



COMUNE DI PAVIA

VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DI RISCHIO IDRAULICO DEL FIUME TICINO IN COMUNE DI PAVIA ai sensi dell'All. 4 della D.G.R. IX/2616/2011 e della D.G.R. X/6738/2017

RELAZIONE

SOMMARIO

1	PREMESSA	3
2	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	4
2.1	PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI).....	4
2.2	PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI	5
2.2.1	<i>Disposizioni regionali concernenti l'attuazione del PGRA nel settore urbanistico (DGR 19 giugno 2017 n. X/6738).....</i>	<i>6</i>
2.3	PROCEDURE PER LA VALUTAZIONE E LA ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO DA ESONDAZIONE (ALL. 4).....	8
3	STUDI IDRAULICI PREGRESSI.....	11
3.1	MONITORAGGIO MORFOLOGICO E SEDIMENTOLOGICO DELL'ALVEO DEL FIUME TICINO.....	11
3.2	STUDIO PER LA DEFINIZIONE DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – S.G.P. SERVIZI DI GEO-INGEGNERIA E PROGETTAZIONE S.R.L.	12
4	IL FIUME TICINO.....	13
4.1	CARATTERIZZAZIONE DELLE OPERE PRESENTI LUNGO IL FIUME TICINO A PAVIA.....	13
4.2	ASPETTI IDRAULICI DEL FIUME TICINO.....	14
4.3	IL REGIME IDROLOGICO DEL FIUME TICINO	15
4.4	CARATTERI GENERALI DELLE PIENE DEL FIUME TICINO	18
4.5	LE MAGRE DEL FIUME TICINO A PAVIA	19

#

4.6	LE PIENE STORICHE DEL FIUME TICINO A PAVIA	19
5	RILIEVI TOPOGRAFICI E RICOSTRUZIONE DEL MODELLO DEL TERRENO	21
5.1	INFORMAZIONI TOPOGRAFICHE UTILIZZATE E COSTRUZIONE DEL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO	21
6	STUDIO IDRAULICO BIDIMENSIONALE	23
6.1	LA PIENA DI RIFERIMENTO.....	23
6.2	DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO.....	23
6.3	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE	26
6.3.1	<i>Descrizione della geometria dell'alveo.....</i>	<i>26</i>
6.3.2	<i>Descrizione geometrica delle aree di allagamento</i>	<i>28</i>
6.3.3	<i>Condizioni al contorno e coefficienti di scabrezza</i>	<i>31</i>
6.4	TARATURA EVENTO DI PIENA OTTOBRE 2000.....	34
6.5	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI E INDIVIDUAZIONE DELLE AREE ESONDABILI	35
6.5.1	<i>Simulazione piena Ticino senza rigurgito del Po</i>	<i>36</i>
6.5.2	<i>Simulazione Piena Ticino con rigurgito del Po.....</i>	<i>38</i>
7	ZONAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO	42
7.1	ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ	42
7.2	ZONAZIONE DEL RISCHIO	43

#

1 PREMESSA

Il Comune di Pavia, ai sensi della D.G.R. X/6738 del 19 giugno 2017 - punto 3.1.4, è tenuto a verificare e, ove necessario, ad aggiornare le condizioni di pericolosità e rischio idraulico locale del Fiume Ticino, già effettuate nel 2012 all'interno dello studio relativo alla componente geologica, idrologica e sismica redatta da S.G.P. Il presente documento costituisce aggiornamento del precedente studio idraulico.

La valutazione del rischio idraulico dovrà essere predisposta secondo le metodologie contenute nell'Allegato 4 "*Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da esondazione*" alla D.G.R. IX/2616 del 30/11/2011 "*Aggiornamento dei criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell'art. 57 della L.R. n. 12 dell'11/3/2005*" approvati con D.G.R. n. 8/1566 del 22/12/2005 e successivamente modificati con D.G.R. 8/7374 del 28/05/2008, per un tempo di ritorno di 200 anni.

Le elaborazioni effettuate hanno definito il grado di pericolosità idraulica(H) ritenuta adeguata alla caratterizzazione dei fenomeni di esondazione interessanti l'ambito di piana alluvionale del fiume Ticino.

Lo studio si è articolato nelle seguenti fasi procedurali:

- analisi degli studi idraulici pregressi allo scopo di acquisire dati di carattere tecnico utili all'elaborazione dello studio (valori di portata, assetto idraulico dei corsi d'acqua, aree inondabili ecc.);
- rilievo geomorfologico di dettaglio del corso d'acqua, delle sponde fluviali e dell'argine di recente realizzazione, supportato dalla base aerofotogrammetrica del comune di Pavia e dal rilievo LIDAR del fiume Ticino;
- rilievo topografico delle sezioni idrauliche di interesse con aggancio delle quote all'aerofotogrammetrico comunale;
- rilievo del profilo fluviale per un tratto sufficiente alla definizione della pendenza media dell'asta;
- determinazione, sulla base dei dati idrologici ed idraulici degli studi sopramenzionati, delle portate al colmo per un tempo di ritorno di 200 anni e degli idrogrammi;
- modellazione idraulica bidimensionale in condizioni di moto vario;
- definizione della pericolosità idraulica incrociando i valori di velocità della corrente a quelli del tirante ottenuti dalla simulazione idraulica bidimensionale;
- individuazione delle aree di rischio (R).

#

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

2.1 PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (PAI)

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino idrografico del fiume Po (PAI), redatto dall'Autorità di bacino del fiume Po ai sensi della legge 18 maggio 1989 n. 183, art. 17 comma 6-ter, è stato approvato con D.P.C.M. del 24 maggio 2001; con la pubblicazione del D.P.C.M. di approvazione sulla G.U. n. 183 del 8 agosto 2001 il Piano è entrato definitivamente in vigore e dispiega integralmente i suoi effetti normativi.

Il PAI persegue l'obiettivo di garantire al territorio del bacino un livello di sicurezza adeguato rispetto ai fenomeni di dissesto idraulico ed idrogeologico.

Per i corsi d'acqua principali di pianura e fondovalle sono definite fasce di pertinenza fluviale che individuano le aree soggette a diversi gradi di pericolosità.

Per ognuna delle fasce sono definite specifiche norme di uso del suolo e specifici divieti:

- la fascia A, costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento, del deflusso della corrente, cui corrisponde una portata di calcolo pari a quella di piena relativa ad un tempo di ritorno di 200 anni e ridotta del 20%. Più precisamente risulta la porzione d'alveo nella quale defluisce l'80% della portata di piena relativa ad un tempo di ritorno di 200 anni, con la verifica che le portate esterne a tale porzione di alveo abbiano una velocità di deflusso non superiore a 0,4 m/s;
- la fascia B, che delimita la porzione di alveo nella quale scorre la portata di piena corrispondente ad un tempo di ritorno di 200 anni; i limiti spesso coincidono con quelli di fascia A, in particolare quando la presenza di arginature e rifacimenti spondali determinano una variazione della conformazione originaria della geometria e della morfologia dell'alveo.
- Il Piano indica con apposito segno grafico, denominato "limite di progetto tra la Fascia B e la Fascia C", le opere idrauliche programmate per la difesa del territorio. Allorché dette opere saranno realizzate, i confini della Fascia B si intenderanno definiti in conformità al tracciato dell'opera idraulica eseguita e la delibera del Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino del fiume Po di presa d'atto del collaudo dell'opera varrà come variante automatica del presente Piano per il tracciato di cui si tratta.
- la fascia C che delimita una parte di territorio che può essere interessata da eventi di piena straordinari, tanto che le portate di riferimento risultano quella massima storicamente registrata, se corrispondente ad un tempo di ritorno superiore a 200 anni, oppure quella relativa ad un tempo di ritorno pari a 500 anni.

Ai sensi dell'art. 39 comma 2 delle NdA del PAI, qualora all'interno dei centri edificati comunali ricadano aree comprese nelle Fasce A e/o B, l'Amministrazione comunale è tenuta a valutare, d'intesa con l'autorità regionale o provinciale competente in materia urbanistica, le condizioni di rischio, provvedendo, se necessario, a modificare lo strumento urbanistico al fine di minimizzare tali condizioni di rischio.

#

2.2 PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI

Il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) è stato adottato con deliberazione n.4 nella seduta del 17 dicembre 2015 e approvato con deliberazione n. 2 del 3 marzo 2016 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Po.

Il Piano di Gestione Rischio Alluvioni è lo strumento operativo previsto dal d.lgs. 49/2010, in attuazione alla Direttiva Europea 2007/60/CE, per individuare e programmare le azioni necessarie a ridurre le conseguenze negative delle alluvioni per la salute umana, per il territorio, per i beni, per l'ambiente, per il patrimonio culturale e per le attività economiche e sociali.

Per il territorio interessato dalle alluvioni di tutti i corsi d'acqua che confluiscono nel Po, dalla sorgente fino allo sbocco in mare, è stato predisposto il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Po, brevemente PGRA-Po.

Il PGRA-Po è stato predisposto dalle amministrazioni competenti per la difesa del suolo e la protezione civile nel Distretto Padano, in coordinamento tra loro e con gli enti sovra regionali competenti per le due materie. Per il Distretto Padano gli autori sono: l'Autorità di Bacino del Po, le Regioni Valle d'Aosta, Piemonte, Liguria, Lombardia, Veneto, Emilia Romagna, la Provincia Autonoma di Trento e il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile.

Il PGRA-Po contiene in sintesi:

- la mappatura delle aree potenzialmente interessate da alluvioni, classificate in base alla pericolosità (aree allagabili) e al rischio, con particolare riferimento alle situazioni a maggiore criticità;
- il quadro attuale dell'organizzazione del sistema di protezione civile in materia di rischio alluvioni;
- le misure da attuare per ridurre il rischio nelle fasi di prevenzione e protezione e nelle fasi di preparazione, ritorno alla normalità ed analisi.

Le mappe di pericolosità evidenziano le aree potenzialmente interessate da eventi alluvionali secondo gli scenari di bassa probabilità (P1 - alluvioni rare con T=500 anni), di media probabilità (P2- alluvioni poco frequenti T=100-200 anni) e alta probabilità (P3 - alluvioni frequenti T=20-50 anni), distinte con tonalità di blu, la cui intensità diminuisce in rapporto alla diminuzione della frequenza di allagamento.

Le mappe identificano ambiti territoriali omogenei distinti in relazione alle caratteristiche e all'importanza del reticolo idrografico e alla tipologia e gravità dei processi di alluvioni prevalenti ad esso associati, secondo la seguente classificazione:

- Reticolo idrografico principale (RP)
- Reticolo idrografico secondario collinare e montano (RSCM)
- Reticolo idrografico secondario di pianura artificiale (RSP)
- Aree costiere lacuali (ACL).

Le mappe del rischio segnalano la presenza nelle aree allagabili di elementi potenzialmente esposti (popolazione, servizi, infrastrutture, attività economiche, etc.) e il corrispondente livello di rischio, distinto in 4 classi rappresentate mediante colori: giallo (R1-Rischio

#

moderato o nullo), arancione (R2-Rischio medio), rosso (R3-Rischio elevato), viola (R4-Rischio molto elevato).

Nell'ambito della redazione del PGRA è stata condotta una specifica attività volta a verificare le esigenze di aggiornamento degli strumenti di pianificazione di bacino vigenti (Piano per l'Assetto Idrogeologico – PAI e PAI Delta) allo scopo di armonizzarli con il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni – PGRA.

Con deliberazione 5/2015, nella seduta del 17 dicembre 2015, il Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del F. Po adotta il Progetto di Variante alle Norme di Attuazione del PAI e del PAI Delta. Con Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 5 del 7 dicembre 2016 è stata successivamente adottata la Variante, articolata come segue:

PARTE PRIMA: introduzione del Titolo V delle NA del PAI, recante "Norme in materia di coordinamento tra il PAI e il Piano di Gestione dei Rischi di Alluvione (PGRA)";

PARTE SECONDA: introduzione della Parte III delle NA del PAI Delta, recante "Norme in materia di coordinamento tra il PAI Delta e il Piano di Gestione dei Rischi di Alluvione (PGRA)".

Di seguito si richiamano sinteticamente alcuni articoli desunti dall'Allegato 1 alla sopracitata Deliberazione C.I. n. 5 del 7 dicembre 2016 (nuovo Titolo V), significativi dal punto di vista urbanistico.

- l'art. 57, comma 1 sancisce che le mappe di pericolosità e rischio contenute nel PGRA costituiscono integrazione del quadro conoscitivo del PAI;
- art. 57, comma 3 sancisce che le suddette Mappe PGRA costituiscono quadro di riferimento per la verifica delle previsioni e prescrizioni del PAI con riguardo, in particolare, all'Elaborato n. 2 (Atlante dei rischi idraulici e idrogeologici – Inventario dei centri abitati montani esposti a pericolo), all'Elaborato n. 3 (Linee generali di assetto idraulico e idrogeologico) nonché per la delimitazione delle Fasce fluviali di cui alle Tavole cartografiche del PSFF en dell'Elaborato 8 del Piano;
- l'art. 58, comma 1 e 2 demanda alle Regioni, ai sensi dell'art. 65, comma 6 del D. Lgs. n. 152/2006, l'emanazione, entro 90 giorni dalla data di entrata in vigore del presente Titolo V, di disposizioni concernenti l'attuazione del PGRA nel settore urbanistico (integrative rispetto a quelle già assunte con DGR VII/7365/2001, ora sostituita dalla vigente DGR IX/2616/2011) coordinate con quelle assunte in materia di Protezione civile ai sensi della legge 12 luglio 2012, n. 100;
- all'art. 59 innesca, ove necessario, una nuova fase di adeguamento degli strumenti urbanistici, una valutazione dettagliata delle condizioni di rischio all'interno dei centri edificati che si trovano a ricadere entro le aree allagabili e, conseguentemente, una fase di verifica e eventuale aggiornamento della pianificazione di emergenza.

2.2.1 Disposizioni regionali concernenti l'attuazione del PGRA nel settore urbanistico (DGR 19 giugno 2017 n. X/6738)

Regione Lombardia, con D.G.R. X/6738 del 19.06.2017, ha approvato le "Disposizioni regionali concernenti l'attuazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza, ai sensi dell'art. 58 delle Norme di Attuazione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) del bacino del fiume Po così

#

come integrate dalla Variante adottata in data 07.12.2016 con deliberazione n. 5 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del fiume Po".

Le disposizioni di cui al punto 3 dell'allegato A della suddetta DGR costituiscono integrazione a quelle dei Criteri e indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica approvati con DGR IX/2616 del 30.11.2011, relativamente all'attuazione della variante normativa al PAI nel settore urbanistico alla scala comunale.

L'allegato A alla D.G.R. X/6738/17, al punto 3.1.4, introduce le disposizioni concernenti l'attuazione del PGRA per i corsi d'acqua **GIA** interessati, nella pianificazione di bacino vigente, dalla delimitazione delle fasce fluviali, quale risulta il Fiume Ticino

In questi corsi d'acqua, alle perimetrazioni di fascia fluviale vigenti si sono sovrapposte nuove perimetrazioni di aree allagabili, che non sostituiscono le fasce, ma ne rappresentano un aggiornamento ed una integrazione.

Normativa

Fino all'adozione delle specifiche varianti PAI a scala di asta fluviale (con le relative norme di salvaguardia) che porteranno alla revisione delle fasce fluviali vigenti, entrambe le perimetrazioni (fascia fluviale e aree allagabili) rimangono in vigore. In caso di sovrapposizione deve essere applicata la classificazione e di conseguenza la norma più restrittiva.

In particolare la norma prevede che:

- Nelle aree interessate da alluvioni frequenti P3/H si applichino le limitazioni e prescrizioni previste per la fascia fluviale A del PAI;
- Nelle aree interessate da alluvioni frequenti P2/M si applichino le limitazioni e prescrizioni previste per la fascia fluviale B del PAI;
- Nelle aree interessate da alluvioni frequenti P1/L si applichino le limitazioni e prescrizioni previste per la fascia fluviale C del PAI.

Procedure di adeguamento degli strumenti urbanistici comunali

Ai sensi dell'art. 59 delle N.d.A. del PAI (introdotto con il nuovo Titolo V), tutti i Comuni, ove necessario, provvedono ad adeguare i rispettivi strumenti urbanistici conformandoli alla normativa sopraindicata.

