati segnalati.

Errors, Warnings and Notes	
Warning:	The cross-section end points had to be extended vertically for the computed water surface.
Warning:	The conveyance ratio (upstream conveyance divided by downstream conveyance) is less than 0.7 or greater than 1.4. This may indicate the need for additional cross sections.
Warning:	The energy loss was greater than 1.0 ft (0.3 m), between the current and previous cross section. This may indicate the need for additional cross sections.

Figura 50: Esempio di messaggio di attenzione mostrato al termine della simulazione

I messaggi di errore (*Errors*) vengono invece generati quando i fattori riscontrati sono tali da impedire alla simulazione di andare a buon fine. In questo caso la simulazione termina in maniera anomala. Nel modello gli errori sono stati riscontrati maggiormente in prossimità di strutture quali ponti, traverse fluviali e nelle anse di meandro. In tali occasioni i problemi sono stati risolti eseguendo un'interpolazione geometrica delle sezioni, riducendo il tempo di calcolo e andando a incrementare il limite superiore delle *rating curve* (Hydraulic Property Tables) utilizzate dal software per la definizione delle caratteristiche idrauliche nelle sezioni.

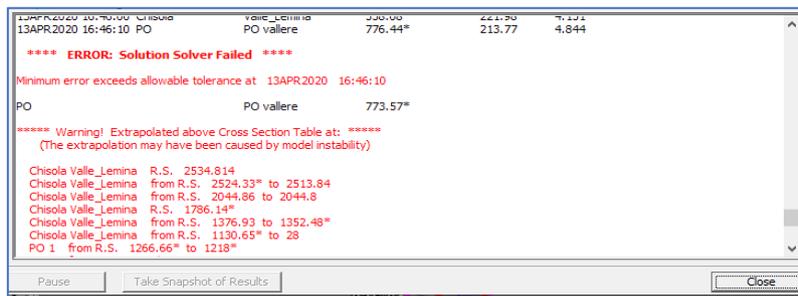


Figura 51: Messaggio di errore riscontrato durante la simulazione

Oltre ai messaggi mostrati nella finestra di simulazione, durante la simulazione viene scritto un file di registro (*Log File*) che contiene una verifica del bilancio dei volumi d'acqua durante la simulazione valutato per l'intera geometria. Nelle figure seguenti vengono riportati alcuni dei risultati ottenuti dalla modellazione 1D terminata la fase di verifica.

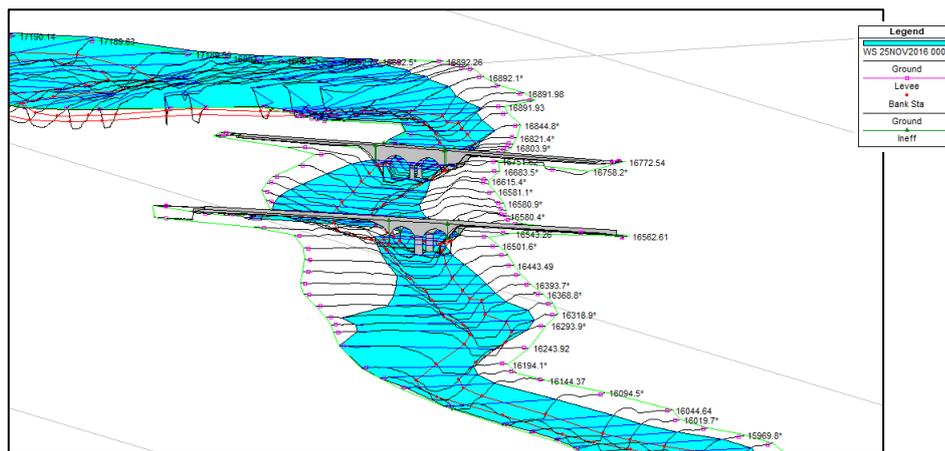


Figura 52: Visualizzazione grafica dei risultati-vista assometrica

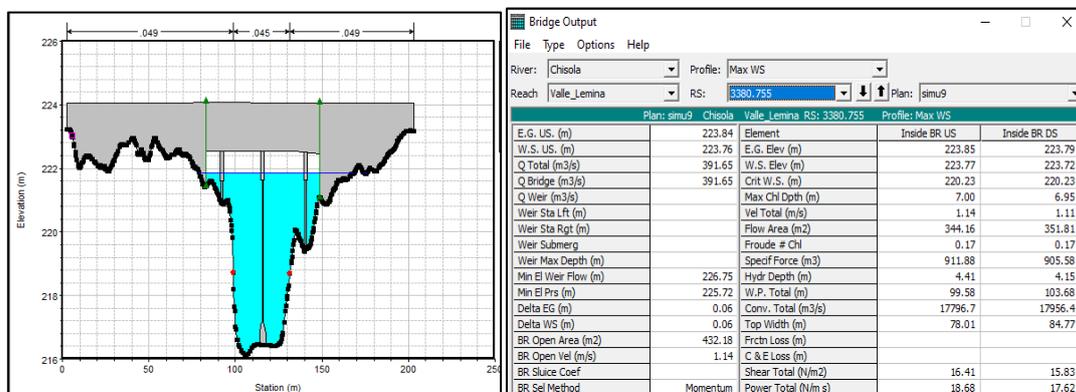


Figura 53: Risultati ottenuti dalla simulazione in corrispondenza di un attraversamento stradale

5.2.2 Definizione del modello bidimensionale

Verificata la corretta modellazione monodimensionale, si è passati a definire i dati geometrici necessari alla modellazione bidimensionale: aree di deflusso, linee di discontinuità, maglia di calcolo, edifici e manufatti idraulici. Nel dominio bidimensionale l'informazione altimetrica è disponibile in ogni punto dell'area di calcolo e non lungo precise direzioni (sezioni trasversali) come accadeva nel modello 1D. Questa è una delle principali caratteristiche dei modelli bidimensionali e in quanto tale richiede l'uso di un modello digitale del terreno (DTM). In questo lavoro di tesi la modellazione bidimensionale è stata utilizzata esclusivamente per la rappresentazione del deflusso nella piana alluvionale, zona esterna all'alveo fluviale, in quanto il canale principale è stato rappresentato dal modello monodimensionale. Nei paragrafi successivi sono delineate le fasi della costruzione del modello 2D.

5.2.2.1 Correzione dei dati topografici

Quando si lavora con i modelli digitali del terreno è importante precisare due aspetti:

- 1) non bisogna confondere la definizione di DTM (*Digital Terrain Model*) con quella di DSM (*Digital Surface Model*) o di DEM (*Digital Elevation Model*) talvolta utilizzati come sinonimi. In campo topografico, si è soliti indicare con la sigla DSM la superficie terrestre comprensiva degli oggetti in essa presenti (edifici, alberi, strade, ponti, ecc..) e con la sigla DTM l'andamento della superficie del terreno priva di tali oggetti. Dunque i DTM sono un prodotto dei DSM mediante operazioni di filtraggio e rimozione degli elementi presenti sopra il terreno;

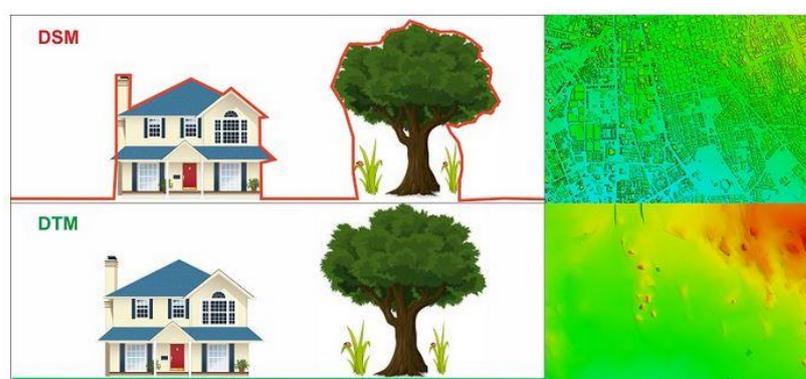


Figura 54: Differenza tra un DTM e un DSM (Fonte: www.3dmetrica.it)

- 2) non bisogna dimenticare che la tecnologia che consente di acquisire questi dati, conosciuta con il nome di LIDAR (*Light Detection and Ranging*) in presenza di superfici liquide (mari, oceani, laghi, fiumi) non consente di acquisire il dato al di sotto della superficie liquida poiché il raggio ad alta frequenza emesso dal dispositivo viene riflesso dalla superficie stessa.

Il dato topografico utilizzato per la modellazione bidimensionale è stato ricavato sovrapponendo al DTM della Regione Piemonte (passo 5 metri) il DTM fornito da AIPo (passo 1 metro) caratterizzato da una precisione cinque volte superiore. La sovrapposizione dei due DTM è avvenuta mediante il Software QGIS usando il comando *Merge Raster* attraverso il quale è stato creato un unico Raster avente una dimensione di cella di 1 metro nel sistema di riferimento WGS 84 /UTM zone 32N (EPSG-32632).

Il modello digitale così ottenuto è stato successivamente elaborato ricorrendo a strumenti di elaborazione dei *Raster* disponibili nell'interfaccia GIS del software GeoHecRas2D.

Le modifiche hanno riguardato:

- l'aggiunta della batimetria del fondo alveo nei corsi d'acqua presenti nel modello: attraverso il comando *Interpolate Geometry* che permette di estrarre un modello digitale del terreno direttamente dalle sezioni trasversali presenti nel modello 1D;
- l'aggiunta degli edifici: noto il contorno in pianta degli edifici e definita una quota di elevazione tramite il comando *Obstructions* è stato possibile estrarre il volume dell'edificio direttamente dal modello digitale del terreno;
- l'aggiunta di canali secondari: tramite il comando *Stamp Geometry* è possibile modificare le quote del DTM inserendo canali a sezione trapezia o rettangolare;
- il ripristino delle quote altimetriche lungo i rilevati arginali e in prossimità dei sottopassaggi irrigui o stradali: tramite il comando *Stamp Geometry*

Alcune modifiche eseguite sono riportate nella seguente figura:

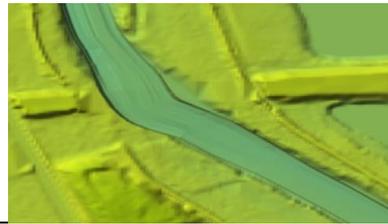
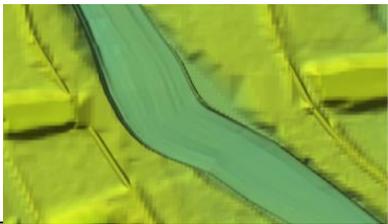
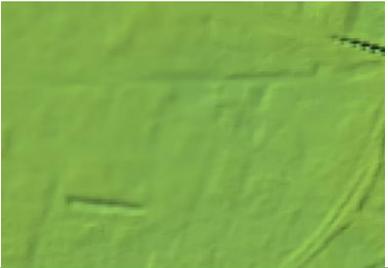
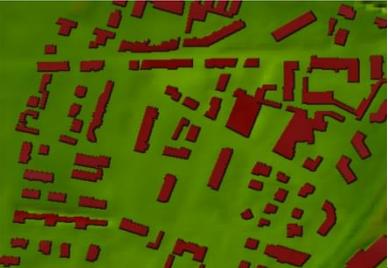
DTM originale	DTM corretto
	
Rilevati arginali interrotti	Rilevati arginali ripristinati
	
Assenza di edifici	Aggiunta di edifici

Figura 55: confronto tra DTM originale e DTM corretto (GeoHecRas2D)

5.2.2.2 Delimitazione aree 2D

Nella modellazione bidimensionale il dominio di calcolo viene definito attraverso l'assegnazione di un'area bidimensionale di deflusso (*2D Flow Area*) all'interno della quale vanno assegnate una maglia di calcolo (*mesh*), linee di discontinuità (*Break line*) ed eventuali strutture di connessione se presenti (*SA/2D Connections*).

L'area a deflusso 2D è stata individuata tracciando sul modello digitale del terreno un'area che avesse un'estensione maggiore dell'area oggetto di studio. Come riferimento è stata utilizzata l'estensione delle aree allagate dell'evento del 2016, rese disponibili nel formato WMS³⁴ (*Web Map Service*) da ARPA Piemonte sul GeoPortale della regione Piemonte. L'area individuata è stata suddivisa in cinque aree di deflusso in modo da agevolare le operazioni di generazione della mesh e di inserimento delle linee di discontinuità (figura 56).

³⁴https://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/services/geologia_e_dissesto/evento_alluvionale_2016/MapServer/WMServer

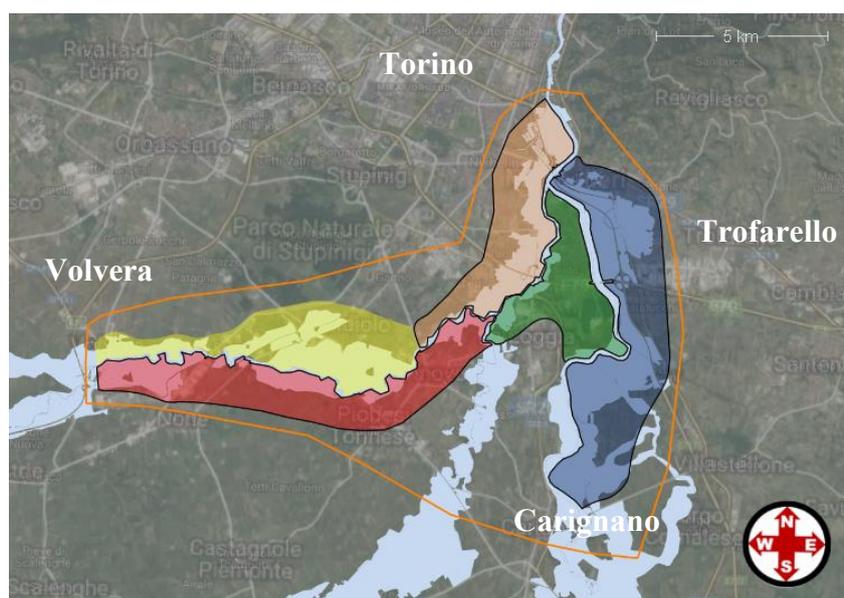


Figura 56: Rappresentazione delle 5 aree di deflusso 2D con indicazione del perimetro del DTM (in arancione) e delle aree allagate del 2016 (in celeste)

5.2.2.3 Mesh di calcolo

A ciascuna area di deflusso individuata è stata assegnata una griglia di calcolo (*mesh*). Come già in precedenza accennato la modellazione 2D in GeoHecRas utilizza un algoritmo di soluzione ai volumi finiti, sviluppato per consentire l'uso di una maglia di calcolo sia strutturata (regolare) che non strutturata (di forma qualsiasi). A seconda delle esigenze del modellista il software consente l'uso di tre tipologie di mesh: rettangolare, esagonale e adattiva dando la possibilità di usare all'interno della stessa area di deflusso anche tutte e tre le tipologie. Indifferentemente dalla tipologia scelta, GeoHecRas crea la maglia di calcolo seguendo la tecnica della triangolazione di Delaunay, e quindi la costruzione di un diagramma di Voronoi (Fig. 57). Questa tecnica, molto simile a quella utilizzata in idrologia per attribuire l'area del bacino a uno specifico pluviometro (metodo dei poligoni di Thiessen) prevede di tracciare un primo schema di celle triangolari e successivamente un secondo schema attraverso la bisezione di tutti i lati dei triangoli del primo schema.

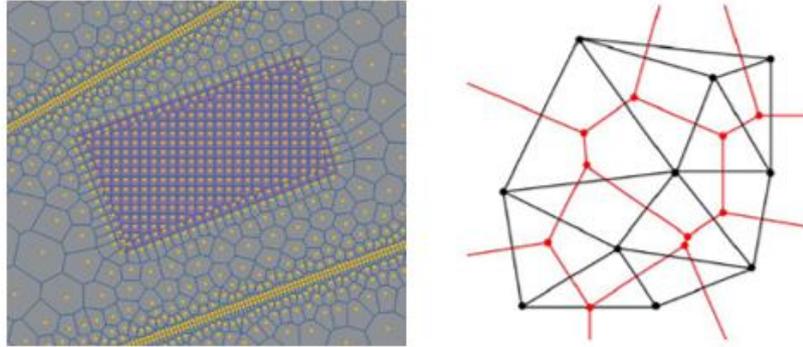


Figura 57: Rappresentazione di una mesh di calcolo non strutturata (regolare ed adattiva) e un esempio del diagramma Delaunay (in nero) -Voronoi (in rosso)

La mesh di calcolo adottata in questa simulazione è stata ottenuta assegnando a tutte le aree di deflusso la griglia a celle flessibili (mesh adattiva) con l'aggiunta di una griglia a passo più fitto (mesh regolare) in prossimità delle aree urbane o degli edifici isolati (fig. 58). Questa scelta ha permesso di ridurre i tempi computazionali del codice di calcolo, riuscendo nello stesso tempo a ottenere un maggior dettaglio laddove necessario. La dimensione delle celle è stata assunta pari a 5 metri per la griglia regolare e a passo variabile (2 -50 m) per la griglia flessibile, definendo un totale di 432 mila celle.

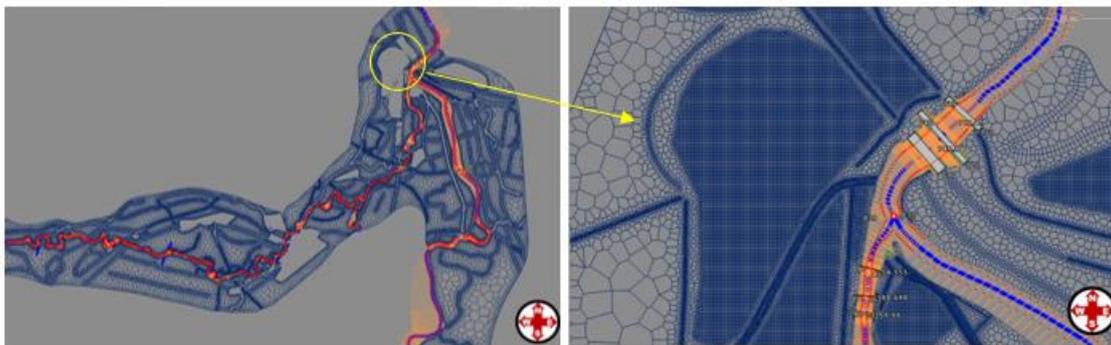


Figura 58: Mesh di calcolo adottata nel modello 2D griglia

5.2.2.4 Break lines

Definita la mesh di calcolo, sono state inserite nelle aree a deflusso 2D le linee di discontinuità (*Breacklines*) in corrispondenza di strade, rilevati arginali, sponde fluviali e scarpate. Tali linee impongono un allineamento delle facce delle celle, costringendo il flusso ad attraversare le celle solo se il livello dell'acqua supera la quota della

discontinuità. L'utilizzo delle *Break lines* evita errori nella rappresentazione del flusso nella piana alluvionale e risulta molto utile nel caso in cui all'interno di una cella di grandi dimensioni sia presente un ostacolo. In questa situazione il flusso tenderebbe ad attraversare l'ostacolo ma in presenza di una break-line è costretto a aggirarlo oppure a sormontarlo. Il software dà la possibilità di definire la dimensione delle celle lungo le *break lines* suggerendo di utilizzare dimensioni più piccole della larghezza dell'elemento da rappresentare.

Nell'area di deflusso sono state inserite circa 280 linee di discontinuità, tracciate in prossimità dei rilevati stradali, ferroviari, arginali e dove è risultato necessario infittire la mesh di calcolo.



Figura 59: Esempio di inserimento di Break Lines nell'area di deflusso 2D

5.2.2.5 Inserimento strutture

Il passo successivo è stato quello di inserire i manufatti presenti all'interno dell'area di studio, essenziali per una corretta rappresentazione delle aree di allagamento.

Dai sopralluoghi di campo realizzati insieme ai tecnici AIPo sono stati individuati in prossimità del Torrente Chisola e del Fiume Po una serie di fornici (sottopassaggi) nel rilevato della A6-Tangenziale sud di Torino-diramazione per Moncalieri e nel rilevato della A55-Tangenziale di Torino-diramazione per La Loggia. Questi manufatti hanno avuto un ruolo molto importante nella piena del 2016 agevolando il deflusso dei corsi d'acqua dalle aree golenali verso le aree urbanizzate. A supporto dell'attività di campo,

anche le immagini satellitari hanno consentito l'individuazione di altre strutture (sottopassaggi stradali e chiaviche idrauliche) anch'esse inserite all'interno dell'area di deflusso 2D.

Per tener conto della presenza di questi manufatti è stato utilizzato il comando SA/2D *Connections* mediante il quale è possibile definire la geometria della struttura e tutte quelle informazioni che ne consentono la modellazione idraulica, come la forma del profilo (*Weir*) e il coefficiente di efflusso (*Weir coefficient*). Il software consente anche l'inserimento di eventuali prese idrauliche come aperture (*gates*) e tombini (*curtvert*). Nel caso in esame la modellazione delle strutture è avvenuta inserendo delle *Connections* dotate di aperture (*gates*) di forma rettangolare dotate di paratoie piane (sluice).

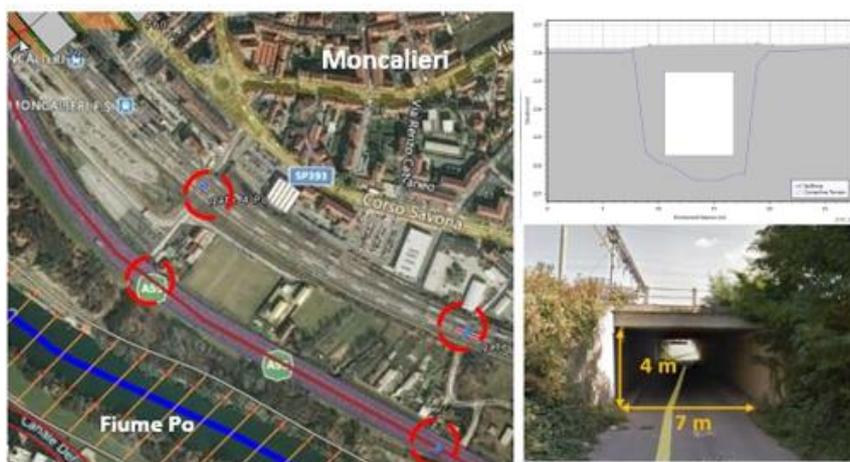


Figura 60: Modellazione dei sottopassi stradali in GeoHecRas2D

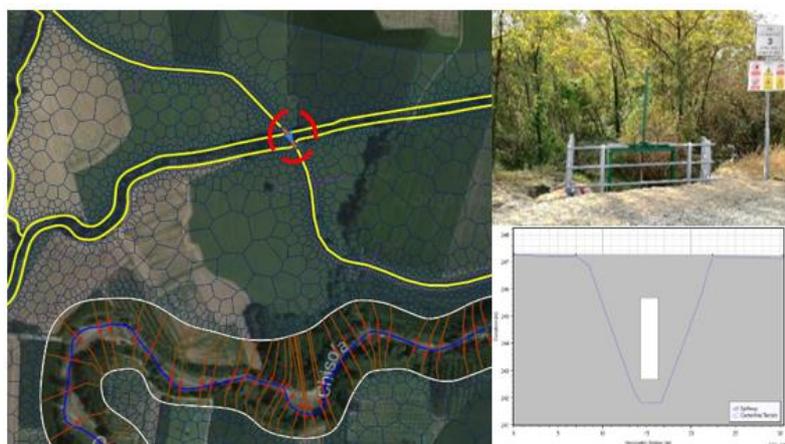


Figura 61: Modellazione di una struttura idraulica (chiavica) in GeoHecRas2D (foto da sopralluoghi di campo)

5.2.2.6 Land cover

Nella modellazione bidimensionale riveste particolare importanza la variazione spaziale della copertura del suolo nell'area di studio. Ai fini del calcolo, questa variazione si traduce in diversi valori del coefficiente di scabrezza da associare ad ogni classe del suolo. Il software GeoHecRas nell'area di deflusso 2D richiede come parametro rappresentativo della scabrezza il coefficiente di Manning, pari all'inverso di quello di Strickler, che consente di calcolare, mediante la formula di Chezy, il valore della portata e quindi la velocità per ogni cella del domino di calcolo. Nell'area di deflusso bidimensionale, la scabrezza è stata definita utilizzando come *layer* di copertura il Land Cover della Regione Piemonte con approfondimento al 4° livello di classificazione e come valori del coefficiente di Strickler quelli riportati nella relazione "Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico" (PAI). La presenza di un numero elevato di classi all'interno del dato di copertura ha portato ad effettuare un raggruppamento degli usi del suolo (Fig. 62) in modo da semplificare le operazioni di taratura del modello. Dunque, sono state definite cinque macro-categorie (tessuto urbano denso, tessuto urbano rado, aree boschive, canali secondari e aree agricole) a cui è stato associato un opportuno valore di scabrezza.

TESSUTO URBANO DENSO		CORSI D'ACQUA SECONDARI	
70	Tessuto urbano continuo e denso	161	Corri d'acqua indifferenziate
71	Edifici del Tessuto urbano continuo e denso	162	Corpi lincici attivi (fiumi e torrenti)
72	Tessuto urbano continuo e mediamente denso	163	Canali e idrovie
73	Edifici del Tessuto urbano continuo e mediamente denso	164	Bacini d'acqua indifferenziate
74	Zone industriali commerciali e reti di comunicazione continue e	165	Bacini d'acqua naturali
75	Edifici delle Zone industriali commerciali e reti di comunicazione	166	Bacini d'acqua artificiali a destinazione produttiva
76	Cimiteri	167	Bacini d'acqua artificiali ad altra destinazione
TESSUTO URBANO RADO		AREE AGRICOLE	
81	Edifici delle Zone industriali	94	Aree verdi urbane indifferenziate
74	Tessuto urbano discontinuo	95	Parchi urbani
75	Edifici del Tessuto urbano discontinuo	96	Aree incolte urbane
76	Tessuto urbano rado	87	Aree estrattive discariche e cantieri indifferenziate
77	Edifici del Tessuto urbano rado (case sparse)	88	Aree estrattive
80	Zone industriali commerciali	98	Campaggi e strutture turistico-ricettive
82	Reti stradali e spazi accessori	100	Aree arborologiche
83	Reti ferroviarie e spazi accessori	101	Territori agricoli indifferenziate
84	Grandi impianti di concentrazione e smistamento merci	102	Seminativi semplici in aree indifferenziate
85	Aree portuali	103	Vivai in aree indifferenziate
86	Aeroporti	104	Culture orticole a pieno campo in aree indifferenziate
89	Discariche e depositi di cave miniere e industrie	105	Serre e tunnel in aree indifferenziate
90	Depositi di rottami e cielo aperto cimiteri di autoveicoli	106	Seminativi semplici in aree non irrigue
91	Cantieri/spazi in costruzione e scavi	107	Vivai in aree non irrigue
92	Suoli rimaneggiati e artefatti	108	Culture orticole a pieno campo in aree non irrigue
93	Aree verdi artificiali non agricole indifferenziate	109	Serre e tunnel in aree non irrigue
99	Impianti sportivi (calcio- atletica- tennis- sci)	110	Seminativi semplici in aree irrigue
AREE BOSCHIVE		111	Vivai in aree irrigue
129	Pioppeti	112	Culture orticole a pieno campo in aree irrigue
130	Aree agroforestali	113	Serre e tunnel in aree irrigue
131	Boschi a prevalenza di latifoglie indifferenziate	114	Risale
132	Aceri-tiglio-frassineti	115	Culture permanenti indifferenziate
133	Castagneti	116	Vigneti
134	Robineti	117	Frutteti e frutti minori indifferenziate
135	Quercus-carpineti	118	Nociolieti
136	Querceti di rovera	119	Castagneti da frutto
137	Querceti di roverella	120	Mieteti
138	Ostietti	121	Pescheti
139	Paggete	122	Actinidieti
140	Formazioni legnose riparie	123	Oliveti
141	Boschi a prevalenza di conifere indifferenziate	124	Arboricoltura da legno indifferenziate
142	Abetine	126	Prati stabili e pascoli
143	Pinete	127	Culture annuali associate e culture permanenti
144	Peccete	128	Sistemi colturali e particellari complessi
145	Lariceti e brughiere di alta quota	129	Aree prevalentemente occupate da culture agrarie
146	Boschi misti di conifere e latifoglie	152	Zone aperte con vegetazione rada o assente indifferenziate
147	Praterie e brughiere di alta quota	153	Spiagge dune e sabbie isole fluviali greti
148	Cespuglieti e arbusteti	154	Rocce nude falde rupi effioramenti
149	Vegetazione sclerofila inclusa macchia e garriga	155	Aree con vegetazione rada
150	Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione naturale	156	Aree percorse da incendi
151	Aree con rimboschimenti recenti	157	Ghiacciai e nevi perenni

Figura 62: Usi del suolo presenti all'interno del Land Cover Piemonte con indicate le cinque macro-classi considerate per la taratura del modello nell'area a deflusso 2D

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
CORSI D'ACQUA MAGGIORI (Raggio idraulico ≥ 4 m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25
AREE GOLENALI (Raggio idraulico ≥ 1 m)	
- a pascolo, senza vegetazione arbustiva	40-20
- coltivate	50-20
- con vegetazione arbustiva spontanea	25-10
- con vegetazione arborea coltivata	30-20

Figura 63: Estratto della tabella riportata nel documento “Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico” (PAI)

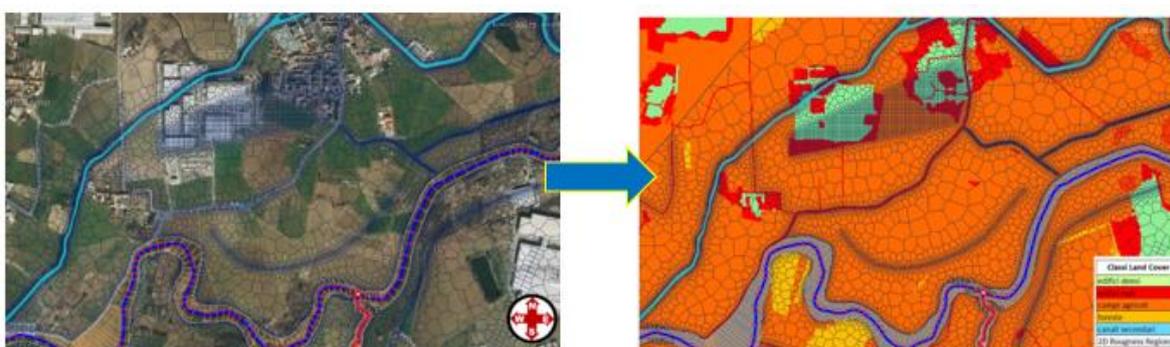


Figura 64: Esempio di copertura del suolo (Land Cover) assegnata all'area di deflusso 2D

Classi Land Cover	$K_s \text{ [m}^{1/3}/\text{s]}$	$n \text{ [s/m}^{1/3}\text{]}$
edifici densi	5	0,20
edifici radi	10	0,10
campi agricoli	20	0,05
foreste	18,2	0,055
canali secondari	50	0,02

Figura 65: Coefficienti di scabrezza iniziali assunti per le cinque classi di uso del suolo

5.2.2.7 Condizioni iniziali e al contorno

In modo analogo a quanto visto nella modellazione monodimensionale, anche per il bidimensionale vanno definite condizioni al contorno e condizioni iniziali, necessarie alla risoluzione delle equazioni del moto 2D di *De Sant Venant*. Il programma nella modellazione 2D consente di scegliere cinque tipi di condizioni al contorno (*Flow*

Hydrograph, Stage Hydrograph, Normal depth, Rating curve e Precipitations) e quattro tipologie di condizioni iniziali. Quest'ultime consentono di avviare la simulazione secondo le seguenti modalità:

- a) in condizioni di celle completamente asciutte;
- b) con un valore di tirante costante su tutta l'area 2D (celle bagnate);
- c) usando i risultati di una simulazione precedente (*Restart-file*);
- d) mantenendo costanti i livelli durante la fase di riscaldamento (*Initial Conditions Ramp up time*).

Nel presente modello le condizioni al contorno sono state definite solo per il modello 1D mentre quelle iniziali sono state definite in entrambi i modelli utilizzando un *Restart-file* contenente i risultati di una simulazione in moto vario precedente. Questa condizione è possibile perché “il modulo di calcolo a moto vario bidimensionale è integrato direttamente nel motore di calcolo del modello 1D in modo che la simulazione venga svolta contemporaneamente per ogni passo temporale”³⁵. In aggiunta sono state definite anche le variazioni di apertura delle paratoie delle strutture (*Connections*) inserite nell'area 2D.

5.2.2.8 Parametri di calcolo

Nello stesso editor che contiene le impostazioni di calcolo 1D sono disponibili anche le opzioni per il controllo dei calcoli sulle aree bidimensionali durante la simulazione in moto vario. I parametri che si vanno ad aggiungere a quelli visti nel modello monodimensionale sono:

- *Equation Set*: il modulo di calcolo bidimensionale consente di scegliere tra la versione completa delle equazioni 2D di De Sant Venant (*Full momentum*) e quella semplificata (*Diffusive Wave*). Le equazioni di default sono le *diffusive wave* in quanto consentono una modellazione bidimensionale più stabile e veloce. Per i motivi trattati nel paragrafo 4.3.2.2 la modellazione 2D è stata condotta secondo le equazioni *Diffusive Wave*;

³⁵ Tratto da “Corso HECRAS sulla modellazione bidimensionale” – RUWA,2016)

- *Initial conditions Time (hrs)*: questa opzione va attivata se nell'area 2D sono state definite delle condizioni al contorno quali un idrogramma di piena o una variazione di livello;
- *Eddy Viscosity*: questo parametro consente di tener in conto gli effetti dalla turbolenza nel campo di moto bidimensionale. Tale parametro va definito solo se le equazioni del moto scelte per la modellazione sono le *Full Momentum*;
- *Use Corioliolis Effects*: questa opzione attivabile solo in presenza delle equazioni complete del momento, consente di tenere in conto gli effetti della rotazione terrestre sull'esito della soluzione (effetto di Coriolis) inserendo la latitudine del centro dell'area 2D simulata;
- *Volume Tollerance*: rappresenta il valore soglia (tolleranza) per il volume utilizzato nella risoluzione delle equazioni del moto;
- *Maximum number of nterations*: è il numero massimo di iterazioni utilizzato dal risolutore per risolvere le equazioni bidimensionali. Il valore di default è 20.
- *Number of cores to use in computations*: consente di definire il numero di core della CPU del computer utilizzato. Nella modellazione 2D è consigliato l'uso di tutti i core disponibili;
- *Computational Time Step interval*: è il passo temporale che il codice di calcolo usa per risolvere le equazioni del moto. Un intervallo piccolo consente una maggiore stabilità del modello.

I valori assunti sono riportati nella tabella seguente con indicazione dell'intervallo di variabilità o del valore di default raccomandato dal Software:

Parametri e opzioni di calcolo	Variabilità o default	Valore usato nella modellazione 2D
<i>Equation Set</i>		<i>Diffusive wave</i>
<i>Initial conditions Time (hrs)</i>		-
<i>Corioliolis Effect</i>		-
<i>Eddy Viscosity</i>	0.11 - 5	-
<i>Volume Tollerance</i>	0,003	0,003
<i>Maximum number of nterations</i>	20 - 40	40
<i>Number of cores to use in computations</i>		8
<i>Computational Time Step interval</i>		10 secondi

Tabella 14: Parametri di calcolo assunti per il modello bidimensionale

5.2.3 Connessione dell'area 2D al modello 1D

Gli elementi dell'area a deflusso 2D e la stessa possono essere collegati agli elementi 1D ricorrendo a opportune strutture chiamate *Lateral Structures*, sfioratori laterali che permettono di modellare i deflussi al di fuori delle sponde di un tratto di fiume 1D. L'inserimento di tali strutture nel modello è definita da regole ben precise che se seguite evitano il riscontro di errori in fase di simulazione.