In particolare, nelle aree allagabili per la piena frequente (P3/H), poco frequente (P2/M) e rara (P1/L):

1. i Comuni applicano da subito la normativa sopraindicata sulle aree allagabili così come presenti nelle mappe di pericolosità del PGRA, modificando di conseguenza le previsioni degli strumenti urbanistici comunali che risultassero in contrasto, ed aggiornando conseguentemente i Piani di Emergenza Comunali;

2. entro le aree che risultano classificate come R4 - rischio molto elevato (ovvero entro le aree che risultano già edificate nell'Ortofoto AGEA 2015 pubblicata sul GEOPortale della Regione Lombardia) i Comuni sono tenuti a verificare e, ove necessario, aggiornare le valutazioni dettagliate delle condizioni di pericolosità e rischio locali già svolte in passato.

#

3. entro le aree che risultano classificate come R4 - rischio molto elevato (ovvero entro le aree che risultano già edificate nell'Ortofoto AGEA 2015 pubblicata sul GEOPortale della Regione Lombardia) nelle more del completamento/aggiornamento della valutazione dettagliata delle condizioni di pericolosità e rischio locali di cui al punto 2. e del suo recepimento nello strumento urbanistico comunale, è facoltà del Comune applicare, anche all'interno degli edificati esistenti, le norme riguardanti le aree P3/H e P2/M (fasce A e B) o richiedere che gli interventi edilizi siano supportati da uno studio di compatibilità idraulica che, partendo dalla valutazione delle condizioni di pericolosità e rischio già svolta (qualora presente) e recepita nel PGT, ne approfondisca gli esiti utilizzando come dati tecnici di input tutte le informazioni del PGRA. Detto studio può essere omesso per gli interventi edilizi che non modificano il regime idraulico dell'area allagabile, accompagnando il progetto da opportuna asseverazione del progettista (es. recupero di sottotetti, interventi edilizi a quote di sicurezza).

4. entro i territori compresi tra un limite B di progetto e un limite di fascia C delle fasce fluviali vigenti: se si è proceduto in passato a svolgere una valutazione più dettagliata delle condizioni di pericolosità e rischio locali, questa valutazione deve essere verificata e, ove necessario, aggiornata tenendo conto dell'estensione dell'area allagabile contenuta nelle mappe di pericolosità del PGRA e dei relativi dati associati.

5. entro e non oltre i termini stabiliti dall'art. 5 della l.r. 31/2014 per l'adeguamento del Piano di Governo del Territorio (PGT), i Comuni procedono con il recepimento delle aree allagabili e relative norme (incluse quelle di dettaglio derivanti dalla valutazione del rischio svolta sugli edificati esistenti che si trovano a ricadere entro le aree allagabili P3/H e P2/M) nello strumento urbanistico comunale secondo le modalità già definite per le fasce fluviali nelle N.d.A. del PAI nonché nella D.G.R. IX/2616/2011, parte II, paragrafo 5.1, punti 1 e 2.

2.3 PROCEDURE PER LA VALUTAZIONE E LA ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO DA ESONDAZIONE (ALL. 4)

La direttiva "Aggiornamento dei 'Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell'art. 57, comma 1, della L.R. 11 marzo 2005, n. 12', approvati con D.G.R. 22 dicembre 2005 n. 8/1566 e successivamente con D.G.R. 28 maggio n. 8/7374", approvata con D.G.R. IX/2616/2011, stabilisce che la valutazione delle condizioni di rischio nelle aree classificate come fascia A e B ricadenti all'interno dei centri edificati si intende raggiunta a condizione che sia effettuata secondo la metodologia riportata nell'Allegato 4 ai Criteri stessi "Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da esondazione". Le risultanze delle valutazioni diventano efficaci al momento della conclusione dell'iter approvativo del Piano di Governo del Territorio; fino ad allora, o in assenza di tale valutazione, si applicano anche all'interno dei centri edificati le norme riguardanti le fasce A e B.

Il suddetto Allegato 4 alla D.G.R. IX/2616/2011 fornisce indicazioni per gli studi finalizzati alla valutazione e alla zonazione della pericolosità e del rischio da esondazione nonché a valutare la compatibilità idraulica delle previsioni degli strumenti urbanistici e territoriali, o più in generale delle proposte di uso del suolo, ricadenti in aree che risultino soggette a possibili esondazioni.

#

Le metodologie proposte si basano sulla conoscenza dei valori delle altezze d'acqua e delle velocità della corrente che si verificano in corrispondenza di portate con determinato tempo di ritorno; l'Allegato richiede quindi di verificare l'esistenza e l'affidabilità di studi già realizzati in grado di fornire tali informazioni con il grado di dettaglio necessario.

Sulla base dei risultati ottenuti in termini di altezze e velocità d'acqua, desunti da studi esistenti o determinati mediante i nuovi approfondimenti condotti tramite l'analisi idrologica e la verifica idraulica, l'Allegato indica infine la metodologia da seguire per la valutazione della compatibilità idraulica delle previsioni urbanistiche e delle proposte d'uso del suolo.

La valutazione deve basarsi sull'individuazione della pericolosità e dei rischi ai quali è soggetta l'area di indagine e che devono essere mitigati tramite la definizione di interventi.

Per la classificazione dei diversi livelli di pericolosità si utilizza il grafico, in Figura 2.1, che fornisce le condizioni di pericolosità in funzione del tirante idrico (m) e della velocità della corrente (m/s) al margine (lato fiume) della zona di interesse.

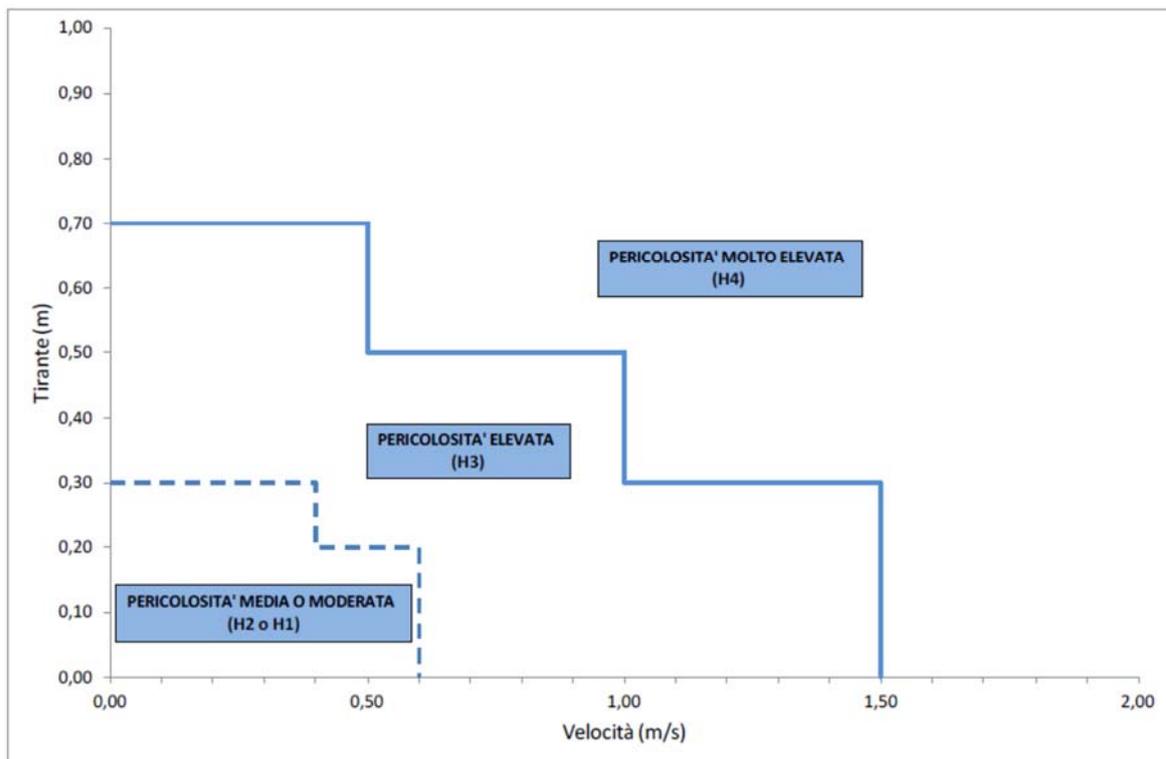


Figura 2.1 – Zonazione della pericolosità (Par. 3.4, All. 4, D.G.R. n° IX/2616 del 30/11/11)

Il grafico individua tre condizioni a differente livello di pericolosità:

- pericolosità molto elevata (H4) con velocità > 1,5 m/s e tirante > 0,7 m;
- pericolosità elevata (H3) con velocità compresa tra 0,5 e 1,5 m/s e tirante compreso tra 0,3 e 0,7 m;

#

- pericolosità medio o moderata con velocità compresa tra 0 e 0,6 m/s e tirante compreso tra 0 e 0,3.

Partendo dalle aree a diversa pericolosità, la quantificazione del rischio dovrà essere effettuata mettendo in relazione la pericolosità (H), l'entità degli elementi a rischio o danno potenziale (E) e la vulnerabilità degli stessi (V) secondo la relazione di natura qualitativa $R = H \times E \times V$.

Le classi del danno potenziale sono determinate in funzione degli elementi a rischio contenuti, come riportato in Tabella 2.1.

	H4	H3	H2	H1
E4	R4	R4	R2	R2
E3	R3	R3	R2	R1
E2	R2	R2	R1	R1
E1	R1	R1	R1	R1

Tabella 2.1 – Classificazione del rischio (Par. 3.5, All. 4, D.G.R. n° IX/2616 del 30/11/11)

Le aree caratterizzate da livello di rischio R4 sono incompatibili con qualunque tipo di urbanizzazione e in esse dovrà escludersi ogni nuova edificazione; nella carta di fattibilità delle azioni di piano a tali aree deve essere attribuita la classe 4.

Le aree caratterizzate da livello di rischio R3 possono ritenersi compatibili con l'urbanizzazione a seguito della realizzazione di opere di mitigazione del rischio o tramite accorgimenti costruttivi che impediscano danni a beni e strutture e/o che consentano la facile e immediata evacuazione dell'area inondabile da parte di persone e beni mobili. Nella carta di fattibilità delle azioni di piano a tali aree deve essere attribuita la classe 3.

#

3 STUDI IDRAULICI PREGRESSI

A supporto delle elaborazioni condotte nel presente studio, si sono analizzati tutti gli studi idrologico-idraulici pregressi relativi al Fiume Ticino:

- Monitoraggio morfologico e sedimentologico dell'alveo del fiume Ticino, R.T.I, costituito da Studio Paoletti, dott. Geol. Giovanni Savazzi e GRAIA), settembre 2008;
- Studio per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio (L.R. 11/03/2005, n. 12; DGR 28/05/2008, n. 8/7374), S.G.P. Servizi di geo-ingegneria e progettazione srl - ottobre 2012;

3.1 MONITORAGGIO MORFOLOGICO E SEDIMENTOLOGICO DELL'ALVEO DEL FIUME TICINO

Il R.T.I, costituito da Studio Paoletti, dott. Geol. Giovanni Savazzi e GRAIA, ha effettuato uno studio di "*Monitoraggio morfologico e sedimentologico dell'alveo del fiume Ticino*" (settembre 2008).

Il modello idraulico, implementato a supporto del sopraccitato studio, interessa il fiume Ticino da Bereguardo alla confluenza in Po. Le analisi idrauliche sono state condotte attraverso un modello idraulico monodimensionale - quasi bidimensionale a fondo fisso. Tale modello, implementato con il codice di calcolo modulo idraulico HD del modello Mike 11 è stato utilizzato per le seguenti finalità:

- valutare il profilo di fondo medio dell'alveo di magra del fiume Ticino nelle diverse epoche;
- valutare i diversi parametri caratteristici dell'alveo nelle diverse sezioni.

A tale scopo sono state condotte diverse simulazioni, dalle quale sono state ricavati i valori dei diversi parametri caratteristici dell'alveo nelle diverse sezioni e nell'attuale configurazione morfologica.

	<i>Portata Ticino [m³/s]</i>	<i>Portata Po a monte Ticino [m³/s]</i>
Portata media annua	190	570
	500	1500
Portata piena ordinaria	900	2100
	1500	3000
Portata piena T = 20 anni	1950	7340
Portata piena T = 200 anni	2500	11100
Portata piena T = 500 anni	2700	12350
Portata piena evento 2000	2600	11100

Tabella 3.1 - Portate per il fiume Ticino e Po

In particolare sono state effettuate simulazioni che considerano una portata del Ticino pari a 500 e 1500 m³/s. Gli analoghi valori relativi all'asta del Po sono stati ricavati a partire dai corrispondenti dati noti a valle del ponte della Becca, a cui sono stati sottratti i valori delle corrispondenti portate del Ticino.

#

I risultati del modello mostrano come la portata di piena ordinaria, pari a 900 m³/s risulta essere ovunque contenuta all'interno dell'alveo inciso (considerando anche il Po in regime di piena ordinaria). A partire da tale valore di portata alcune zone golenali vengono interessate da esondazioni.

Gli effetti di rigurgito indotti dal Po sul regime idrometrico del Ticino sono notevoli, pertanto è sufficiente considerare per il Po un regime idraulico differente da quello sopra indicato per ottenere risultati molto diversi.

3.2 STUDIO PER LA DEFINIZIONE DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – S.G.P. SERVIZI DI GEO-INGEGNERIA E PROGETTAZIONE S.R.L.

Il comune di Pavia, nell'ambito della redazione della componente geologica, idrogeologica e sismica del PGT (ottobre 2012), ha effettuato uno studio idraulico sul fiume Ticino.

La simulazione è stata effettuata, utilizzando HEC-RAS 3.1.3, in moto permanente e ha interessato il tratto di corso d'acqua compreso tra il ponte Coperto e i ponte della Becca.

I risultati ottenuti su questo tratto, in relazione alle caratteristiche delle piene fluviali a Pavia, sono da ritenere estendibili anche alle sezioni di monte del ponte Coperto.

Il modello implementato ha considerato come condizioni al contorno l'altezza idrometrica al ponte della Becca (condizione di valle) e la portata di piena. Entrambi questi valori sono riferiti alla piena del 2000.

I risultati del modello implementato sono riassunti nella tabella seguente.

SEZ.	Z_f (m s.l.m.)	L (m)	Z_w (m s.l.m.)	h (m)	H (m s.l.m.)	V (m/s)	A (m ²)	B (m)	Fr
9	49.54	6840	62.00	12.46	62.01	0.61	5204	1189	0.06
8	44.85	6215	61.94	17.09	61.95	0.59	6033	1734	0.06
7	50.31	5555	61.89	11.58	61.90	0.45	8673	2175	0.04
6	50.84	4720	61.86	11.02	61.86	0.31	11496	2566	0.03
5	50.15	3485	61.78	11.63	61.80	0.59	4175	851	0.06
4	45.63	2550	61.55	15.92	61.61	1.11	2341	563	0.11
3	48.06	1695	61.34	13.28	61.37	0.81	2501	255	0.08
2	49.30	860	61.22	11.92	61.23	0.62	4080	679	0.06
1	49.95	0	61.13	11.18	61.14	0.50	4586	692	0.05

Tab. D. Risultati della simulazione idraulica di moto stazionario per la piena registrata nel 2000. Portata al colmo = 2.646 m³/s. **Legenda:** Z_f : quota di fondo; L : distanza progressiva; Z_w : quota del pelo libero; h : tirante idrico è uguale a $Z_w - Z_f$; H : carico assoluto; A : area bagnata; B : larghezza superficiale; Fr : numero di Froude.

Tabella 3.2 - Risultati del modello

I risultati ottenuti mostrano che la velocità della corrente fuori alveo è sempre inferiore a 1 m/s anche se il tirante raggiunge valori superiori a 2 m. per tale ragione le classi di rischio idraulico sono state assegnate considerando esclusivamente il valore del tirante idrico.

#

4 IL FIUME TICINO

Il Fiume Ticino ha origine in territorio svizzero, in prossimità del passo del S. Gottardo, ha una lunghezza complessiva di 284 km ed un dislivello complessivo di circa 2800 m. Costituisce con il fiume Toce il principale affluente del lago Maggiore o di Verbano; a monte della sua immissione in lago, in località Locarno, riceve in sinistra torrenti Brenno e Moesa.

Uscito dal lago a Sesto Calende, a quota 205 m s.l.m., esso percorre la Pianura Padana per circa 110 km confluendo nel Fiume Po a Linarolo (PV) a quota 56 m s.l.m., con una larghezza media del bacino idrografico di 7 km; tale bacino, con poche eccezioni, è circoscritto alle sole aree golenali ed ai territori agricoli le cui colature giungono, più o meno direttamente, al fiume.