Il criterio da seguire prevede il rispetto delle seguenti condizioni:

- L'asse (*Centerlines*) dello sfioratore va tracciato lungo il perimetro dell'area di deflusso 2D;
- la lunghezza dello sfioratore non può essere diversa da quella dell'asse (*Centerlines*), la tolleranza ammessa è dello 0,5 %;
- il numero massimo di sezioni trasversali che è possibile collegare alla struttura laterale non deve superare le 100 unità;
- non è consentita l'intersezione della struttura laterale con altre strutture presenti lungo il modello 1D come ponti, traverse fluviali, soglie, ecc..;
- le quote del profilo dello sfioratore non possono essere inferiori rispetto alle quote del terreno, quest'ultime definite dal modello digitale del terreno.

Nel rispetto di queste condizioni sono state inserite 74 strutture laterali assegnando a ciascuna di esse l'area di deflusso 2D competente.

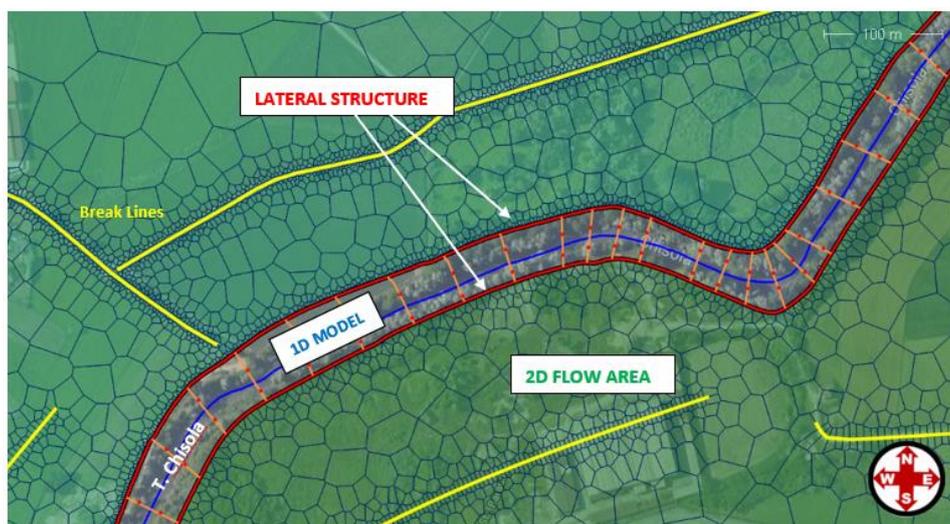


Figura 66: Collegamento dell'area 2D al modello 1D mediante Lateral Structures (GeoHecRas2D)

Per regolare il trasferimento del deflusso dal fiume (elemento 1D) alla piana alluvionale (area a deflusso 2D) è stato definito un coefficiente di stramazzo di “carattere” differente rispetto ai coefficienti visti per le traverse fluviali (Fig. 27 e 28). In questi casi è importante scegliere un coefficiente che risulti appropriato per la situazione che si intende modellare e comunque non superiore al valore assunto per le strutture trasversali al fine di evitare trasferimenti eccessivi di portata. In riferimento ai valori indicati dal software e riportati in tabella 15, è stato utilizzato un coefficiente di stramazzo pari a 0,22 (default) nelle zone in cui la struttura laterale è stata definita a livello del suolo e un coefficiente pari a 2,0 (default) nelle zone in cui la struttura laterale è stata tracciata sopra un rilevato arginale.

Lateral Flow, Weir Coefficients		
Weir Type	Description	Coefficients
Levee or Roadway 3 ft (1 m) or higher above natural ground	Broad crested weir shape, flow over levee or roadway acts like weir flow	US Units: 1.5 to 2.2 (2.0 default) SI Units: 0.83 to 1.2 (1.1 default)
Levee or Roadway 1 – 3 ft (0.3 – 1 m) above natural ground	Broad crested weir shape, flow acts like weir flow but becomes submerged easily	US Units: 1.0 to 2.0 (1.7 default) SI Units: 0.55 to 1.1 (0.94 default)
Natural high ground barrier 1 – 3 ft (0.3 – 1 m) high	Does not act like a weir, but must flow over high ground	US Units: 0.5 to 1.0 (0.86 default) SI Units: 0.28 to 0.55 (0.47 default)
Non-elevated overbank, lateral structure not elevated	Overland flow escaping the main river	US Units: 0.1 to 0.5 (0.39 default) SI Units: 0.06 to 0.28 (0.22 default)

Tabella 15: Coefficienti di stramazzo per una struttura laterale (HEC-RAS,2013)

5.3 Taratura del modello combinato 1D-2D

Le regole della modellazione prevedono la cosiddetta fase di taratura, da eseguire necessariamente prima dell'analisi dei risultati. Essa prevede, sulla base di informazioni idrometriche (livelli idrici) registrate da stazioni di misura e dati osservati durante un evento di piena, di calibrare alcuni parametri del modello (in particolare la scabrezza) in modo che vi sia un'accettabile coincidenza tra i risultati ottenuti dalla modellazione e i valori realmente verificati.

Nel presente lavoro, la taratura del modello è avvenuta utilizzando come evento di riferimento l'alluvione verificatasi a Novembre 2016 in Piemonte e come parametro di calibrazione il coefficiente di scabrezza di Gauckler Strickler. Inoltre ai fini di una

ricostruzione quanto più fedele dell'evento, è stato considerato nelle simulazioni anche il contributo di portata derivante dal fiume Po per tener conto dell'effetto di rigurgito sui livelli del torrente Chisola in prossimità della confluenza.

5.3.1 Dati consultati

La ricostruzione della dinamica di evento ha fatto riferimento alle seguenti informazioni:

- 1) Valori di altezze idriche registrate dalle stazioni idrometriche “*La Loggia Chisola*” e “*Moncalieri Po*” durante la piena e pubblicate da ARPA Piemonte nella relazione “*Analisi preliminare evento 21-26 novembre 2016*”;

Stazione di misura	Quota zero idrometrico [m.s.l.m]	Altezza idrometrica Nov. 2016 m]	Quota Assoluta Nov. 2016 [m.s.l.m]	Ora e data del colmo
La Loggia Chisola	216,25	7,41	223,66	12:30 - 25/11
Moncalieri Po	212,57	8,72	221,29	23:00 - 25/11

Tabella 16: Colmi di piena registrati durante l'evento per le stazioni significative (ARPA,2016)

- 2) Rilievo³⁶ delle aree allagate con indicazioni sui punti di sormonto spondale, rotte arginali e direzioni di deflusso nonché le altezze delle acque di esondazione, eseguite dai tecnici della Regione Piemonte, del CNR-IRPI e da ARPA Piemonte;
- 3) Mappe sull'estensione delle aree allagate ricavate da immagini satellitari ad alta risoluzione riprese dai satelliti Cosmo Skymed e Sentinel nell'ambito del programma Copernicus (EMS)³⁷ scaricabili dal sito del progetto³⁸ in formato JPG, PDF e SHP;

³⁶ Risorsa consultabile al seguente indirizzo web:

<https://webgis.arpa.piemonte.it/Geoviewer2D/index.html?webmap=e60084dec90847f2bc9e04c7b32e5216>

³⁷ Copernicus Emergency Management Service è un programma nato a seguito dell'accordo tra il Dipartimento Nazionale di Protezione Civile, l'Agenzia Spaziale Italiana e la Fondazione Cima per fornire una stima preliminare sulla delimitazione delle aree allagate e sui danni provocati da eventi alluvionali (tratto da “Analisi preliminare evento 21-26 novembre 2016” ARPA,2016)

³⁸ Disponibili all'indirizzo: <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR192/ALL/ALL>

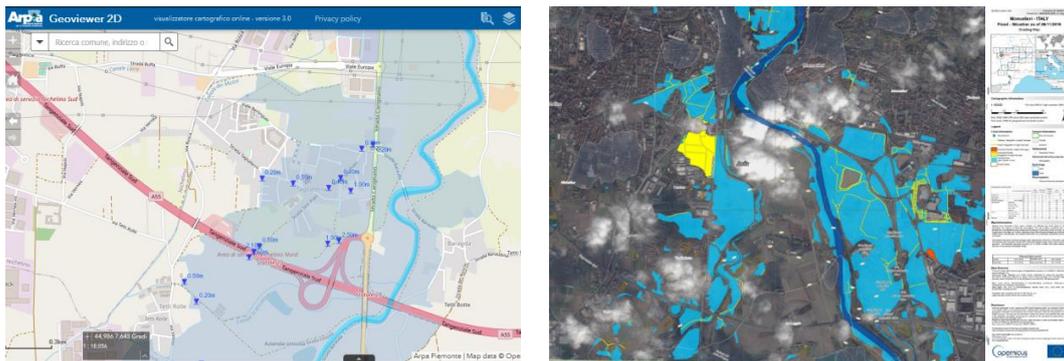


Figura 67. Mappa con osservazioni sulle altezze idriche dell'alluvione (Geoportale ARPA) e mappa delle aree allagate a sud di Torino (Copernicus EMS)

- 4) Filmati e fotografie di evento riportate sulla piattaforma YouReporter e YouTube riguardanti l'esonazione del torrente Chisola nei pressi di strada Carignano, Moncalieri (TO);
- 5) Testimonianze³⁹ da parte di residenti e tecnici AIPo delle zone colpite dall'alluvione;



Figura 68: Immagini delle aree allagate a Moncalieri (YouReporter e YouTube,2016)

³⁹ Racconti riguardanti la dinamica di evento e l'altezza delle acque di esondazione in prossimità delle abitazioni (sopralluoghi di campo effettuati dal sottoscrittore con tecnici AIPo, 2018)

5.3.2 Calibrazione del parametro di scabrezza

La calibrazione del modello combinato è avvenuta variando su tutto il dominio di calcolo il parametro rappresentativo della resistenza al deflusso (coefficiente di Glaukler Strickler) definito nei paragrafi precedenti lungo i corsi d'acqua e in tutta la piana alluvionale (area di deflusso 2D).

Partendo dai valori di scabrezza assunti e dalle condizioni al contorno definite nel modello⁴⁰, sono state condotte una serie di simulazioni in moto vario che hanno permesso di ottenere un'accettabile corrispondenza tra i risultati generati dal modello⁴¹ e i dati osservati durante l'evento di piena del 2016. I valori del coefficiente di scabrezza ottenuti a seguito della fase di taratura sono riportati nelle figure sottostanti.

Corso d'acqua	tratto	Golena sx	Alveo	Golena dx
Chisola	Volvera - None	25.0	28.6	25.0
Chisola	None - confluenza Lemina	20.0	22.2	20.0
Chisola	confluenza Lemina - La Loggia	20.8	22.2	20.8
Chisola	La Loggia - confluenza Po	20.4	22.2	20.4
Lemina	SP 145 - confluenza in Chisola	25.0	25.0	26.3
Po	Carignano - Parco Le Vallere	30.3	32.3	30.3

Figura 69: Valori finali del coefficiente di scabrezza di Gauckler Stickler assegnati alle sezioni fluviali dei corsi d'acqua presenti del modello 1D



Figura 70: Suddivisione in tratti del torrente Chisola per la definizione del coefficiente di scabrezza

⁴⁰ In riferimento all'intero dominio di calcolo mono-bidimensionale.

⁴¹ la ricostruzione di eventi di piena di carattere alluvionale, comporta in modo inevitabile un grado di approssimazione sui risultati che dipende essenzialmente da diversi fattori: la qualità dei dati di ingresso (risoluzione del modello digitale del terreno); la definizione dello schema di calcolo (mesh e dimensioni di cella) e la disponibilità delle informazioni utilizzate per la taratura del modello.

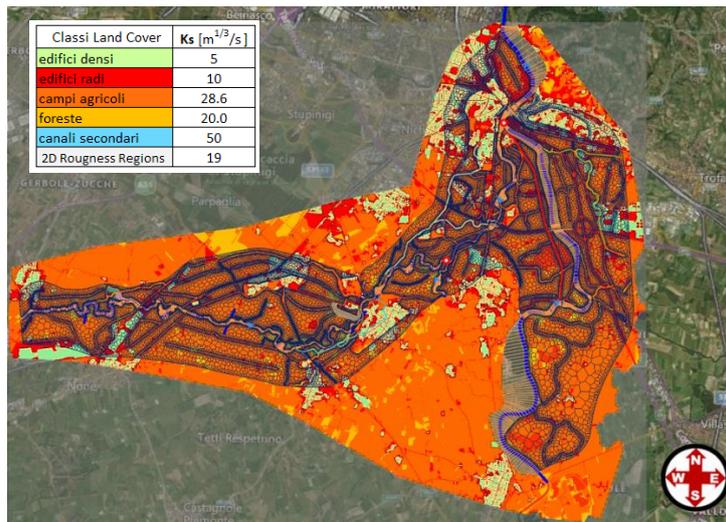


Figura 71: Valori finali del coefficiente di scabrezza di Gauckler Stickler delle sei classi di Land Cover assegnate all'area di deflusso 2D

La ricostruzione della dinamica di evento, ha tenuto conto anche delle due rotte arginali (Fig.72) verificatesi durante la piena nei pressi di strada Barauda a Moncalieri. La modellazione di queste è avvenuta inserendo lungo il rilevato arginale sinistro del torrente due strutture laterali (*Lateral Structures*) dotate di paratoie piane. Il controllo sull'apertura delle paratoie è avvenuto inserendo delle opportune condizioni al contorno (*Elevation Controlled Gates*) che hanno consentito di manovrare le paratoie in funzione della quota idrica raggiunta a monte della struttura stessa. Sulla base delle informazioni (fotografie e filmati) riportate dai tecnici AIPo durante l'evento, tali valori sono stati stimati tenendo conto che la prima rotta (posta a monte di strada Barauda) è avvenuta per sormonto del rilevato arginale mentre la seconda (a valle di str. Barauda) è avvenuta per fenomeni di erosione, come rappresentato nelle figure sottostanti.



Figura 72: Sormonto del rilevato arginale con sfioro distribuito (a sinistra) e rotta arginale con efflusso verso strada Carignano (a destra). (AIPo, 2016)

I valori assunti per il coefficiente di scabrezza hanno quindi permesso di tarare in modo soddisfacente il modello idraulico ottenendo dei risultati di estensione delle aree allagate e di altezze idrometriche, del tutto confrontabili con quelli riportati da ARPA Piemonte.

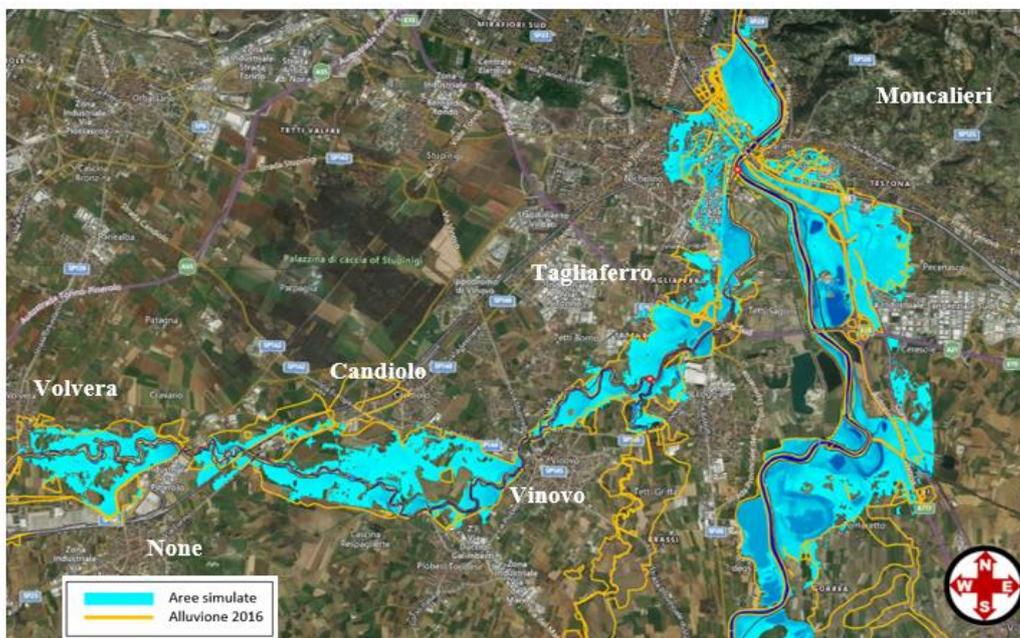


Figura 73: Confronto tra le aree allagate ottenute con il modello idrodinamico 1D-2D e il perimetro delle aree esondate dell'evento del 2016 (ARPA,2016)

Stazione idrometrica	Evento alluvionale 2016		Taratura modello		Confronto	
	Quota idrica [m.s.l.m]	Q max [m ³ /s]	Quota idrica [m.s.l.m]	Q max [m ³ /s]	ΔH [m]	ΔQ [m ³ /s]
La loggia Chisola	223,66	440	223,74	393	- 0,08	- 47
Moncalieri Po	221,29	2400	221,30	2270	- 0,01	- 130

Tabella 17: Confronto dei valori di altezza idrometrica e di portata relativi all'evento del 2016 (ARPA) con i valori ottenuti dalla taratura del modello idrodinamico combinato

Dai risultati riportati (Fig. 73) si evince come il modello idrodinamico combinato riproduca in maniera fedele le dinamiche fluviali osservate nel corso dell'evento del 2016. Gli scostamenti più rilevanti sono stati osservati in prossimità dell'abitato di Candiolo in cui l'estensione dell'esondazione non si è dimostrata al pari di quella osservata. A seguito di numerose simulazioni svolte al fine di ottenere dei risultati quanto più prossimi a quelli verificati, si ritiene che tali scostamenti siano dovuti principalmente alla sovrapposizione

dei modelli digitali del terreno che essendo caratterizzati da due risoluzioni differenti, generano in corrispondenza della linea di giunzione un errore in quota di circa ± 60 cm che tende a ostacolare la propagazione dei deflussi verso l'abitato di Candiolo. In termini di tiranti idrici, da un confronto tra le altezze d'acqua rilevate durante l'evento in tutta la piana alluvionale e i valori ottenuti dalla calibrazione del modello si è osservato come le massime differenze tra le altezze idriche siano state dell'ordine dei 30 cm, un valore più che accettabile considerate le imprecisioni e le difformità legate al dato topografico di riferimento. Un buon risultato è stato riscontrato anche nelle stazioni di misura di La Loggia Chisola e Moncalieri Po (tab. 17 sopra riportata) dove la differenza tra i valori osservati e quelli simulati si è rivelata inferiore ai 10 cm, e in prossimità degli argini di None dove è stata verificata la riduzione del franco idraulico come osservato durante l'evento di piena.

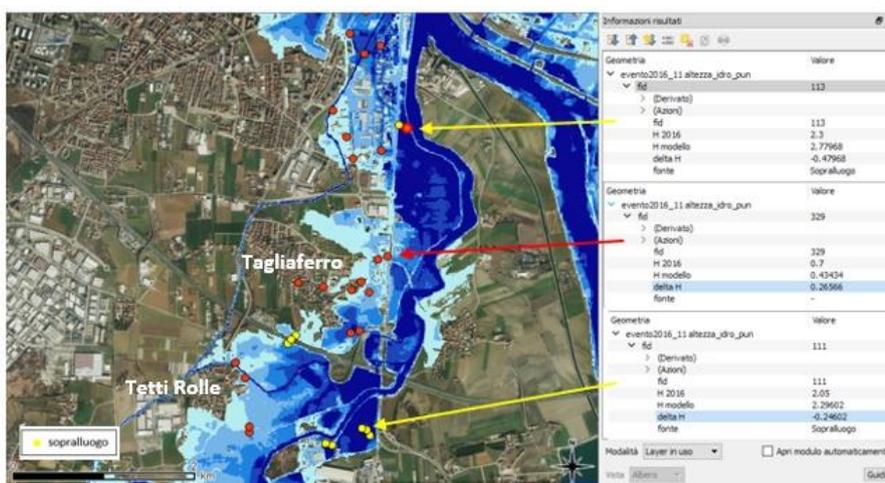


Figura 74: confronto tra altezze d'acqua osservate durante l'evento di piena e i valori ottenuti dalla taratura del modello idrodinamico (QGIS)

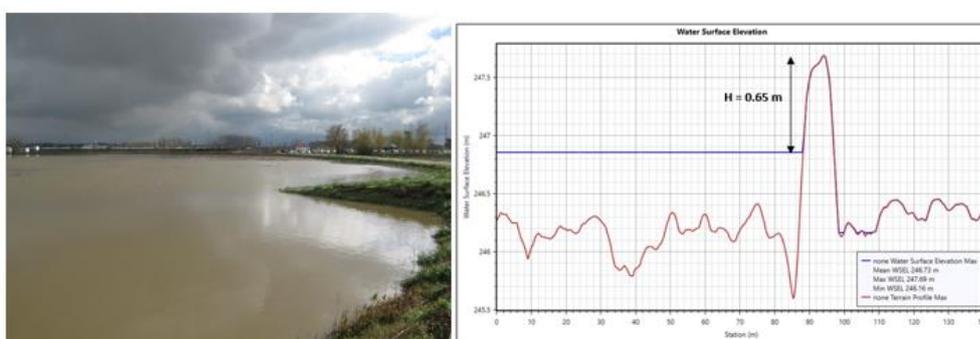


Figura 75: Confronto tra il livello idrico calcolato dal modello e quello osservato durante l'evento del 2016 in prossimità dell'argine di None (AIPo,2016)

In relazione ai risultati ottenuti, si ritiene che la fase di taratura del modello per la ricostruzione dell'evento alluvionale del 2016, abbia portato a dei risultati più che soddisfacenti, pertanto si può considerare conclusa.

5.4 Mappe di pericolosità del torrente Chisola per scenari di pericolosità: High, Medium, Low

Concluse le operazioni di taratura del modello idrodinamico si è passati alla definizione delle mappe di pericolosità del torrente Chisola per i tre scenari di riferimento indicati dalla Direttiva 2007/60/CE:

- Scenario di Alta probabilità di alluvioni (High)
- Scenario di Media probabilità di alluvioni (Medium)
- Scenario di Bassa Probabilità di alluvioni (Low)

Le mappe sono state ricavate utilizzando il modello idrodinamico tarato sull'evento del 2016 con scenari di pericolosità valutati nelle condizioni più critiche in modo da massimizzare l'estensione delle aree allagate in prossimità della confluenza del torrente Chisola con il fiume Po.

Per individuare la condizione più sfavorevole sono state condotte per ogni scenario di riferimento tre differenti simulazioni definite in modo da ottenere per le prime due il tempo di trasferimento del colmo di piena lungo i due corsi d'acqua e per la terza la concomitanza dei due colmi alla confluenza.

5.4.1 Idrogrammi di piena TR20, TR200 e TR500

I dati di *input* del modello per le simulazioni in moto vario sono stati definiti assumendo:

- per il torrente Chisola gli idrogrammi riportati nello studio del Prof. Natale “*Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola*” definiti in una sezione del

torrente prossima a quella di riferimento⁴² per tempi di ritorno di 20, 200 e 500 anni;

- per il fiume Po i valori di colmo delle portate di piena per TR 20, 200 e 500 anni riferite alla sezione 287 (La Loggia) indicate dal PGRA nel documento “*Profili di piena per i corsi d’acqua del reticolo principale*”.

Corso d’acqua	sezione	Denominazione	Q 20 [m ³ /s]	Q 200 [m ³ /s]	Q 500 [m ³ /s]
Po	287	La Loggia	1600	2400	2720

Tabella 18: Portate al colmo di piena del fiume Po relative alla sezione La Loggia in località Belvedere (PGRA,2015)

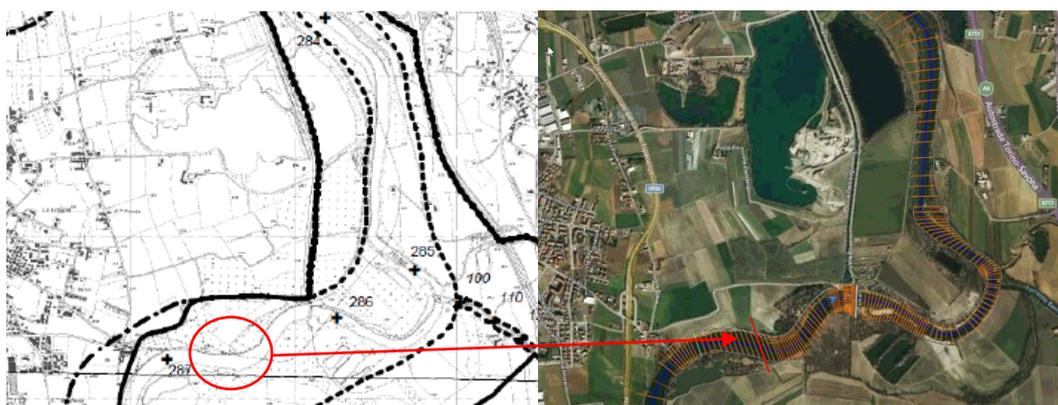


Figura 76: Indicazione della sezione 287 La Loggia nel modello idrodinamico (tavole di delimitazione delle fasce fluviali, PAI)

Dal punto di vista metodologico le onde di piena da assegnare al fiume Po sono state ricavate per ogni scenario di riferimento, amplificando l’idrogramma estratto dal modello tarato⁴³, in prossimità della sezione 281, con un coefficiente tale da eguagliare la portata al colmo al valore di portata indicato nella medesima sezione dal PGRA.

⁴² Sezione di monte del torrente Chisola, posta a valle della SP 139 nel comune di Volvera.

⁴³ La taratura del modello è avvenuta sull’evento del 25 Novembre 2016 (di cui al paragrafo 5.3)

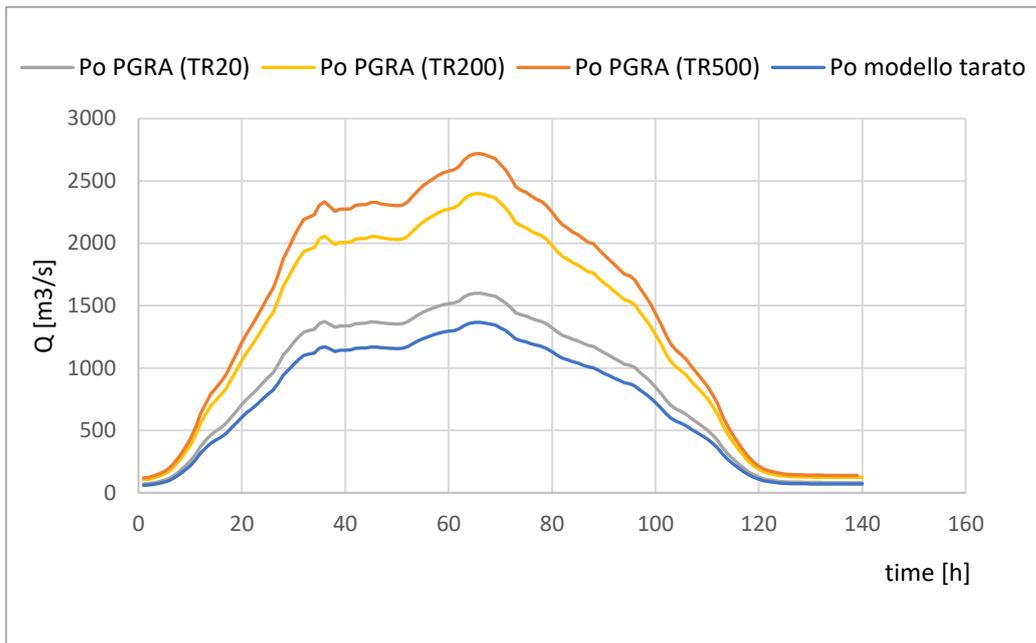


Figura 77: Idrogrammi di piena per il fiume Po ricavati alla sezione 281 (La Loggia)

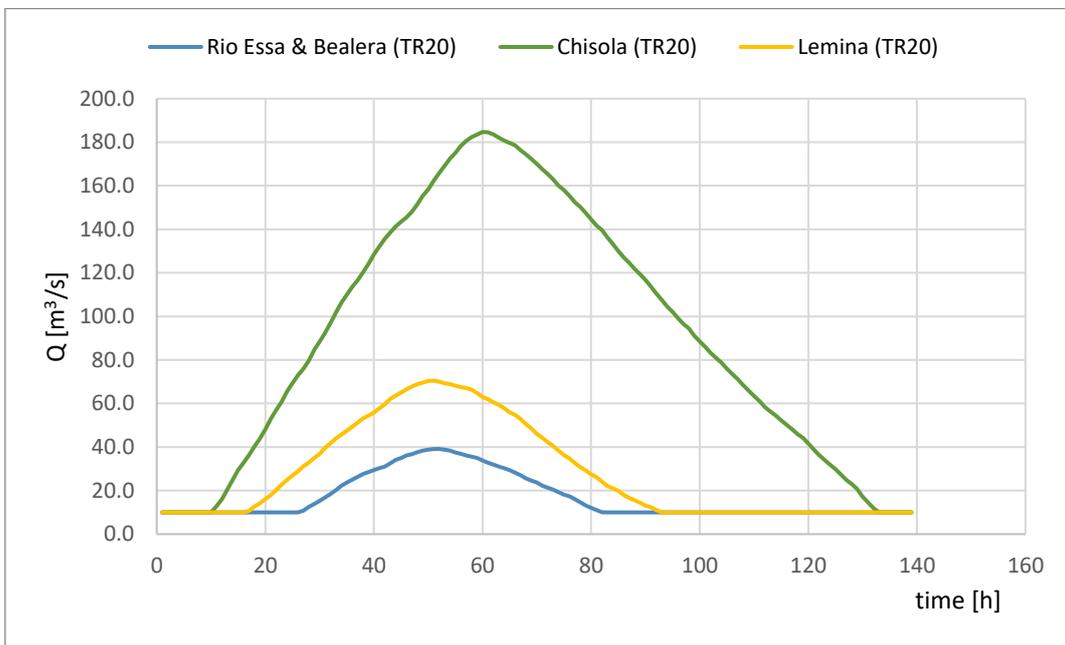


Figura 78: Idrogrammi di Piena per il torrente Chisola e affluenti nello scenario di alta pericolosità (Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola, Natale)

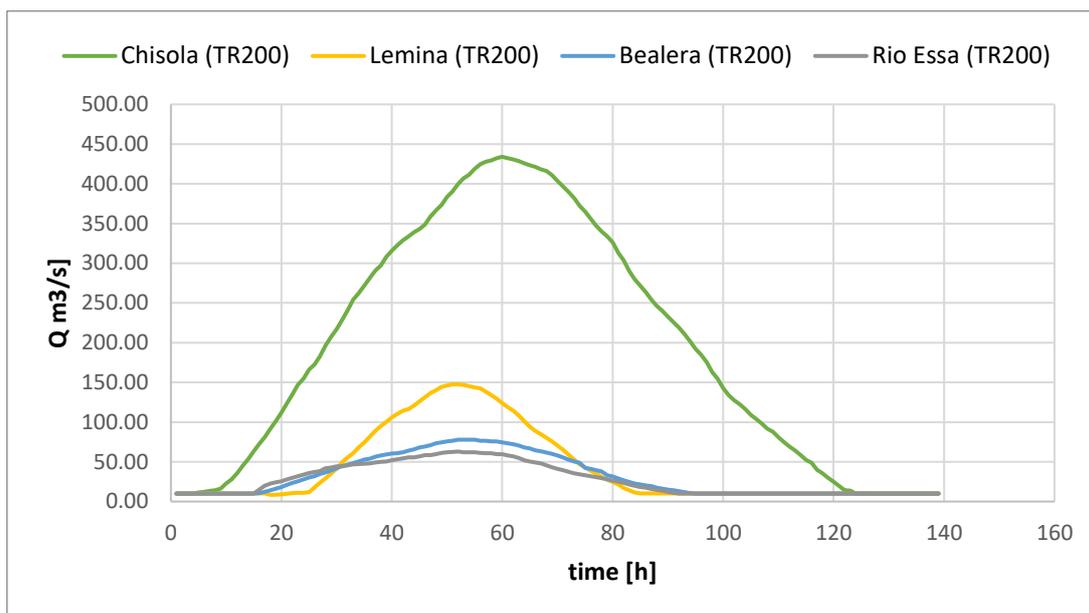


Figura 79: Idrogrammi di Piena per il torrente Chisola e affluenti nello scenario di media pericolosità (Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola, Natale)

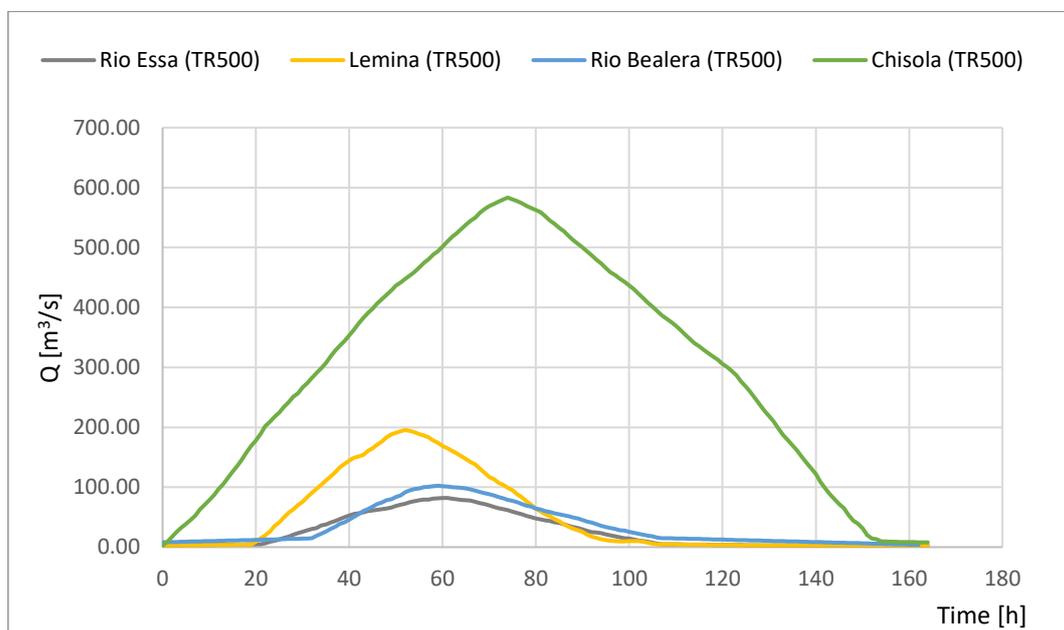


Figura 80: Idrogrammi di Piena per il torrente Chisola e affluenti nello scenario di bassa pericolosità (Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola, Natale)

Ricavati gli idrogrammi da utilizzare nel modello calibrato come condizioni al contorno, si è passati a ricavare per ogni scenario di pericolosità (elevata, media e bassa) le mappe di pericolosità del torrente Chisola valutate in termini di tiranti e velocità.

Per ricavare le mappe nelle condizioni più critiche, per ogni scenario di pericolosità sono state eseguite 3 simulazioni:

- nelle prime due è stato calcolato separatamente per i corsi d'acqua principali (Chisola e Po) il tempo di trasferimento del colmo di piena dalle sezioni di monte sino alla confluenza, utilizzando come dati di ingresso del modello gli idrogrammi associati allo scenario inizialmente considerato;
- sulla base dei dati ottenuti dalle prime due, nell'ultima simulazione è stata eseguita una traslazione del colmo di piena del fiume Po in modo da massimizzare per lo scenario di riferimento l'estensione delle aree allagate sul torrente Chisola in prossimità della confluenza.

A seguire vengono riportati per ogni scenario di riferimento i risultati in termini di massimi valori di tiranti e velocità ottenuti per ciascuna delle tre simulazioni considerate.

5.4.2 Scenario di pericolosità elevata (H)

5.4.2.1 Simulazione Chisola TR20

Per questa simulazione, come condizioni al contorno del modello si è utilizzato sul torrente Chisola e affluenti gli idrogrammi per tempo di ritorno pari a 20 anni (Fig. 78) e sul fiume Po una portata relativamente bassa, tale da non influenzare lo studio sul Chisola. Dai risultati ottenuti si è osservato che l'onda di piena del Chisola impiega cinque ore per transitare dalla sezione di monte (Volvera) sino alla confluenza con il Po nel comune di Moncalieri. A seguire i risultati ottenuti.

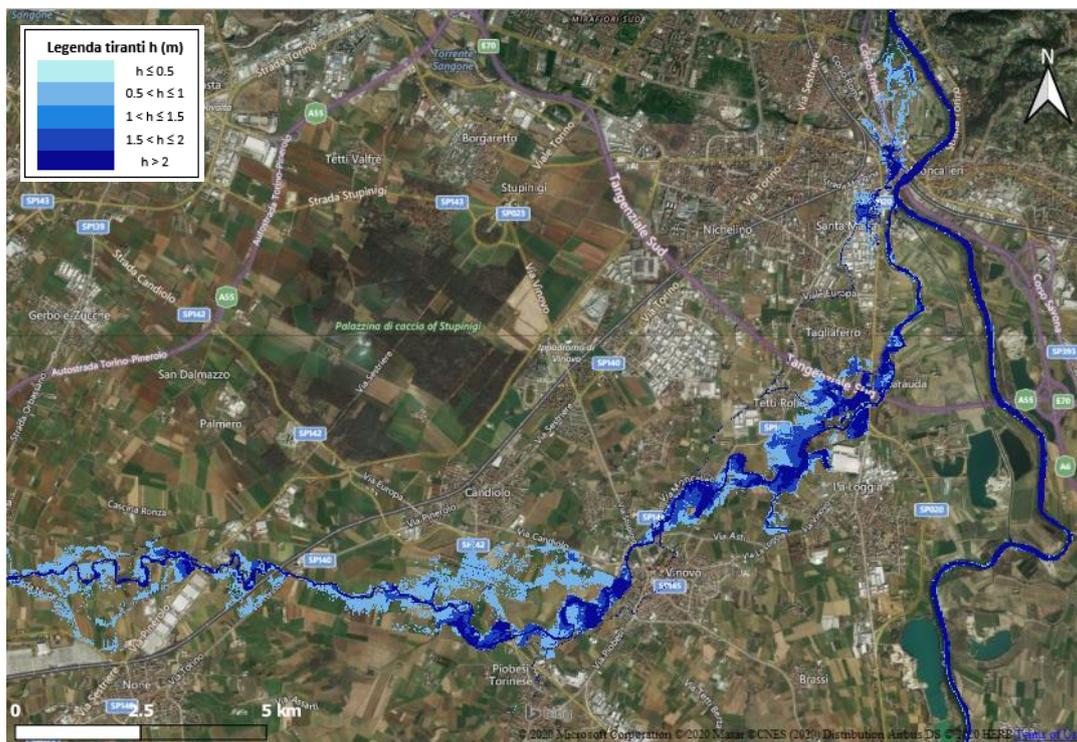


Figura 81: Mappa di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di elevata pericolosità (H)

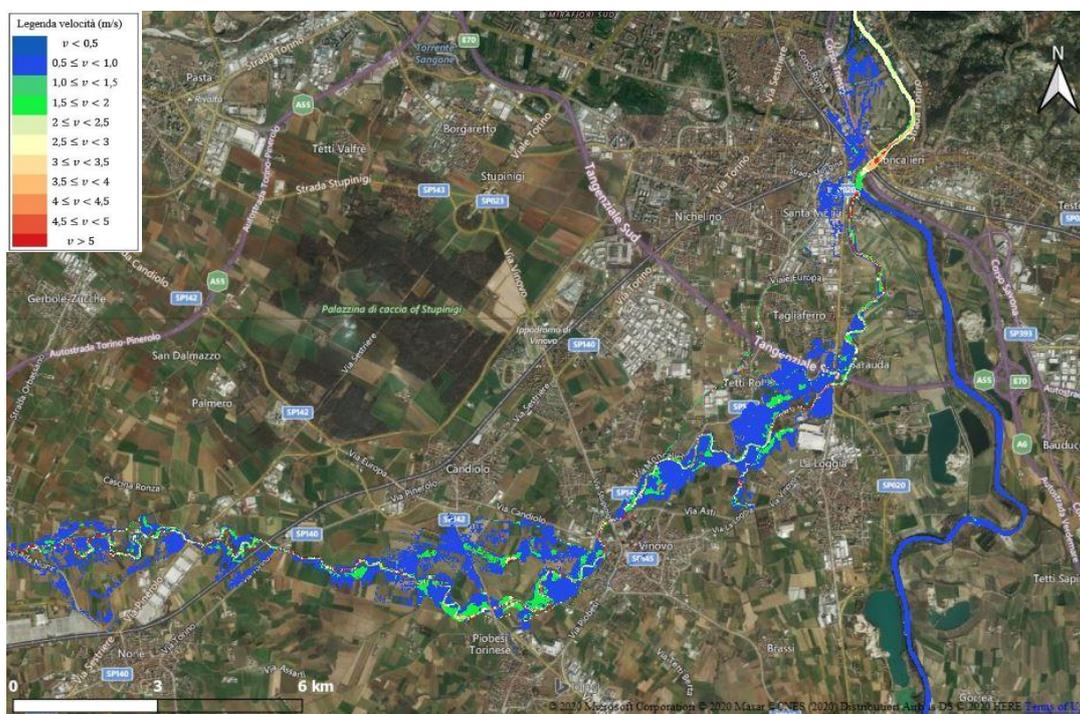


Figura 82: Mappa di pericolosità delle massime velocità per lo scenario di elevata pericolosità (H)

5.4.2.2 Simulazione Po TR20

In questa seconda simulazione come condizioni al contorno del modello sul fiume Po è stato utilizzato l'idrogramma per tempo di ritorno pari a 20 anni (Fig. 78) mentre sul torrente Chisola e affluenti sono stati utilizzati dei valori delle portate costanti relativamente basse, tali da non influenzare lo studio sul fiume Po. Dai risultati ottenuti si è osservato che l'onda di piena del fiume Po impiega due ore per transitare dalla sezione di monte (Carignano) sino alla confluenza con il Chisola nel comune di Moncalieri. A seguire i risultati ottenuti.

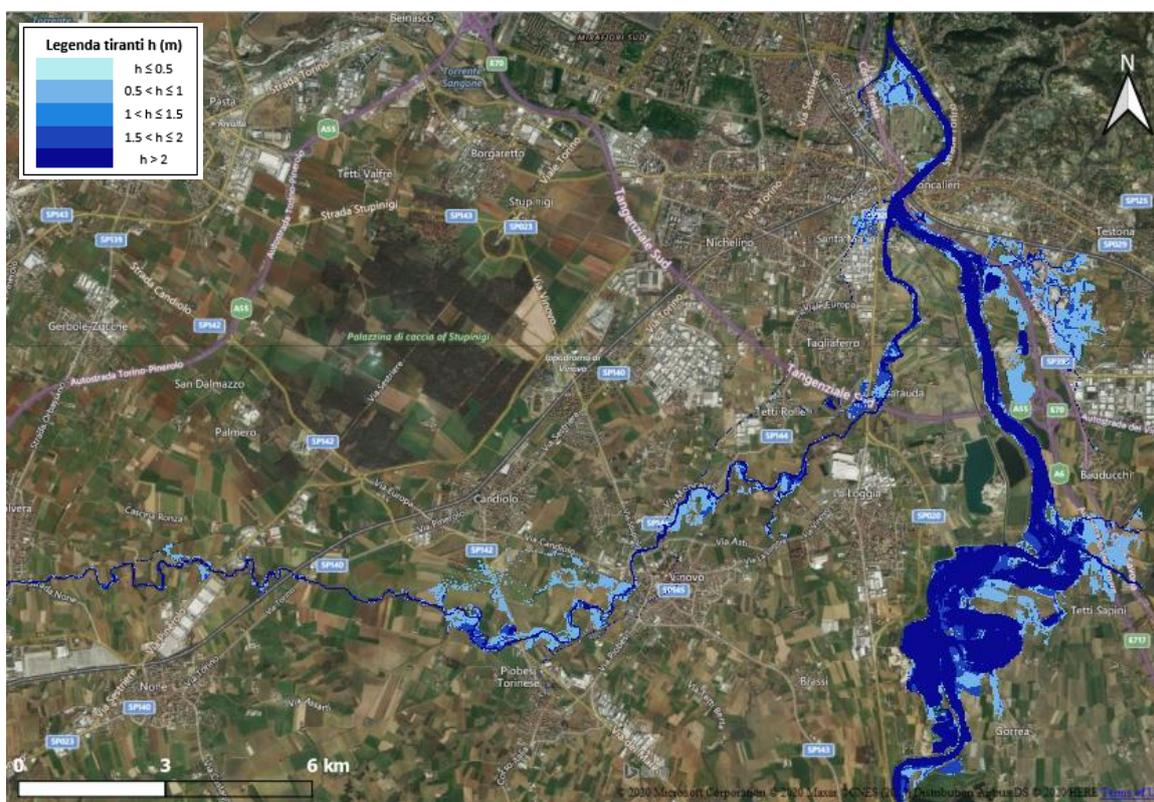


Figura 83: Mappa di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di elevata pericolosità (H)

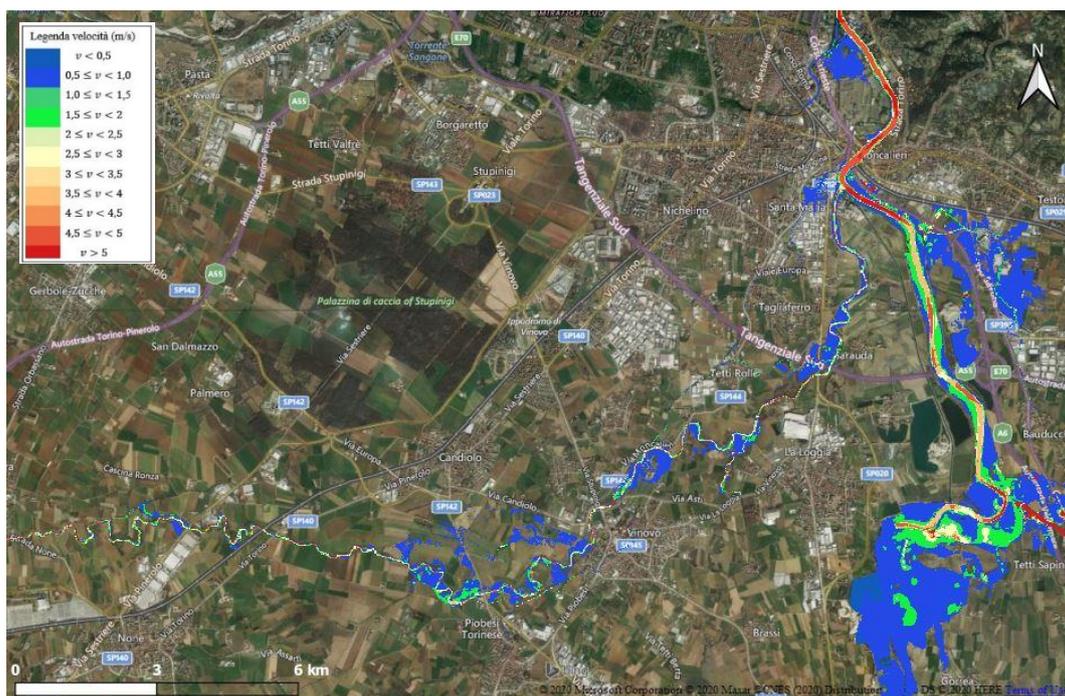


Figura 84: Mappa di pericolosità delle massime velocità per lo scenario di elevata pericolosità (H)

5.4.2.3 Simulazione Po-Chisola TR20

Nella terza simulazione, come condizioni al contorno del modello, sul torrente Chisola e affluenti sono stati utilizzati gli stessi idrogrammi utilizzati nella simulazione “ChisolaTR20” mentre sul fiume Po, sulla base delle informazioni ottenute dalla precedente simulazione, è stato usato l'idrogramma per tempo di ritorno pari a 20 anni (Fig. 78) opportunamente traslato in modo da massimizzare l'estensione delle aree allagate alla confluenza.

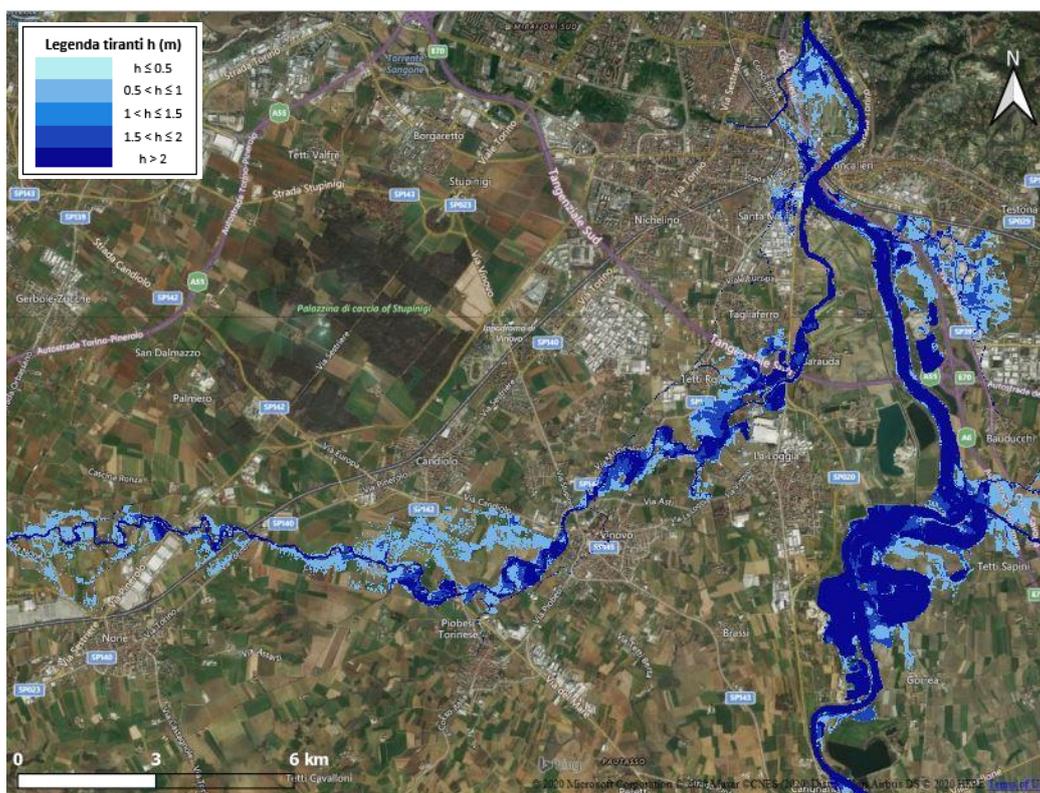


Figura 85: Mappe di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di elevata pericolosità (H) ricavate nelle condizioni di pericolosità più critiche

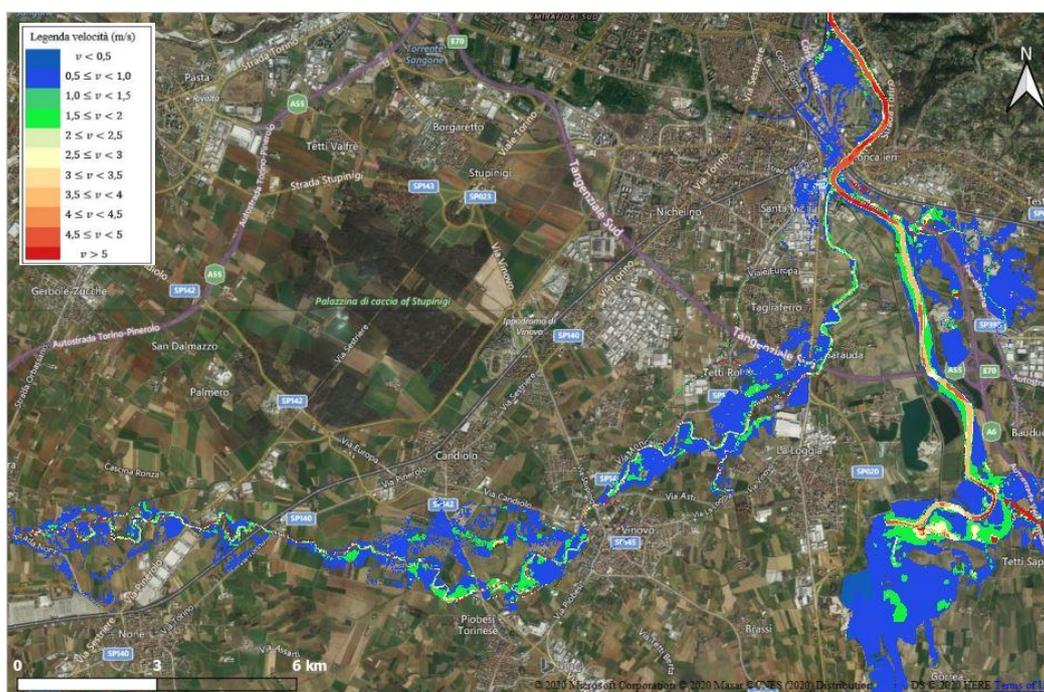


Figura 86: Mappe di pericolosità delle massime velocità per lo scenario di elevata pericolosità (H) ricavate nelle condizioni di pericolosità più critiche

5.4.3 Scenario di pericolosità media (M)

5.4.3.1 Simulazione Chisola TR200

Per questa simulazione, come condizioni al contorno del modello sono stati utilizzati sul torrente Chisola e affluenti gli idrogrammi per tempo di ritorno pari a 200 anni (Fig. 79) e sul fiume Po una portata relativamente bassa, tale da non influenzare lo studio sul Chisola. Dai risultati ottenuti si è osservato che l'onda di piena del Chisola impiega quattro ore e mezza per transitare dalla sezione di monte (Volvera) sino alla confluenza con il Po nel comune di Moncalieri. A seguire i risultati ottenuti.

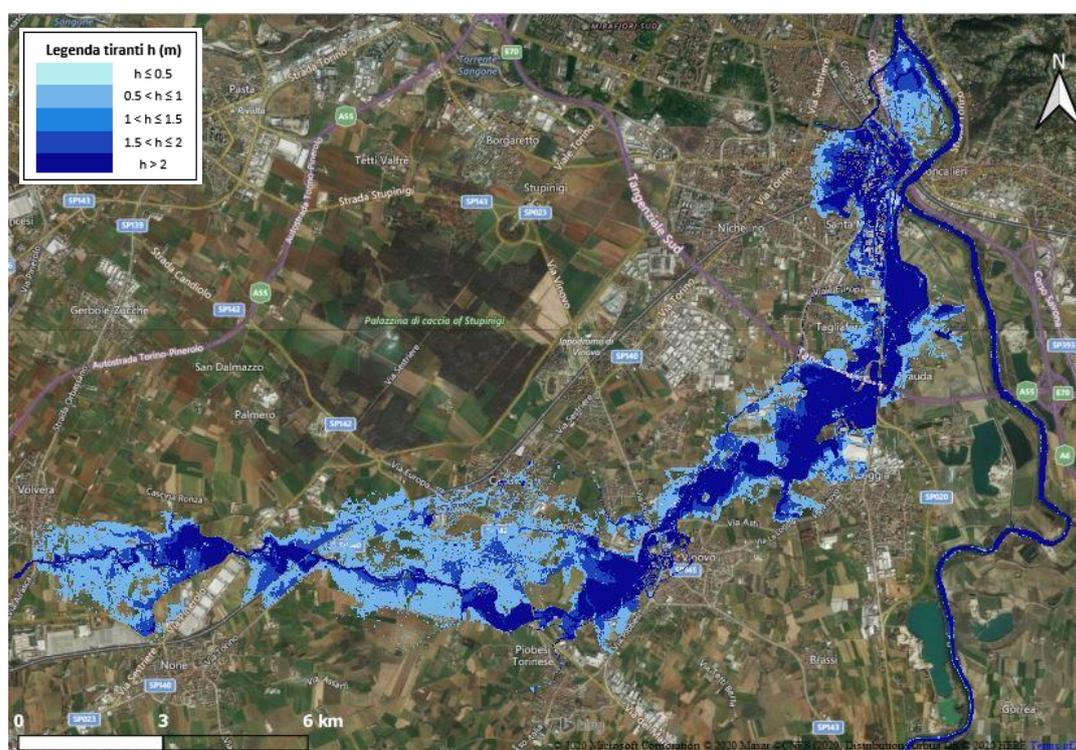


Figura 87: Mappa di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di media pericolosità (M)

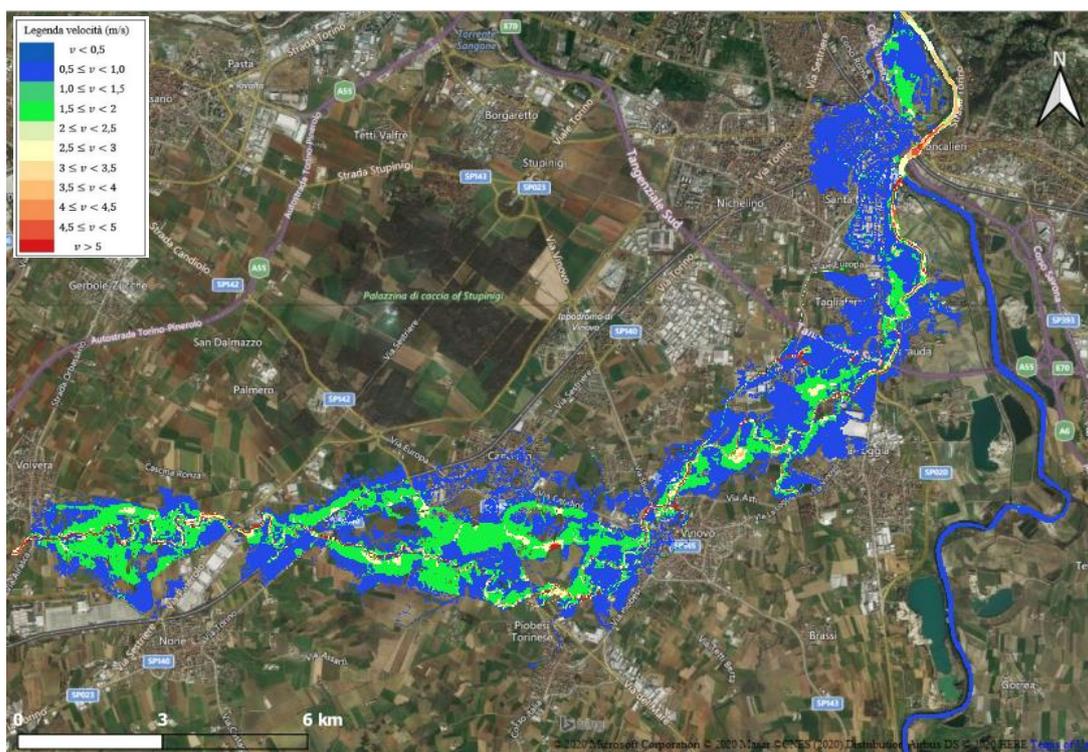


Figura 88: Mappa di pericolosità delle massime velocità per lo scenario media pericolosità (M)

5.4.3.2 Simulazione Po TR200

In questa seconda simulazione, come condizioni al contorno del modello, sul fiume Po è stato utilizzato l'idrogramma per tempo di ritorno pari a 200 anni (Fig. 79) mentre sul torrente Chisola e affluenti sono state utilizzate delle portate costanti relativamente basse, tali da non influenzare lo studio sul fiume Po. Dai risultati ottenuti si è osservato che l'onda di piena del fiume Po impiega due ore per transitare dalla sezione di monte (Carignano) sino alla confluenza con il Chisola nel comune di Moncalieri. A seguire i risultati ottenuti.

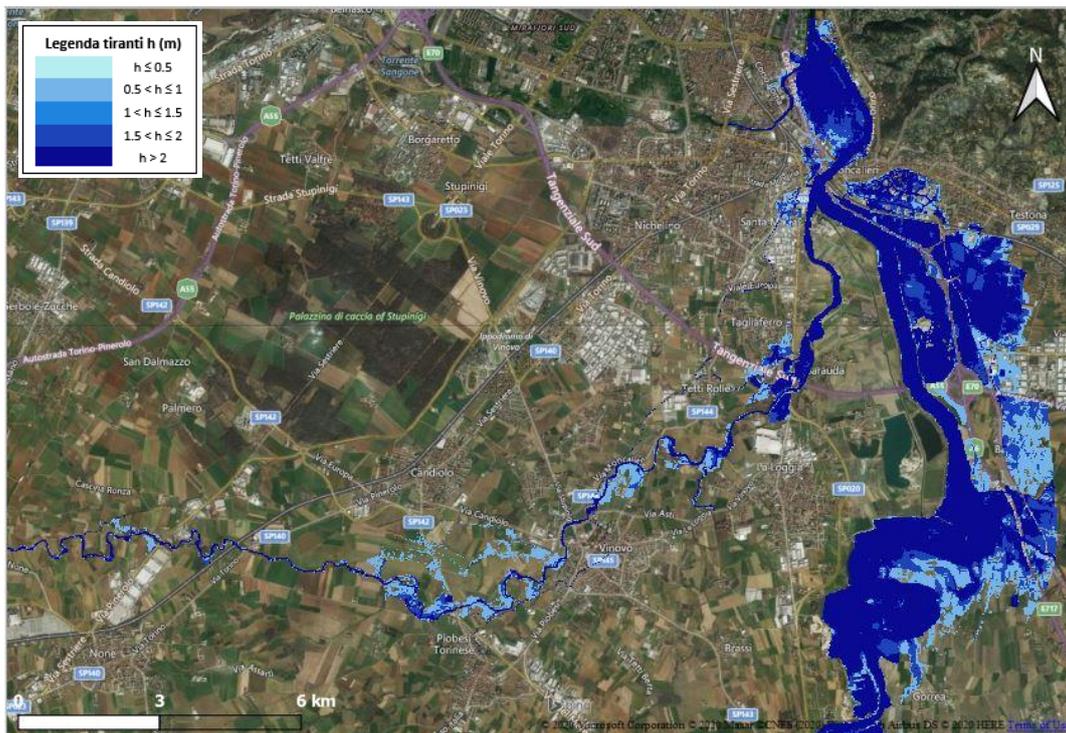


Figura 89: Mappa di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di media pericolosità (M)

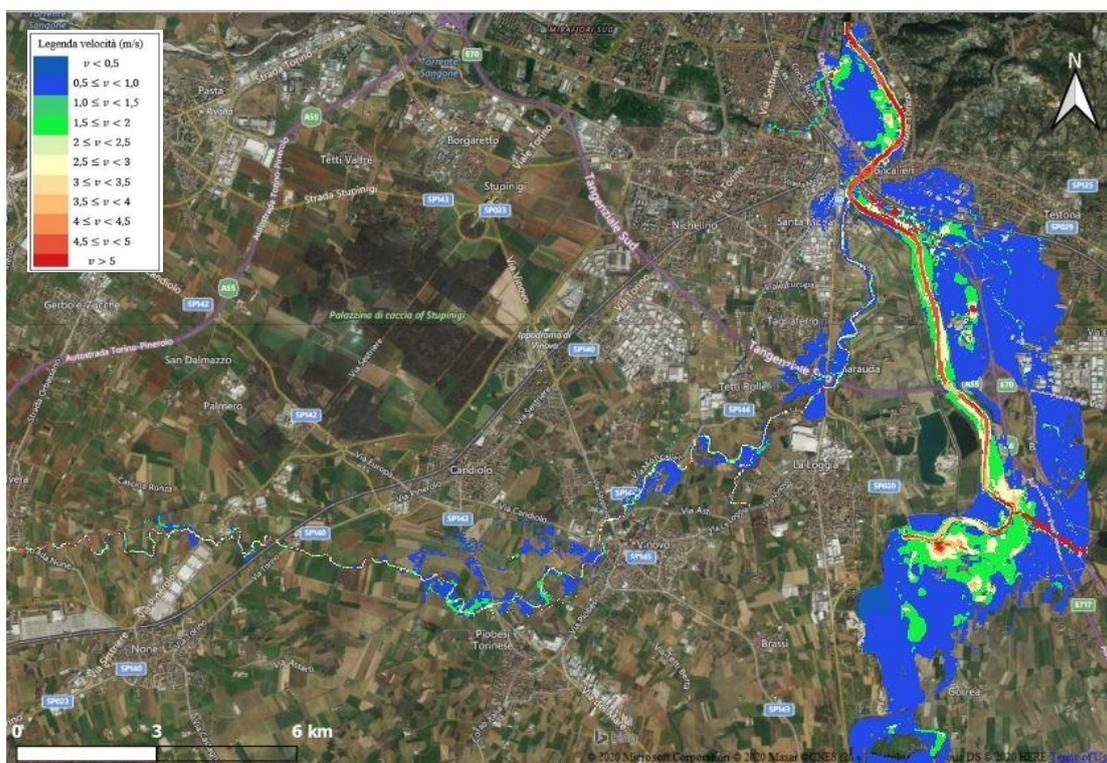


Figura 90: Mappa di pericolosità delle massime velocità per lo scenario di media pericolosità (M)

5.4.3.3 Simulazione Po-Chisola TR200

In questa terza simulazione, come condizioni al contorno del modello, sul torrente Chisola e affluenti sono stati utilizzati gli stessi idrogrammi utilizzati nella simulazione “ChisolaTR200” mentre sul fiume Po, sulla base delle informazioni ottenute dalla precedente simulazione, è stato usato l'idrogramma per tempo di ritorno pari a 200 anni (Fig. 79) opportunamente traslato in modo da massimizzare l'estensione delle aree allagate alla confluenza.

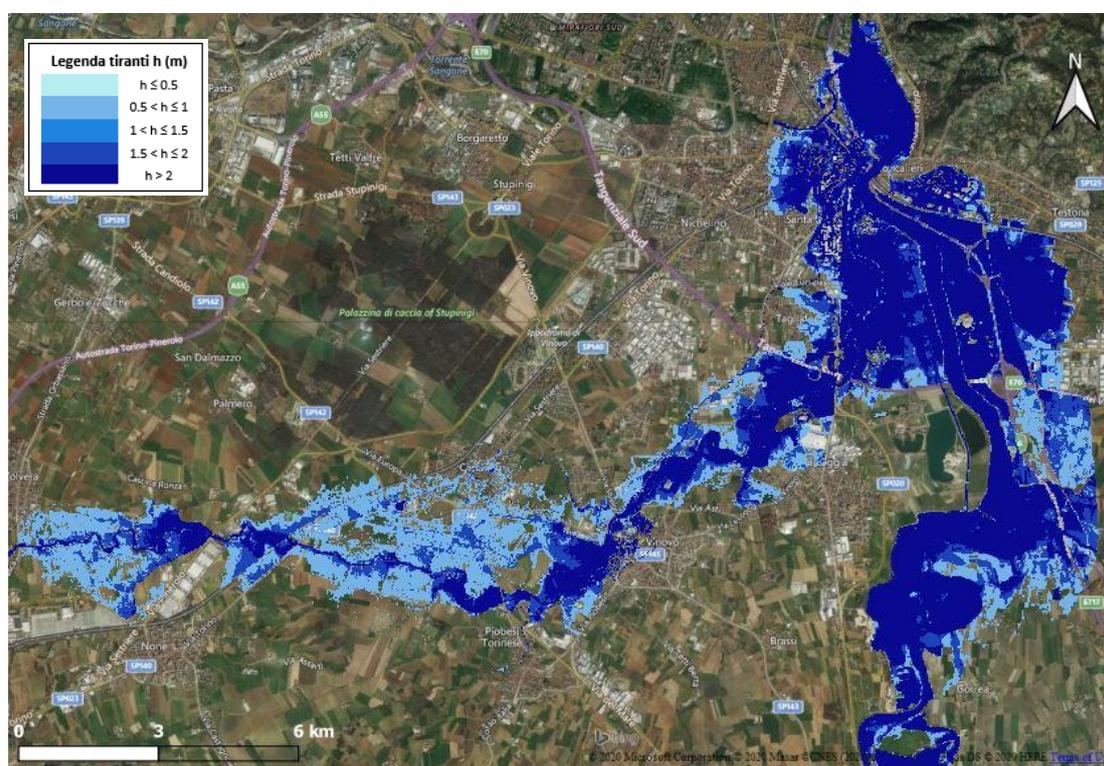


Figura 91: Mappe di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di media pericolosità (M) ricavate nelle condizioni di pericolosità più critiche

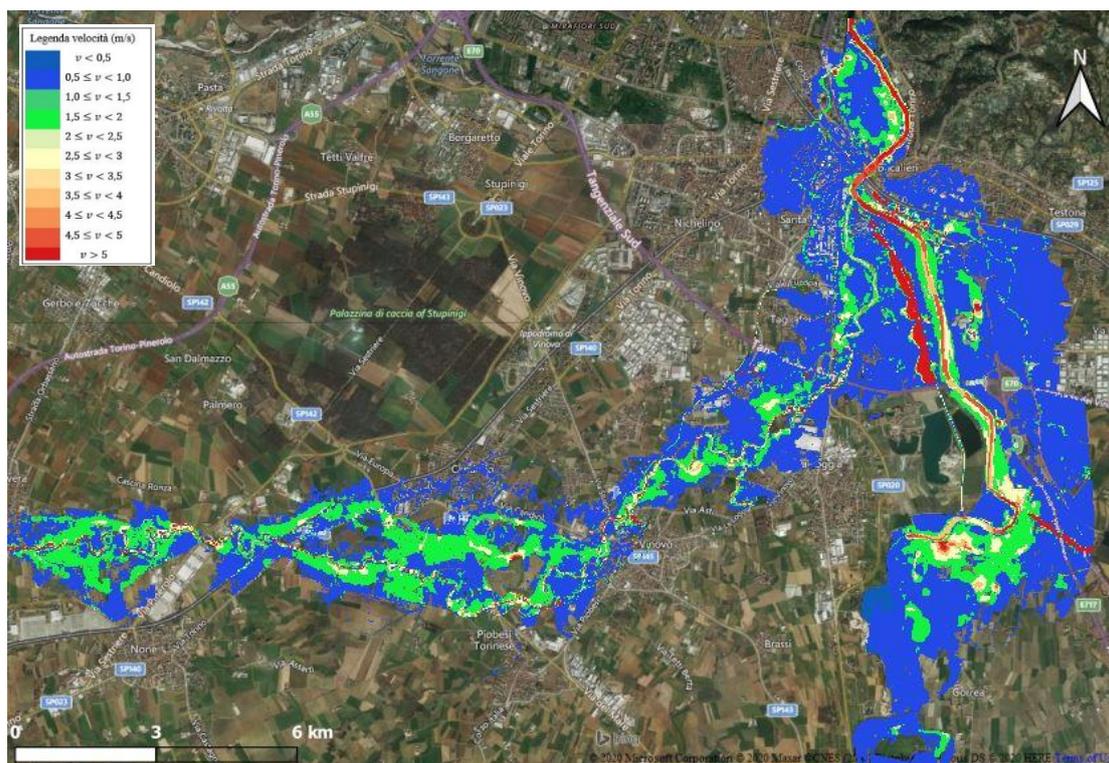


Figura 92: Mappe di pericolosità delle massime velocità per lo scenario di media pericolosità (M) ricavate nelle condizioni di pericolosità più critiche

5.4.4 Scenario di pericolosità bassa (L)

5.4.4.1 Simulazione Chisola TR500

Per questa simulazione, come condizioni al contorno del modello si è utilizzato sul torrente Chisola e affluenti gli idrogrammi per tempo di ritorno pari a 500 anni (Fig. 80) e sul fiume Po una portata relativamente bassa, tale da non influenzare lo studio sul Chisola. Dai risultati ottenuti si è osservato che l'onda di piena del Chisola impiega tre ore per transitare dalla sezione di monte (Volvera) sino alla confluenza con il Po nel comune di Moncalieri. A seguire i risultati ottenuti.