Il Ticino sublacuale scorre in una valle a fondo quasi piatto, incisa nella superficie fondamentale della pianura cui è raccordata da un terrazzo principale e da altri minori: il fiume decorre dapprima con un alveo semplice, quindi amplia progressivamente il suo letto divagando e formando isole e meandri.

In territorio di Pavia, l'alveo del F. Ticino scorre da NW verso SE ai piedi dei terrazzi sui quali sorge la città, in un solco vallivo a fondo piatto (tipica "valle a cassetta") di larghezza di circa 7 km, lateralmente delimitata da due ordini di scarpate con dislivello complessivo di oltre 20 m, che, spesso, presentano andamento planimetrico "falcato", conseguenza del tracciato meandriforme che caratterizzava il Ticino nel momento in cui, abbassando il proprio alveo, le incideva.

Sull'ampio e piatto fondo della "valle a cassetta" sono ben visibili le tracce dei più recenti fenomeni di divagazione del fiume, che ancora nell'andamento meandreggiante trovano il loro più diretto riscontro.

Proprio poco a sud di Pavia, la "valle" si connette con quella, analoga, scavata dal F. Po, che funge anche da recapito per le acque convogliate dal Ticino.

All'interno dell'area golenale (esondabile in caso di piena) è anche possibile distinguere due zone: quella più prossima al corso d'acqua, che viene allagata dalle acque del Ticino in caso di piena ordinaria, e quella più vicina al sistema artificiale di contenimento, inondabile solo in caso di piene progressivamente più gravose.

4.1 CARATTERIZZAZIONE DELLE OPERE PRESENTI LUNGO IL FIUME TICINO A PAVIA

Lungo il Ticino è presente un doppio sistema di difese:

- gli argini maestri, posti in destra idraulica, all'estremità delle aree golenali e che delimitano l'alveo di piena;
- le difese spondali, che delimitano l'alveo inciso e difendono le aree golenali.

Mentre le difese spondali sono presenti solo saltuariamente laddove più intense si sono manifestate nel tempo le azioni erosive della corrente fluviale e le conseguenti richieste di difesa delle aree golenali, le arginature maestre sono presenti con continuità in sponda destra dal ponte di barche di Bereguardo fino alla confluenza in Po, con un'interruzione tra il comune di Zerbolò e Carbonara al Ticino. In sinistra idraulica non sono presenti argini

#

maestri in quanto è presente un evidente terrazzo morfologico che assume quote sufficienti per la sicurezza idraulica degli abitati circostanti.

Gli argini presenti hanno uno sviluppo complessivo pari a 21,5 km e sono realizzati in terra, ad eccezione di un tratto in prossimità del ponte coperto di Pavia presso la località Borgo Ticino, realizzato in muratura.

Le difese spondali presenti hanno un'estensione complessiva di 21,7 km, di cui 10,3 km in sponda sinistra e 11,4 km in sponda destra. Le opere di difesa spondale sono realizzate in massi a secco o con blocchi di calcestruzzo.

Nel territorio di studio sono stati considerati i seguenti manufatti di attraversamento:

- Ponte Tangenziale di Pavia;
- Ponte ferroviario linea Milano – Genova;
- Ponte SP 35;
- Ponte coperto di Pavia;
- Ponte della Becca, a confluenza con il F. Po (esterno al territorio comunale di Pavia, ma limite di chiusura del modello idraulico).

4.2 ASPETTI IDRAULICI DEL FIUME TICINO

Il F. Ticino, emissario del Lago Maggiore, scorre in un alveo costituito da più canali attivi a seconda delle condizioni idrauliche prevalenti.

Il bacino idrografico del fiume Ticino, chiuso all'incile del Lago Maggiore a Sesto Calende ha un'estensione complessiva pari a circa 6'600 km², mentre in corrispondenza della confluenza con il fiume Po la superficie è pari a complessivi 8'170 km².

Il tratto terminale del fiume denominato "Basso Ticino", compreso approssimativamente tra il ponte in chiatte di Bereguardo e lo sbocco nel F. Po, è delimitato dalla scarpata del Piano Generale Terrazzato della pianura lombarda, molto prossima ed a volte coincidente con la sponda naturale sinistra del fiume, ma molto distante dalla sua sponda destra, da cui è separato da un'estesa piana alluvionale.

A protezione delle attività antropiche e degli insediamenti costituiti sulla detta pianura, ricorrentemente vanificati e travolti in passato dalle piene stagionali del fiume, fu realizzata una delimitazione artificiale dell'alveo di piena, con la costruzione di un'arginatura continua adiacente alla sponda destra.

Il regime idrologico del fiume è la risultante di diversi fattori, naturali ed artificiali: i deflussi dal Lago Maggiore, determinati dall'alimentazione del bacino prelacuale, dalla laminazione effettuata dal lago stesso e dagli altri serbatoi naturali ed artificiali e dalle operazioni di regolazione dello sbarramento della Miorina; le numerose derivazioni e restituzioni; le risorgive, le colature e gli scarichi presenti lungo l'asta.

La portata complessiva degli apporti suddetti, in media, può essere considerata pressoché equivalente alle portate derivate dai principali canali irrigui; navigabili o industriali. Pertanto le portate in uscita dall'incile del Lago Maggiore devono considerarsi equivalenti a quelle affluenti nel Po alla Becca.

Il Lago Maggiore, dal punto di vista idraulico, svolge una funzione di serbatoio volano, moderatore delle variazioni idrometriche nel Ticino sublacuale, ritardando il rilascio delle

#

portate di piena e integrando le portate di minima. Inoltre, poiché funziona da bacino di calma, esso provoca la decantazione delle torbide provenienti dai bacini alti e ne impedisce il trasferimento all'alveo sublacuale, che pertanto, deve considerarsi carente di apporti solidi da monte ed in fase di costante erosione.

Un'analisi pur superficiale e qualitativa dell'assetto planimetrico dell'alveo, consente di rilevare, a prima vista, alcune situazioni anomale rispetto ai caratteri propri del fiume.

In particolare è da segnalare l'anomalia dell'assetto d'alveo presente in corrispondenza dell'abitato di Pavia dove, alla sezione del Ponte Coperto, giunge a determinare una strozzatura tale da ridurre drasticamente la sezione libera di deflusso.

La condizione idraulica del "Basso Ticino" sembra risentire delle alterazioni morfologiche indotte, manifestando attività erosive laterali e di fondo particolarmente esaltate.

Un semplice esame dell'andamento planimetrico dell'arginatura in sponda destra del Ticino fa inoltre sorgere il dubbio che sia stata realizzata una costrizione dell'alveo ed una riduzione della sezione libera di deflusso a valori incompatibili con il proposito, a suo tempo perseguito, di assicurare un agevole deflusso delle portate di piena, tutte contenute entro questo unico canale.

Ancor più critica appare la condizione di strozzatura dell'alveo di magra e delle medie morbide, che a valle del Ponte Coperto, alla sezione di Porta Nuova, subisce un'ulteriore cospicua riduzione, passando a una larghezza di circa 75 m.

Le condizioni suddette sembrerebbero costituire un rilevante contributo ai processi di erosione laterale e di fondo, che recenti rilievi e osservazioni dimostrano aver raggiunto valori molto esaltati, accelerati ed evidenti specialmente a Pavia, a valle del Ponte Coperto.

Il regime idrometrico del fiume Ticino, oltre ad essere influenzato, come ovvio, dalla portata defluente dalle caratteristiche dell'asta fluviale (larghezza, pendenza, scabrezza, ecc.) è notevolmente influenzato dal regime idrometrico del fiume Po, soprattutto in condizioni di piena ma anche in presenza di deflussi più contenuti. A parità di portata defluente nel fiume Ticino, il livello idrico presso il ponte coperto di Pavia cresce notevolmente al crescere della portata defluente nel fiume Po. Tale circostanza non si verifica solo durante eventi di piena rilevanti, ma anche per portate più ridotte.

4.3 IL REGIME IDROLOGICO DEL FIUME TICINO

Il bacino idrografico del fiume Ticino, chiuso all'incile del Lago Maggiore a Sesto Calende ha un'estensione complessiva pari a circa 6'600 km², mentre in corrispondenza della confluenza con il fiume Po la superficie è pari a complessivi 8'170 km².

Il regime idrologico del fiume è la risultante di diversi fattori, naturali ed artificiali:

- i deflussi dal Lago Maggiore, determinati dall'alimentazione del bacino prelacuale, dalla laminazione effettuata dal lago stesso e dagli altri serbatoi naturali ed artificiali e dalle operazioni di regolazione dello sbarramento della Miorina;
- le numerose derivazioni e restituzioni;
- le risorgive, le colature e gli scarichi presenti lungo l'asta.

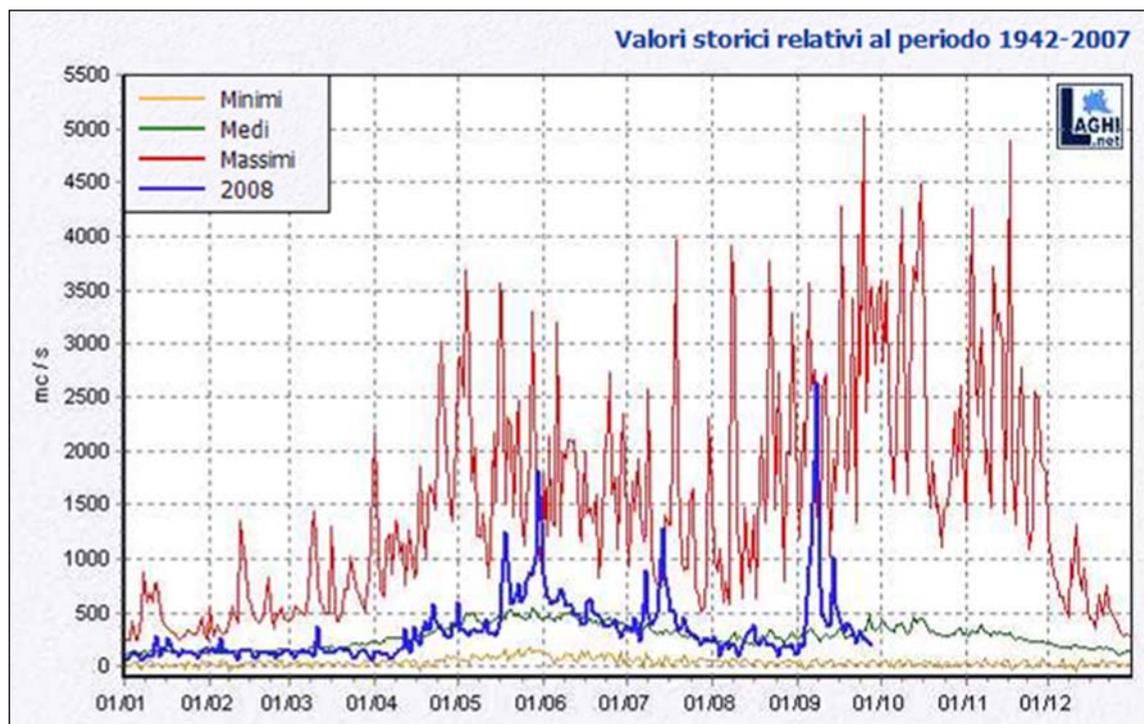
L'utilizzazione dell'acqua del Ticino, derivata attraverso opere anche di notevoli dimensioni, è in atto da parecchi secoli. La rete irrigua che attualmente fa capo al fiume sottende una

#

superficie di circa 154.000 ha, nelle province di Novara, Milano, Pavia. Numerose sono anche le centrali idroelettriche alimentate dal corso sublacuale, con l'aggiunta della centrale termoelettrica di Turbigo che utilizza, per il raffreddamento, le acque del Naviglio Grande.

Per l'idrologia del Ticino, in rapporto al riequilibrio dei prelievi operati dalle derivazioni, un elemento di rilievo è costituito dalle risorgenze che determinano, in assenza di affluenti superficiali notevoli, un significativo aumento delle portate da monte verso valle; questo è dovuto al drenaggio della falda freatica effettuato dall'alveo del fiume, alle colature dei terreni agricoli e agli scarichi civili e industriali; i valori di risorgenza aumentano sino a Bereguardo, per poi diminuire sensibilmente e riprendere nuovamente consistenza nella zona urbana di Pavia (Amm. Prov. di Pavia, 1989; Parco del Ticino, 1986).

Relativamente all'effetto di regolazione del Lago Maggiore, si riportano di seguito gli andamenti dei valori minimi, massimi e medi della portata media giornaliera affluita al Lago Maggiore e i corrispondenti valori della portata da esso erogata nel Ticino, con riferimento al periodo 1942 – 2007 e i valori giornalieri del 2008 (Fonte: Consorzio del Ticino).



#

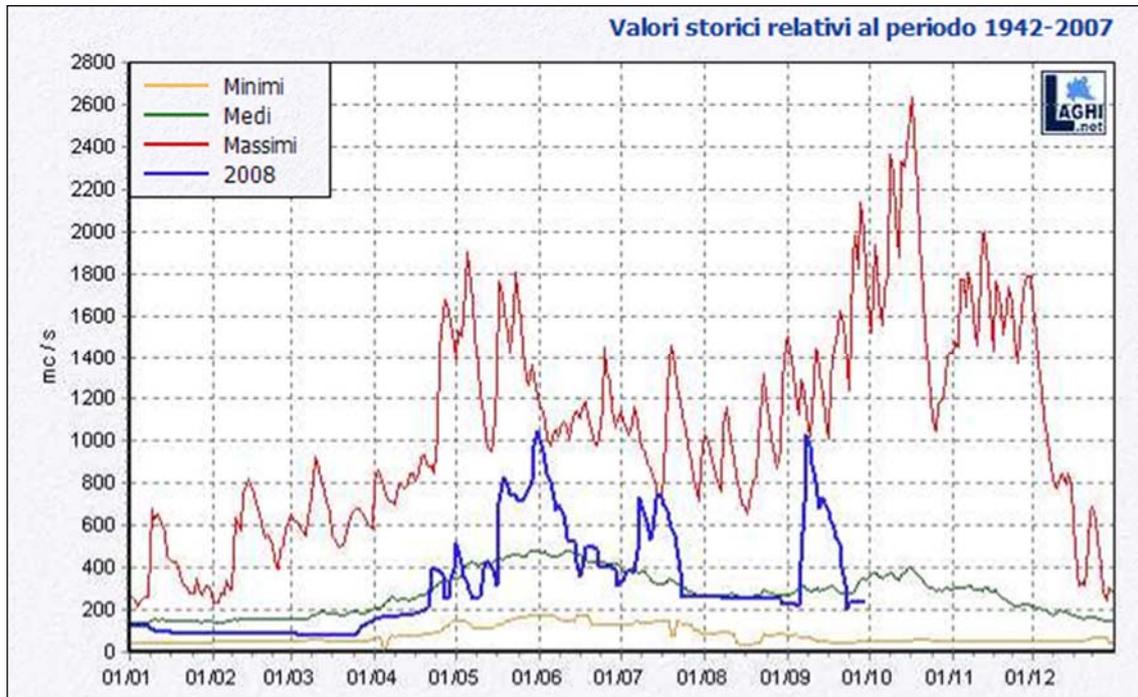


Figura 4.1 – Portate affluite al Lago Maggiore (sopra) ed erogate nel fiume Ticino (sotto)

Dal confronto fra i due grafici sopra riportati si può osservare il notevole effetto di regolazione e laminazione delle portate da parte del lago: per esempio, considerando gli eventi di piena che si sono verificati nel 2008, si osserva che le portate in uscita dal lago sono pari a circa la metà di quelle in entrata.

Per quanto riguarda il regime delle portate di piena del Ticino, è bene mettere in evidenza come le stesse dipendano quasi esclusivamente dal deflusso in uscita dal Lago Maggiore, in quanto gli apporti del bacino sublacuale, pari a 800 km² sono poco influenti. Secondo Raffa, De Marchi ed altri, gli apporti in piena, costituiti da scarichi di centri urbani, da acque provenienti dal bacino sublacuale, dalla restituzione di acque irrigue e dalle sorgive, possono essere considerate all'incirca pari alle acque captate dalle derivazioni.