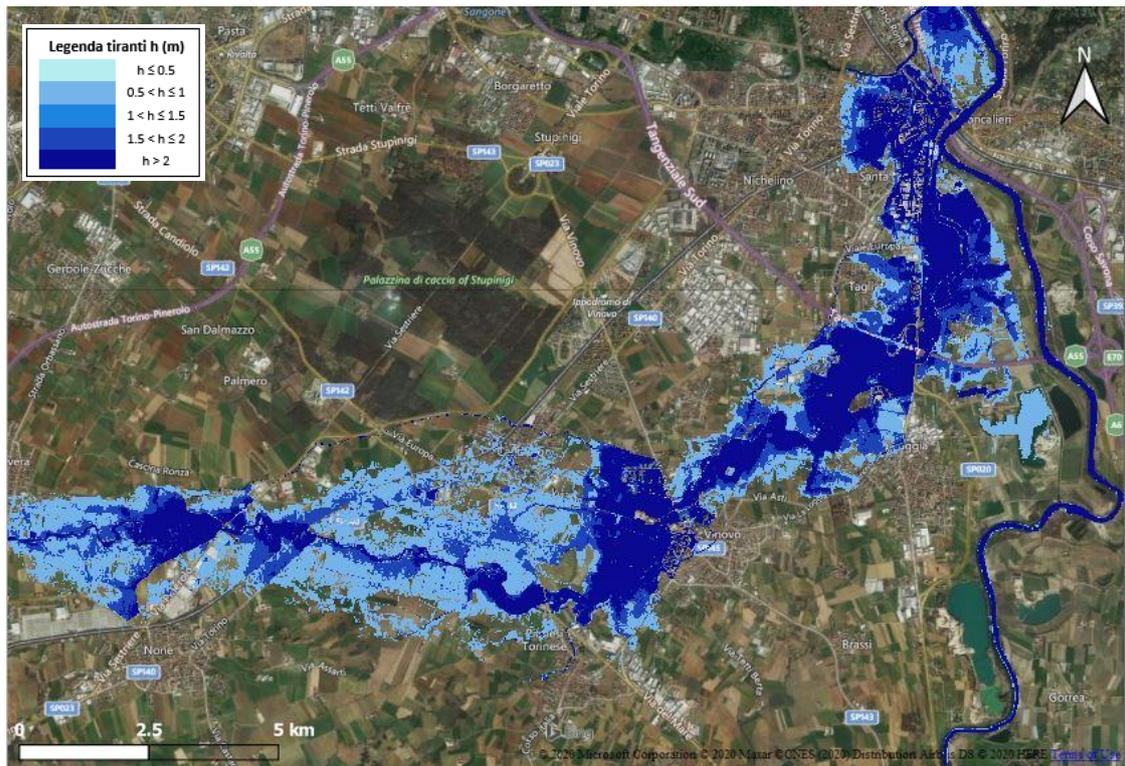


Figura 93: Mappa di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di bassa pericolosità (L)

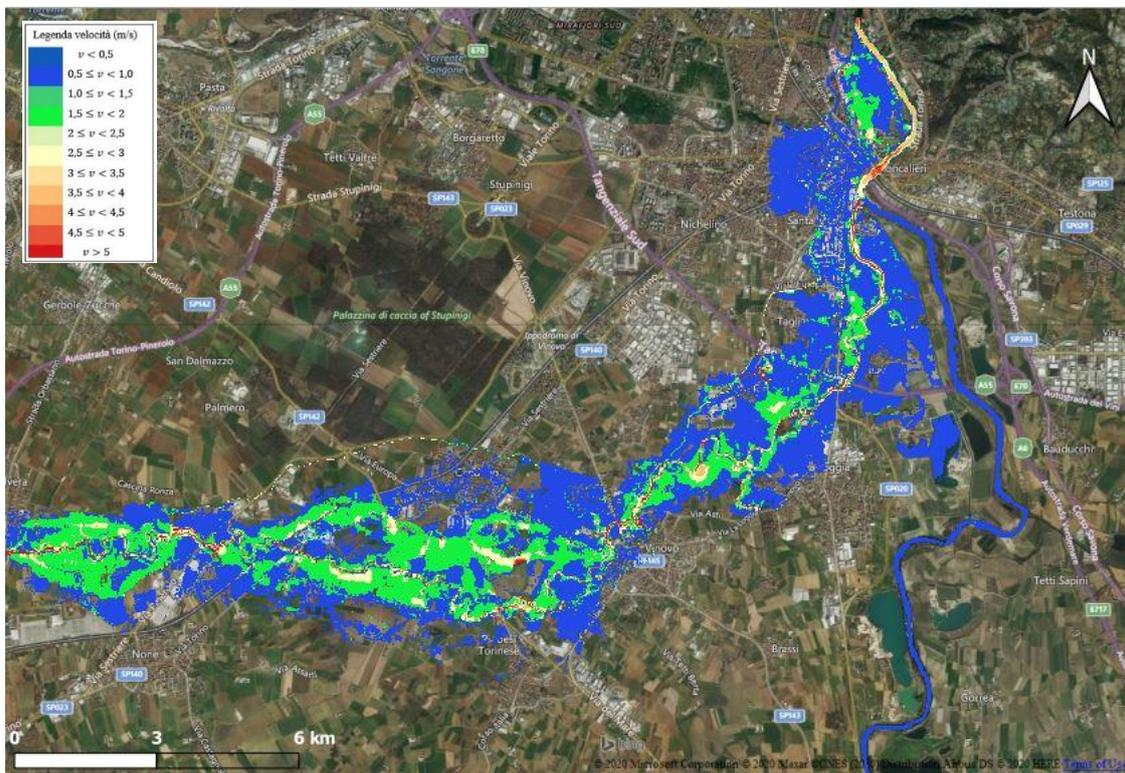


Figura 94: Mappa di pericolosità delle massime velocità per lo scenario di bassa pericolosità (L)

5.4.4.2 Simulazione Po TR500

In questa seconda simulazione come condizioni al contorno del modello sul fiume Po è stato utilizzato l'idrogramma per tempo di ritorno pari a 500 anni (Fig. 80) mentre sul torrente Chisola e affluenti sono state utilizzate delle portate costanti relativamente basse, tali da non influenzare lo studio sul fiume Po. Dai risultati ottenuti si è osservato che l'onda di piena del fiume Po impiega tre ore per transitare dalla sezione di monte (Carignano) sino alla confluenza con il Chisola nel comune di Moncalieri. A seguire i risultati ottenuti.

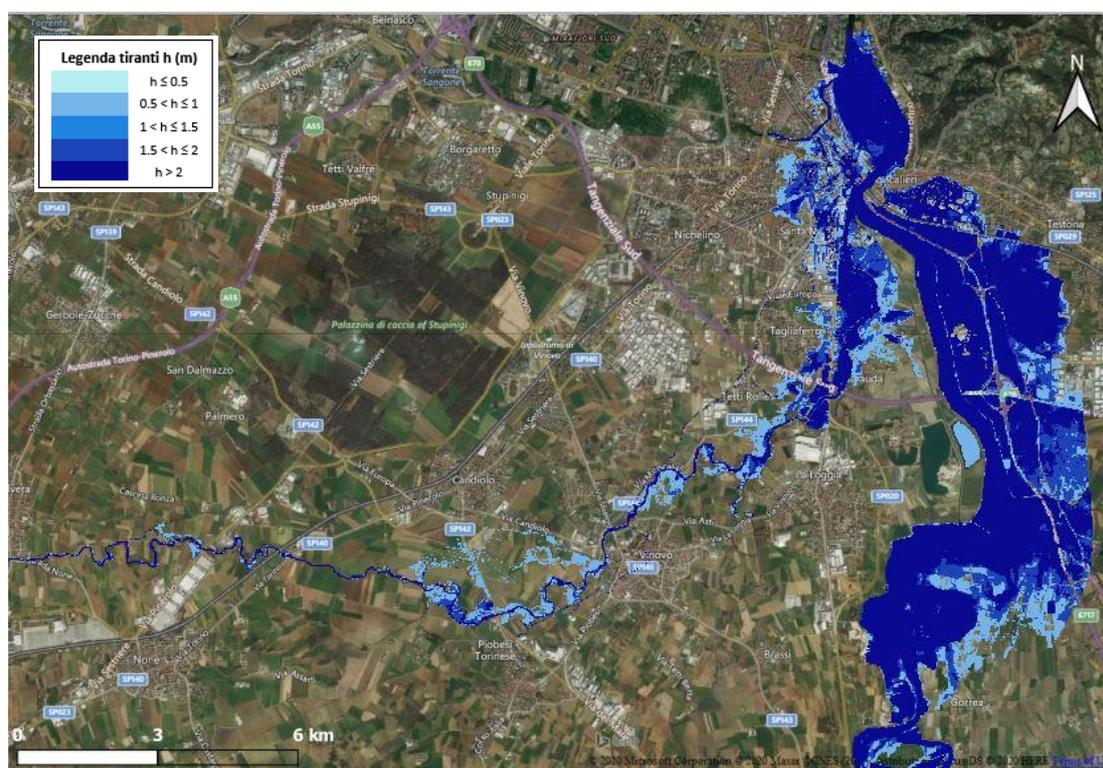


Figura 95: Mappa di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di bassa pericolosità (L)

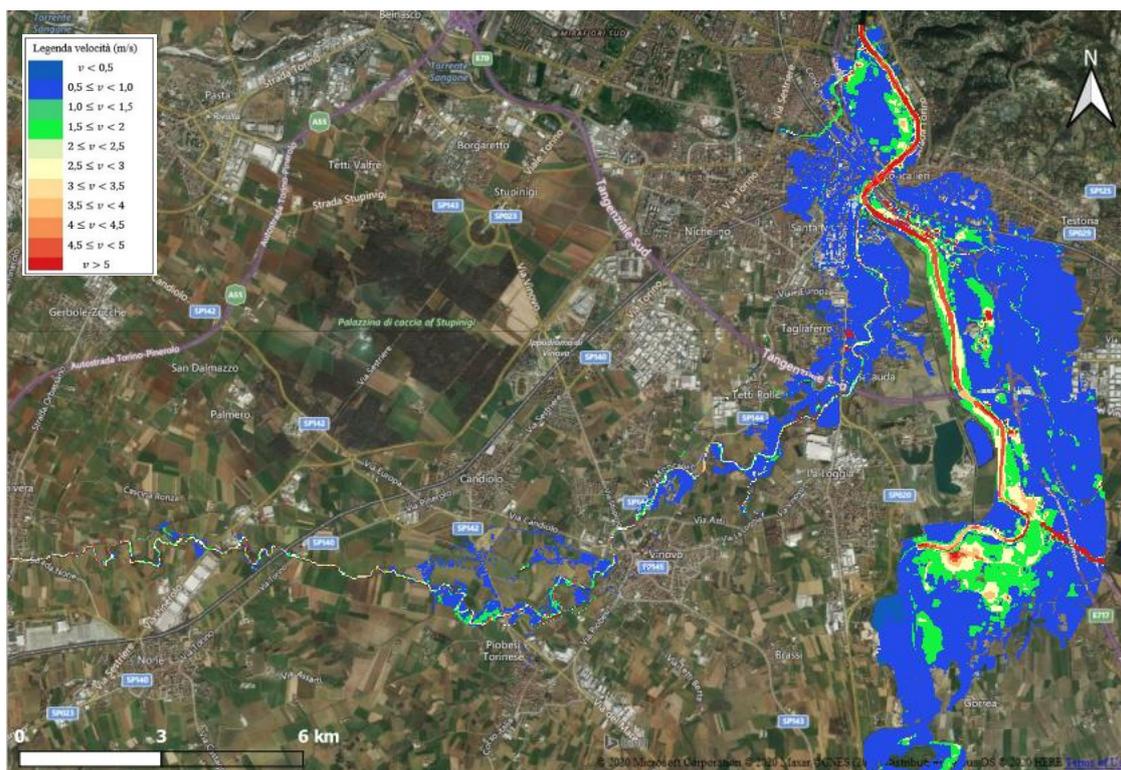


Figura 96: Mappa di pericolosità delle massime velocità per lo scenario di bassa pericolosità (L)

5.4.4.3 Simulazione Po-Chisola TR500

In questa terza simulazione, come condizioni al contorno del modello, sul torrente Chisola e affluenti sono stati utilizzati gli stessi idrogrammi utilizzati nella simulazione “ChisolaTR500” mentre sul fiume Po, sulla base delle informazioni ottenute dalla precedente simulazione, è stato usato l’idrogramma per tempo di ritorno pari a 500 anni (Fig. 80) opportunamente traslato in modo da massimizzare l’estensione delle aree allagate alla confluenza.

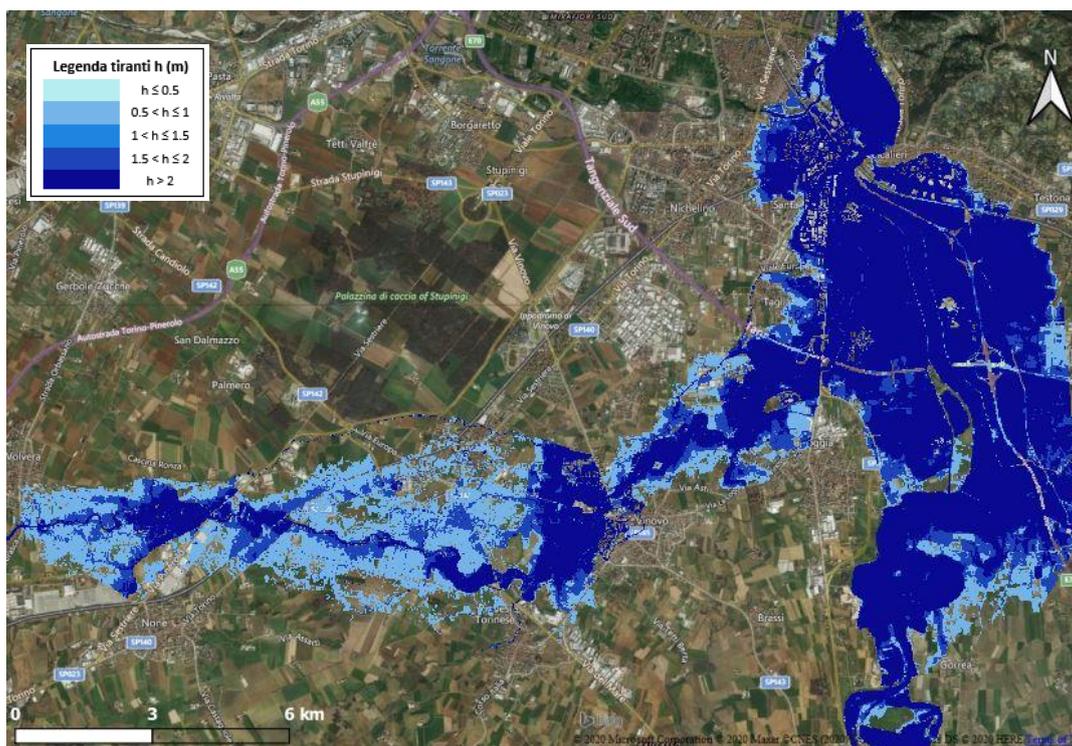


Figura 97: Mappe di pericolosità dei massimi tiranti per lo scenario di bassa pericolosità (L) ricavate nelle condizioni di pericolosità più critiche

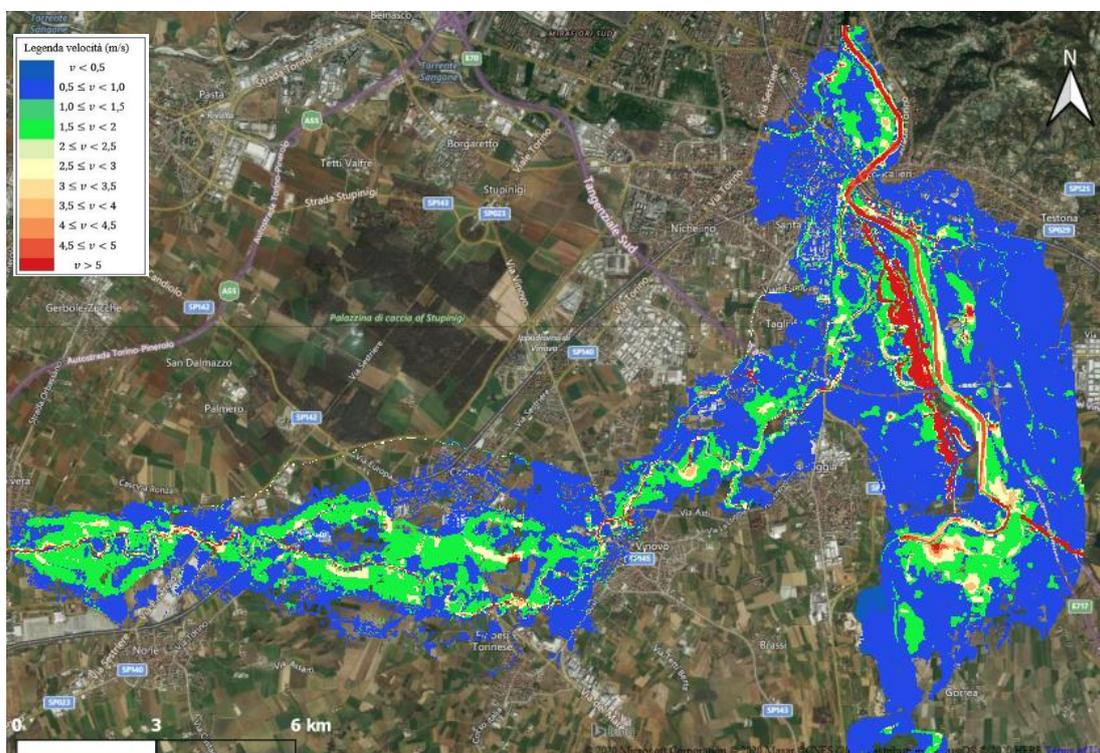


Figura 98: Mappe di pericolosità delle massime velocità per lo scenario di bassa pericolosità (L) ricavate nelle condizioni di pericolosità più critiche

5.5 Confronto dei risultati

Questo paragrafo è dedicato al confronto delle mappe di pericolosità del torrente Chisola, espresse in termini di aree allagate e di tiranti idrici, ottenute per ciascun scenario di pericolosità con i due metodi adottati, ovvero quello speditivo caratterizzato da un basso livello di confidenza (capitolo 4) e il metodo di dettaglio a cui è associato un livello di confidenza più elevato (capitolo 5). Le mappe sono state sovrapposte in modo da evidenziare le analogie e le differenze sull'estensione delle aree allagate osservando anche le variazioni dei tiranti idrici. Il confronto, per i tre scenari di pericolosità (Low, Medium, High), ha riguardato le mappe del primo ciclo di gestione del PGRA ottenute con il metodo speditivo e le mappe ricavate nelle condizioni più critiche dal modello combinato 1D-2D, quest'ultime definite in modo da massimizzare le aree allagate del torrente Chisola in prossimità della confluenza con il fiume Po.

Ai fini di un confronto macroscopico e conoscitivo, l'area esaminata è stata suddivisa in due zone, sulla base dell'estensione delle mappe ricavate con il metodo speditivo:

- Zona 1: dal comune di Piobesi Torinese al rilevato A55 della Tangenziale Sud di Torino;
- Zona 2: dal Rilevato della A55-Tangenziale Sud di Torino sino alla confluenza in Po a Moncalieri.

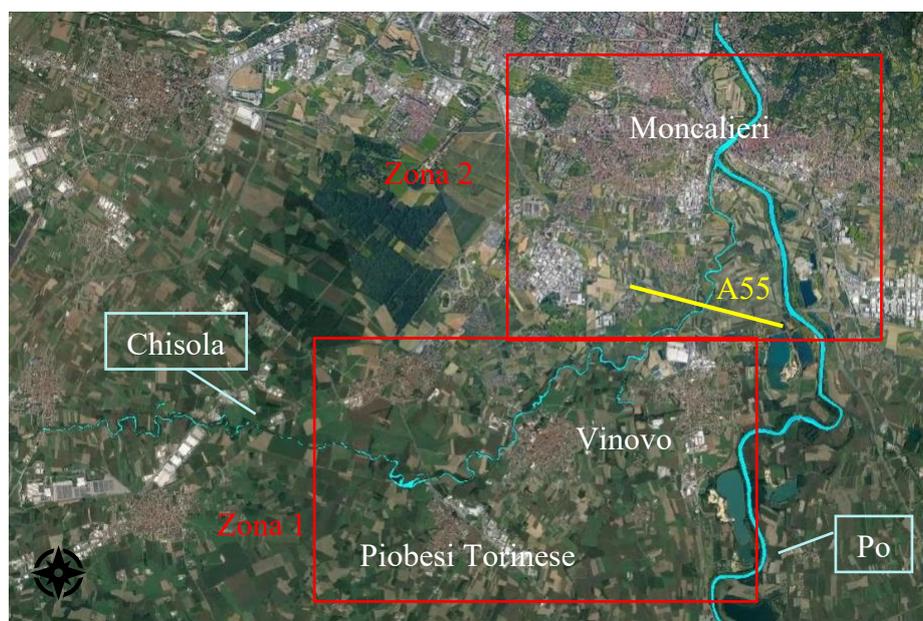


Figura 99: Suddivisione dell'area di interesse

5.5.1 Scenario di elevata pericolosità (TR20)

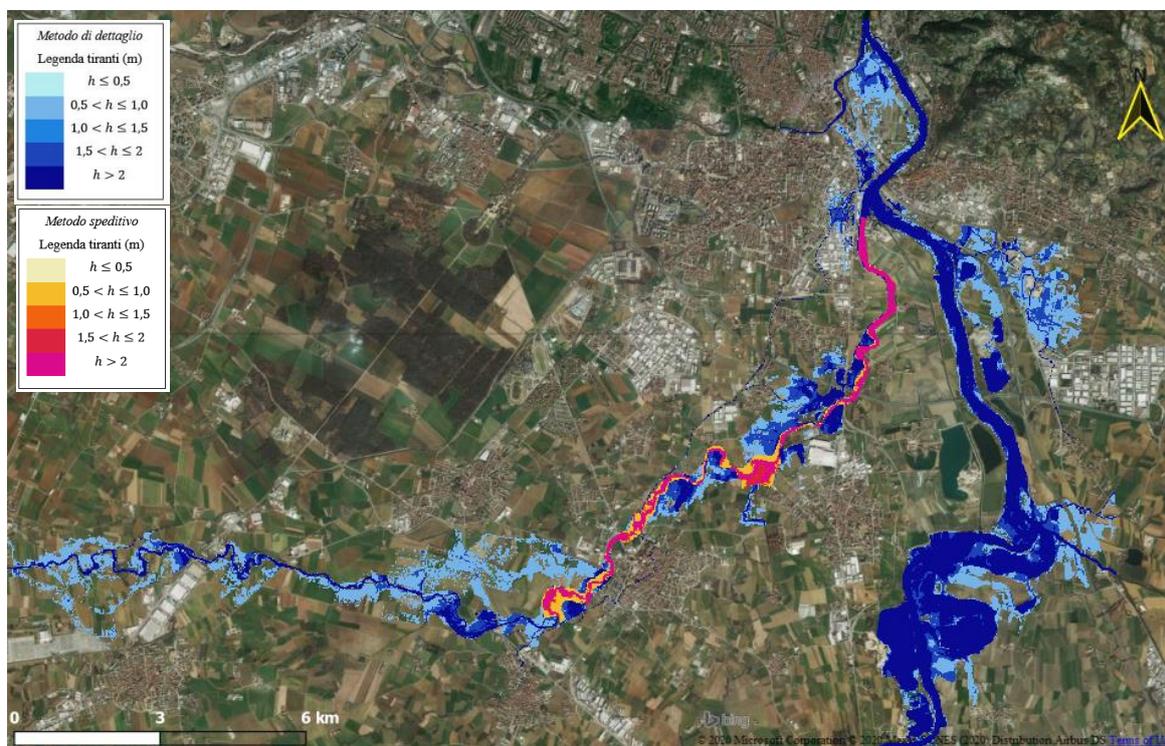


Figura 100: Confronto tra le mappe dei massimi tiranti ricavate con il metodo speditivo (in rosso) e quelle ricavate con il modello matematico nelle condizioni più critiche (in azzurro), per uno scenario di pericolosità elevata (TR20)

Da un primo confronto sull'estensione delle aree allagate si osserva che i risultati dei due modelli coincidono lungo il tratto arginato ricadente nella seconda zona di studio. In entrambi i casi, infatti, i livelli idrici sono contenuti all'interno dei rilevati arginali esistenti, confinando il deflusso idrico all'interno della sezione composta dall'alveo inciso e dai rilevati arginali stessi. All'interno della prima zona, a monte dell'abitato di Vinovo, le aree risultano confrontabili, mentre si discostano maggiormente a valle della confluenza con il Torrente Lemina, dove la dinamica della corrente nelle aree golenali è evidenziata solo dal modello matematico. In termini di tiranti, nel modello matematico, i livelli sono sempre superiori, infatti le maggiori differenze sono lungo l'asta del fiume con incremento dei livelli idrici di circa un metro e mezzo, con punte di due metri, in prossimità dei rilevati arginali di Moncalieri. Inoltre dal modello matematico è possibile ottenere le informazioni sulle condizioni di deflusso sotto le luci dei ponti ma in questo scenario non è stata riscontrata nessuna criticità, i deflussi avvengono tutti a luce libera rispettando il franco idraulico ($f=1m$).

5.5.2 Scenario di media pericolosità (TR200)

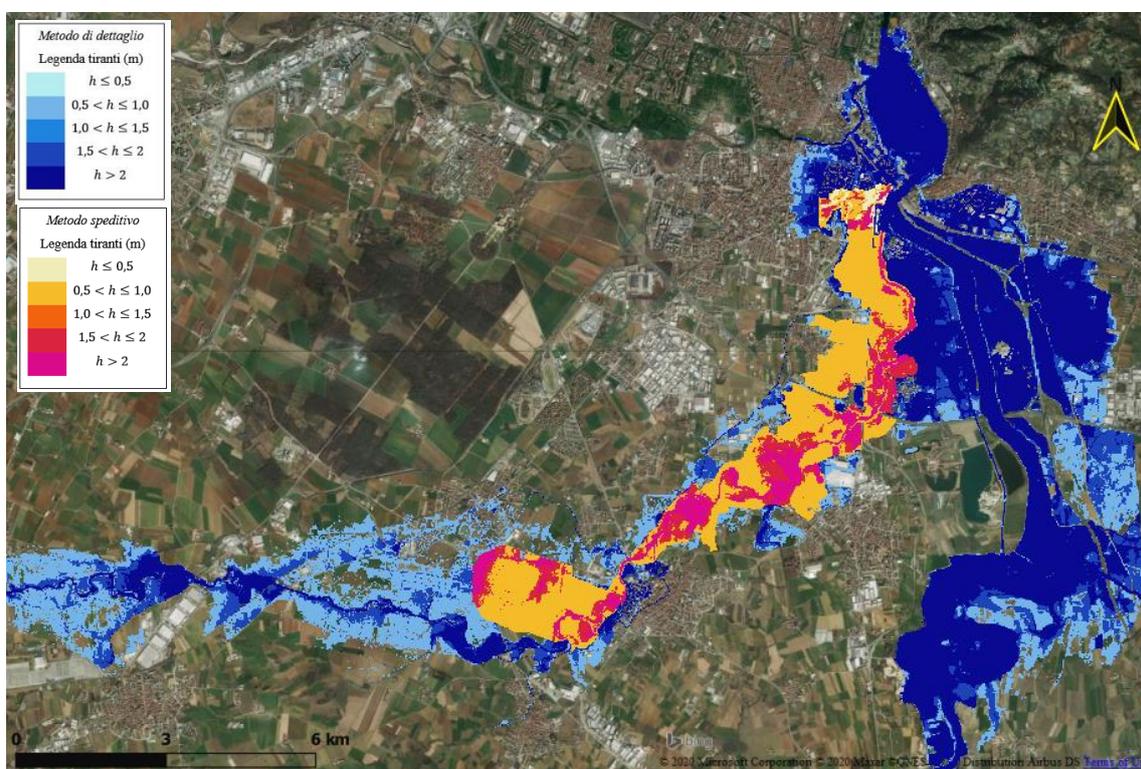


Figura 101: Confronto tra le mappe dei massimi tiranti ricavate con il metodo speditivo (in rosso) e quelle ricavate con il modello matematico nelle condizioni più critiche (in azzurro), per uno scenario di pericolosità media (TR200)

Da un confronto in termini di aree allagate emerge che l'estensione ottenuta dal metodo speditivo risulta interamente compresa all'interno dei risultati del modello matematico. Nella prima zona di studio, il modello matematico tiene conto della presenza di canali secondari che disperdono i deflussi nelle campagne limitrofe al corso d'acqua, mentre quelle del metodo speditivo risultano confinate, da cui non risulta pertanto nessuna evidenza di tale dinamica. Nel tratto finale del torrente (zona 2) la differenza è molto più marcata essendo, con il metodo speditivo, tutto contenuto all'interno delle arginature poste sul lato destro. In termini di tiranti, anche per tale scenario, nel modello matematico, i livelli sono sempre superiori, con un incremento di circa un metro e mezzo per le aree a monte del ponte di Vinovo e di circa due metri a monte del rilevato della tangenziale. Anche lungo l'asta del torrente le differenze sono nell'intorno dei due metri. Nell'abitato di Moncalieri i valori delle altezze d'acqua ottenute con il metodo speditivo risultano comprese tra i 0,4 e i 2 metri mentre quelle ricavate con il modello matematico risultano

mediamente pari a due metri, con valori anche superiori in prossimità degli edifici. In questo scenario, inoltre, dal modello matematico, si è osservato che i deflussi sotto i ponti avvengono quasi tutti in pressione con velocità superiori ai 2 (m/s).

Si fa notare, infine, che la maggiore estensione delle aree allagate ottenuta con il modello matematico è da imputare alle particolari condizioni per cui sono state ricavate tali mappe, aventi l'obiettivo di massimizzare le aree allagate simulando la concomitanza dei colmi di piena alla confluenza.

5.5.3 Scenario di bassa pericolosità (TR500)

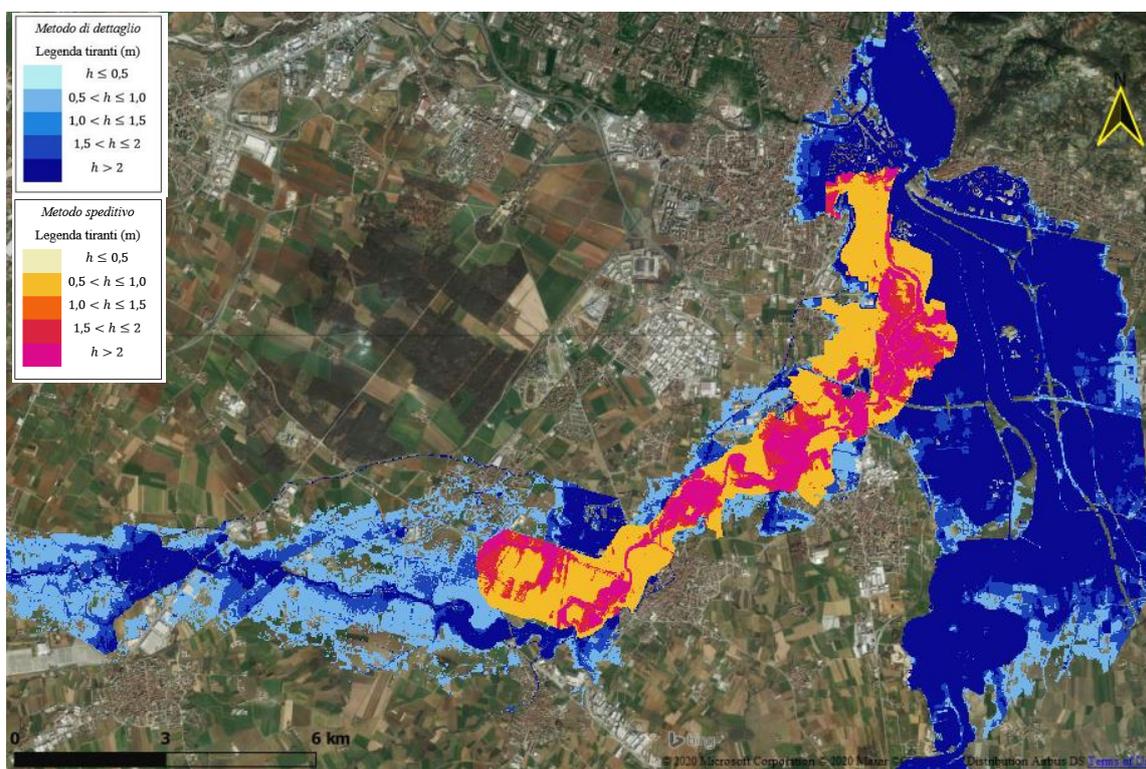


Figura 3

Figura 102: Confronto tra le mappe dei massimi tiranti ricavate con il metodo speditivo (in rosso) e quelle ricavate con il modello matematico nelle condizioni più critiche (in azzurro), per uno scenario di bassa pericolosità (TR500)

In questo scenario, la differenza tra le due mappe risulta molto più marcata e in gran parte dovuta, come per lo scenario precedente, agli effetti indotti dalla concomitanza dei colmi di piena nei pressi della confluenza tra il torrente Chisola e il fiume Po. Nella prima zona

di studio risulta evidente che l'area ottenuta con il metodo speditivo ha portato solo a una leggera variazione rispetto allo scenario precedente, risultando ovunque meno estesa rispetto all'area del modello matematico. In prossimità della confluenza con il torrente Lemina, inoltre, l'area ricavata con il metodo speditivo presenta un'estensione minore escludendo l'abitato di Tetti Rolle dall'azione dei deflussi. A valle del rilevato della Tangenziale Sud di Torino si evidenzia una quasi perfetta coincidenza delle mappe in direzione Ovest e un marcato scostamento sul lato opposto, quest'ultimo dovuto al contributo del fiume Po, analizzato nel modello matematico. Sulla base di un confronto in termini di tiranti si è osservata un incremento, nel modello matematico, in media, di 2 metri lungo l'asta del torrente e altezze d'acqua comprese tra i 0,3 e 1,5 m nelle aree golenali ad esclusione del tratto a monte di Vinovo in cui in tutta la piana alluvionale la differenza tra i tiranti è prossima ai due metri. In zona Moncalieri, a valle del rilevato della Tangenziale Sud di Torino, le altezze d'acqua ricavate con il metodo speditivo si mantengono in media inferiori ai due metri e solo in alcuni punti superano tale valore. I risultati del modello matematico invece mostrano valori ben superiori, soprattutto in prossimità degli edifici in cui le altezze d'acqua raggiungono i 3 metri di altezza. Evidenti criticità sono state riscontrate in tutti i ponti ricadenti all'interno dell'area di studio ad eccezione del ponte SR 20 a La Loggia, che presentano deflussi in pressione con livelli idrici prossimi al piano stradale.