A valle del lago infatti non sono presenti immissioni di corsi d'acqua naturali, pertanto la portata defluente lungo l'asta è pari a quella rilasciata dal lago, alla quale si sommano i contributi idrici del bacino naturale residuo (deflussi superficiali e interscambio con la falda), corretti in funzione dell'impatto antropico associato alle derivazioni, prevalentemente ad uso irriguo ed idroelettrico, e agli scarichi provenienti dagli impianti di depurazione, dalle centrali idroelettriche e dal reticolo irriguo (portate residue non utilizzate per l'irrigazione) presenti a monte del tratto di interesse.

La portata di piena ordinaria del fiume Ticino nel tratto di interesse è pari a **900 m³/s** (*"Rapporto tra pianificazione e qualità dell'ambiente fluviale: l'esperienza del Parco Ticino"* - Consorzio Parco Ticino, 1998; *"Studio idraulico del fiume Ticino nel tratto del ponte di barche di Bereguardo in relazione alle opere previste per la sua ristrutturazione"* - Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università di Pavia - 1998).

#

Di seguito vengono riportati i valori delle portate di piena di riferimento ricavati dallo "Studio idraulico per la delimitazione delle fasce fluviali del Ticino tra il Lago Maggiore e il Po", condotto dal Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università di Pavia e quelli riportati nella Direttiva n. 2 delle Norme di Attuazione del PAI dell'Autorità di Bacino del fiume Po ("Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica").

<i>Tempo di ritorno</i>	<i>Portata Ticino [m³/s]</i>
20	1946
50	2185
100	2355
200	2514
500	2718

Tabella 4.1 – Portate di piena del Ticino determinate dall'Università di Pavia

Tabella 8: portate di piena per il fiume Ticino

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km ²	Q20 m ³ /s	Q100 m ³ /s	Q200 m ³ /s	Q500 m ³ /s	Idrometro Denominazione
		Progr.(km)	Cod.	Denomin.						
Ticino	Ticino	147.200	42	Traversa di Miorina	6599	-	-	2000	-	Ticino a Miorina
Ticino	Ticino	245.020	5	Confluenza in Po	7681	-	-	2300	-	

Tabella 4.2 –Portate di piena per il fiume Ticino contenute nella Direttiva 2 del PAI

Relativamente alla portata T200 anni i valori stimati dall'Università di Pavia sono in linea con quelli indicati nella Direttiva PAI. I valori stimati dall'Università di Pavia sono stati utilizzati per le simulazioni idrauliche condotte nello studio di "Monitoraggio morfologico e sedimentologico dell'alveo del fiume Ticino" (settembre 2008).

4.4 CARATTERI GENERALI DELLE PIENE DEL FIUME TICINO

Le piene del F. Ticino nel suo tratto terminale, il "Basso Ticino", possono essere distinte in: piene proprie del Ticino (tipo 1993), piene del Ticino con rigurgiti di piene contemporanee del Po (tipo 2000) e piene di solo rigurgito del Po (tipo 1994).

A Pavia si sono verificate piene di rigurgito con livelli idrometrici molto elevati pur con modesti stati di piena contemporanea del Ticino. Così avvenne nel 1857 e nel 1917, quanto ruppero gli argini di fronte alla città, come pure nel 1926, nel 1951 e nel 1968, quando invece i colmi defluirono senza danni.

Per l'effetto moderatore esercitato dal Lago Maggiore sui tempi di propagazione dei colmi di piena del fiume, nel suo alveo sublacuale, in assenza di interferenze costituite da stati di

#

invaso in atto nel lago, i colmi stessi subiscono ritardi di circa 20 ore cosicché quelli delle piene contemporanee del Po e del Ticino a Pavia non coincidono mai.

Le piene proprie del Ticino, oltre all'elevazione dei livelli idrometrici anche se con tiranti sensibilmente inferiori alle altre due tipologie, comportano elevate velocità di deflusso con effetti aggravati da irregolarità, deformazioni, rivestimenti d'alveo, turbolenze e vortici (dovuti all'obliquità delle pile dei ponti rispetto alla direzione del filone della corrente), vegetazione in alveo ed esaltazione dei rigurgiti provocati da riduzioni eccessive delle sezioni di deflusso.

A Pavia, pertanto, al verificarsi di piene con effetti prevalenti dovuti ai rigurgiti del Po, l'unico pericolo è costituito dall'elevazione straordinaria dei livelli idrometrici e da possibili alluvioni per sormonto delle arginature.

4.5 LE MAGRE DEL FIUME TICINO A PAVIA

Un fenomeno idrometrico di particolare rilievo osservato a Pavia negli ultimi anni, a prescindere la maggiore frequenza delle massime piene trattata al paragrafo precedente, è lo straordinario abbassamento dei livelli di magra del fiume Ticino.

In assenza di variazioni significative del regime climatico nel bacino tributario e di conseguenti riduzioni delle portate minime, questo fatto sembra riconducibile a quel più ampio processo di abbassamento dei fondi d'alveo, in atto dalla seconda metà del XX secolo su quasi tutto il sistema idrografico del bacino del Po.

Il fenomeno, a Pavia, ha assunto valori e velocità evolutiva tali da indurre le preoccupazioni di cui si è fatto cenno.

Natura e origini del fenomeno sono stati oggetto di indagini impegnative e studi complessi soprattutto sull'asta del Po; tuttavia si ritiene di poter riferire un cospicuo contributo a tale fenomeno osservato a Pavia, all'assetto del "Basso Ticino" ed in particolare alla concentrazione di tutte le portate del fiume nell'unico ramo conservato attivo e per di più fortemente strozzato in corrispondenza dell'abitato di Pavia.

Lo sviluppo dinamico molto accelerato del fenomeno nell'ultimo cinquantennio può essere stimato in circa 2,5-3 m, sia mediante l'esame delle osservazioni idrometriche, sia osservando vari manufatti a fiume (soglia di accesso al canale navigabile "Naviglio di Pavia"; opere di fondazione di manufatti storici vari: muraglioni, attracchi, rivestimenti di sponda ecc.) un tempo costantemente sommersi e ora sempre più spesso in emersione.

4.6 LE PIENE STORICHE DEL FIUME TICINO A PAVIA

Le informazioni sulle piene storiche a Pavia derivano dai dati del Servizio Provinciale del Genio Civile di Pavia della Regione Lombardia, integrati da altri dati bibliografici e informazioni sulle piene più recenti.

La piena del 1857 è considerata la maggior piena di rigurgito del Po osservata a Pavia. Essa si è formata per una piena del Po che alla Becca raggiungeva una portata valutata in circa 10.000 m³/sec a cui si aggiunse un contributo del Ticino di circa 1.500 m³/sec al colmo della piena.

#

La seconda piena in elenco è quella del 1868; fu una piena propria del Ticino la cui portata fu valutata in 5.000 m³/sec e che indusse una quota idrometrica inferiore di soli 2 cm rispetto alla precedente.

La terza piena (1705) fu ancora una piena propria del Ticino, anch'essa caratterizzata da portate straordinarie con massimo valutato in 4.000 m³/sec.

La piena del 17 maggio 1907, con un'altezza idrometrica di + 5,09 e una portata di 2.500 m³/sec, provocò la rottura dell'argine. La piena del 28 ottobre successivo, con un'altezza di +5,24 m sullo zero idrometrico, costituisce una massima storica con contributo proprio del Ticino stimato di 1.600 m³/sec. In quell'occasione, nel Po si verificò una delle piene massime, con altezza idrometrica di + 7,56 all'idrometro della "Becca".

Nell'ultimo decennio si sono potute osservare tutte le tipologie delle piene, che si sono verificate con caratteri eccezionali e con frequenza elevata. Nello specifico si fa riferimento a:

1. la piena propria del Ticino del 1993 che è stata la seconda più grande del XX secolo, con portate al colmo dell'ordine di 2.500 m³/sec. La piena è iniziata verso la metà di settembre, e culminata tra la fine di settembre e la metà di ottobre. Il periodo di piena con portate superiori alla piena ordinaria (900 m³/s) è stato dal 24 settembre al 26 ottobre.

Le portate massime, superiori ai 2.000 m³/sec, si sono verificate i giorni:

- 9 ottobre 2.360 m³/s
- 10 ottobre 2.275 m³/s
- 11 ottobre 2.058 m³/s
- 13 ottobre 2.325 m³/s
- 14 ottobre 2.304 m³/s
- 15 ottobre 2.381 m³/s
- 16 ottobre 2.241 m³/s
- 17 ottobre 2.052 m³/s

Le misure sono effettuate alle 9:00 a.m., alla diga della Miorina. Il massimo assoluto di poco inferiore a circa 2.500 m³/s è stato raggiunto nel corso della giornata del 15.10.93. La piena da rigurgito del Ticino del novembre 1994 che, con una altezza idrometrica di +5,67 (63,35 m s.l.m. al Ponte Coperto, superiore di 60 cm rispetto al concomitante colmo di Po alla Becca) ha rappresentato una tra le massime piene da rigurgito ed è stata la seconda per altezza idrometrica raggiunta a partire dal 1868, superata solo da quella del 2000. Estesi furono gli allagamenti nel Borgo Basso ed i danni causati, con la perdita accidentale anche di due vite umane.

2. la piena del Ticino con rigurgito di piena contemporanea del Po del 2000, la più grande dal 1868, con portata al colmo di 2.646 m³/sec e concomitante piena eccezionale di Po. Il livello idrometrico massimo di Ticino al Ponte Coperto è stato osservato il 17/10/2000 (+ 6,1 m sullo zero idrometrico, pari a 63,71 m s.l.m.) mentre il colmo alla Becca è stato di + 7,84 m sullo zero idrometrico (62,94 m s.l.m.). Occorre ricordare che l'ottobre 2000 vide il verificarsi di un evento alluvionale di carattere eccezionale non solo per il Ticino ma per buona parte del bacino padano, in particolar modo nel settore nord-occidentale.

#

5 RILIEVI TOPOGRAFICI E RICOSTRUZIONE DEL MODELLO DEL TERRENO

5.1 INFORMAZIONI TOPOGRAFICHE UTILIZZATE E COSTRUZIONE DEL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO

Al fine di studiare correttamente il comportamento del fiume Ticino, della confluenza con il Po e delle esondazioni nelle aree golenali, è necessario disporre di un rilievo topografico di dettaglio dell'area oggetto di studio, esteso lungo tutto il territorio comunale, che sarà la base di riferimento del modello idraulico che verrà implementato con il software HEC-RAS 5.0.7.

Per tale ragione è stato utilizzato come riferimento il rilievo topografico, molto dettagliato, dell'alveo sommerso del fiume Ticino acquisito nell'ambito dello studio "*Monitoraggio morfologico e sedimentologico dell'alveo del fiume Ticino*" nel marzo 2008 sovrapposto alla base LIDAR a maglia 1x1 del Ministero dell'Ambiente.

In particolare il rilievo della parte di alveo inciso posto al di sotto del livello di magra è stato realizzato mediante l'utilizzo di un ecoscandaglio, abbinato ad un sistema GPS, entrambi installati su un'imbarcazione. Con l'imbarcazione è stata condotta una rotta tale da consentire di rilevare numerose sezioni trasversali, nonché i tratti in prossimità di una delle due sponde nel tratto compreso tra due sezioni successive.

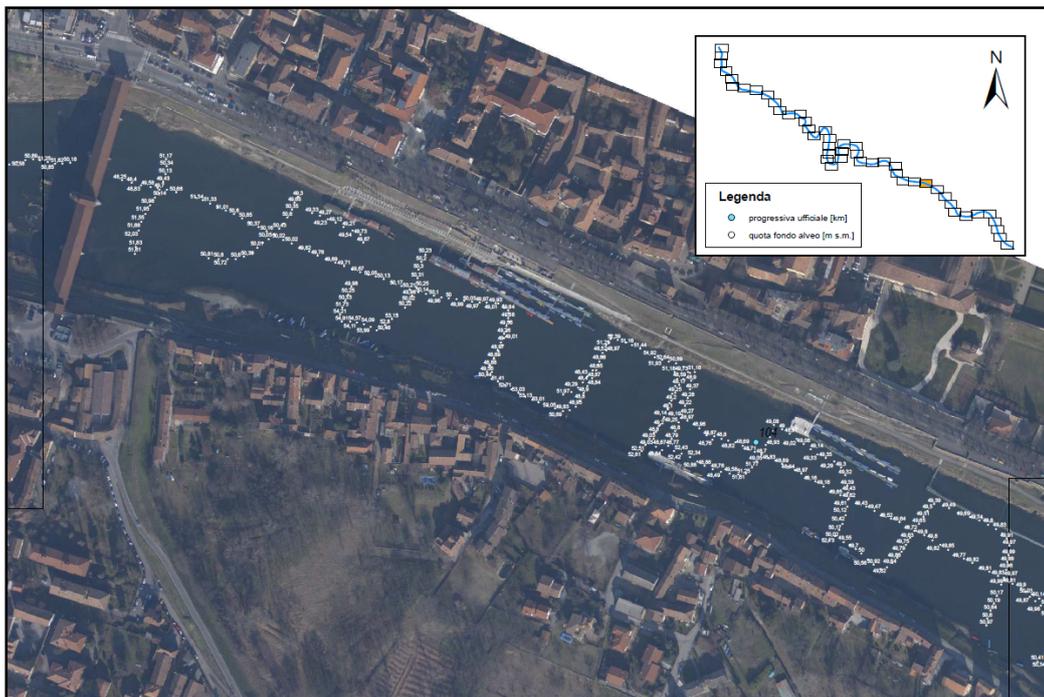


Figura 5.1 - stralcio della cartografia del rilievo batimetrico - R.T.I. Studio Paoletti - Savazzi - Graia
La pendenza del Ticino è stata stimata pari a circa il 4‰. Tale valore, molto basso, caratteristico del tratto pavese del Ticino, non consente importanti fenomeni di trasporto solido o approfondimento del fondo alveo se non in corrispondenza della confluenza.

#

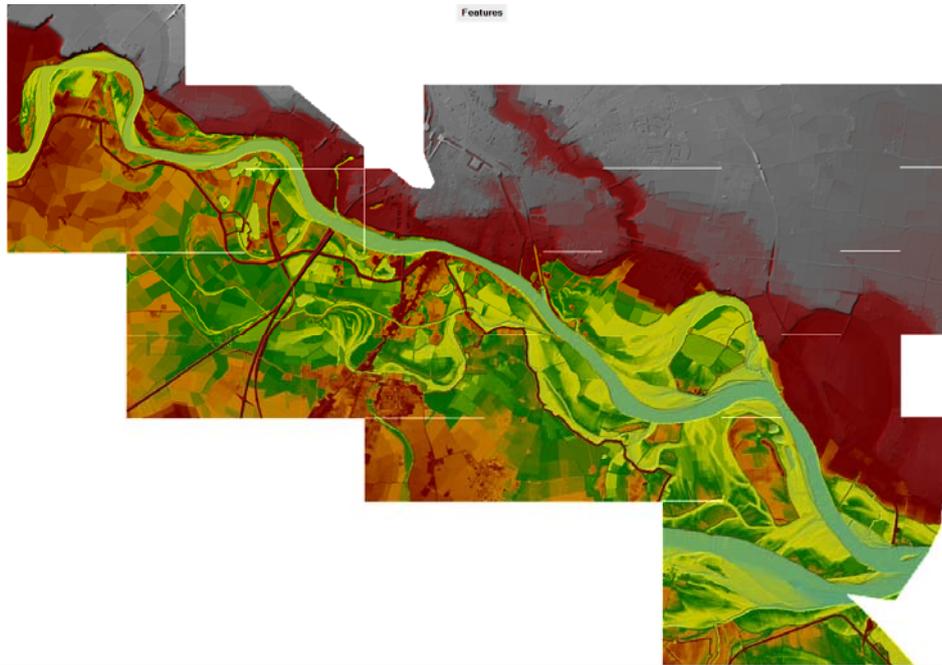


Figura 5.2 - Base LIDAR del fiume Ticino

La descrizione delle aree di esondazione, in sinistra e destra idrografica del fiume Ticino, è stata effettuata utilizzando il rilievo LIDAR a maglia 1x1. LIDAR è una tecnica di telerilevamento che ha permesso il rilevamento di tutta la costa italiana e di tutte le aste fluviali.

Partendo dall'informazione topografica in esso contenuta, è stato ricavato il modello digitale del terreno per la porzione di territorio limitrofa al fiume Ticino, oggetto di studio (Figura 5.2).

Nel mese di maggio 2020 è stato effettuato un rilievo topografico di 10 sezioni lungo il fiume Ticino, 8 sezioni lungo il Gravelone e alcune sezioni sul Naviglio Pavese e sull'argine presente a Borgo Ticino.

#

6 STUDIO IDRAULICO BIDIMENSIONALE

Per ricostruire il comportamento idrodinamico del fiume Ticino e definire i tiranti idrici che si instaurano lungo il corso d'acqua e nelle aree golenali ad esso collegate è stato implementato un modello idraulico monodimensionale accoppiato ad un modello bidimensionale delle aree golenali.

Il modello bidimensionale è stato implementato mediante l'uso del software HEC-RAS 5.0.7 sviluppato dall'*U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center*.

6.1 LA PIENA DI RIFERIMENTO

La portata di riferimento per le simulazioni idrauliche condotte è quella registrata durante l'evento di piena dell'Ottobre 2000 che, come descritto nel seguito, è confrontabile sia con la piena di riferimento T200 anni indicata nella Direttiva PAI che con la portata T200 anni utilizzata nello studio 2008 di "*Monitoraggio morfologico e sedimentologico dell'alveo del fiume Ticino*".

La piena dell'ottobre 2000 è stata caratterizzata dal massimo della portata in arrivo pari a **2.646 m³/s** registrata nel secolo scorso e nello scorcio di questo (misurata alla diga della Miorina) e contemporaneamente da uno dei massimi valori di altezza idrica alla confluenza con il Po al ponte della Becca dal 1926, pari a **62,94 m s.l.m.** (+7.84 m sullo zero idrometrico uguale a 55,10 m s.l.m.).

Al ponte coperto è stata misurata un'altezza massima di **63,71 m s.l.m.** (+6.1 m sullo zero idrometrico), di 1 cm superiore rispetto al profilo della piena di riferimento del PAI, quindi perfettamente paragonabile con quest'ultima per la perimetrazione delle aree esondabili. La portata massima per il tempo di ritorno 200 anni riportata nella "*Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica*" è pari a 2.300 m³/s.

Se si considera lo "*Studio idraulico per la delimitazione delle fasce fluviali del Ticino tra il Lago Maggiore e il Po*" condotto dall'Università di Pavia, la portata T200 anni a Pavia è stimata pari a 2500 m³/s (vedi Tabella 4.1) e risulta praticamente coincidente con la piena del 2000.

Alla luce delle considerazioni sopra descritte appare quindi corretto assumere quale portata di riferimento la piena 2000 il cui colmo è pari a circa 2600 m³/s.

6.2 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Il modello monodimensionale accoppiato al bidimensionale è stato implementato mediante l'uso del software HEC-RAS 5.0.7 sviluppato dall'*U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center*.

Per la parte monodimensionale HEC-RAS risolve le equazioni di De Saint Venant distinguendo tra alveo e zone golenali:

Equazione di continuità

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0$$

#

dove

- x : distanza lungo il canale;
- t tempo;
- Q portata;
- A area della sezione;
- S area della sezione non considerata contribuente al deflusso (ineffective flow area);
- q_l flusso laterale per unità di lunghezza.

L'equazione può essere scritta per l'alveo inciso, per la golena destra e per la golena sinistra, di seguito, per semplicità, si riportano le equazioni per l'alveo inciso e per le golene complessivamente:

$$\frac{\partial A_a}{\partial t} + \frac{\partial Q_a}{\partial x_a} - q_g = 0$$

$$\frac{\partial A_g}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q_g}{\partial x_g} = q_a + q_l$$

dove la sotto scrittura a e g indica alveo inciso e golene rispettivamente, q_c e q_g indicano gli scambi di portata tra l'alveo inciso e le zone golenali. Si noti come siano considerate distanze diverse lungo l'alveo inciso e le zone golenali.

Equazione dell'energia

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S \right) = 0$$

dove:

- g accelerazione di gravità;
- S perdite di energia dovute alla scabrezza;
- V velocità.

Anche in questo caso possiamo scrivere l'equazione per l'alveo inciso e per le golene:

$$\frac{\partial Q_a}{\partial t} + \frac{\partial(V_a Q_a)}{\partial x_a} + gA_a \left(\frac{\partial z}{\partial x_a} + S_a \right) = M_g$$

$$\frac{\partial Q_g}{\partial t} + \frac{\partial(V_g Q_g)}{\partial x_g} + gA_g \left(\frac{\partial z}{\partial x_g} + S_g \right) = M_a$$

dove M rappresenta lo scambio di quantità di moto tra alveo inciso e golene, si noti che

$$\Delta x_a M_a = -\Delta x_g M_g$$

Nelle equazioni z (livello d'acqua) non è sottoscritto, infatti un modello monodimensionale ha come assunzione implicita che il livello è costante all'interno dell'intera sezione. La

#

velocità è invece diversa tra alveo inciso e zone golenali, per cui si avrebbe un valore dell'energia diverso, non possibile in un modello monodimensionale. Il valore dell'energia viene calcolato introducendo il valore α . Considerando una velocità media nella sezione e differenziando tra alveo, golena destra e golena sinistra, facendo una media pesata sulle portate, possiamo scrivere:

$$\alpha \frac{\bar{V}}{2g} = \frac{Q_{gsx} \frac{V_{gsx}^2}{2g} + Q_a \frac{V_a^2}{2g} + Q_{gdx} \frac{V_{gdx}^2}{2g}}{Q_{gsx} + Q_a + Q_{gdx}}$$

assumendo che la pendenza della linea dell'energia è unica risulta anche:

$$Q_{gsx} = \frac{Q_{Tot}}{K_{Tot}} K_{gsx} \quad Q_a = \frac{Q_{Tot}}{K_{Tot}} K_a \quad Q_{gdx} = \frac{Q_{Tot}}{K_{Tot}} K_{gdx}$$

dove K rappresenta la conveyance o conduttività idraulica. Inserendo quest'ultime nell'equazione precedente si ottiene:

$$\alpha = \frac{A_{Tot}^2 \left[\frac{K_{gsx}^3}{A_{gsx}^2} + \frac{K_a^3}{A_a^2} + \frac{K_{gdx}^3}{A_{gdx}^2} \right]}{K_{Tot}^3}$$

HEC-RAS utilizza l'equazione di Manning per la definizione delle perdite di carico per attrito:

$$Q = \frac{AR_H^{2/3} \sqrt{S}}{n}$$

dove n è il coefficiente di scabrezza secondo tale formulazione.

HEC-RAS nella scrittura, e quindi implementazione, dell'equazione dell'energia distingue sempre tra alveo inciso e zone golenali calcolando separatamente la conveyance di queste zone. Nel caso in cui all'interno di tali zone vi siano variazioni di scabrezza suddivise ulteriormente la sezione calcolando la conveyance per ogni tratto a partire da area e contorno bagnato.

Oltre alle perdite di carico per attrito HEC-RAS considera anche le perdite di carico per allargamento o restringimento della sezione:

$$h_e = C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove c è il coefficiente di contrazione.

In HEC-RAS possono essere schematizzate diversi tipi di strutture, sia trasversali al corso d'acqua che parallele allo stesso.

Per le strutture trasversali la valutazione delle perdite di carico dovute alla presenza della struttura è fatta mediante la schematizzazione con 4 sezioni del tratto in cui avviene la contrazione e l'espansione della vena liquida.

#

Il calcolo del deflusso attraverso gli stramazzi avviene con le formule degli stramazzi. Si possono considerare sia stramazzi in parete sottile che in parete grossa, liberi o controllati da paratoie verticali o radiali.

Oltre alle strutture trasversali alla corrente è possibile considerare delle strutture parallele alla corrente che simulano lo sfioro dell'acqua al di sopra di un argine o di una apposita struttura di sfioro laterale. In HEC-RAS il calcolo della portata sfiorante avviene considerando unicamente il livello di una sezione, ma considerando la variazione di livello sia dello stramazzo che del livello d'acqua, permettendo una più precisa valutazione.

Per la parte bidimensionale il codice risolve le equazioni di De Saint Venant bidimensionali. Per la soluzione il codice utilizza la tecnica dei volumi finiti su griglia non strutturata. La tecnica dei volumi finiti consente di rappresentare in modo corretto sia correnti in moto subcritico che supercritico, come pure di descrivere fronti d'onda ripidi come quelli che si verificano in caso di rottura d'argini o dighe. La tecnica dei volumi finiti consente inoltre il controllo preciso dell'equazione di continuità nei problemi di flood and dry, continuità non sempre strettamente garantita nei metodi agli elementi finiti e differenze finite. HEC-RAS è perciò particolarmente adatto a descrivere propagazioni di onde su asciutto come quelle che si verificano durante gli allagamenti delle zone golenali. Le griglie non strutturate consentono di descrivere in dettaglio il dominio di calcolo, permettendo di variare le dimensioni degli elementi infittendo la griglia di calcolo dove le variazioni geometriche sono più accentuate e/o dove si vuole un livello di dettaglio più accurato. Inoltre l'utilizzo della tecnica dei volumi finiti consente di accelerare i tempi di calcolo. Il codice di calcolo definisce per ogni faccia di una cella di calcolo della mesh le grandezze idrodinamiche caratteristiche in una fase di preelaborazione, accelerando quindi il calcolo in fase di simulazione.

Attraverso l'accoppiamento 1D-2D è possibile simulare sistemi complessi quale quello in oggetto, garantendo la massima affidabilità dei livelli in alveo anche in presenza di strutture interferenti che creano funzionamenti rigurgitati dell'alveo, e al tempo stesso fornire un'accurata definizione delle dinamiche bidimensionali nelle aree golenali e dell'interconnessione tra alveo e golena.

Per non appesantire la trattazione e per dettagli sul funzionamento computazionale del codice di calcolo utilizzato, si rimanda all'ampia documentazione disponibile al seguente indirizzo <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>.

6.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE

Vengono di seguito descritti i criteri utilizzati per l'implementazione del modello idraulico del fiume Ticino, in particolare per la ricostruzione geometrica dell'alveo monodimensionale e le aree bidimensionali relative alle zone golenali prese in considerazione.

6.3.1 Descrizione della geometria dell'alveo

Il tratto di corso d'acqua oggetto di studio si estende per una lunghezza complessiva di circa 12 km compreso tra la località "Chiozdo" a monte e il ponte della Becca a valle in corrispondenza della confluenza con il fiume Po.

Per la ricostruzione geometrica dell'alveo si è fatto riferimento al modello digitale del terreno (DTM) descritto nel capitolo 5.

#

Il DTM è stato costruito sulla base del rilievo LIDAR a maglia 1x1 del Ministero dell'Ambiente integrato con il rilievo batimetrico di dettaglio dell'alveo acquisito nell'ambito dello studio "*Monitoraggio morfologico e sedimentologico dell'alveo del fiume Ticino*" del 2008.

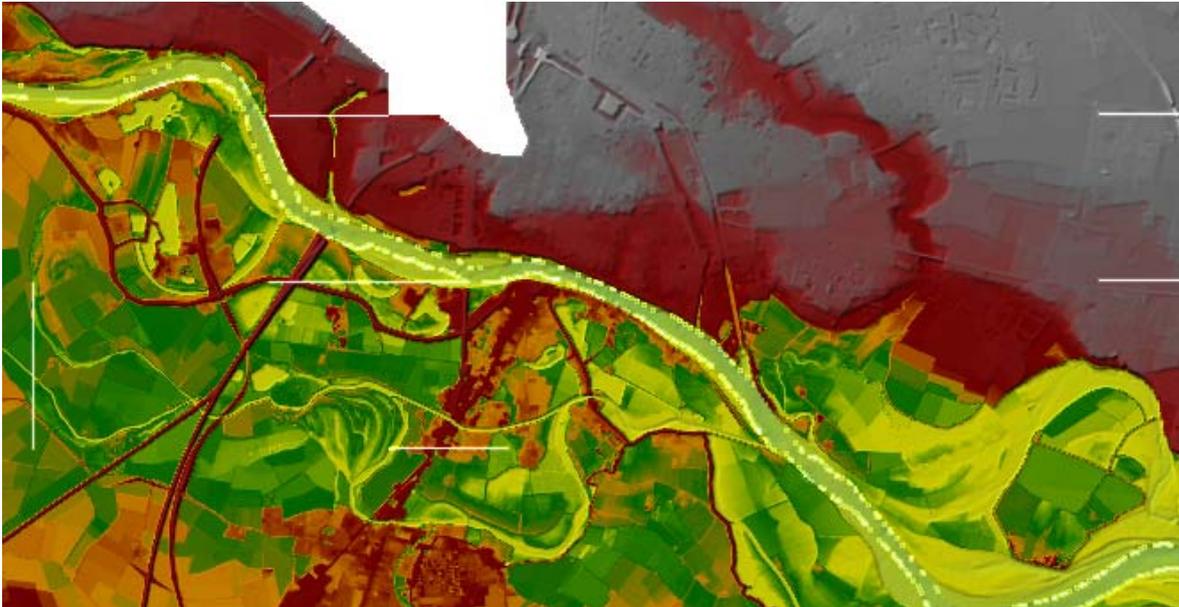


Figura 6.1 – Stralcio modello digitale del terreno utilizzato per la ricostruzione geometrica dell'alveo

Il modello digitale è stato poi confrontato con il rilievo topografico eseguito nel mese di giugno 2020. Tra i due si può riscontrare una buona corrispondenza con uno scarto medio di circa 10 cm.

Sulla base del DTM così implementato sono ricavate 63 sezioni trasversali che sono state inserite nel modello per la descrizione monodimensionale dell'alveo. Sono quindi stati inseriti i manufatti di attraversamento presenti:

- Ponte Tangenziale di Pavia;
- Ponte ferroviario linea Milano–Genova;
- Ponte SP 35 (ponte della Libertà ex ponte Impero);
- Ponte coperto di Pavia;

#

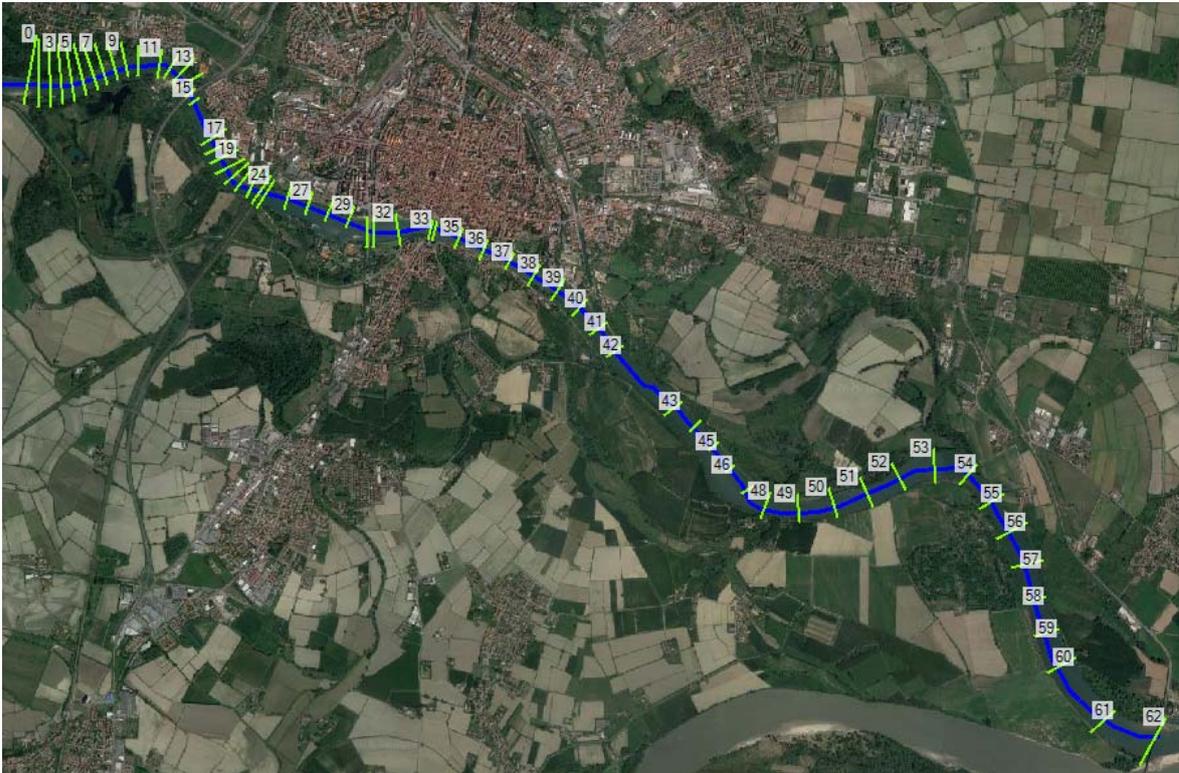


Figura 6.2 – Fiume Ticino nel tratto oggetto di studio

6.3.2 Descrizione geometrica delle aree di allagamento

Per la simulazione delle esondazioni nelle aree golenali e quindi definire le aree di allagamento nella zona oggetto di studio si è fatto riferimento sempre al DTM ricostruito sulla base del rilievo LIDAR.