6. Agenzia Interregionale per il fiume Po

L'Agenzia Interregionale per il fiume Po (di seguito AIPo) raccoglie l'eredità del Magistrato del Po, quest'ultimo istituito nel 1956 dopo la catastrofica alluvione del 1951 e trasformato da una serie di leggi nel corso degli anni da un semplice ufficio di coordinamento in un organo con pieni poteri per la difesa e la gestione di tutto il bacino del fiume Po. L'AIPo è stata istituita nel 2003 con quattro leggi approvate dai Consigli regionali del Piemonte, della Lombardia, dell'Emilia Romagna e del Veneto ed è un ente strumentale delle quattro regioni con sede a Parma.

Il reticolo di competenza AIPo è gestito attraverso 12 Sedi operative, oltre alla sede centrale, distribuite sul territorio, presenti nei capoluoghi di Provincia principali, le quali complessivamente gestiscono 3.855 km di corsi d'acqua. Il parco delle opere gestite da AIPo ammonta, al momento, a complessivi 3.323 km di arginature di prima e seconda categoria, oltre a undici Casse di laminazione funzionanti, numerosissime chiaviche e diversi impianti di sollevamento.

L'AIPo si occupa di:

- Realizzare e mantenere opere pubbliche per la difesa idraulica e per la valorizzazione del reticolo fluviale del bacino del Po;
- Curare la gestione del relativo demanio idrico (beni demaniali e risorse idriche);
- Gestire eventi estremi e intervenire per fronteggiare situazioni critiche e di rischio;
- Realizzare e gestire le opere per consentire e migliorare la navigazione fluviale.

Particolarmente impegnative sono le funzioni di polizia idraulica, soprattutto per l'eccessiva antropizzazione dell'intero bacino, attraverso operazioni di vigilanza, controllo e segnalazione di esigenze di manutenzione ordinaria e straordinaria.

Inoltre è di propria competenza la progettazione e l'esecuzione degli interventi sulle opere idrauliche di prima, seconda e terza categoria (Testo Unico n. 523/1904) sull'intero bacino del Po.

Con tre laboratori, uno geotecnico e due di modellistica idraulica, ubicati a Boretto (Reggio Emilia) inoltre si dedica ad attività di ricerca e di sviluppo anche con la collaborazione delle università e di enti qualificati.

6.1 Analisi su proposte di intervento per la protezione degli abitati rivieraschi dal Comune di Volvera al Comune di Moncalieri

I territori attraversati dal torrente Chisola e dai suoi affluenti sono un tassello importante nelle strategie di pianificazione, se si pensa agli effetti che nel corso degli anni gli eventi alluvionali hanno indotto negli abitati dei comuni di Pianura a partire da Volvera sino a Moncalieri dove il Chisola si immette nel Po. Tra gli ultimi eventi quello del 2016 ha ulteriormente evidenziato la necessità di ricorrere a ulteriori interventi da attuare localmente in prossimità degli abitati maggiormente colpiti.

In tale contesto, in collaborazione con l’Agenzia Interregionale del fiume Po sono state condotte tre differenti simulazioni con l’obiettivo di analizzare le criticità riscontrate in termini di aree allagate, tiranti e velocità su alcune proposte di intervento per la messa in sicurezza degli abitati rivieraschi del torrente. Le simulazioni sono state condotte utilizzando il modello combinato (1D-2D) calibrato sull’evento del 2016 in condizioni di argini inerodibili (non soggetti a crollo) e in assenza della componente di trasporto solido.

6.1.1 Portate di riferimento

In accordo con il Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni-Profilo di piena dei corsi d’acqua del reticolo principale, pubblicato a Marzo 2016, ai sensi dell’art.7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010, sono state assegnate alle sezioni di monte del modello, le seguenti condizioni al contorno:

- per il torrente Chisola e i suoi affluenti gli idrogrammi derivanti dalla relazione “*Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola*” (Prof. Natale), relativi ad un evento con tempo di ritorno pari a 200 anni (scenario di riferimento per la progettazione delle opere di difesa);

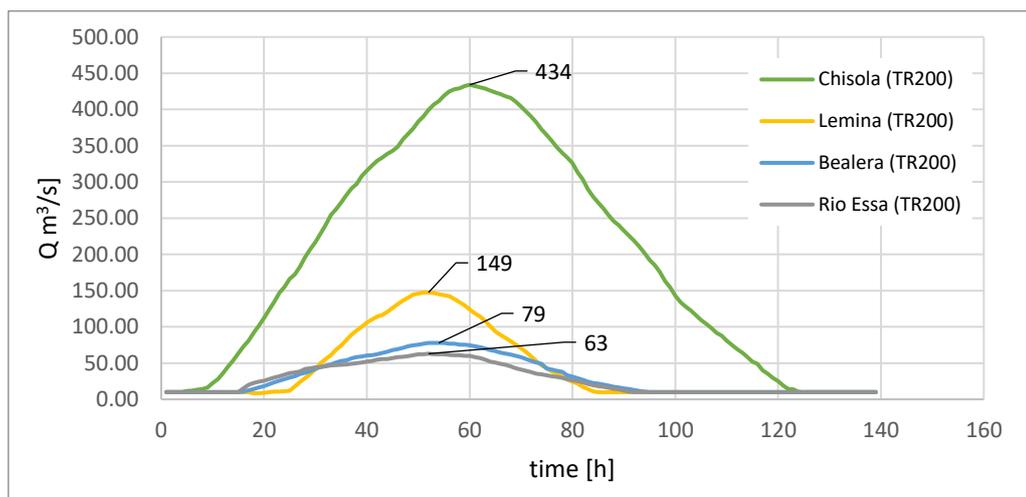


Figura 103: Idrogrammi di Piena per il torrente Chisola e affluenti per un evento con TR=200 anni (Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola, Natale)

- per il fiume Po l'idrogramma di piena ricostruito da ARPA Piemonte per l'evento del 2016 avente un tempo di ritorno stimato intorno ai 50 anni.

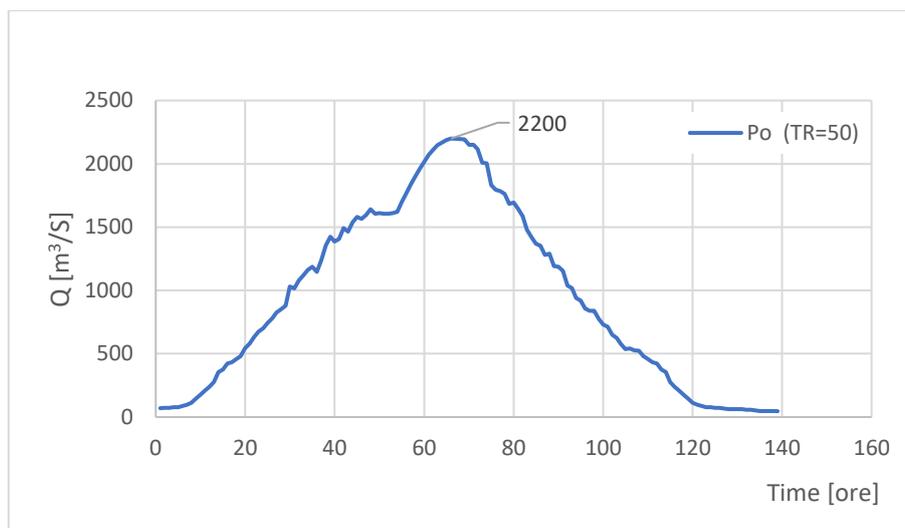


Figura 104: Idrogramma relativo alla sezione di monte (Carignano) del fiume Po, per TR=50 anni

La condizione al contorno di valle è rappresentata dall'altezza di moto uniforme (*Normal depth*) nella sezione di valle del modello idraulico (RS 660.4) corrispondente all'ultima sezione del Po. Questa condizione, richiede l'inserimento della pendenza dell'energia che in condizioni di moto uniforme coincide con la pendenza del fondo. Sulla base di quanto riportato nel rapporto "*Analisi e valutazione degli aspetti morfologici*" (Attività 2015-16

del Dipartimento Geologia e Dissesto, ARPA Piemonte), la pendenza del fiume Po nel tratto finale del modello è stata assunta pari allo 0,044 %.

6.2 Scenario TR200: Analisi dello stato di fatto

Sulla base della dinamica dell'alluvione del 2016 e ricostruita mediante il modello idrodinamico combinato e degli effetti in termini di aree allagate e danni subiti dagli abitati di Tetti Rolle, Tagliaferro e Barauda, ricadenti nel comune di Moncalieri, si è deciso di analizzare alcuni interventi per il contenimento dei livelli di piena col fine di mitigare eventuali conseguenze negative di piene future. Tali interventi sono stati definiti analizzando i risultati in termini di tiranti ed aree allagate ottenuti da una prima simulazione lanciata considerando lo stato di fatto e le condizioni al contorno prima definite e ponendo particolare attenzione ai rilevati arginali esistenti a protezione degli abitati di None, Vinovo e Moncalieri. Dalle mappe dei massimi tiranti e delle massime velocità (Fig. 101 e 102 di seguito riportate) è stato possibile osservare che:

- A None: l'argine destro, a protezione dell'area industriale viene aggirato e in certi punti presenta una riduzione del franco idraulico al di sotto del mezzo metro. Le velocità assumono valori inferiori ai 0,5 m/s tranne che in alcuni punti nei pressi dell'argine sinistro di None in cui superano i 2 m/s;
- A Vinovo: l'argine destro a protezione dell'abitato viene aggirato per via della presenza di un canale di derivazione che dal Rio Essa si dirama per attraversare il centro urbano e infine confluire nel Torrente Chisola. I deflussi allagano il centro città con velocità inferiori a 1 m/s e con altezze d'acqua comprese tra 1-2 metri; l'argine destro presenta lungo il suo sviluppo una riduzione del franco idraulico e in alcuni punti un sormonto con tiranti di 30 cm. La corrente in prossimità degli argini di Vinovo presenta una velocità inferiore a 1 m/s mentre raggiunge velocità più elevate (4 m/s) a monte del ponte di Vinovo.
- Tra None e Vinovo gli allagamenti risultano molto estesi con velocità ovunque inferiori a 1 (m/s); dalla sponda sinistra del torrente i deflussi si fanno strada verso l'abitato di Candiolo e proseguendo verso valle aggirano il rilevato della SP 144 (Via Candiolo) e l'argine sinistro del comune di Vinovo.

- In prossimità della confluenza con il Torrente Lemina l'acqua fuoriesce dalla sponda sinistra, aggira l'arginello sinistro a ridosso di Strada Chisola e si dirige verso il rilevato della A55-tangenziale Sud di Torino, inondando tutta l'area circostante con tiranti superiori al metro e in certi punti anche superiori ai 2 metri; i deflussi arrivano a lambire l'abitato di Tetti Rolle con altezze d'acqua ovunque inferiori al metro e velocità inferiori ai 0,5 m/s.; in destra idrografica le acque arrivano a lambire i capannoni industriali del comune di La Loggia.
- La presenza dei fornicci nel rilevato della Tangenziale Sud di Torino consente alla corrente di proseguire verso valle allagando prima le borgate di Tagliaferro e Tetti Piatti con velocità ovunque inferiori ai 0,5 m/s per poi proseguire verso Strada Carignano.
- A valle del rilevato della tangenziale Sud di Torino il Chisola si trova confinato tra due lunghi rilevati arginali sino alla confluenza con il fiume Po. A monte del ponte Barauda, le acque del Chisola tracimano entrambi i rilevati arginali e proseguono verso valle costeggiando lato campagna i rilevati arginali. Le aree allagate a sinistra di Strada Carignano presentano delle altezze d'acqua comprese tra 1-2 metri con valori di velocità inferiori a 1 m/s. Ai piedi degli argini, lato fiume le velocità si mantengono dell'ordine di 1 m/s.
- Nell'abitato di Moncalieri in prossimità della confluenza, gli allagamenti risultano ampiamente diffusi e dovuti anche in parte ai deflussi provenienti dal canale dei Molini che nell'ultimo tratto risulta tombato dal piano stradale.

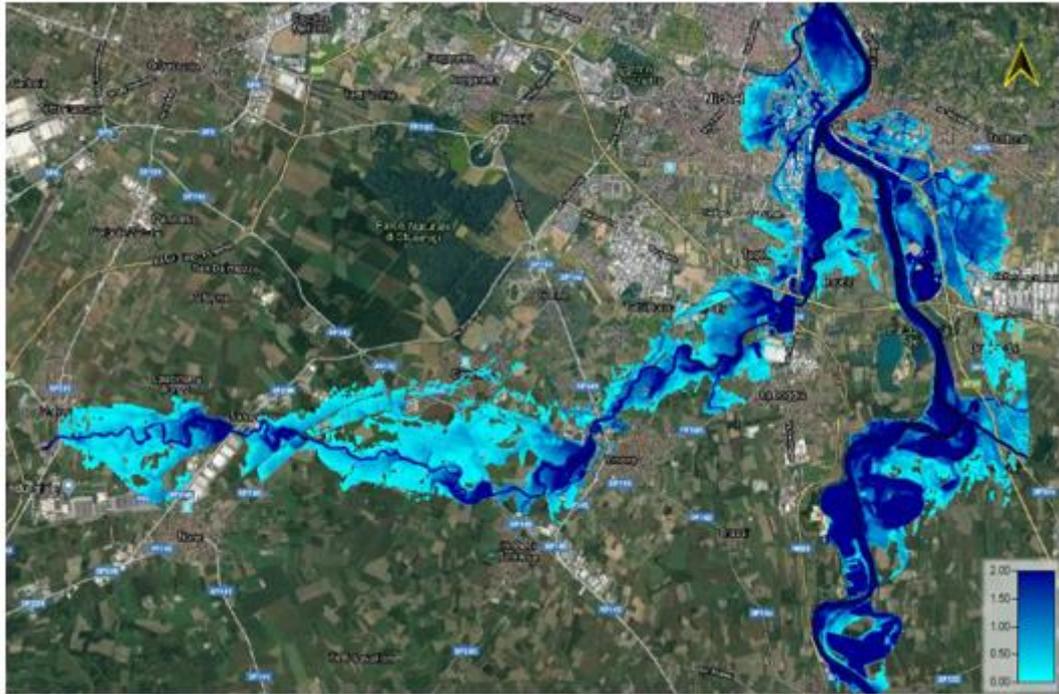


Figura 105: Mappa dei massimi Tiranti per scenario TR200 (stato di fatto)



Figura 106: Mappa delle massime velocità per scenario TR200 (stato di fatto)

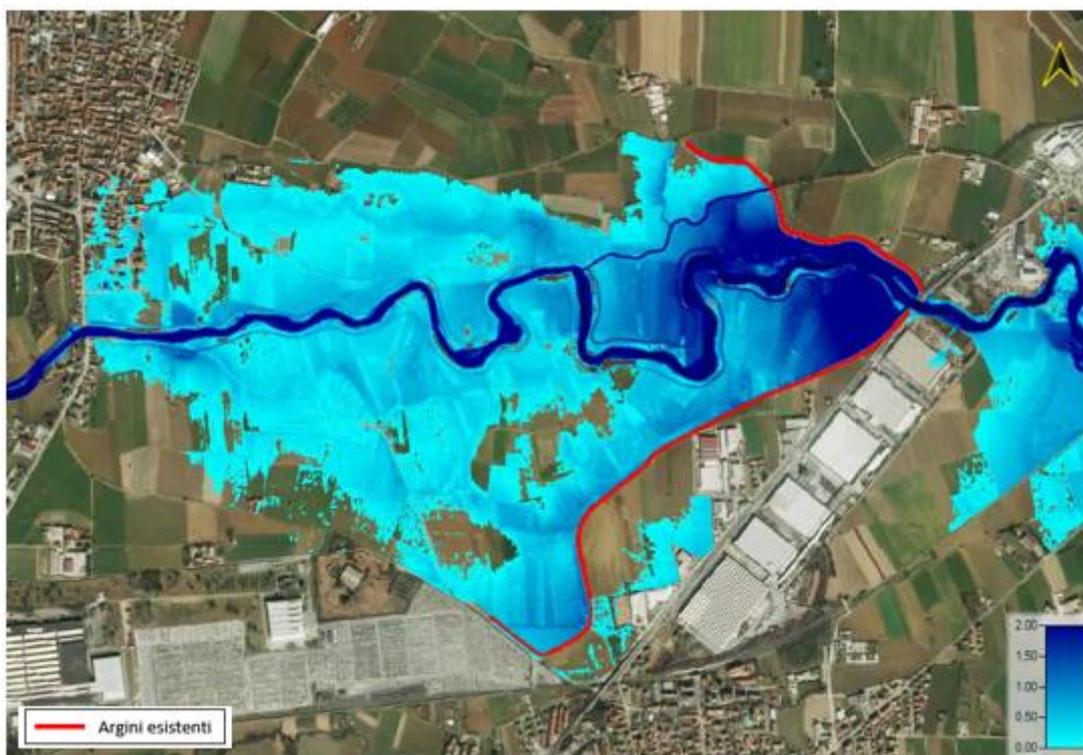


Figura 107: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra i comuni di Volvera e None (Scenario TR200)

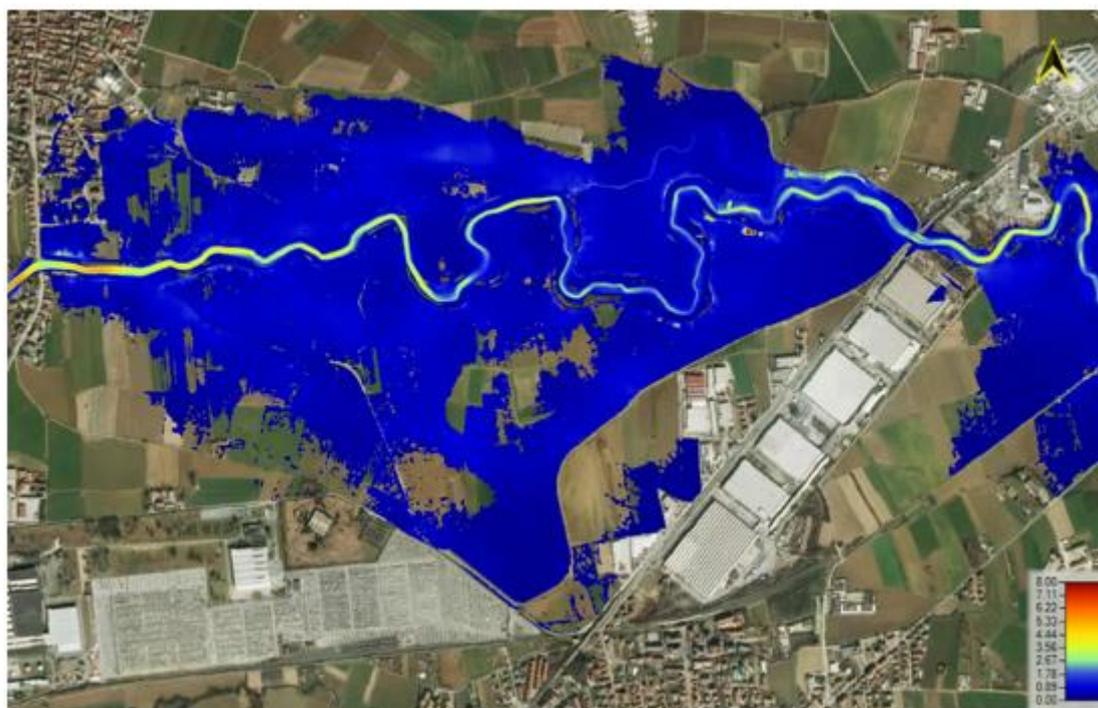


Figura 108: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra i comuni di Volvera e None (Scenario TR200)

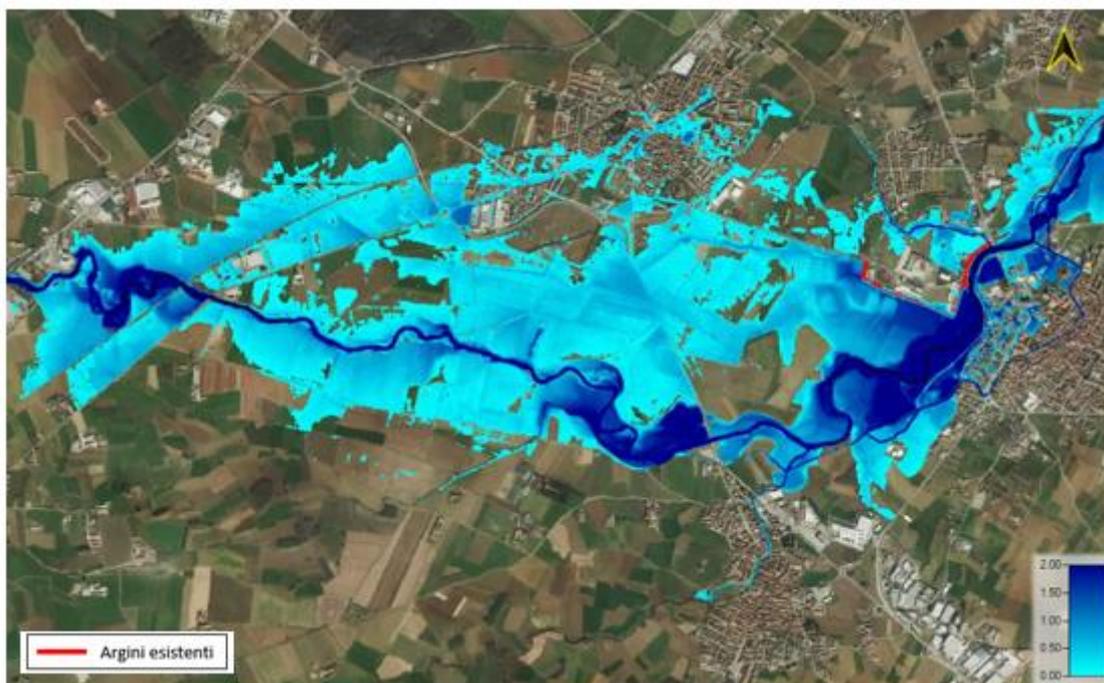


Figura 109: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra i comuni di None e Vinovo (Scenario TR200)

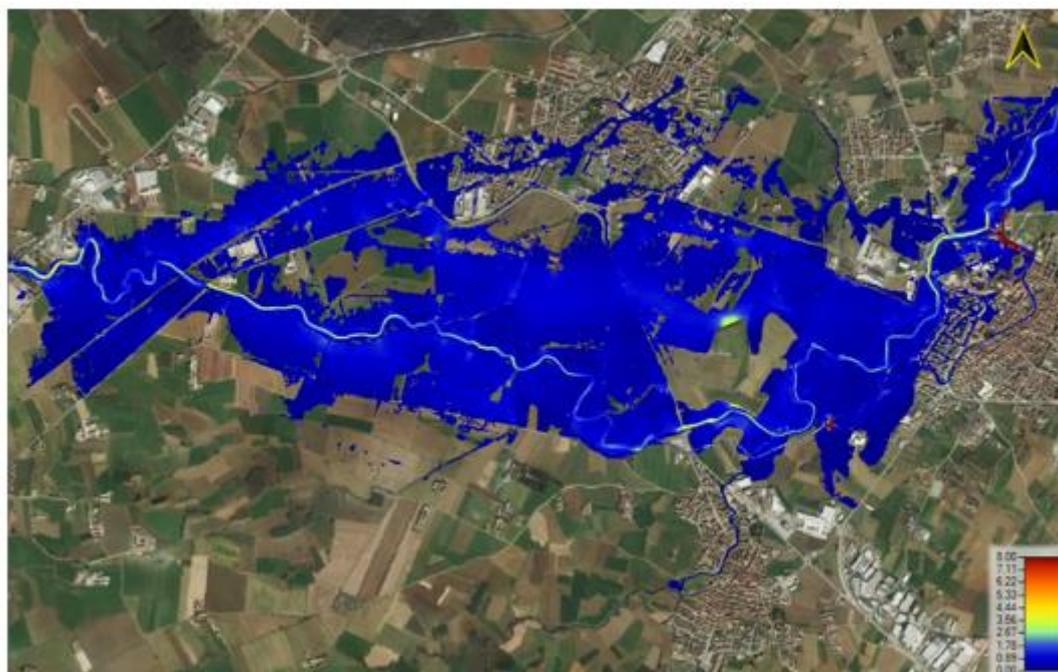


Figura 110: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra i comuni di None e Vinovo (Scenario TR200)

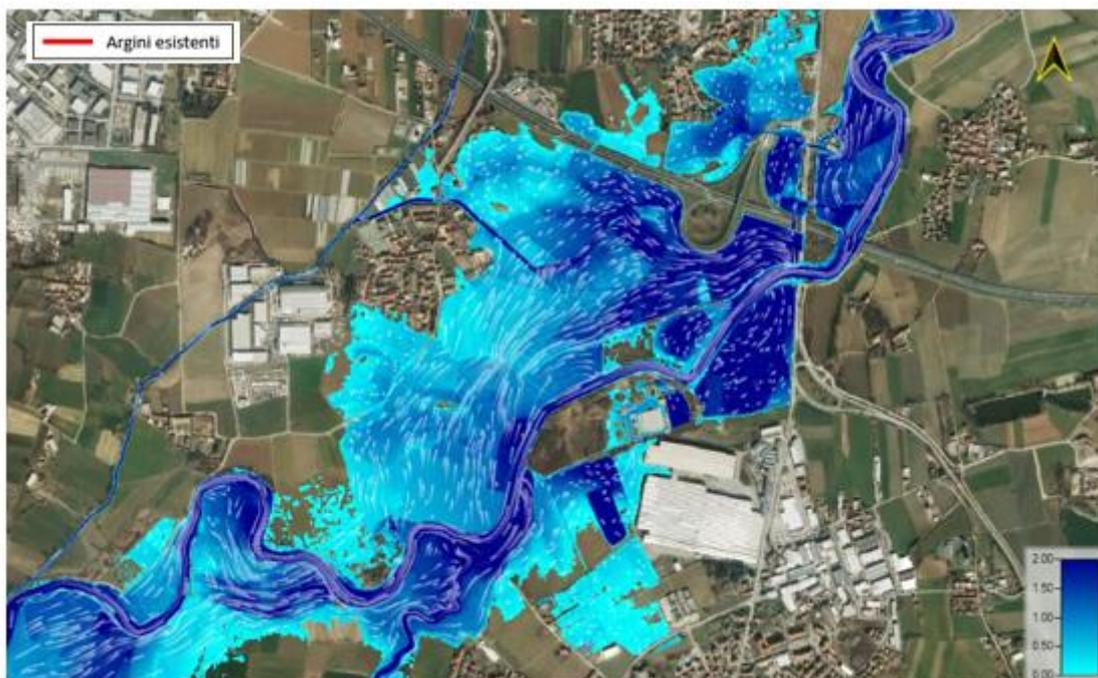


Figura 111: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il comune di Vinovo e il rilevato A55 - Tangenziale Sud di Torino con indicazione delle traiettorie di flusso (Particle tracing)

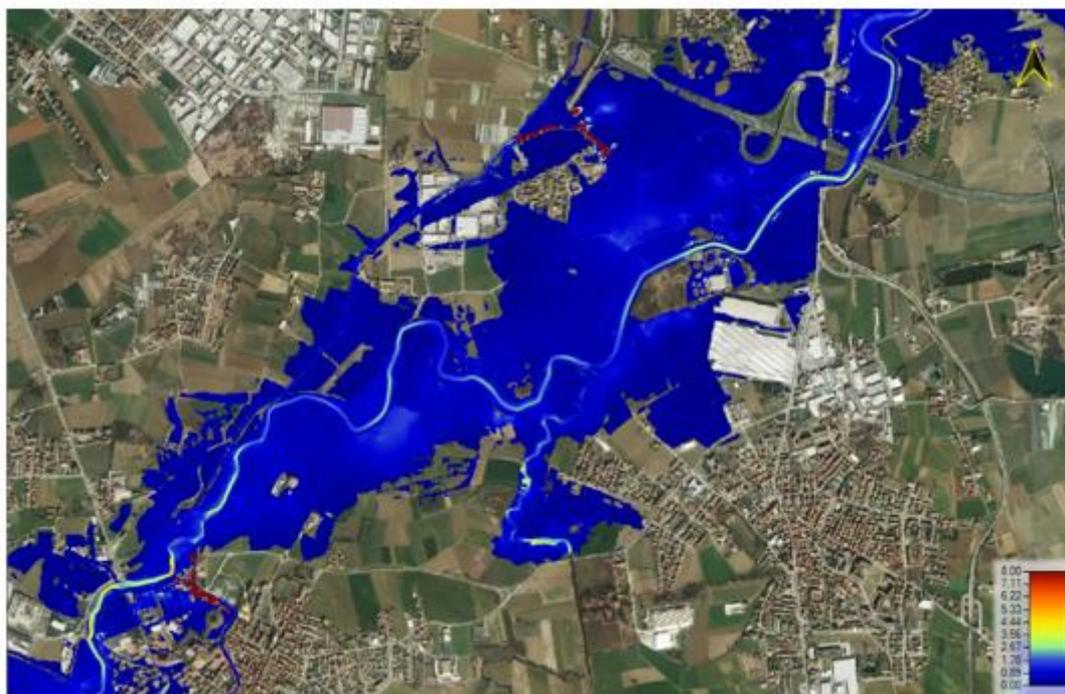


Figura 112: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il comune di Vinovo e il rilevato A55 - Tangenziale Sud di Torino (Scenario TR200)

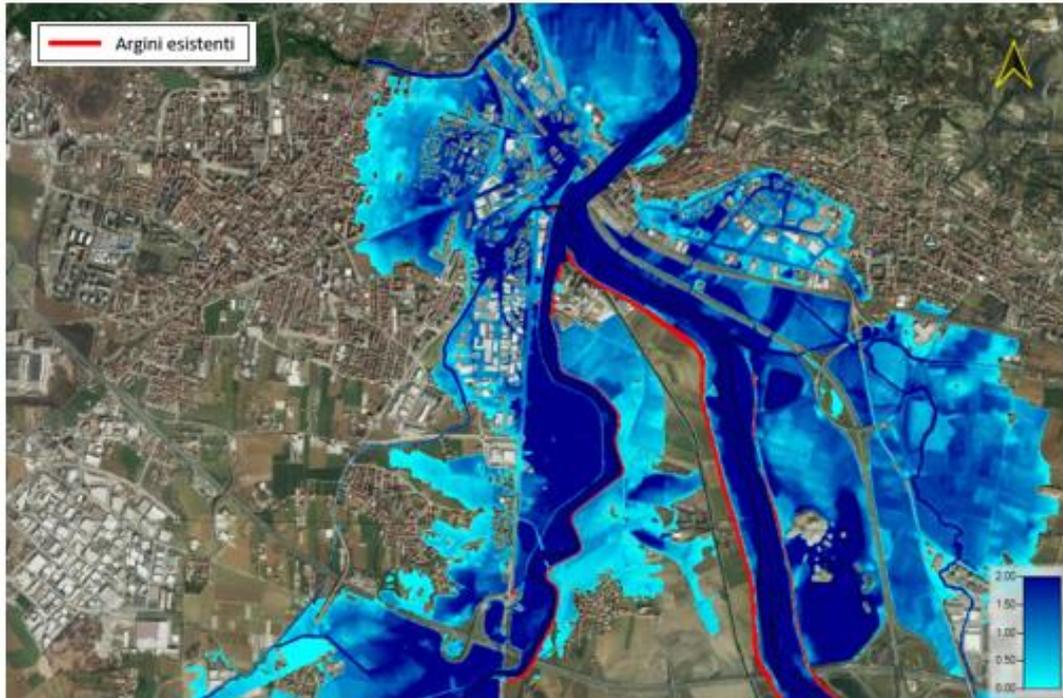


Figura 113: mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il rilevato A55 -Tangenziale Sud di Torino e la confluenza con il fiume Po (Scenario TR200)



Figura 114: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il rilevato A55 -Tangenziale Sud di Torino e la confluenza con il fiume Po (Scenario TR200)

6.3 Scenari di progetto per TR200

Sulla base delle criticità individuate nei comuni rivieraschi del Torrente Chisola, si è deciso di analizzare tre possibili scenari di progetto così definiti:

- Assetto di progetto A1
- Assetto di Progetto A2
- Assetto di progetto A3

Per ogni scenario sono stati usati gli stessi idrogrammi impiegati nell'analisi dello stato di fatto (TR200) e ricavate le mappe dei massimi tiranti e delle massime velocità nelle zone oggetto di intervento.

6.3.1 Analisi sull'assetto di progetto A1

Questa prima simulazione prevede una serie di interventi da effettuare sui rilevati arginali presenti sul territorio nel tratto del Chisola compreso tra il comune di Volvera e quello di Moncalieri. In particolare si è previsto:

- il rialzo in quota dei rilevati arginali di None e Vinovo con adeguamento planimetrico del rilevato destro di None che nella precedente simulazione veniva aggirato dalla corrente;
- l'adeguamento planimetrico dell'argine destro a protezione dell'abitato di Vinovo con l'inserimento di un manufatto anti-rigurgito (chiavica) dotato di paratoia tale da permettere l'attraversamento nel rilevato arginale dei deflussi del canale derivatore, e nel contempo impedire il rigurgito delle acque del Chisola in caso di piena;
- la creazione di un'area di laminazione seppur di modeste dimensioni a valle del rilevato della A-55 Tangenziale Sud di Torino con la realizzazione di nuovi rilevati arginali arretrati e rimozione di quelli in frodo esistenti.

I nuovi rilevati arginali sono stati inseriti nel modello matematico attraverso il comando *SA/2D Connection* che consente di inserire delle strutture all'interno dell'area a deflusso 2D. Nel rilevato arginale a protezione dell'abitato di Vinovo, si è tenuto anche conto della presenza del manufatto idraulico (chiavica) predisponendo all'interno della *Connection*

un'apertura regolata da una paratoia piana, impostata in modo che rimanesse chiusa durante tutta la durata della simulazione. A tutti i rilevati arginali è stata assegnata un valore di quota che evitasse il sormonto da parte della corrente.

Nelle figure a seguire vengono riportati gli interventi prima menzionati e i risultati della simulazione in termini di mappe di allagamento, massimi tiranti e massime velocità.