Le dimensioni dell'area oggetto di simulazione e il grado di dettaglio della maglia di calcolo sono state definite tenendo conto delle seguenti esigenze:

1. avere un'adeguata estensione e grado di dettaglio tale da consentire una corretta ricostruzione della fenomenologia di allagamento nelle aree di interesse e minimizzare l'influenza delle condizioni al contorno sui risultati.
2. implementare un modello compatibile da un punto di vista computazionale con i processori di ultima generazione.

In relazione al grado di dettaglio necessario nella zona da simulare nonché alle variazioni morfologiche presenti nelle diverse aree, per la zona oggetto di studio si è utilizzata una maglia di dimensioni 10 x 10 metri. La superficie complessiva dell'area 2D modellata è pari circa 31 km², per un totale di circa 310'000 celle.

#

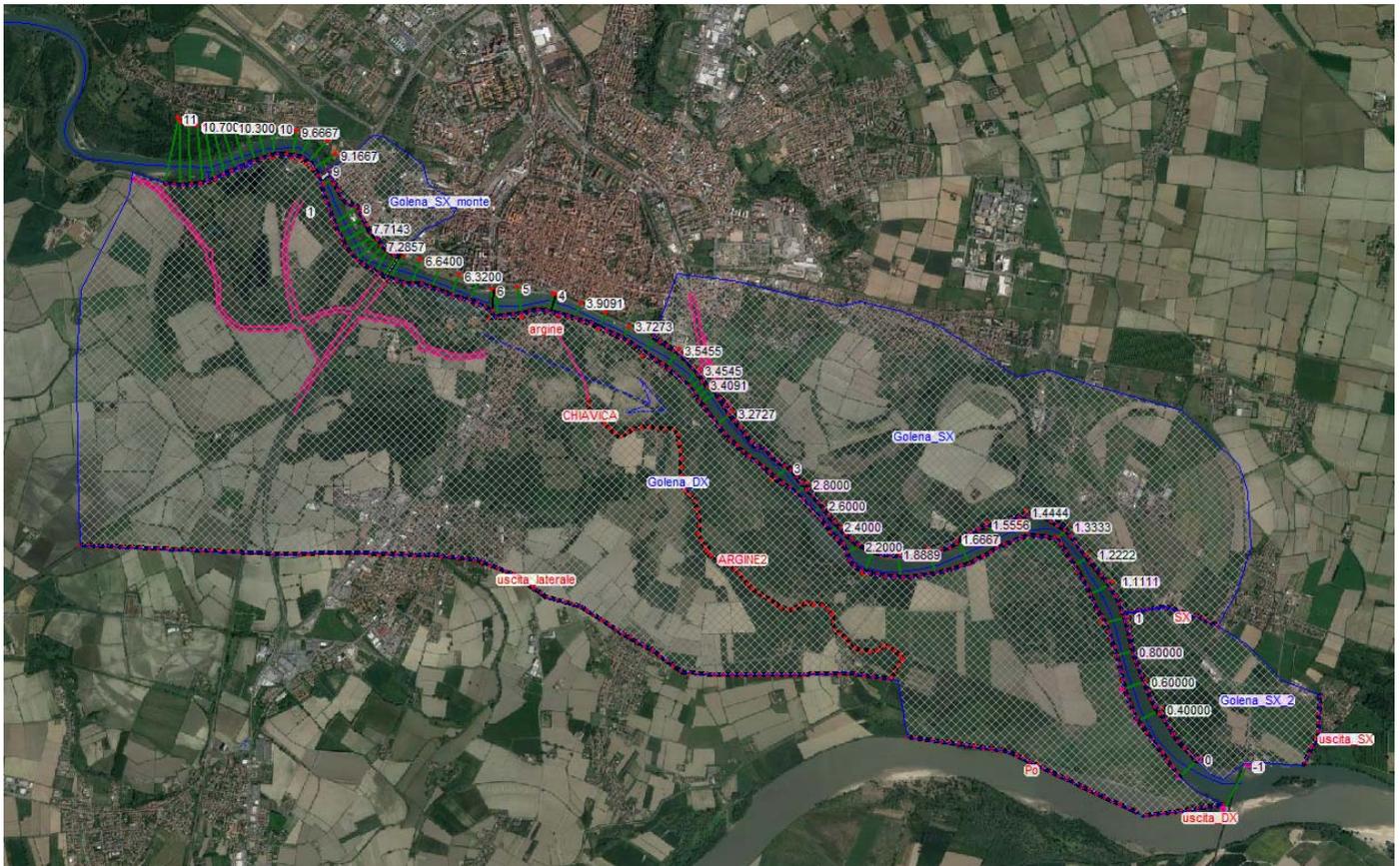


Figura 6.3 – Schematizzazione 2D del tratto oggetto di studio

All'interno delle aree golenali sono quindi stati dettagliati alcuni elementi fondamentali per simulare correttamente il fenomeno delle esondazioni. In particolare è stato dettagliato all'interno dell'area 2D destra il rilevato arginale del fiume Po e la chiavica sulla roggia Gravellone che, durante le piene del Ticino, viene chiusa per impedire alle acque di risalire lungo la roggia stessa e provocare allagamenti lungo via dei Mille. Sempre in sponda destra sono stati inseriti i panconi che durante le piene vengono posizionati in corrispondenza dell'apertura di via Milazzo.

In sponda sinistra è invece stata inserita la chiavica posta lungo il Naviglio di Pavia che impedisce il rientro della piena evitando esondazioni nel centro storico della città.

#

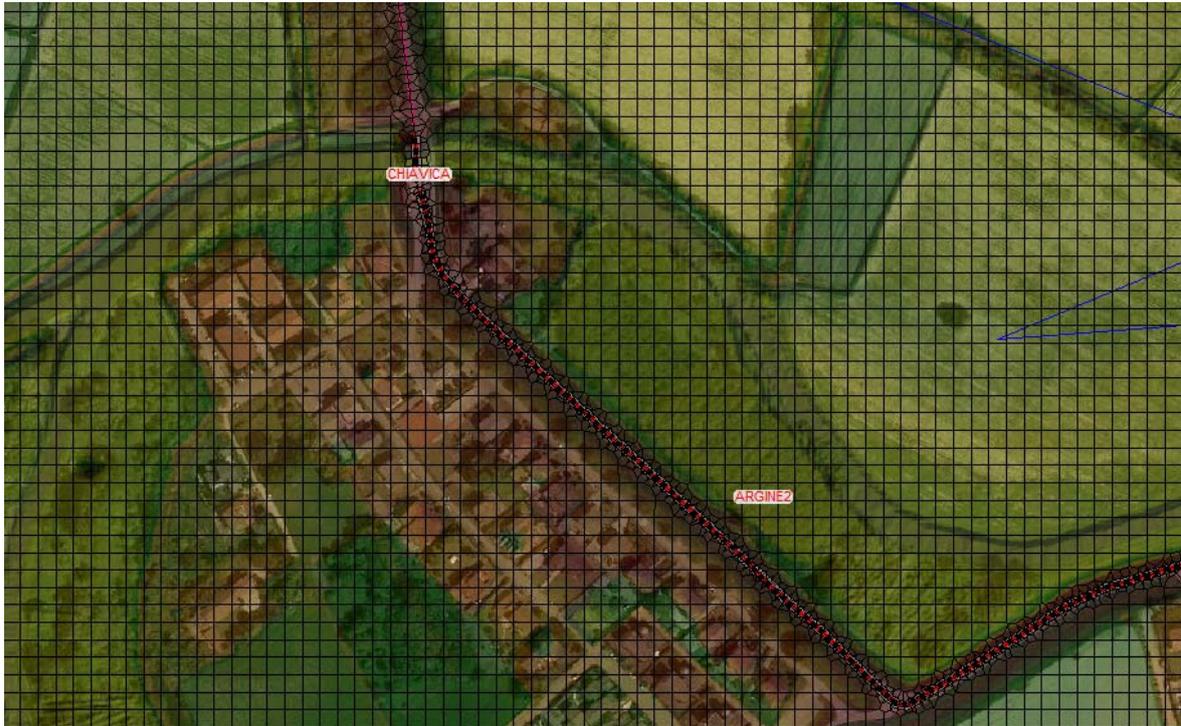


Figura 6.4 – Particolare area 2D golena destra con argine e chiavica roggia Gravellone



Figura 6.5 – Particolare area 2D golena sinistra con chiavica Naviglio Pavia

#

6.3.3 Condizioni al contorno e coefficienti di scabrezza

Come già detto la piena di riferimento assunta per le modellazioni idrauliche è quella relativa all'evento del 2000 il cui colmo registrato al ponte della Libertà (SP 35 ex ponte Impero) è pari a **2646 m³/s**.

Nella sezione di monte del modello, come condizione al contorno, è stato quindi inserito l'idrogramma di piena registrato all'idrometro, riportato nella figura seguente.

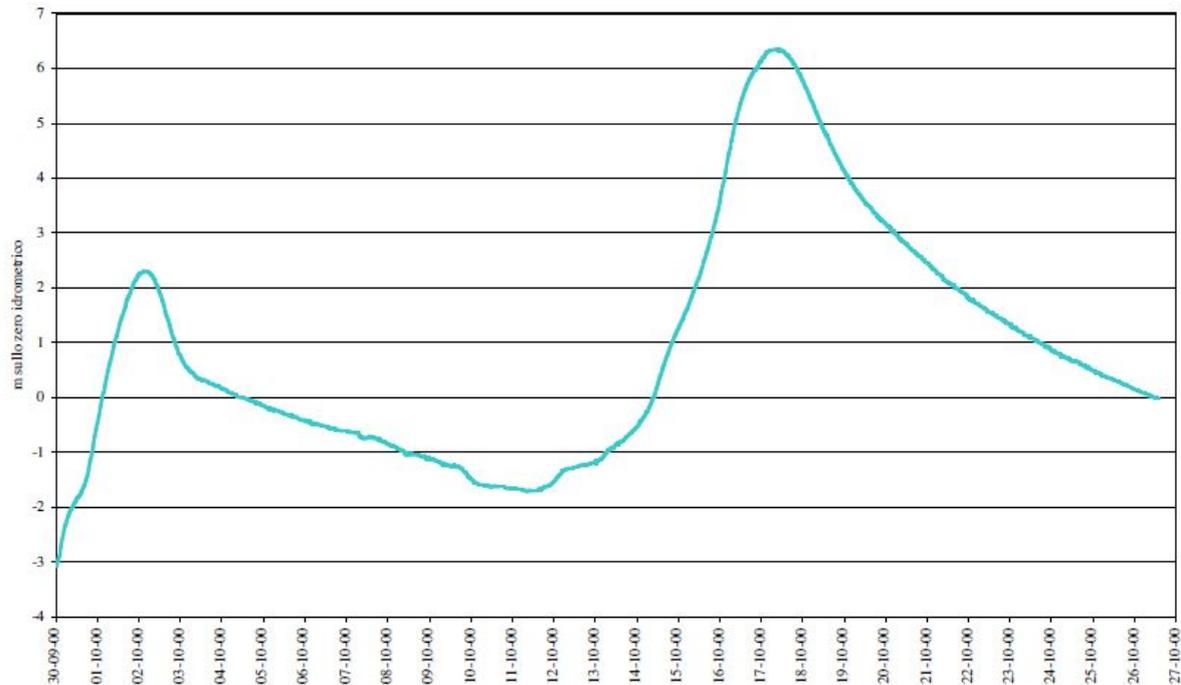


Figura 6.6 – Idrogramma piena Ottobre 2000 registrato all'idrometro dell'ex Ponte Impero (ponte SP35)

Non avendo a disposizione la scala di deflusso dell'idrometro la ricostruzione delle portate è stata ricostruita analiticamente digitalizzando l'idrogramma sopra riportato e facendo coincidere il massimo livello registrato con la portata al colmo di 2646 m³/s. L'idrogramma così ottenuto (vedi figura seguente) è stato inserito nel modello.

#

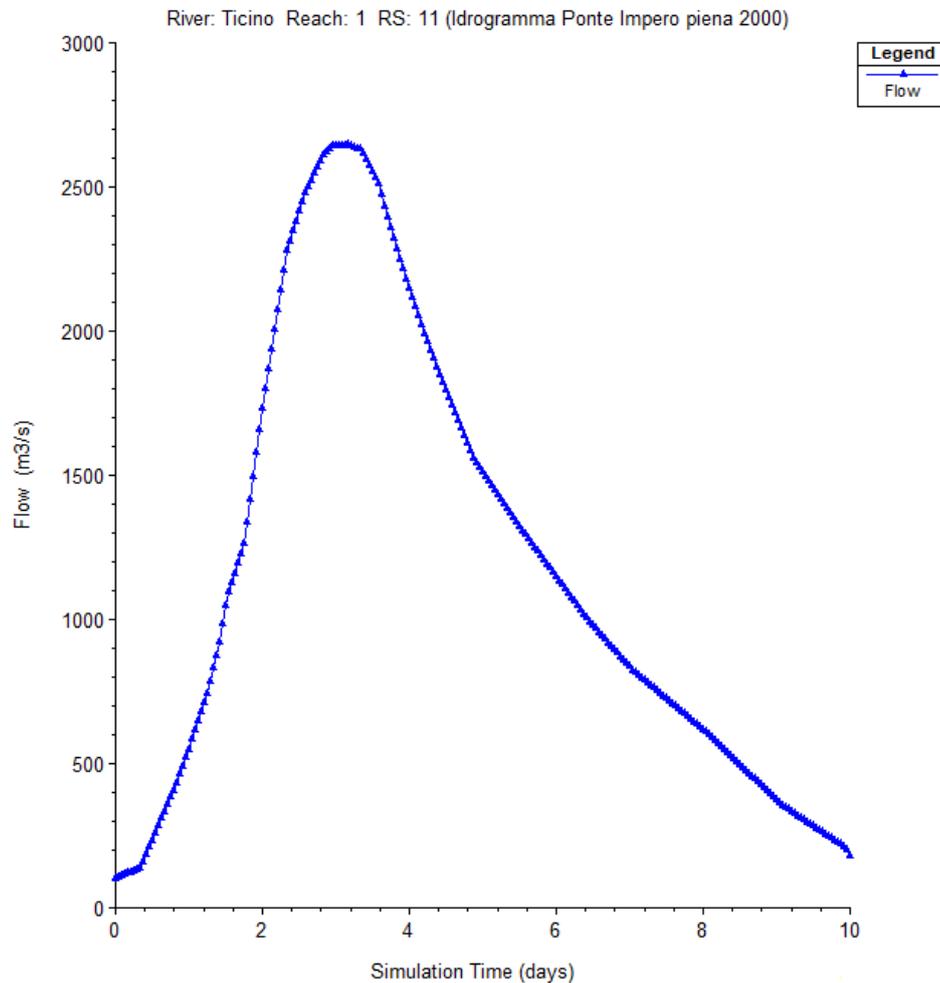


Figura 6.7 – Condizione di monte: idrogramma di piena inserito nel modello (portata al colmo 2646 m³/s)

Come condizione al contorno di valle è stata inserita la scala di deflusso del Po in corrispondenza della confluenza con il Ticino in prossimità del Ponte della Becca. La scala di deflusso di riferimento è quella registrata in corrispondenza della stazione idrometrica di Spessa Po (stazione idrometrica più prossima alla confluenza Ticino-Po) la cui equazione è di seguito riportata:

- $328.960 \cdot (h + 2.846)^{1.293}$ per h compresi tra -2.5 m e +2.3 m sullo zero idrometrico
- $917.375 \cdot (X - 2.30)^{1.198} + 2737.497$ per h compresi tra +2.3 e +9.0 m sullo zero idrometrico

La scala di deflusso è stata quindi calcolata rispetto allo zero idrometrico riferito al ponte al ponte della Becca pari a 55,10 m s.l.m.