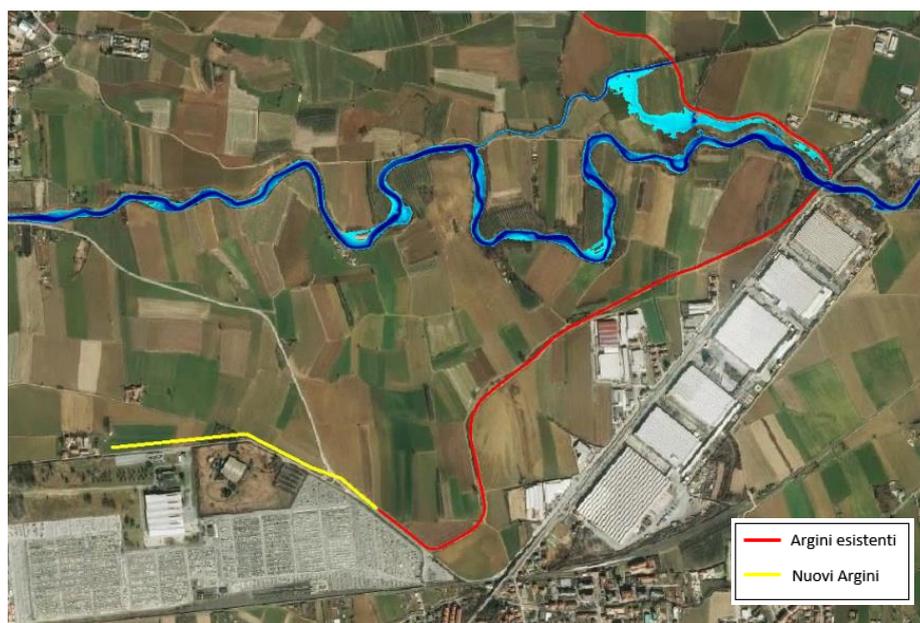


Figura 115: Intervento di adeguamento planimetrico dell'argine destro a protezione della zona industriale del comune di None



Figura 116: Intervento di adeguamento planimetrico dell'argine destro del comune di Vinovo

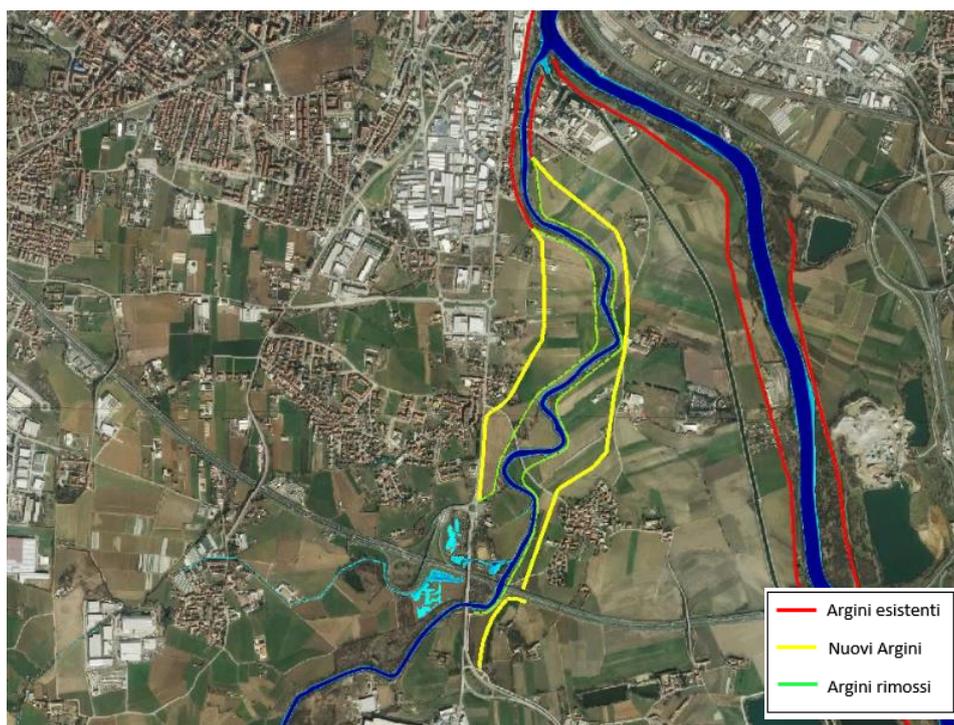


Figura 117: Intervento di realizzazione di nuovi rilevati arginali arretrati con rimozione di quelli in frodo esistenti.

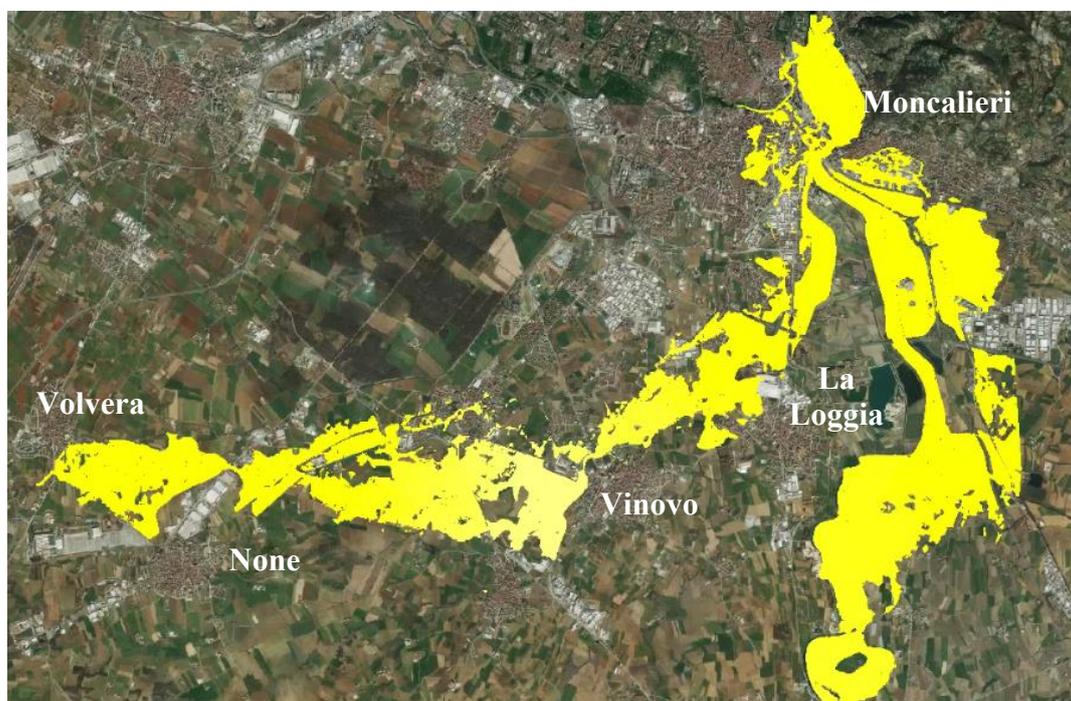


Figura 118: Mappa delle aree allagate (Simulazione A1)

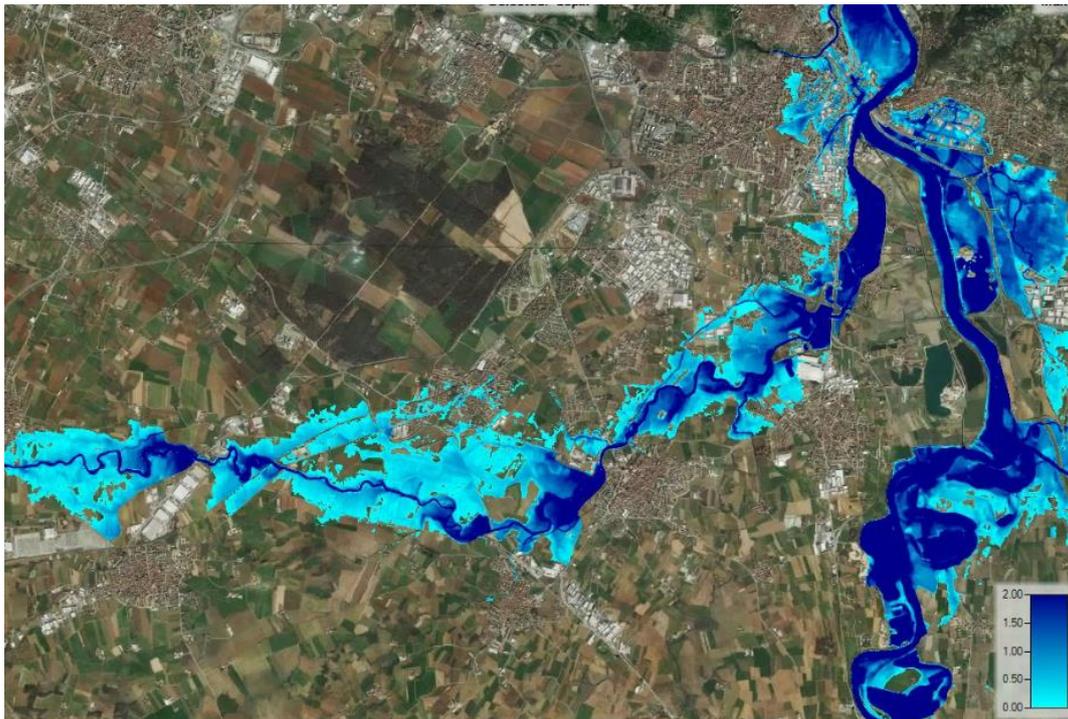


Figura 119: Mappa dei massimi tiranti per lo scenario A1

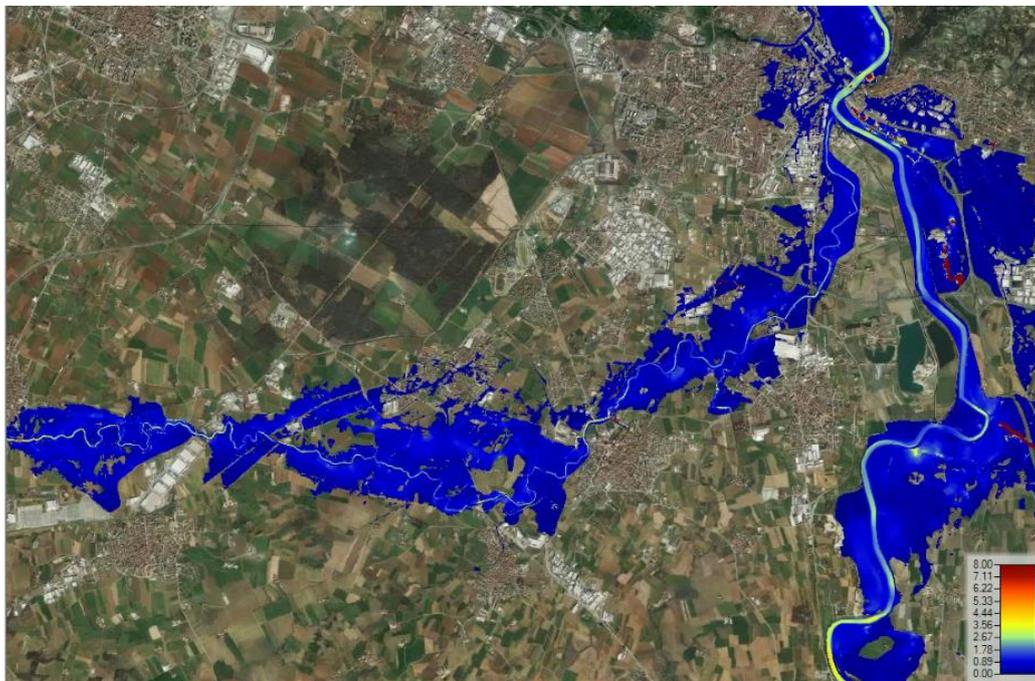


Figura 120: Mappa delle massime velocità per lo scenario A1

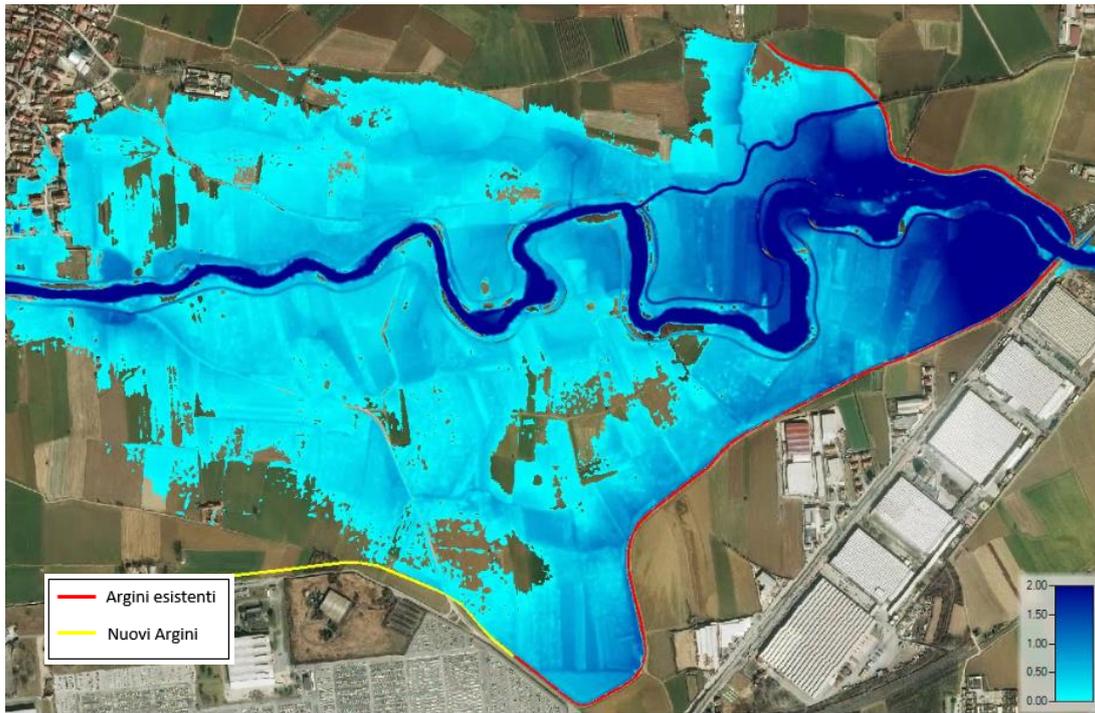


Figura 121: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il ponte SP 139 del comune di Volvera e il ponte SP 23R del comune di Vinovo (scenario A1)

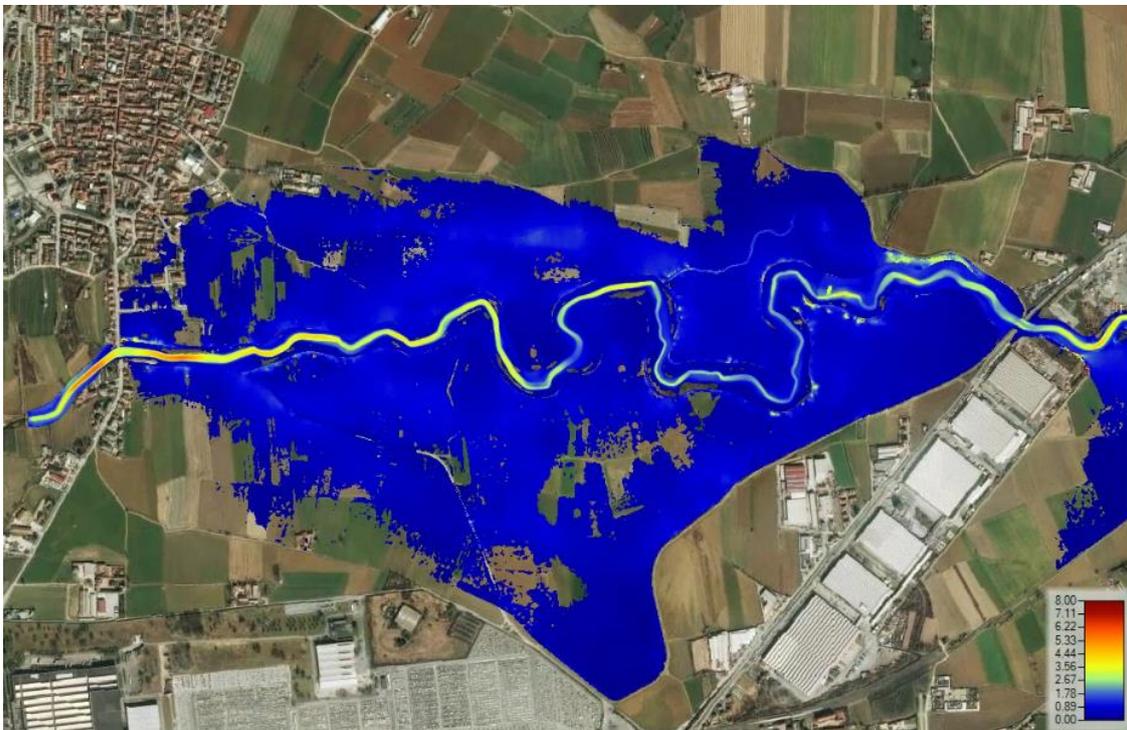


Figura 122: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il ponte SP 139 del comune di Volvera e il ponte SP 23R del comune di Vinovo (scenario A1)

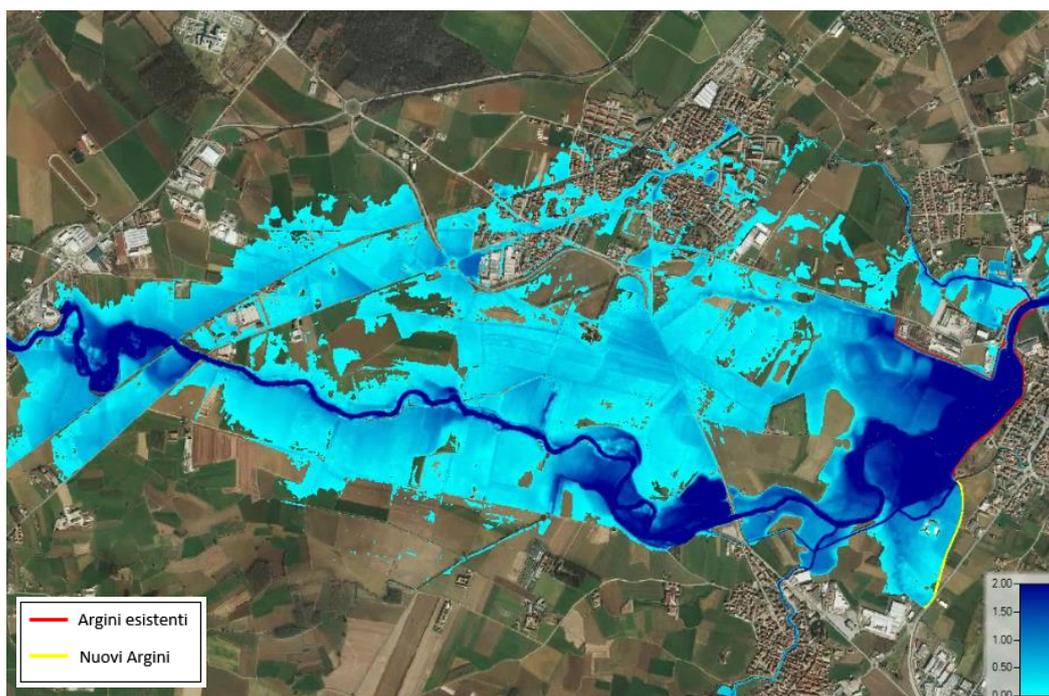


Figura 123: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra i comuni di None e Vinovo

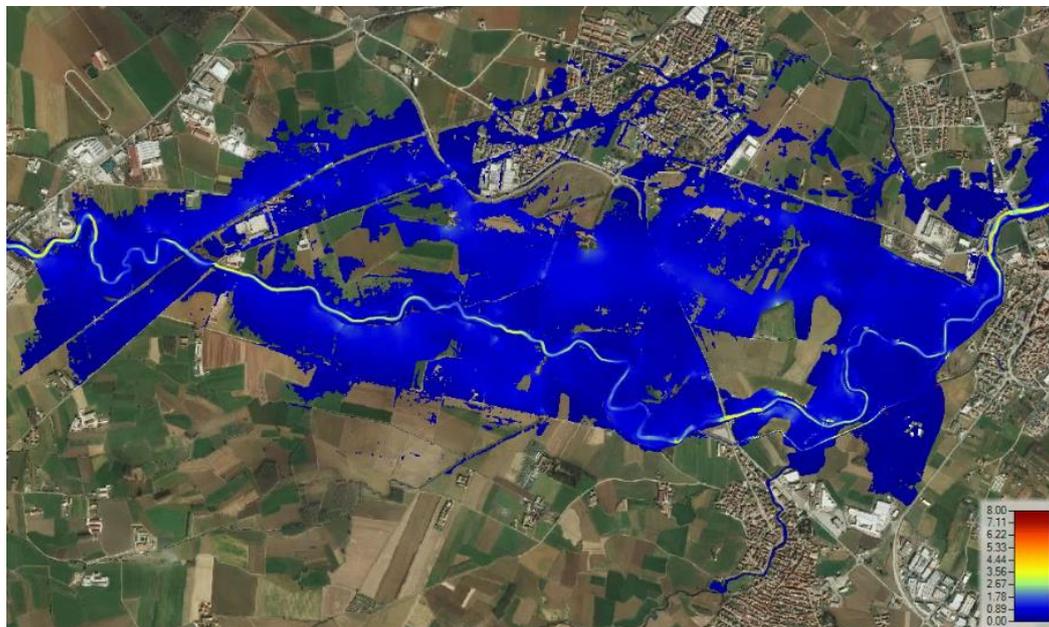


Figura 124: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra i comuni di None e Vinovo

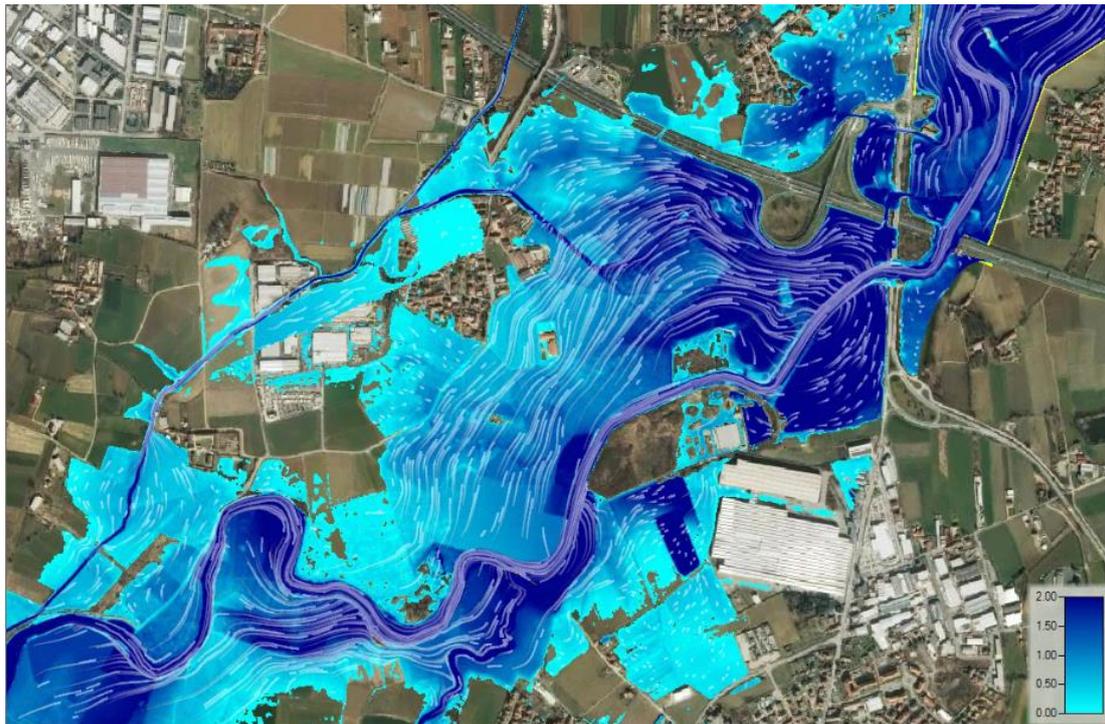


Figura 125: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il comune di Vinovo e il rilevato A55 - Tangenziale Sud di Torino con indicazione delle traiettorie di flusso (particle tracing)

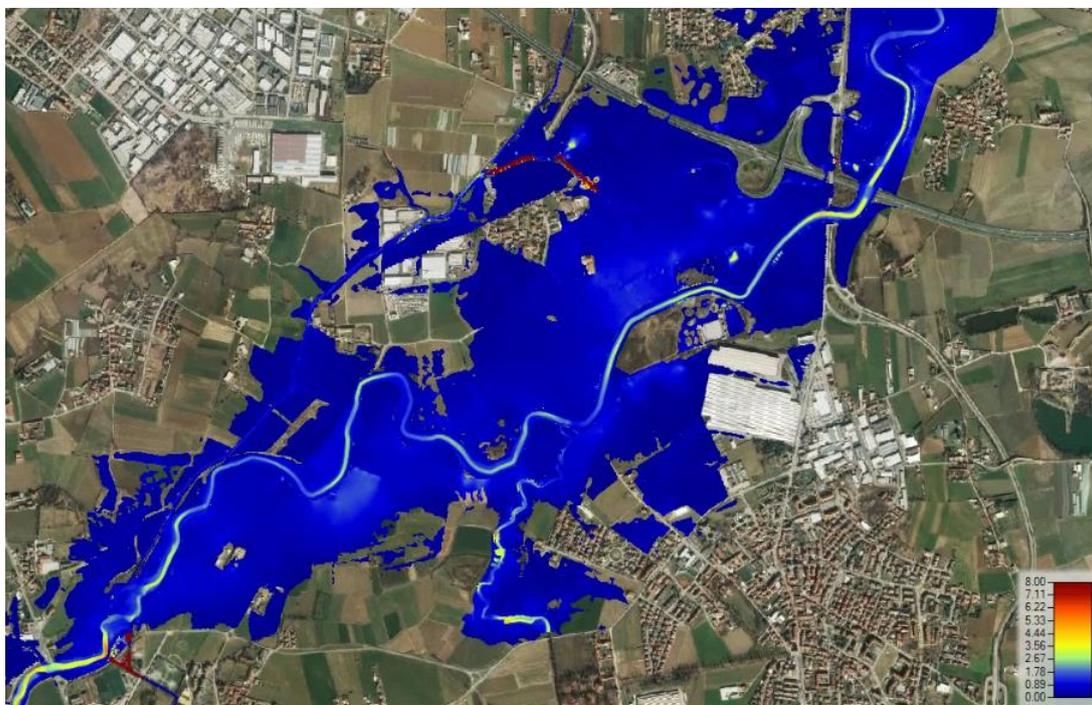


Figura 126: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il comune di Vinovo e il rilevato A55 - Tangenziale Sud di Torino

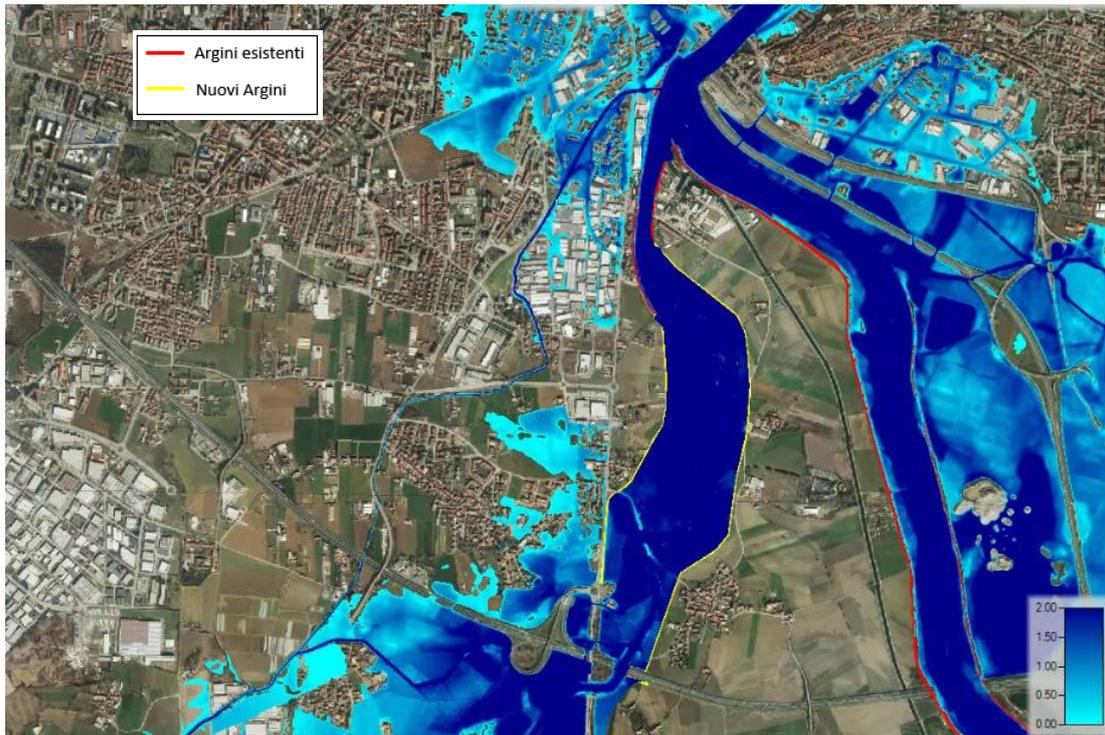


Figura 127: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il rilevato A55 -Tangenziale Sud di Torino e la confluenza con il fiume Po a Moncalieri



Figura 128: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il rilevato A55 -Tangenziale Sud di Torino e la confluenza con il fiume Po a Moncalieri

Sulla base della dinamica dei deflussi e dei risultati ottenuti è stato possibile osservare che:

- A None: l'intervento di adeguamento planimetrico eseguito sull'argine destro ha impedito, rispetto allo stato di fatto, l'aggiramento dei deflussi provenienti da monte impedendo gli allagamenti nella zona industriale. La velocità della corrente fuori alveo si mantiene ovunque sotto a 1 m/s mentre in alveo raggiunge valori maggiori, compresi tra 1,5 e 3 m/s. Sotto il ponte della SP 23R nel comune di None la corrente defluisce in pressione, risultando non adeguato, con una velocità massima pari ai 3 m/s;
- a Vinovo: l'adeguamento planimetrico dell'argine destro con l'inserimento della chiavica ha impedito alla corrente di aggirare l'argine stesso e al contempo di allagare il centro città; i tiranti riscontrati a monte del rilevato arginale sono risultati ovunque inferiori al metro presentando velocità al piede molto basse e comunque inferiori ai 0,10 m/s.
- tra None e Vinovo gli allagamenti risultano molto estesi con valori massimi di velocità in tutta la piana alluvionale, dell'ordine di 1 m/s; lungo l'asta del torrente le velocità si aggirano sui 2 m/s superando i 5 m/s in prossimità delle luci del Ponte SP 143 del comune di Vinovo. Sotto i ponti (SP 140, SP 142, SP 143) i deflussi avvengono tutti in pressione, risultando tutti non adeguati, ovvero senza il franco di sicurezza pari a 1,5 m, secondo le nuove NTC18;
- in prossimità della confluenza con il Torrente Lemina si ripresenta la stessa dinamica osservata nella simulazione precedente; la corrente inonda l'area circostante con tiranti superiori al metro prossimi ai 4 metri in prossimità del rilevato della tangenziale Sud di Torino; la presenza dei fornicci nel rilevato della Tangenziale consente ai deflussi di proseguire verso valle, aggirando gli argini in destra a valle del Ponte La Loggia e allagando, seppur con un'entità lievemente inferiore rispetto allo stato di fatto, prima le borgate di Tagliaferro e Tetti Piatti con velocità ovunque inferiori ai 0,5 m/s per poi proseguire verso l'abitato di Moncalieri; i deflussi arrivano a lambire anche il centro abitato della frazione Tetti Rolle con tiranti ovunque inferiori al mezzo metro;

- a valle del rilevato della tangenziale Sud di Torino nel nuovo assetto di progetto il Chisola si ritrova confinato tra due rilevati arginali che individuano una area di laminazione dei deflussi più ampia rispetto a quella attuale, impedendo ai deflussi di andare a interessare l'abitato della frazione Barauda. All'interno dell'area di laminazione le altezze d'acqua si mantengono superiori ai 2 metri raggiungendo i 3 metri in prossimità dell'ultimo tratto del torrente prima della confluenza. La velocità in tutta l'area di espansione è relativamente bassa presentando valori inferiori a 1 m/s e superiori ai 5 m/s in prossimità del ponte di Strada Barauda.

6.3.2 Analisi sull'assetto di progetto A2

Questa seconda analisi ripropone gli stessi interventi dell'assetto di progetto A1 con l'aggiunta della condizione di chiusura dei fornicelli presenti nel rilevato della Tangenziale Sud di Torino, responsabili come osservato nell'alluvione del 2016 e nei risultati precedenti, del passaggio della corrente dalla piana alluvionale verso gli abitati delle borgate di Tetti Rolle e Tagliaferro. Il dettaglio del campo di moto in prossimità dei fornicelli viene mostrato nella figura sottostante.



Figura 129: Mappa dei massimi tiranti con indicazione delle traiettorie di flusso (particle tracing) in prossimità dei fornicelli del rilevato della A55-Tangenziale Sud di Torino – (ricostruzione evento 2016)

I fornici sono stati inseriti nel modello idrodinamico ricorrendo ancora una volta al comando *SA/2D Connection*, e predisponendo all'interno di ogni *Connection* un'apertura regolata da una paratoia piana, impostata in modo che rimanesse chiusa durante tutta la durata della simulazione. Le paratoie simulano la presenza di eventuali panconi che possono essere utilizzati durante gli eventi di piena come strumento di difesa temporaneo. Da un confronto in termini di estensione delle aree allagate si è osservato che l'assetto di progetto A2 differisce da quello precedente (A1) solo per le aree poste a valle del rilevato della Tangenziale Sud di Torino come mostrato nella figura 126. A seguire vengono riportati i risultati della simulazione in termini di mappe di massimi tiranti e massime velocità

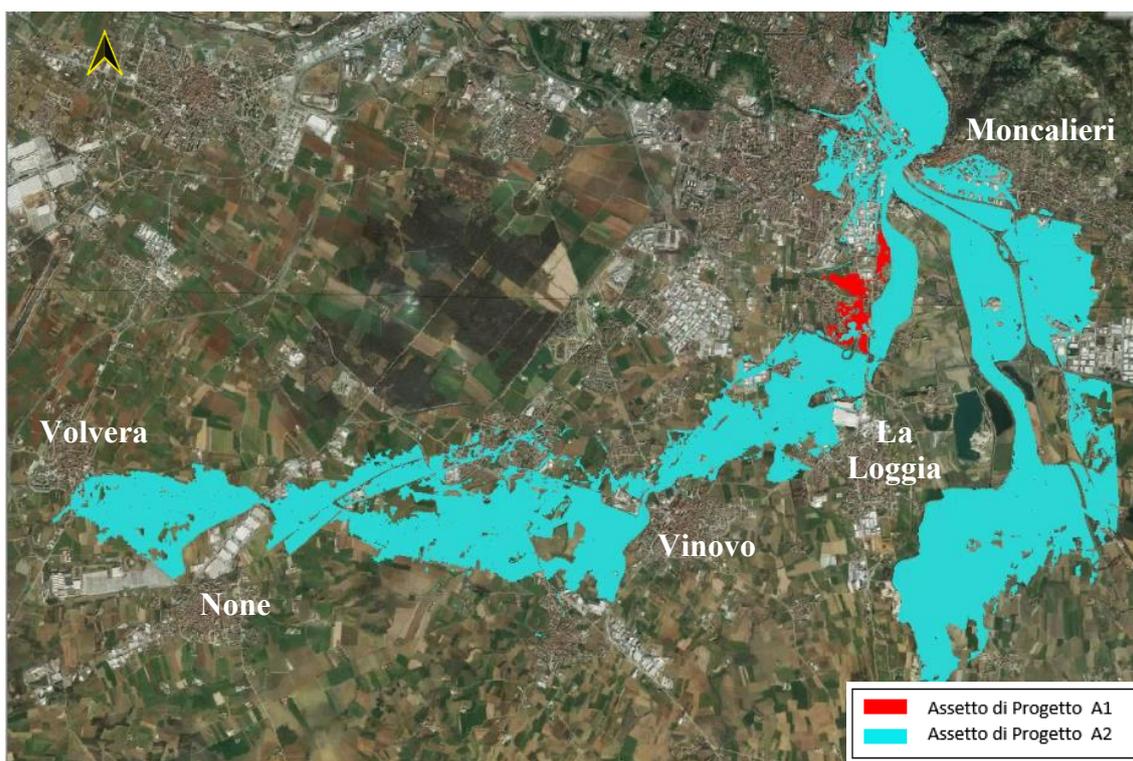


Figura 130: Confronto in termini di aree allagate tra i risultati dell'assetto di progetto A1 e quelli dell'Assetto A2

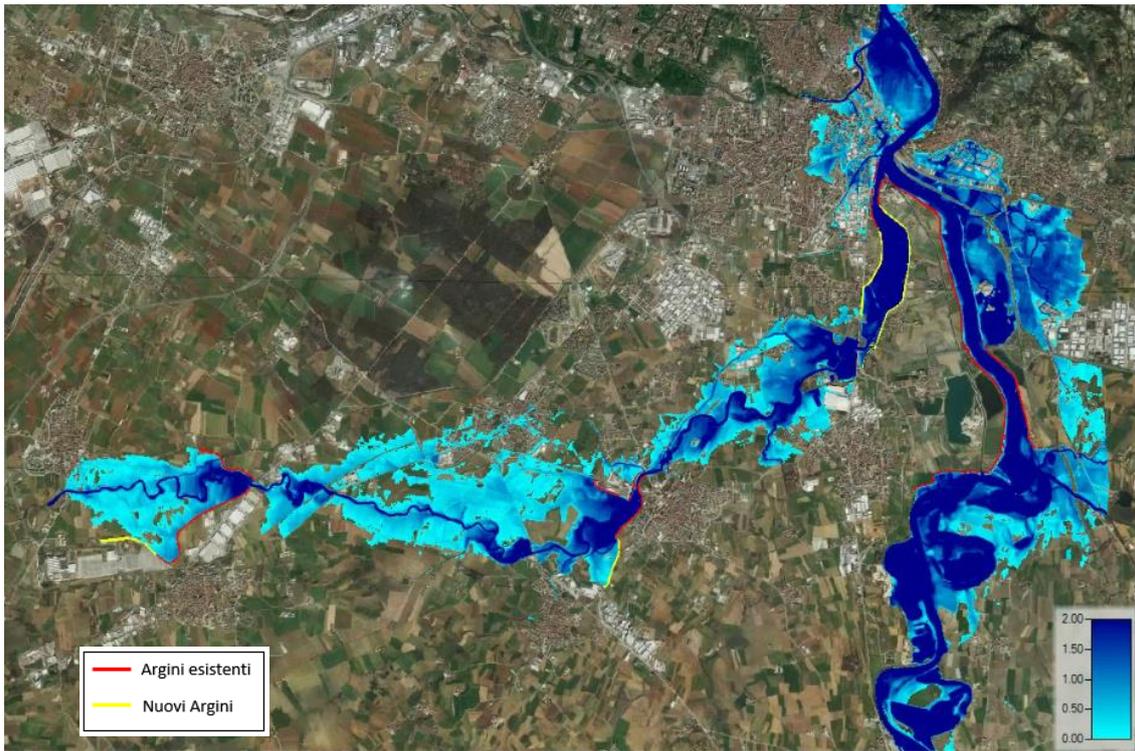


Figura 131: Mappa dei massimi tiranti per lo scenario A2

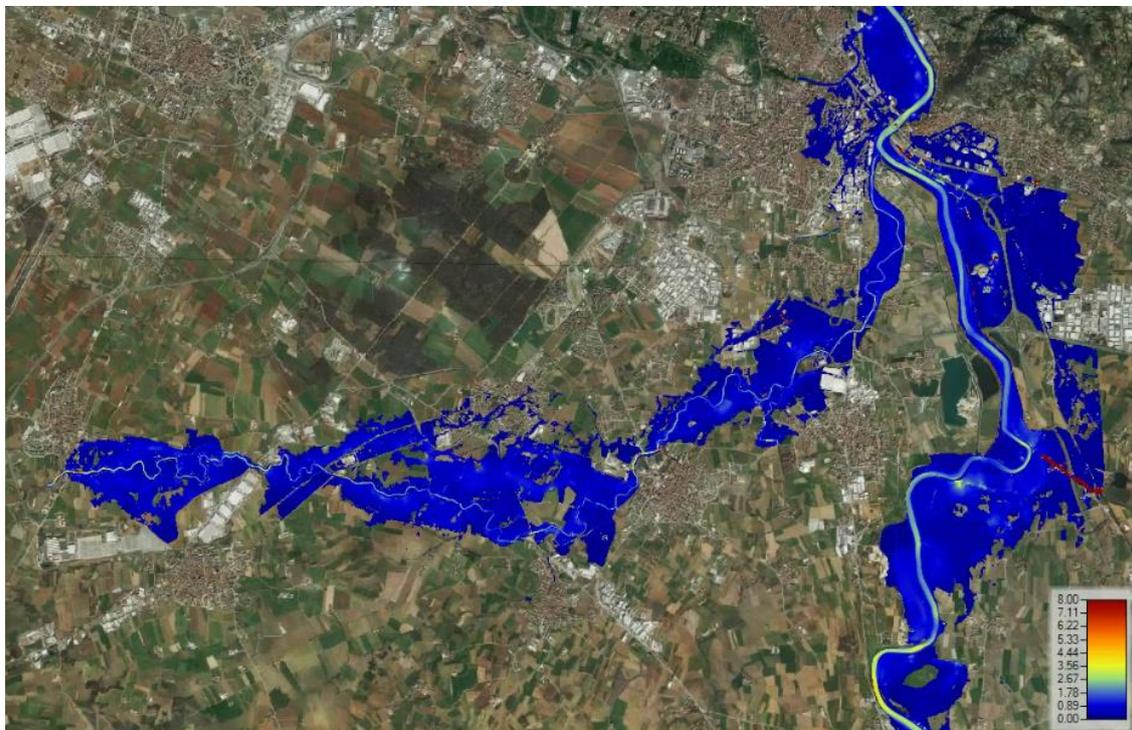


Figura 132: Mappa delle massime velocità per lo scenario A2

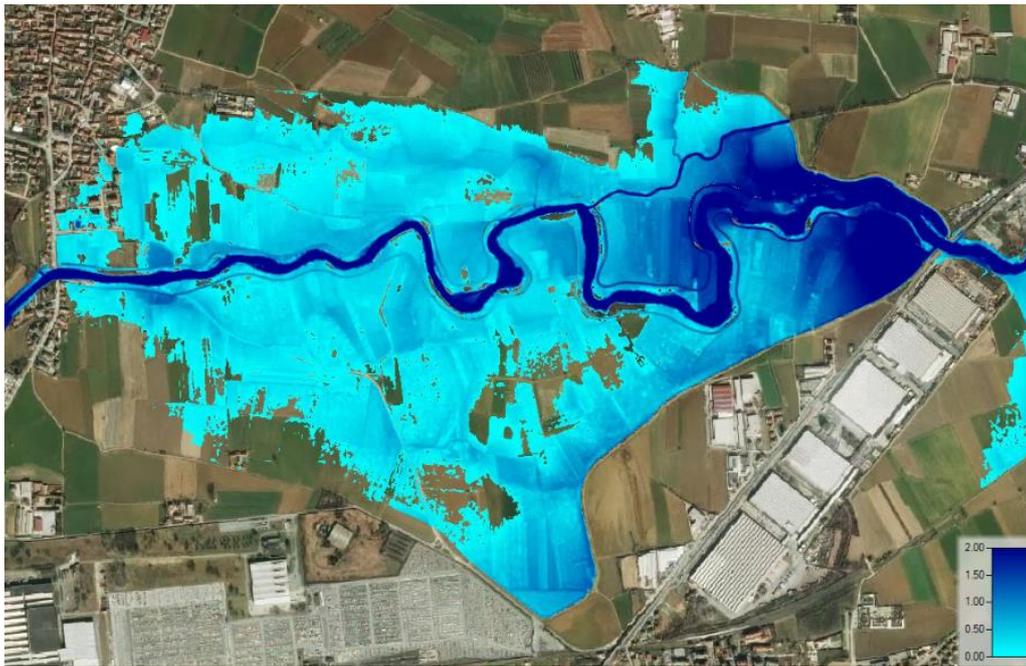


Figura 133: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il ponte SP 139 del comune di Volvera e il ponte SP 23R del comune di Vinovo (scenario A2)

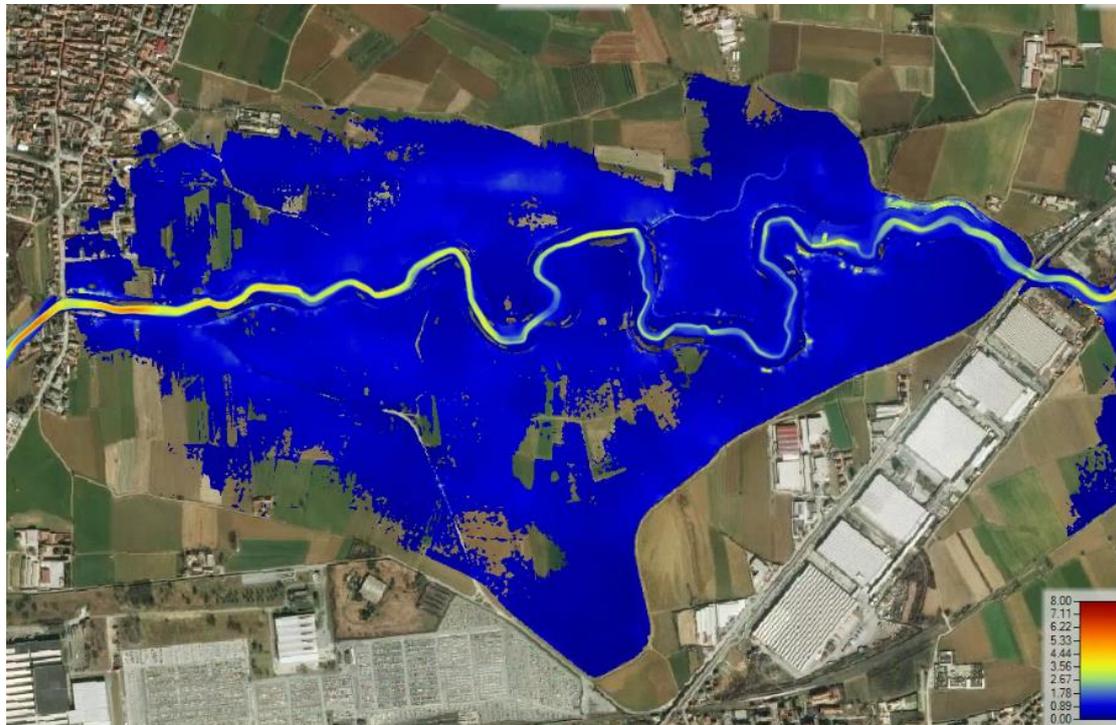


Figura 134: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il ponte SP 139 del comune di Volvera e il ponte SP 23R del comune di Vinovo (scenario A2)

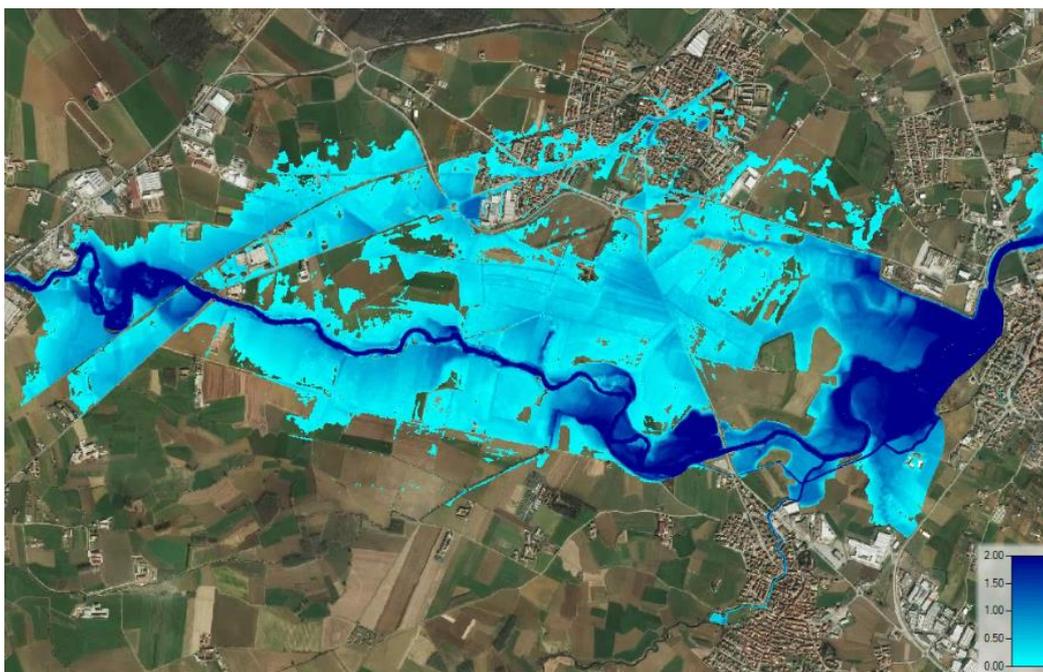


Figura 135: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra i comuni di None e Vinovo (scenario A2)

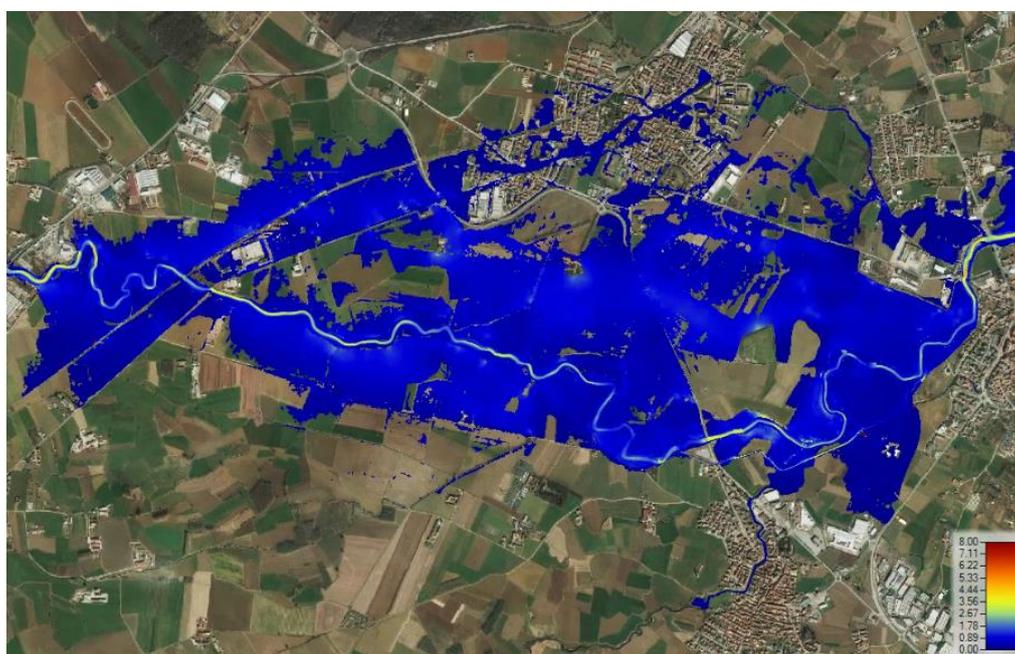


Figura 136: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra i comuni di None e Vinovo (scenario A2)

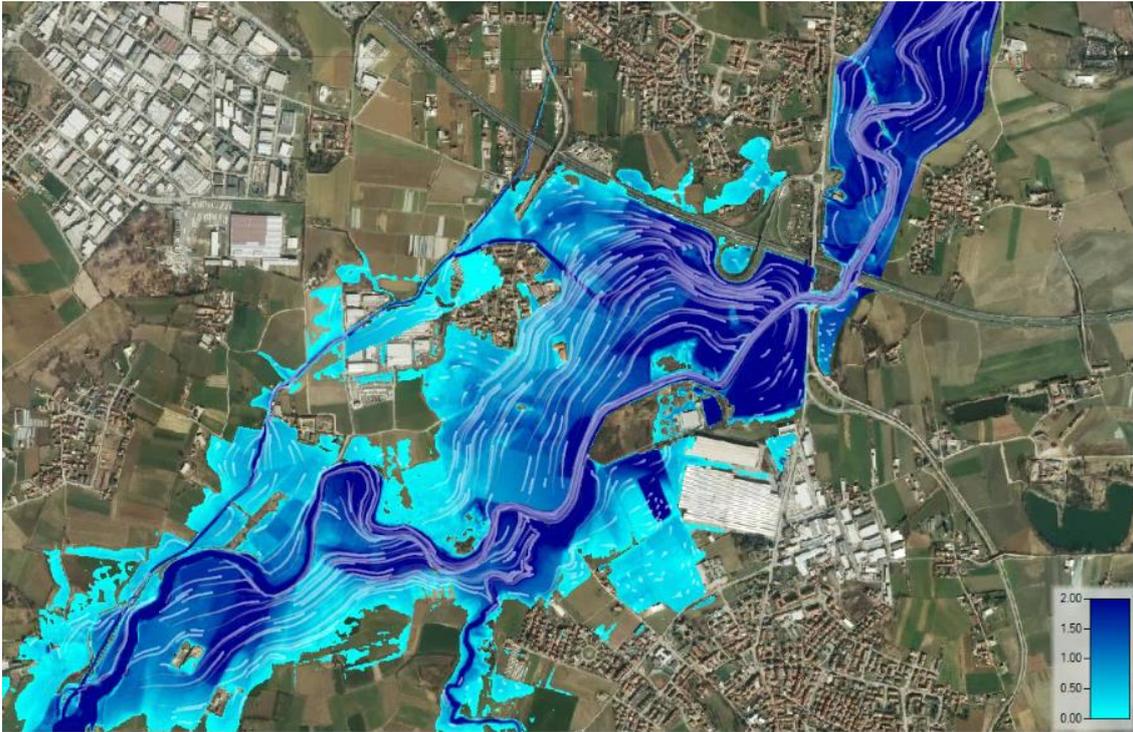


Figura 137: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il comune di Vinovo e il rilevato A55 - Tangenziale Sud di Torino con indicazione delle traiettorie di flusso (particelle tracing)

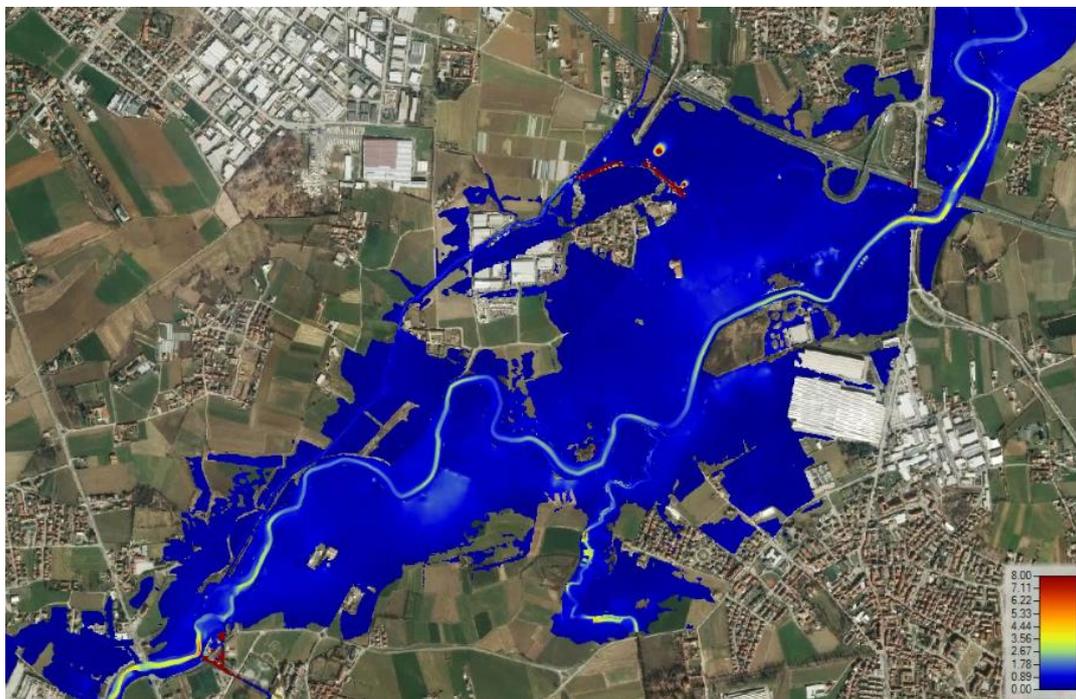


Figura 138: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il comune di Vinovo e il rilevato A55 - Tangenziale Sud di Torino (scenario A2)

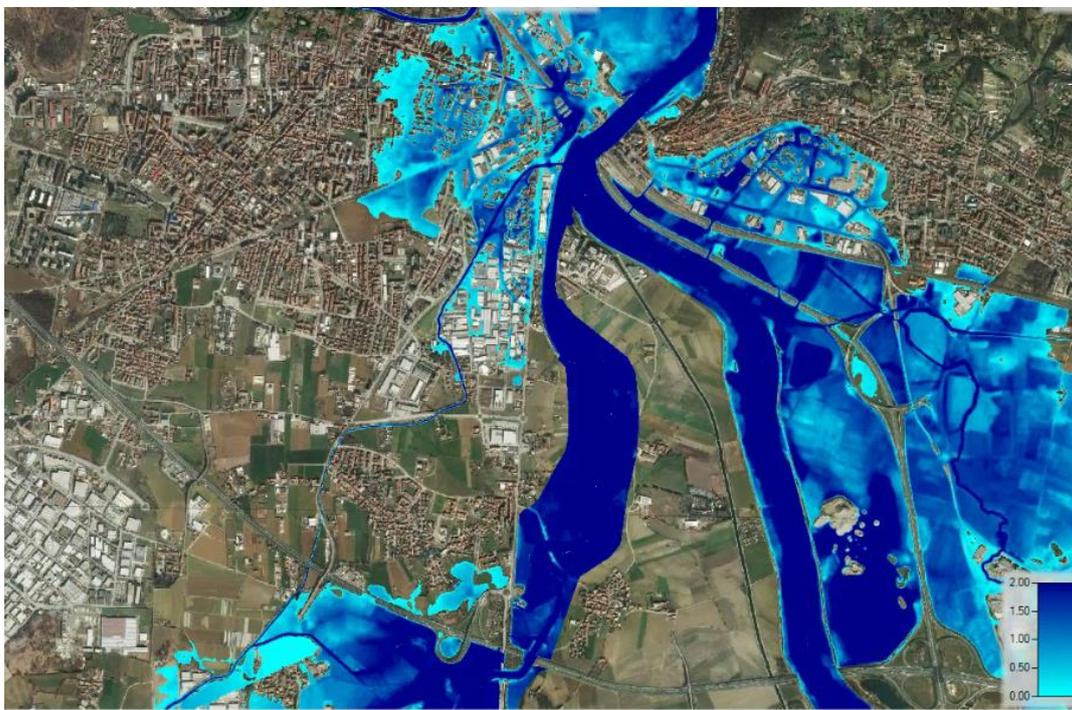


Figura 139: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il rilevato A55 -Tangenziale Sud di Torino e la confluenza con il fiume Po a Moncalieri (scenario A2)



Figura 140: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il rilevato A55 -Tangenziale Sud di Torino e la confluenza con il fiume Po a Moncalieri

Gli effetti indotti dallo scenario A2 sono stati esaminati anche in termini di velocità e tiranti, come commentato qui di seguito.

- A None: nessuna nuova variazione in termini di aree allagate, in tutta l'area i tiranti si mantengono compresi tra 0,5-1,5 m con punte di 2 m in prossimità del ponte di None. Le velocità assumono valori inferiori ai 0,5 m/s tranne che in alcuni punti nei pressi dell'argine sinistro di None in cui superano i 2 m/s. Sotto il ponte della SP 23R la corrente defluisce in pressione con una velocità massima pari ai 3 m/s;
- a Vinovo: nessuna nuova variazione in termini di aree allagate, con un leggero aumento sui 0,2 m/s nelle aree esterne all'alveo e in prossimità gli argini destro e sinistro. In alveo le velocità si mantengono sui 2 m/s raggiungendo valori prossimi ai 4 m/s nel tratto arginato a monte del ponte della SP 143.
- tra None e Vinovo nessuna variazione in termini di aree allagate, le velocità in tutta la piana alluvionale si mantengono dell'ordine di 1 m/s mentre in alveo risultano comprese tra i 1,5 e i 2 m/s raggiungendo valori più elevati in prossimità delle luci dei ponti SP 140, SP 142 ed SP 143 in cui i deflussi avvengono tutti in pressione;
- in prossimità della confluenza con il Torrente Lemina si è osservata una variazione in termini di aree allagate seguita da un leggero aumento delle velocità di 0,20 m/s nelle aree golenali del torrente e un incremento maggiore prossimità dell'abitato di Tetti Rolle. La chiusura dei fornic ha incrementato i tiranti di circa 0.3 m nelle aree a monte del rilevato della Tangenziale, provocando la tracimazione di una parte del rilevato stesso e l'interessamento di alcune aree agricole della borgata di Tagliaferro con altezze d'acqua pari a circa 0,3 m. Un altro effetto riscontrato è stato il leggero aumento dell'area allagata in sponda destra del Chisola, nei pressi dell'abitato di La Loggia con tiranti compresi tra i 0,2 e 0,5 m.
- a valle del rilevato della tangenziale Sud di Torino all'interno dell'area di laminazione individuata dai nuovi rilevati arginali le velocità non subiscono rilevanti cambiamenti e mantengono il valore della precedente simulazione. Le altezze subiscono un leggero incremento dell'ordine dei 0,10 m assumendo valori sui 3 m

lungo l'alveo e intorno ai 2 metri lungo i rilevati arginali. Nell'abitato di Moncalieri si è osservato un leggero aumento dell'area allagata e dei tiranti, provocata dai deflussi provenienti dal canale dei Molini che nel suo ultimo tratto risulta tombato dal piano stradale.

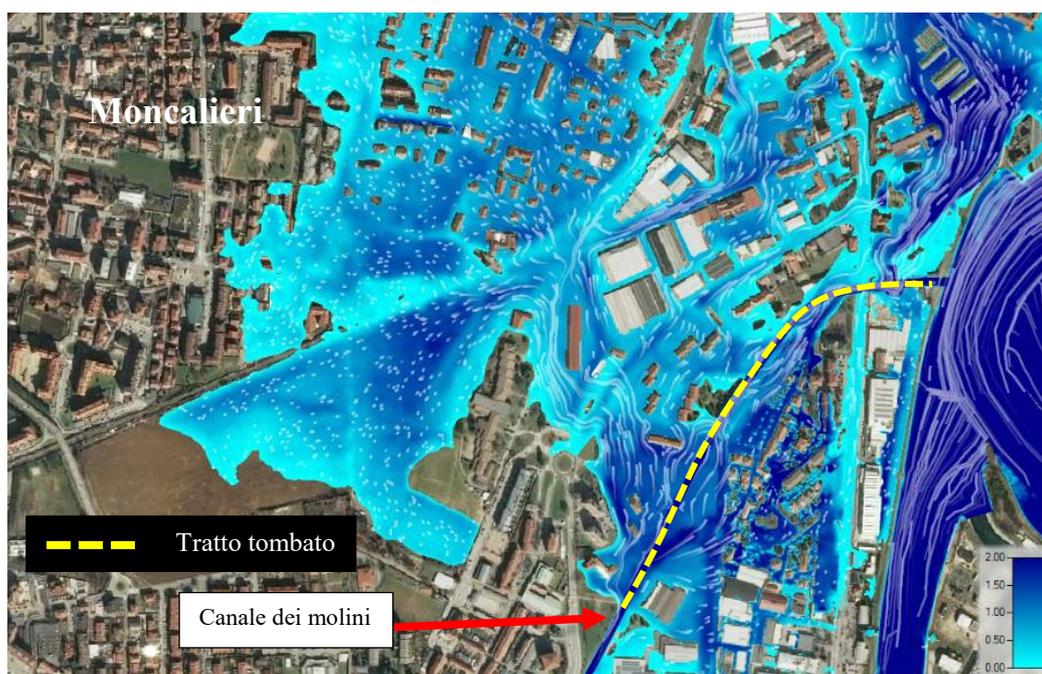


Figura 141: Mappa dei tiranti nell'abitato di Moncalieri con indicazione delle traiettorie di flusso (particle tracing)

6.3.3 Analisi sull'assetto di progetto A3

A seguito delle criticità riscontrate nella precedente simulazione, quest'ultimo scenario di progetto riprende il precedente e prevede un nuovo rilevato arginale per la difesa dell'abitato di Tetti Rolle.

Il tracciato del rilevato arginale è stato scelto in modo da ridurre le aree soggette ad allagamenti senza sottrarre aree di laminazione ai deflussi. Inoltre per ridurre gli allagamenti nell'abitato di Moncalieri è stato inserito nel rilevato arginale anche un manufatto chiavicale in corrispondenza del canale dei Molini (Fig. 3). Il rilevato arginale è stato inserito nel modello utilizzando lo stesso procedimento impiegato nelle simulazioni precedenti.

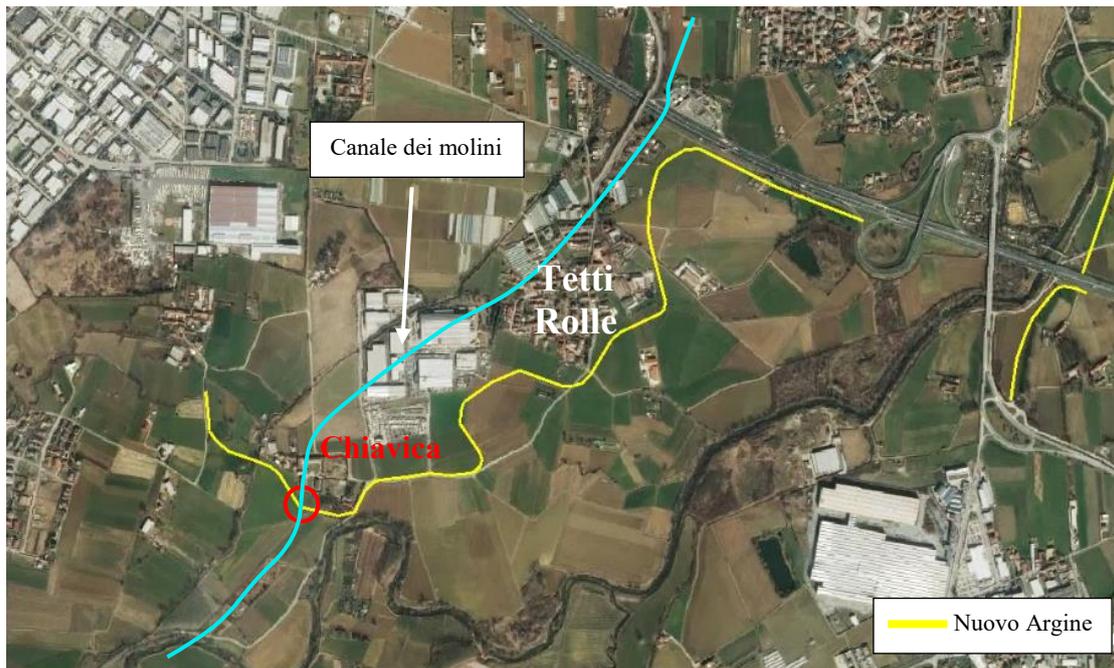


Figura 142: Intervento di realizzazione di un rilevato arginale a difesa dell'abitato di Tetti Rolle

Da un primo confronto in termini di estensione delle aree allagate si è osservato che l'assetto di progetto A3 differisce da quello precedente (A2) principalmente in due zone: nell'abitato di Tetti Rolle, e nella zona urbana di Moncalieri. Ulteriori osservazioni riguardanti il campo di moto delle velocità e dei tiranti sono riportati a seguito delle mappe dei tiranti e delle velocità.