#

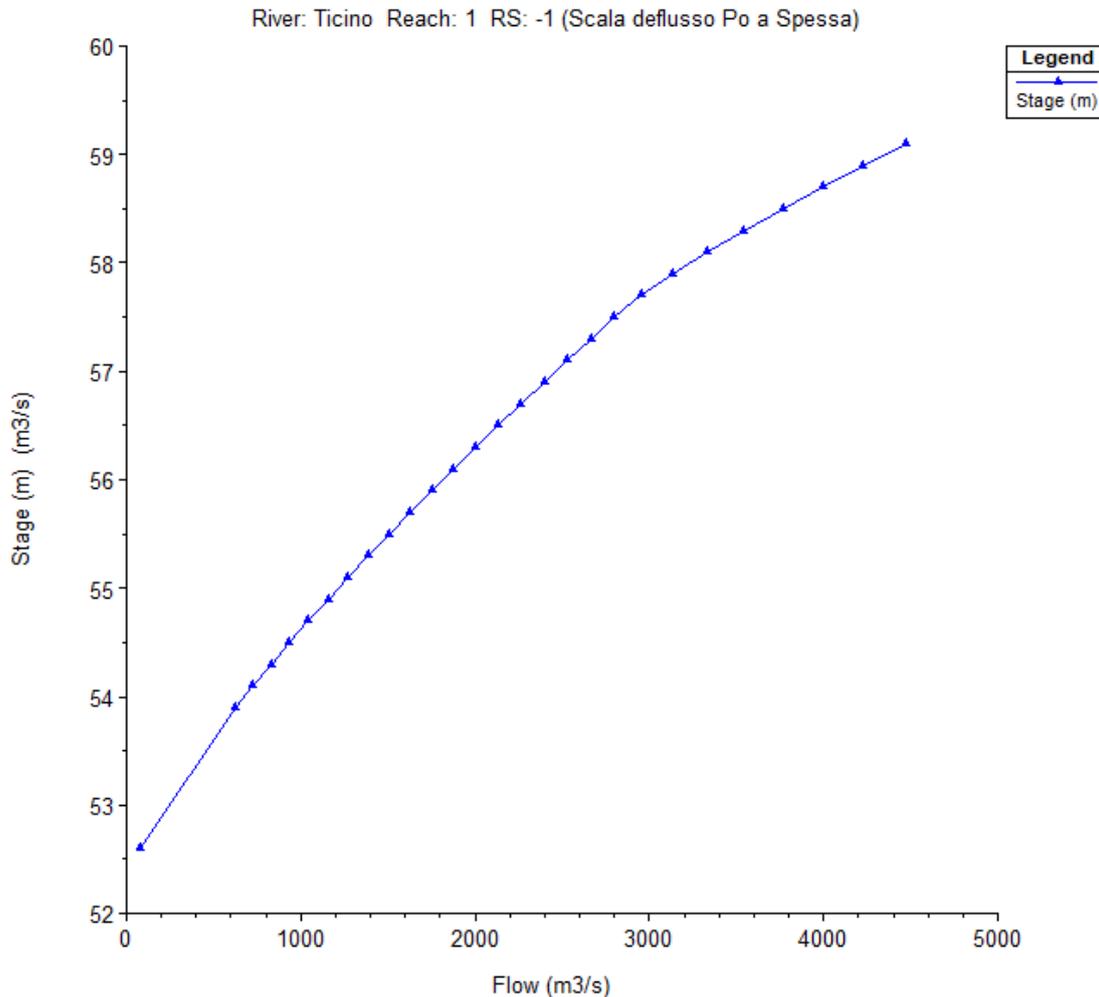


Figura 6.8 – Condizione di valle: scala di deflusso fiume Po alla confluenza con il fiume Ticino (scala di riferimento di Spessa Po)

La condizione di valle così definita è stata considerata per la simulazione idraulica che prende in considerazione solamente la piena di Ticino senza concomitante piena di Po.

Nel presente studio è stata eseguita anche la simulazione con la piena concomitante di Po (piena ottobre 2000) che ha registrato al ponte della Becca un livello di +7.84 m sopra lo zero idrometrico pari a **62.94 m s.l.m.** Tale livello è stato imposto come condizione di valle nella simulazione idraulica che considera la piena concomitante di Po e Ticino (piena 2000 di taratura)

Per la definizione dei coefficienti di scabrezza si è fatto riferimento alle tabelle riportate nel testo "Ven Te Chow, Ph. D - *Open Channel Hydraulics* - Mc Graw Hill International Edition - 1986".

#

La scelta è stata effettuata considerando sia le caratteristiche dei materiali che compongono attualmente l'alveo e le sponde che a seguito di una taratura eseguita mediante la ricostruzione dell'evento di piena del 2000.

Con riferimento al coefficiente di scabrezza di Strikler K_S per l'alveo inciso sono stati adottati i seguenti valori:

- tratto a monte del ponte FS $K_S = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- tratto a valle del ponte FS $K_S = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Per le aree golenali, viste le caratteristiche prevalentemente naturali delle aree di esondazione, si è ritenuto corretto adottare un valore di scabrezza $K_S = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

6.4 TARATURA EVENTO DI PIENA OTTOBRE 2000

Prima di procedere alle simulazioni bidimensionali delle aree allagabili si è eseguita una taratura del modello al fine di valutare correttamente i coefficienti di scabrezza dell'alveo inciso del fiume Ticino nel tratto di interesse.

La taratura del modello, eseguita con uno schema monodimensionale del corso d'acqua, si è basata sulla piena di riferimento dell'ottobre 2000.

Considerate le condizioni al contorno descritte nel paragrafo precedente (in particolare l'idrogramma di piena in ingresso a modello e la quota idrica registrata al ponte della Becca in corrispondenza della massima piena del Po), mediante il modello si è cercato di riprodurre il massimo livello idrico registrato al ponte coperto durante l'evento. Tale livello (come descritto nel paragrafo 6.1) risulta pari a 63.71 m s.l.m. Nella figura seguente si riporta il profilo idraulico ricostruito con il modello.

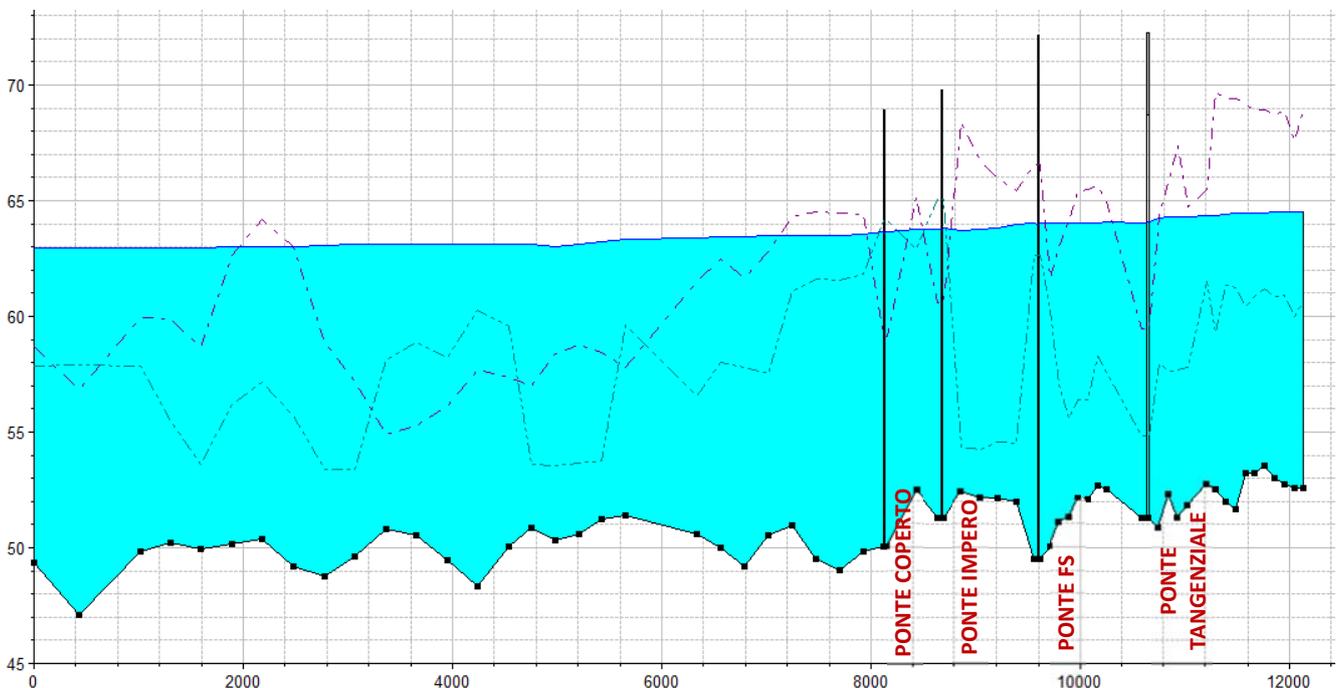


Figura 6.9 – Taratura modello: profilo idraulico monodimensionale ricostruito con il modello per la piena ottobre 2000

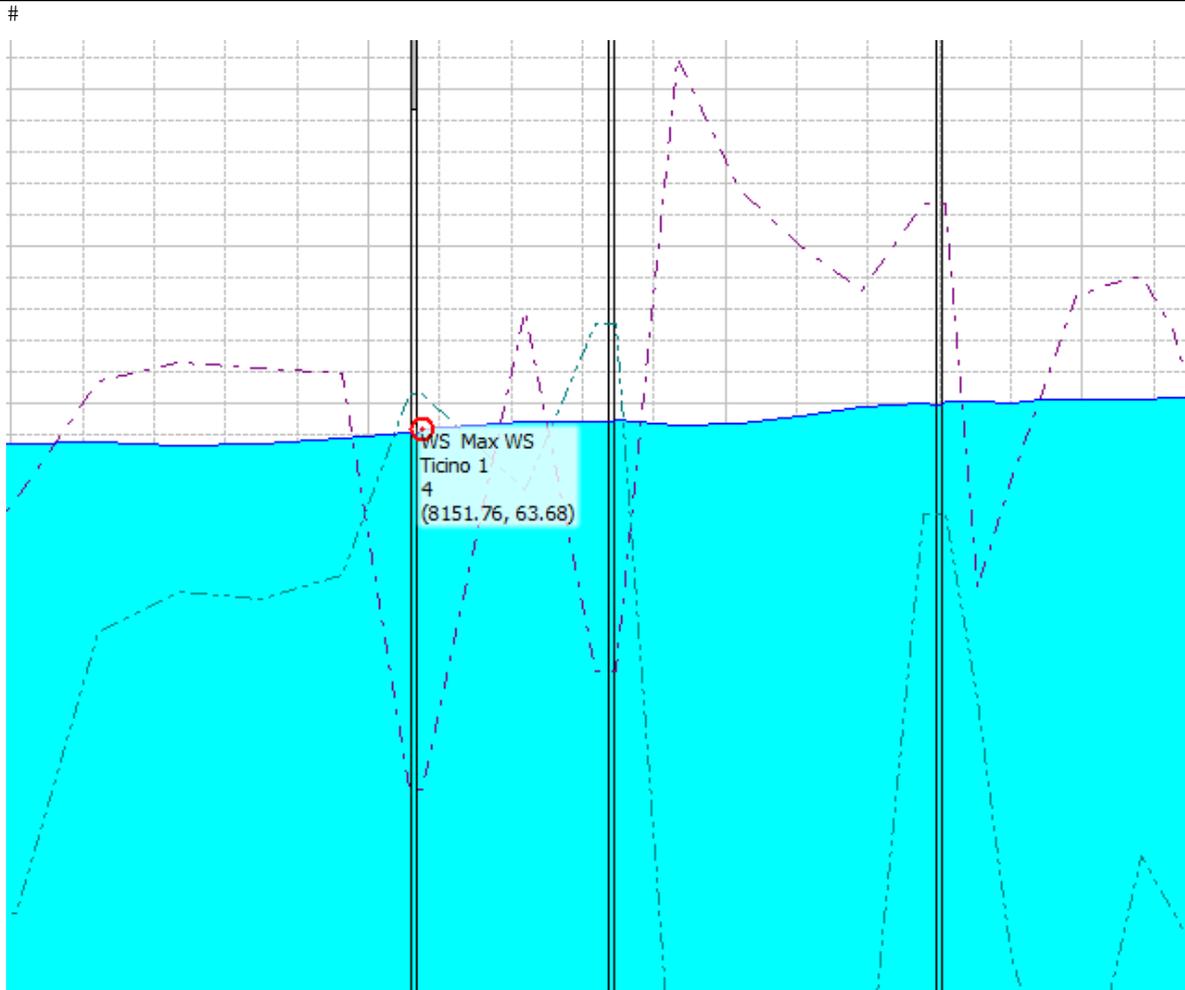


Figura 6.10 – Taratura modello: dettaglio profilo idraulico piena ottobre 2000 in corrispondenza del ponte coperto

Come si evince dalla figura il livello calcolato con il modello in corrispondenza del ponte coperto è pari a 63.68 m s.l.m., praticamente coincidente con il livello registrato durante l'evento. Possiamo quindi concludere che il modello implementato è in grado di riprodurre correttamente e con un buon grado di affidabilità il comportamento idraulico del fiume Ticino in occasione degli eventi di piena.

6.5 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI E INDIVIDUAZIONE DELLE AREE ESONDABILI

Terminata la fase di implementazione e taratura del modello e assegnate le condizioni al contorno sono state condotte le simulazioni idrauliche per l'evento di piena 2000 (piena di riferimento adottata per il presente studio) che come si è congruente alla piena T200 anni. Mediante le simulazioni 2D è stato possibile definire le condizioni di deflusso del Ticino e delle esondazioni che si verificano nelle aree golenali

Sono state svolte due simulazioni idrauliche differenti considerando dapprima la sola piena Ticino e successivamente la piena Ticino con la concomitante piena Po, determinando così

#

sia gli allagamenti dovuti esclusivamente alle insufficienze idrauliche del Ticino che a quelli derivanti dal rigurgito del Po.

Nelle figure seguenti sono riportati i risultati ottenuti in termini di tiranti idrici e velocità della corrente.

6.5.1 Simulazione piena Ticino senza rigurgito del Po



Figura 6.11 – Tiranti idrici con piena Ticino senza rigurgito del Po

#

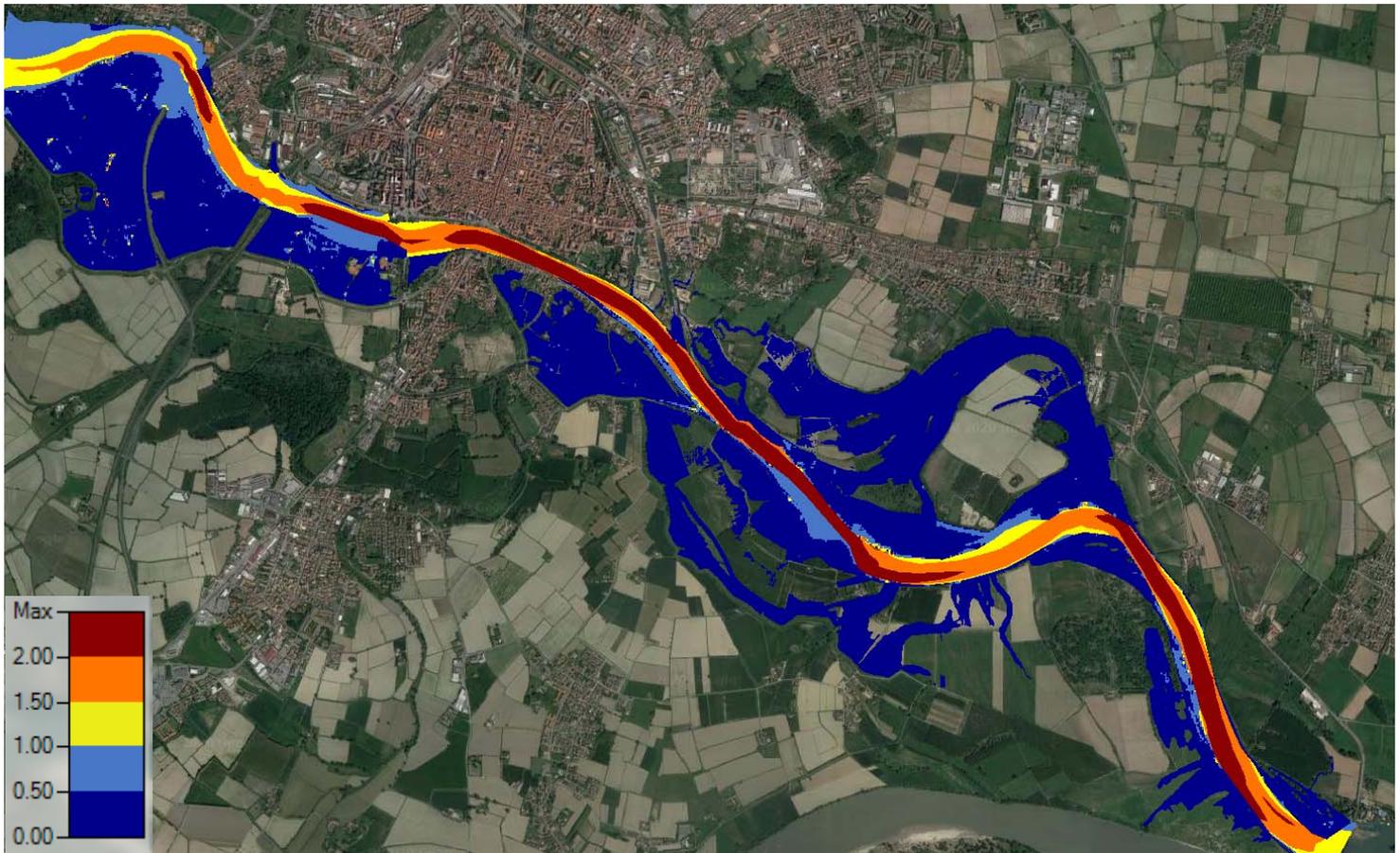


Figura 6.12 – Andamento delle velocità con piena Ticino senza rigurgito del Po

Dall'analisi dei risultati si evince che i tiranti maggiori si verificano nella golena destra di monte compresa tra il ponte della tangenziale e il ponte della linea ferroviaria. Le esondazioni in questa porzione del territorio risultano comunque contenute dalla difesa arginale presente. A valle del ponte coperto sempre in destra idraulica le esondazioni risultano contenute dal rilevato arginale esistente. La chiavica posta in corrispondenza della roggia Gravellone impedisce alle esondazioni di allagare il territorio abitato lungo via dei Mille.