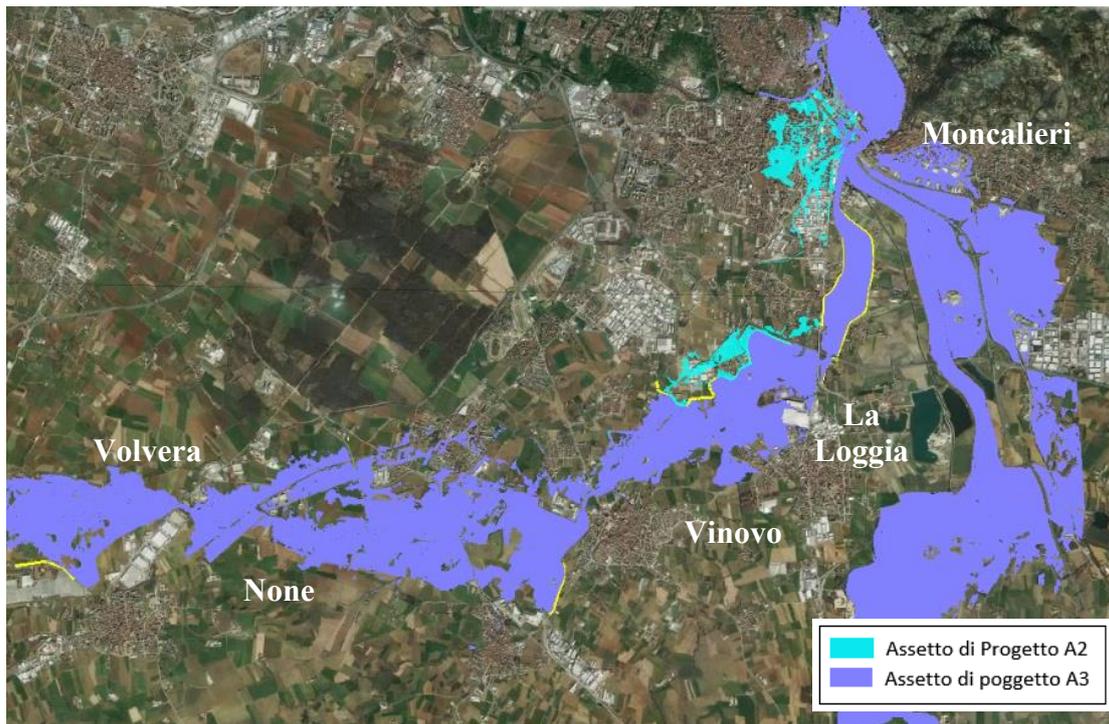


Figura 143: Confronto in termini di aree allagate tra i risultati dell'assetto di progetto A2 e quelli dell'Assetto A3

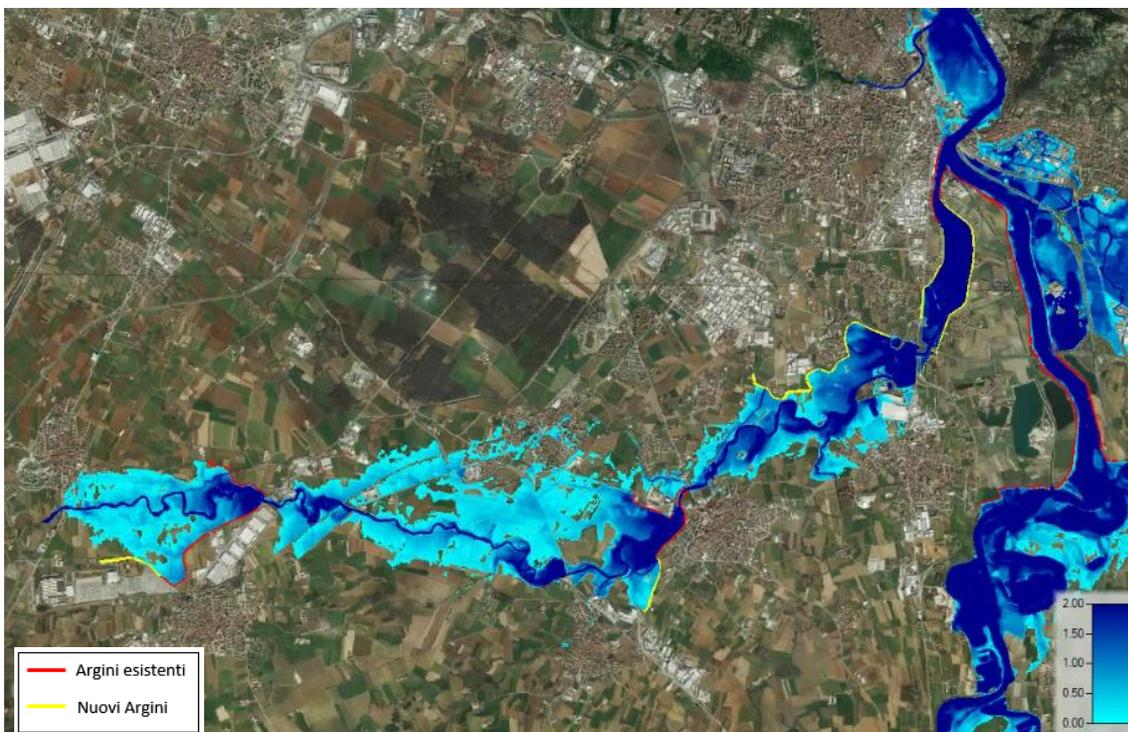


Figura 144: Mappa dei massimi tiranti per lo scenario A3



Figura 145: Mappa delle massime velocità per lo scenario A3

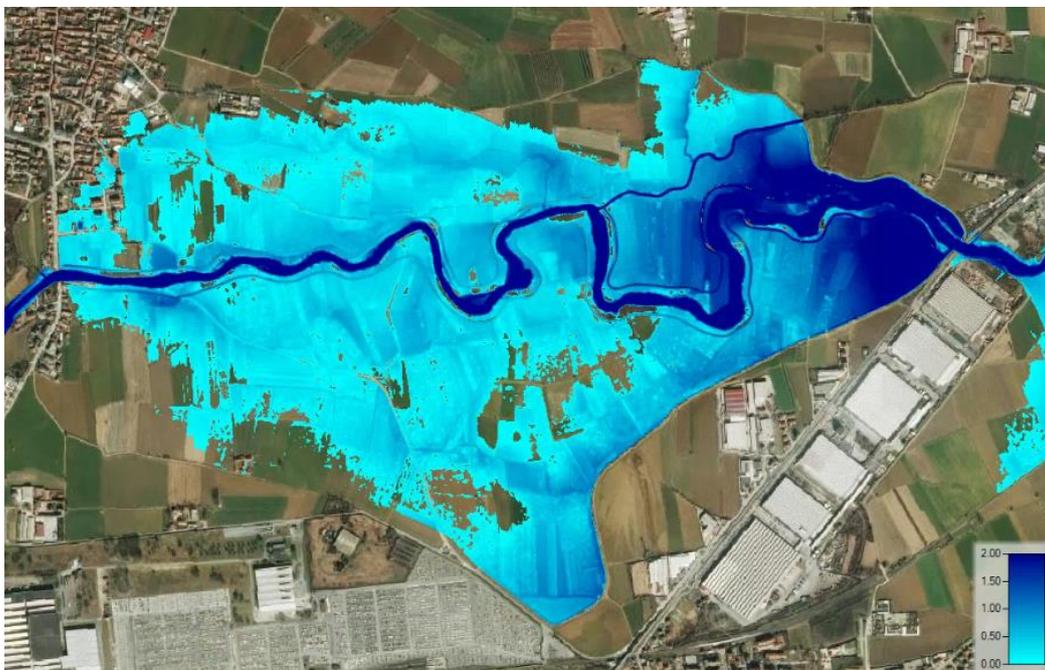


Figura 146: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il ponte SP 139 del comune di Volvera e il ponte SP 23R del comune di Vinovo (scenario A3)

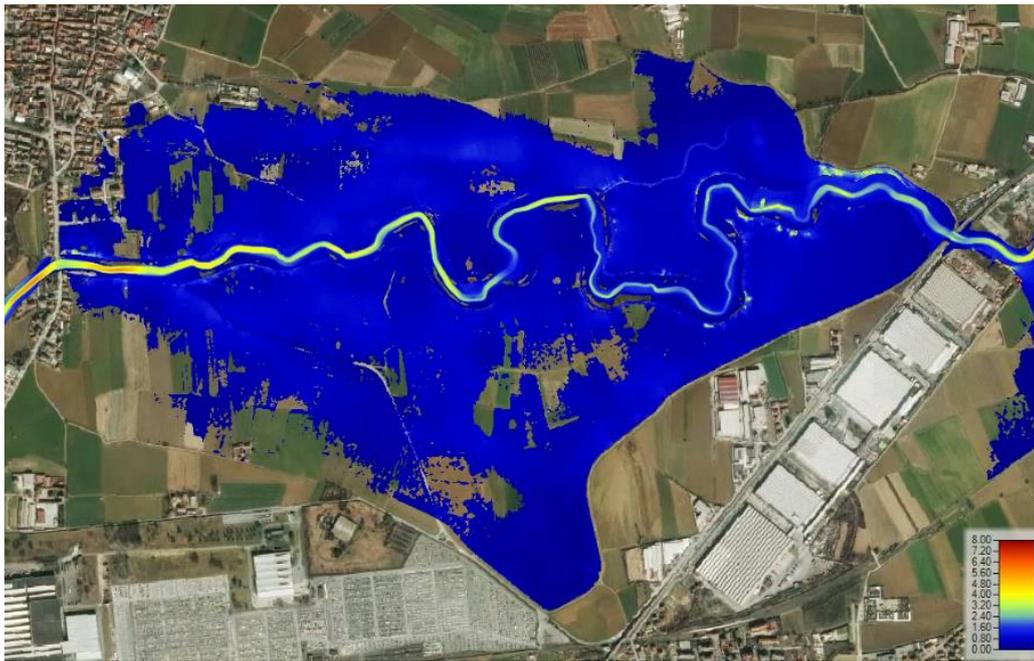


Figura 147: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il ponte SP 139 del comune di Volvera e il ponte SP 23R del comune di Vinovo (scenario A3)

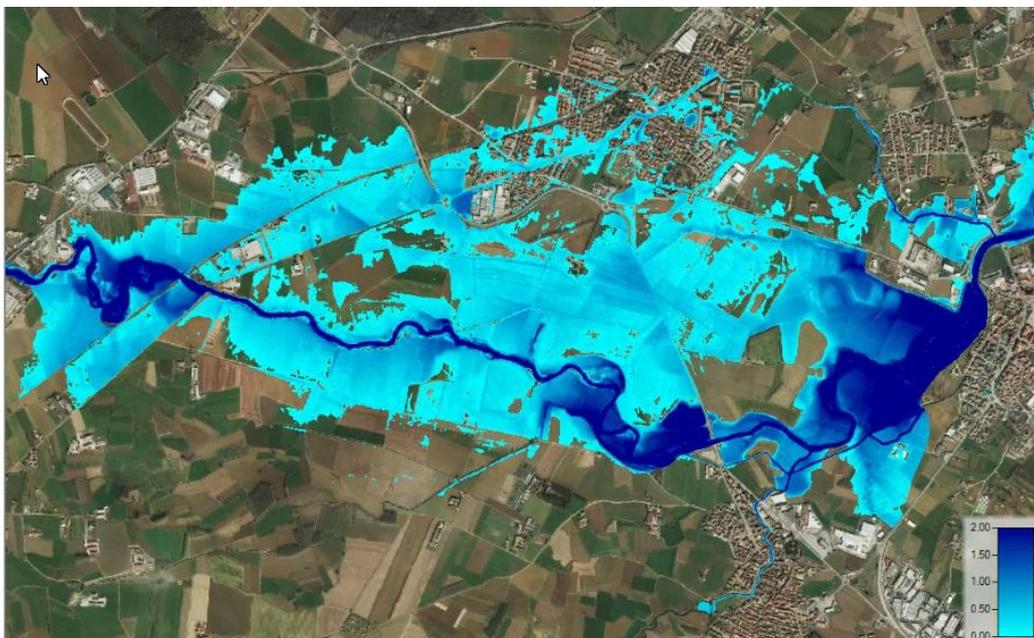


Figura 148: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra i comuni di None e Vinovo (scenario A3)

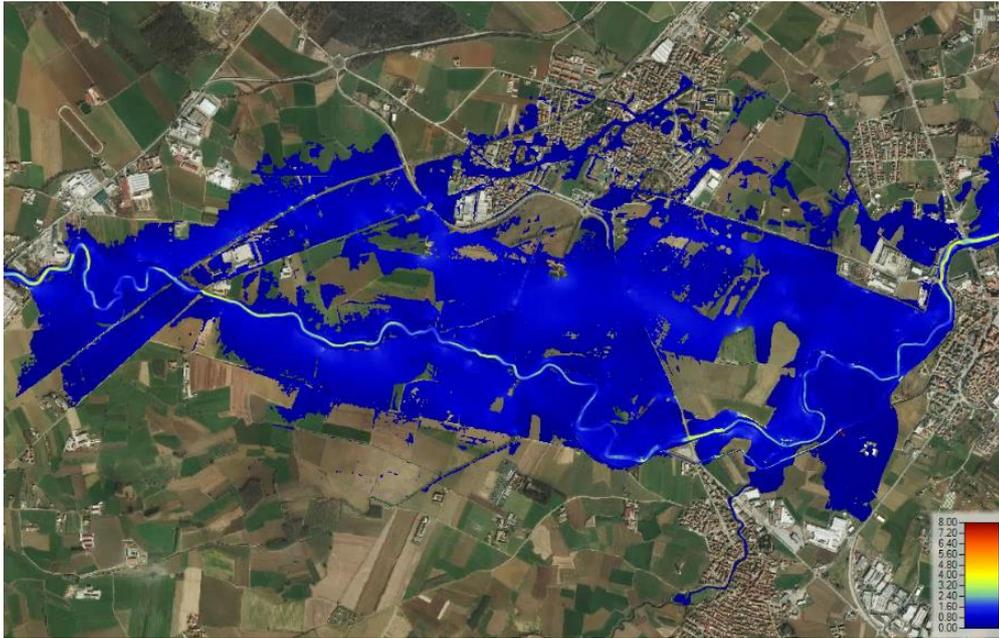


Figura 149: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra i comuni di None e Vinovo (scenario A3)

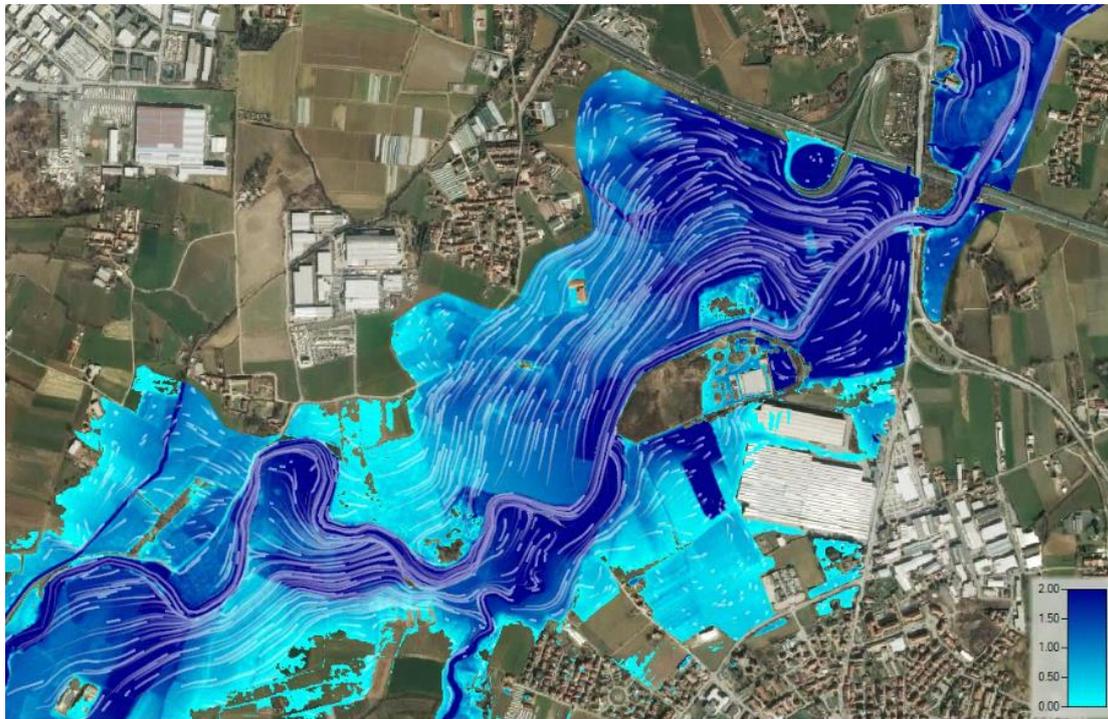


Figura 150: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il comune di Vinovo e il rilevato A55 - Tangenziale Sud di Torino con indicazione delle traiettorie di flusso (particle tracing)

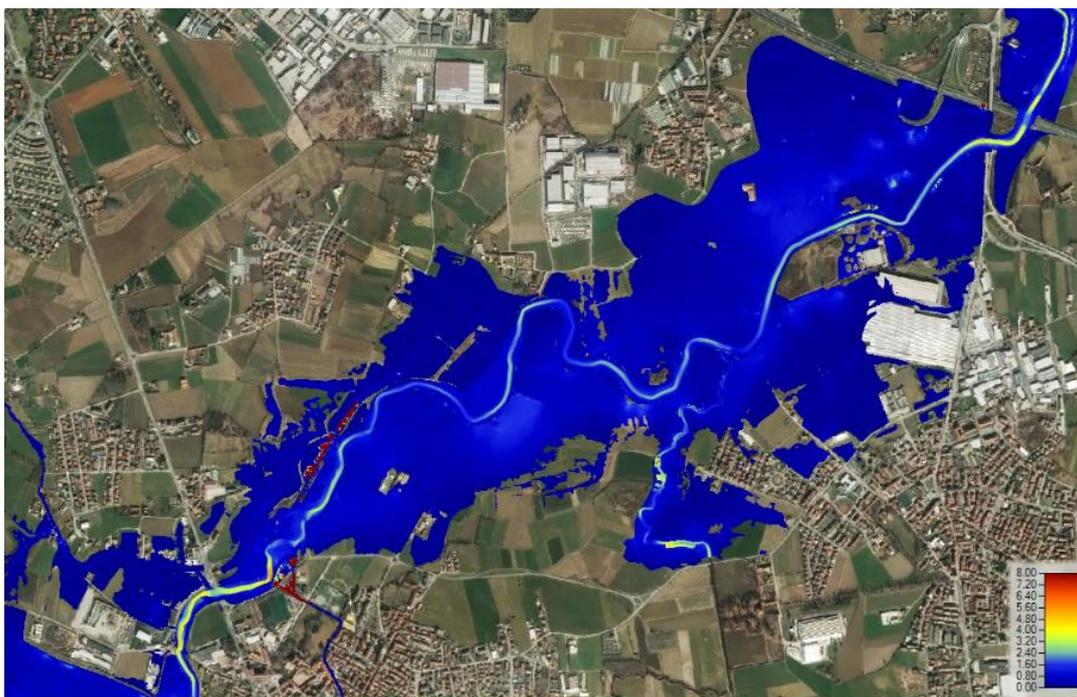


Figura 151: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il comune di Vinovo e il rilevato A55 - Tangenziale Sud di Torino (scenario A3)

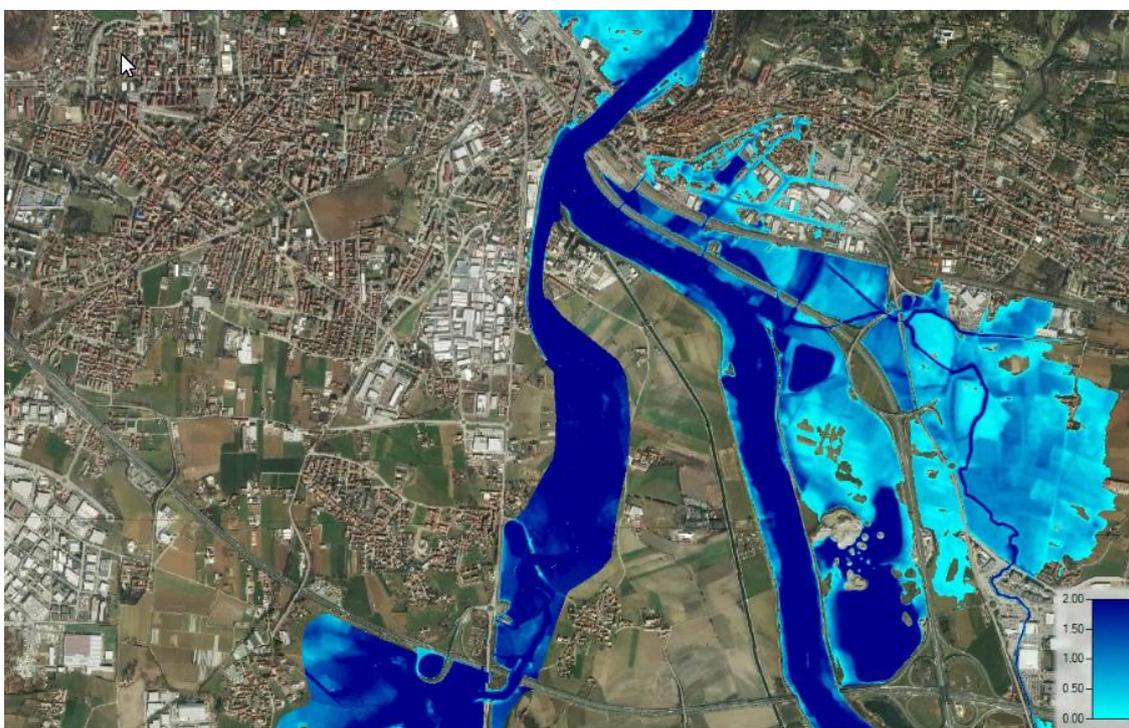


Figura 152: Mappa dei massimi tiranti nel tratto compreso tra il rilevato A55 -Tangenziale Sud di Torino e la confluenza con il fiume Po a Moncalieri (scenario A3)



Figura 153: Mappa delle massime velocità nel tratto compreso tra il rilevato A55 -Tangenziale Sud di Torino e la confluenza con il fiume Po a Moncalieri (Scenario A3)

Gli effetti indotti dallo scenario A3 sono stati esaminati anche in termini di velocità e tiranti, come commentato qui di seguito.

- Nel tratto compreso tra None e Vinovo: nessuna nuova variazione in termini di aree allagate, in tutta l'area i tiranti si mantengono ancora compresi tra 0,5-1,5 m con punte di 2 m in prossimità del ponte di None. Le velocità sono ovunque inferiori a 0,5 m/s tranne in alcuni punti nei pressi dell'argine sinistro di None in cui superano i 2 m/s. Sotto il ponte della SP 23R la corrente defluisce in pressione con una velocità massima pari ai 3 m/s;
- a Vinovo: nessuna nuova variazione in termini di aree allagate. In alveo le velocità si mantengono sui 2 m/s raggiungendo valori prossimi ai 4 m/s nel tratto arginato a monte del ponte della SP 143.

- tra None e Vinovo nessuna variazione in termini di aree allagate, le velocità hanno subito in tutta la piana alluvionale continuano a essere dell'ordine di 1 m/s mentre in alveo risultano comprese tra i 1,5 e i 2 m/s raggiungendo valori più elevati in prossimità delle luci dei ponti SP 140, SP 142 ed SP 143 in cui i deflussi avvengono tutti in pressione;
- in prossimità della confluenza con il Torrente Lemina si è osservata una variazione in termini di aree allagate con una riduzione dei valori di velocità per valori compresi tra i 0,20 e 0,5 m/s nelle aree golenali. Lungo l'intero sviluppo del rilevato arginale a protezione dell'abitato di Tetti Rolle le velocità si mantengono sotto i 0,5 m/s anche in prossimità del rilevato della Tangenziale Sud di Torino. La chiusura dei fornicci e la presenza del rilevato arginale hanno indotto un aumento dei tiranti di circa 0.5 m nelle aree a monte del rilevato della Tangenziale.

Se da un lato si è osservata una riduzione quasi totale degli allagamenti che nella simulazione precedente interessavano l'abitato di Tetti Rolle, nello stesso tempo i deflussi hanno interessato altre aree limitrofe come quelle del comune di La Loggia in cui si è osservato un incremento dei tiranti di 0,3 m rispetto allo scenario precedente.

- a valle del rilevato della tangenziale Sud di Torino all'interno dell'area di laminazione individuata dai nuovi rilevati arginali le velocità subiscono una riduzione lungo l'alveo di circa 0,10 m e un incremento dello stesso ordine lungo i rilevanti arginali. I tiranti subiscono una riduzione dell'ordine dei 0,20 m rispetto allo scenario precedente (A2) assumendo valori intorno ai 2 metri in prossimità degli Argini. Nell'abitato di Moncalieri si è osservata una riduzione significativa degli allagamenti e quindi dei tiranti, provocata dalla presenza del manufatto chiavica nell'argine a Tetti Rolle che ha impedito alla corrente di raggiungere l'abitato di Moncalieri.

7. Conclusione

Gli eventi metereologici eccezionali sono sempre più frequenti negli ultimi anni e causano alluvioni con bilanci a volte pesanti: feriti, dispersi, morti, sfollati, danni alle agli edifici, alle infrastrutture, alle attività economiche, al patrimonio artistico. L'individuazione delle aree a potenziale rischio di alluvione è di primaria importanza per potere predisporre mappe sempre aggiornate come validi strumenti di valutazione e gestione del rischio. L'evento di piena che ha interessato il Piemonte tra il 21 e il 25 Novembre 2016 ha evidenziato, sulla base delle criticità verificate, la necessità di ridefinire nuove linee di intervento per la difesa del territorio, in quelle zone in cui l'uso del suolo si è dimostrato non compatibile con le dinamiche di allagamento. Gli effetti al suolo, largamente diffusi su tutto il territorio piemontese, hanno riguardato in particolar modo le aree attraversate dal torrente Chisola dove l'estensione degli allagamenti è risultata generalmente più estesa rispetto a quelle cartografata dal PGRA-2015 anche nello scenario avente tempo di ritorno di 500 anni.

Il lavoro della tesi è scaturito dalla necessità di aggiornare, per il corso d'acqua esaminato, gli scenari di pericolosità individuati nell'ambito della redazione del secondo ciclo del Piano di Gestione Rischio Alluvioni del fiume Po che terminerà nel 2021. La definizione delle aree a potenziale rischio significativo del torrente Chisola è stata condotta per tre diversi di pericolosità Low, Medium, Hight ricorrendo a due metodologie aventi un differente livello di confidenza. Un primo risultato per ricavare le mappe in termini di tiranti è stato ottenuto ricorrendo a un metodo speditivo e la procedura adottata si è avvalsa dell'uso del software open source Quantum QGIS nella versione 2.18.13 (Las Palmas). Successivamente è stato impiegato un metodo di dettaglio con la costruzione di un modello idraulico combinato 1D-2D con l'impiego del software GeoHecRas2D che ha consentito l'aggiornamento delle mappe di pericolosità, in termini di tiranti e velocità, nelle condizioni di pericolosità più critiche. Gli scenari infatti sono stati analizzati in modo tale da massimizzare l'estensione delle aree allagate nel tratto terminale del torrente Chisola, in prossimità della confluenza con il fiume Po. Nello studio si è tenuto conto anche degli affluenti in sinistra idrografica del Chisola nonché di una serie di canali di derivazione presenti sul territorio. La fase di taratura del modello è stata condotta ricostruendo la dinamica dell'evento alluvionale del 25 Novembre 2016 considerando

nelle simulazioni anche un tratto del fiume Po per tener conto dell'importanza dell'effetto di rigurgito all'interno del Chisola in prossimità della confluenza.

Dai risultati ottenuti si evince come il modello idrodinamico combinato abbia riprodotto in maniera soddisfacente le dinamiche fluviali osservate nel corso dell'evento del 2016 con qualche scostamento accettabile (vedi Cap. 5 Paragrafo 5.3.2).

Il livello di confidenza dei risultati ottenuti con il modello speditivo si può considerare alquanto basso per via delle ipotesi semplificative usate nello stesso, conseguente all'aver assunto una distribuzione lineare delle quote idriche su tutta l'area di riferimento senza considerare la presenza di ostacoli quali edifici, muri, rilevati stradali, opere idrauliche, ecc. L'utilizzo del metodo di dettaglio ha invece favorito il raggiungimento di un livello di confidenza più accurato e ha permesso di simulare la propagazione dell'onda di piena in condizioni di moto vario secondo i tre scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni. Le mappe ricavate con l'impiego dei due modelli differenti sono state messe a confronto evidenziando le forti differenze specie in termini di estensione delle superfici allagate e della differenza in termini dei livelli idrici riscontrati.

Nell'ultimo capitolo della tesi, in collaborazione con l'Agenzia Interregionale del Fiume Po, Autorità Idraulica competente nel territorio, sono stati analizzati alcuni interventi per la messa in sicurezza dei territori rivieraschi dal Comune di Volvera al Comune di Moncalieri. Dai risultati ottenuti si è osservato come la riduzione del rischio idraulico su alcune porzioni di territorio con la realizzazione di opere strutturali, nel caso analizzato di rilevati arginali, non risolve integralmente le problematiche riscontrate.

Risulta chiaro che nell'ambito della realizzazione delle opere idrauliche per la riduzione del rischio, detti interventi non possono essere pensati e realizzati unicamente per risolvere problemi locali, ma vanno pensati a scala più ampia, a lungo termine e con una visione più strategica coinvolgendo interi tratti di un corso d'acqua. Potrebbero essere pensate strategie di intervento che consentono di sfruttare il quanto più possibile le aree disponibili limitrofe al corso d'acqua mediante la creazione di aree golenali allagabili poste tra due arginature al fine di consentire la laminazione del colmo di piena di progetto, oppure interventi che permettono di aumentare la resilienza del territorio, anche riqualificando l'habitat fluviale attraverso il ripristino di una fascia tampone al corso d'acqua, al fine quindi di proteggere anche il territorio circostante. .

Sarebbe auspicabile, inoltre, che lo studio sviluppato nel lavoro di tesi venga ulteriormente approfondito e completato con la redazione delle mappe di rischio, con l'indicazione delle potenziali conseguenze negative in termini di numero di abitanti e delle attività economiche coinvolti, al fine di definire le azioni correttive di tipo attivo e passivo da attuare.

Bibliografia

- AIPo - Relazione di fine evento - *“Evento di piena del bacino del fiume Po”*, Novembre 2016
- AIPo- *“Rilievi Topografici del torrente Chisola dall’abitato di Volterra a confluenza Po”*
- Anthi-Eirini K. Vozinakia, Giasemi G. Morianoua, Dimitrios D. Alexakisa and Ioannis K. Tsanis (2017) *“Comparing 1D and combined 1D/2D hydraulic simulations using high resolution topographic data: a case study of the Koiliaris basin, Greece”*
- Aricò, C.; Sinagra, M.; Begnudelli, L.; Tucciarelli, T. MAST *“2D diffusive model for flood prediction on domains with triangular Delaunay unstructured meshes”* (Adv. Wat. Res. 2011, 34, 1427–1449).
- Arpa Piemonte *“Analisi Regionale delle Piene dei Bacini Montani”*, 2012
- Arpa Piemonte *“Analisi Preliminare Evento 21-25 Novembre 2016”*, Dicembre 2016
- Arpa Piemonte *“Analisi e valutazione degli aspetti morfologici”*, 2016
- Autorità di bacino del fiume Po- Relazione Metodologica - *“Aggiornamento e revisione delle mappe di pericolosità e del rischio di alluvione”* - II ciclo di gestione - Distretto del fiume Po, 20 dicembre 2019
- Autorità di Bacino fiume Po- Relazione Metodologica- *“Aggiornamento e revisione delle mappe di pericolosità e del rischio di alluvione”* – II ciclo di gestione. Allegato 2- *“Attività sviluppate a livello distrettuale per la valutazione dei tiranti e delle velocità nelle APSFR distrettuali”* - Distretto del fiume Po, 2019
- Autorità di Bacino fiume Po- Relazione Metodologica – *“Aggiornamento e revisione delle mappe di pericolosità e del rischio di alluvione”* – II ciclo di gestione. Allegato 3” *Attività sviluppate a livello regionale per la valutazione dei tiranti e delle velocità nelle APSFR regionali”* - Distretto del fiume Po, 2019
- Autorità di Bacino del fiume Po - *“Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni”*- Parte I- Inquadramento generale, Marzo 2016
- Autorità di bacino del fiume Po – *“Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni”*- II A. *“Mappatura della pericolosità e valutazione del rischio”*, Marzo 2016
- Autorità di Bacino del fiume Po – *“Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni”*- III A. *“Relazione di piano Primo Piano di gestione del rischio di alluvioni”* (PGRA 2015-2021)

- Autorità di Bacino del fiume Po – “*Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni*” - IV A - “*Aree a rischio significativo di alluvione ARS Distrettuali*”, Marzo 2016
- Autorità di Bacino del fiume Po – “*Piano stralcio per l’assetto Idrogeologico*” (PAI) 26 aprile 2001
- Autorità di Bacino del fiume Po-Relazione metodologica – “*Valutazione preliminare del rischio di alluvioni e definizione delle aree a potenziale rischio significativo di alluvioni*”- II ciclo di gestione - Distretto del fiume Po, 2019
- Autorità di Bacino del fiume Po-Norme di Attuazione. Elaborato 7 – “*Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico*”- PAI,2006
- Barbano A., Braca G., Bussetini M., Dessì B., Inghilesi R., Lastoria B., Monacelli G, Morucci S., Piva F, Sinapi L., Spizzichino D. “*Proposta metodologica per l’aggiornamento delle mappe di pericolosità e rischio*”, Manuali e Linee Guida 82/2012
- Barbero Secondo- “*Valutazione Portata di Progetto Torrente Chisola*”, Gennaio 2018
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 29 settembre 1998 n. 180
- DHI, Technical Paper- “*Modelli numerici per l’idraulica fluviale*”
- *Federico Rubiu*-“*Flood risk assessment in the vicinity of Kartena town using Hec-Ras 1d-2d models*”, Master's degree thesis, 2018
- Gazzetta Ufficiale del 2 aprile 2010, n. 77. Decreto Legislativo 23 Febbraio 2010, n.49. “*Attuazione della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvione*”
- Gazzetta ufficiale dell’Unione Europea del 6/11/2007 L.288/27- *Direttiva 2007/60 del Parlamento Europeo e del Consiglio*
- Gazzetta ufficiale dell’Unione Europea del 22/12/2000 L.327/1 *Direttiva 2000/60 del Parlamento europeo e del Consiglio.*
- Gazzetta Ufficiale- Serie Generale n.166 del 19-07-2001 – (Suppl. Straordinario n. 166) “*Adozione del Piano stralcio per l’assetto idrogeologico per il bacino idrografico di rilievo nazionale del fiume Po*”. (Deliberazione n. 18/2001)
- G. De Marchi, D. Citrini, G. Nosedà - “*Nozioni di Idraulica*”, Edagricole, Bologna, 1977
- GeoHECRAS- “HEC-RAS 2D Flow Modeling Ebook” Marzo 2019*

- Henderson, F.M “*Open Channel Flow, MacMillan Publishing Inc*”, New York, 1966.
- Laio Francesco e Ganora Daniele-Politecnico di Torino - “*Consulenza tecnica relativa all’evento alluvionale del 23-26 Novembre 2016 nei comuni di Moncalieri e Torino*” Giugno 2017
- Laio Francesco e Secondo Barbero - “*Previsione e caratterizzazione meteo-idrologica dell’evento del 22-25 novembre 2016 e confronto con gli eventi passati*”, Marzo 2017
- Ministero dell’ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare - *Indirizzi operativi per l’attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione ed alla gestione dei rischi da alluvioni* Gennaio 2013
- Natale Luigi “*Approfondimenti idraulici asta Torrente Chisola*”
- Patel, D.P., Ramirez, J.A., Srivastava, “*Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5*”. *Nat Hazards*, 2017
- RUWA Acqua Territorio Energia, modellistica Idrologica e Idraulica - “*Corso HEC-RAS Moto Vario*” Gennaio 2015
- RUWA Acqua Territorio Energia, modellistica Idrologica e Idraulica - “*Corso HEC-RAS Modellizzazione Bidimensionale*” Settembre 2016
- RUWA “*Corso HECRAS sulla modellazione bidimensionale*” 2016
- Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio* - Edizione 2018. ISPRA, Rapporti 287/2018
- US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. “*HEC-RAS 5.0. River Analysis System. Hydraulic Reference Manual*”, Febbraio 2016.
- V.T. Chow “*Open Channel Hydraulics*”, McGraw-Hill, 1959.
- Yunus A. Cengel, John M. Cimbala - “*Meccanica Dei Fluidi*” - McGraw-Hill

Sitografia

<https://adbpo.gov.it/>

http://www.adbpo.it/PDGA_Documenti_Piano/

<https://www.agenziapo.it/#http://iononrischio.protezionecivile.it/prevenire-le-alluvioni-gestire-le-criticita/>

<http://www.arpa.piemonte.it/pubblicazioni-2/gli-eventi-alluvionali-in-piemonte>

http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/ambiente/dwd/risidriche/pdf/chisola/protocollo_intesa_chisola_web.pdf

<http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/territorio-urbani>

http://www.dicat.unige.it/idraflu/Dispense_IdrFluv/Dispense_FondoFisso.pdf

<https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR192/ALL/ALL>

<https://ec.europa.eu/>

http://www.idrologia.polito.it/didattica/PIT/2013/2_AnalisiRegionale/AltroMateriale/DATI_AtlanteBaciniImbriferi.pdf

<https://www.isprambiente.gov.it/it>

<https://www.minambiente.it/>

<https://pai.adbpo.it/index.php/2016/05/25/psff/http://www.pcn.minambiente.it/mattm/direttiva-alluvioni/>

<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/direttiva-alluvioni/>

<https://www.regione.piemonte.it/web/temi/protezione-civile-difesa-suolo-opere-pubbliche/difesa-suolo/strumenti-per-difesa-suolo/piano-per-lassetto-idrogeologico-pai>

<https://rivista.ording.roma.it/wp-content/uploads/2015/02/quaderno-3.38-50.pdf>

https://webgis.arpa.piemonte.it/ags101free/services/geologiaedisesto/evento_alluvionale_2016/MapServer/WMSServer

<https://knowledge.civilgeo.com/knowledge-base/>