In sponda sinistra i livelli di piena risultano contenuti dalla morfologia del territorio per cui non si verificano allagamenti nel centro abitato. Allagamenti in sinistra si verificano solamente nelle aree golenali poste a valle della confluenza del Naviglio di Pavia, ma interessano solamente aree per lo più a valenza agricola e naturale.

Le velocità maggiori si verificano nell'alveo inciso del fiume Ticino, mentre nelle golene le velocità della corrente risultano generalmente dell'ordine di 0.5 m/s.

#

6.5.2 Simulazione Piena Ticino con rigurgito del Po

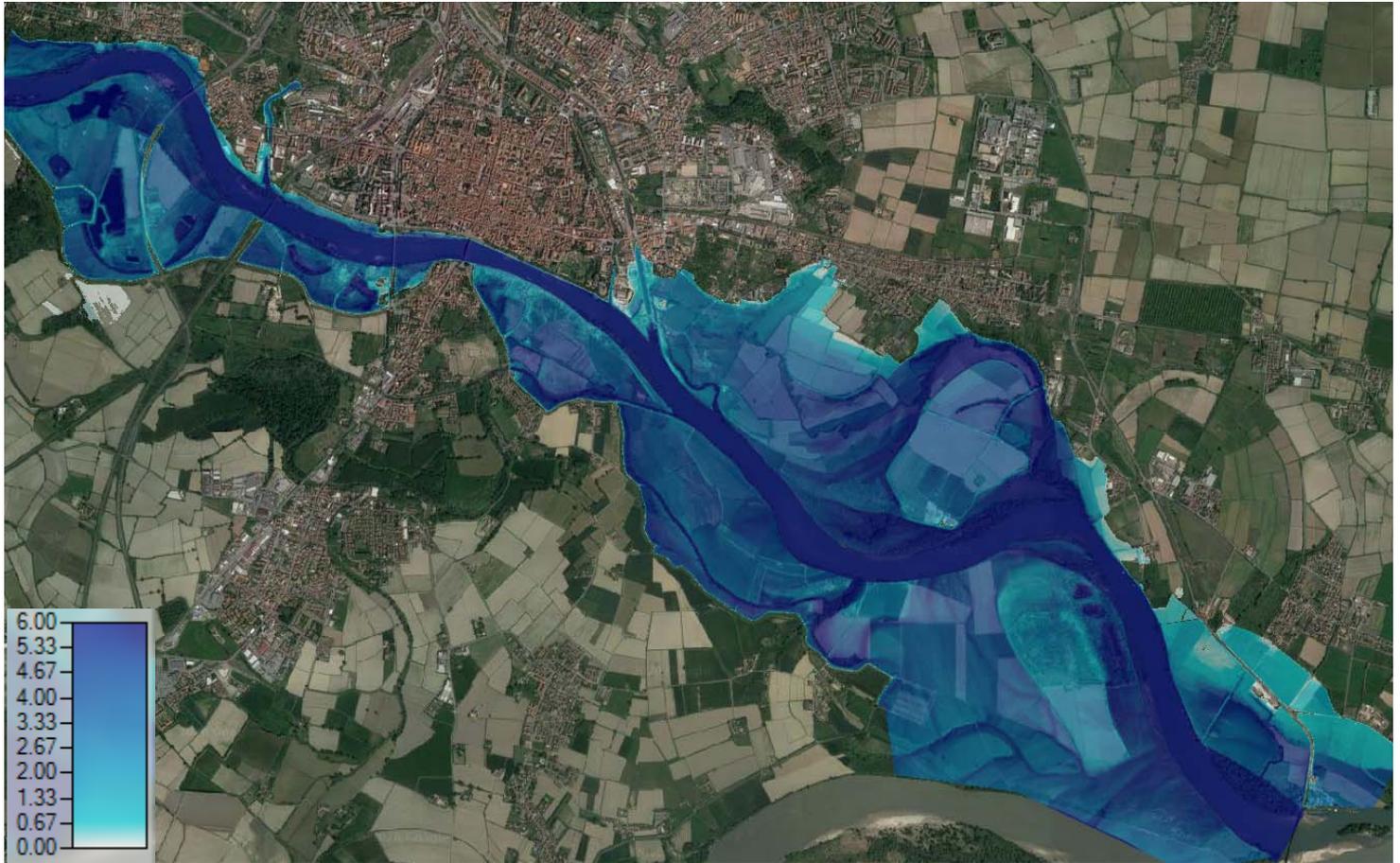


Figura 6.13 – Tiranti idrici con piena Ticino e rigurgito del Po

#

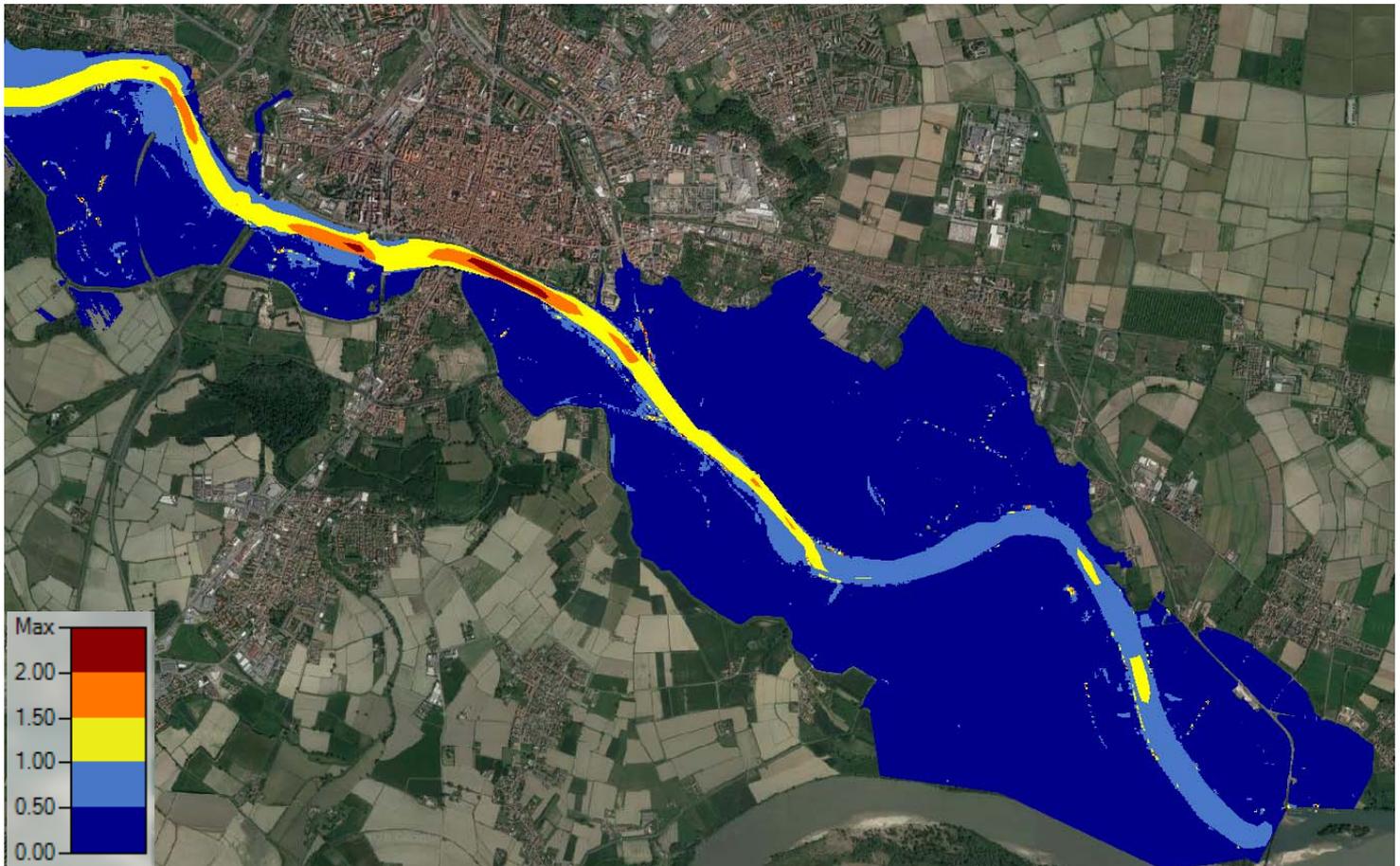


Figura 6.14 – Andamento delle velocità con piena Ticino e rigurgito del Po

La simulazione con piena concomitante del Po (evento di piena di riferimento del presente studio) mette in evidenza l'impossibilità del Ticino di recapitare le proprie portate. L'allagamento delle aree golenali, molto più ampio rispetto alla simulazione con la sola piena del Ticino, è dovuto esclusivamente al livello idrico del fiume Po che dà origine ad una sorta di lago il cui livello è superiore alla quota di piano campagna. In sponda destra la golena risulta completamente allagata e i livelli di piena risultano contenuti dal rilevato arginale. La chiusura della chiavica sul Gravelone e il posizionamento dei panconi di via Milazzo impediscono gli allagamenti dei centri urbani posti esternamente all'argine ad eccezione dell'abitato di Borgo Ticino. Le velocità della corrente nelle aree allagate risultano comprese generalmente tra 0.5 e 1.0 m/s.

In sponda sinistra l'allagamento risulta generalmente contenuto dalla morfologia del terreno e le esondazioni non interessano il centro abitato di Pavia. Locali allagamenti che interessano zone urbane possono verificarsi a seguito del rigurgito dei livelli di piena lungo il Navigliaccio (a monte del ponte FS) e lungo il Naviglio di Pavia.

Lungo il Naviglio di Pavia il rientro delle acque del Ticino è limitato dalla chiavica posta lungo Viale Partigiani per cui gli allagamenti interessano parzialmente le abitazioni in fregio alle vie Correnti e Venezia.

#



Figura 6.15 – Particolare allagamenti in corrispondenza della confluenza del Naviglio di Pavia

In zona "arsenale" a monte del ponte FS il rigurgito all'interno del Navigliaccio da origine ad esondazioni locali che interessano alcuni complessi industriali. Gli allagamenti in questa zona sono fortemente contenuti dall'andamento altimetrico del terreno che in una porzione limitata di territorio subisce una variazione di quote di +2.0 metri

#

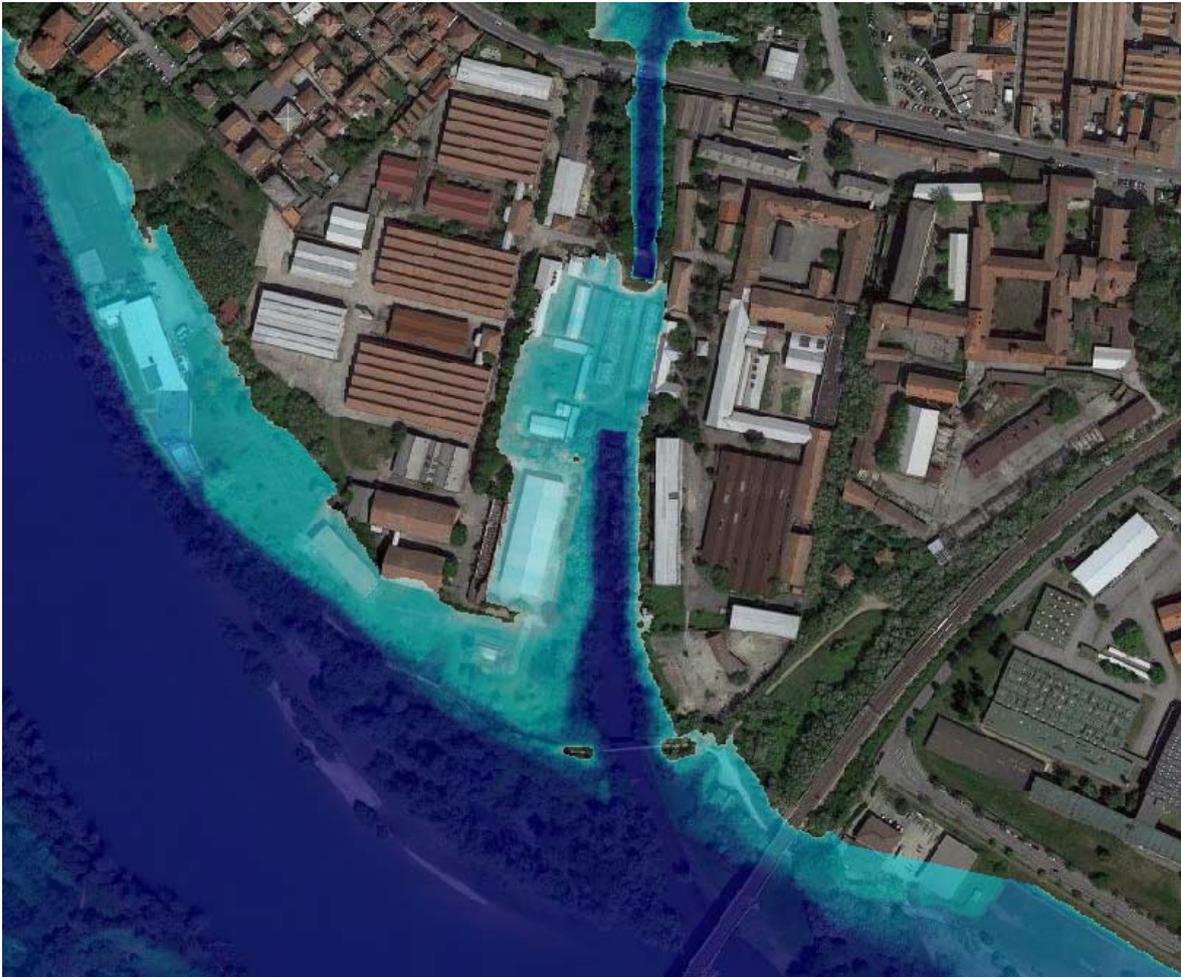


Figura 6.16 – Particolare allagamenti in corrispondenza della zona arsenale (confluenza Navigliaccio)

A valle della confluenza con il Naviglio di Pavia, in sinistra idraulica, si verificano ampie esondazioni che interessano aree golenali a bassa domanda di sicurezza.

#

7 ZONAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO

L'attività di valutazione e zonazione delle condizioni di rischio idraulico sul corso d'acqua di interesse è stata condotta secondo i criteri indicati nell'Allegato 4 alla D.G.R. IX/2616 del 30/11/2011 - Aggiornamento dei "Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell'art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12" approvati con D.G.R. 22 dicembre 2005 n. 8/1566 e successivamente modificati con D.G.R. n. 8/7374 del 28/5/2008.

La zonazione del rischio idraulico ha comportato le seguenti attività:

1. Zonazione della pericolosità in funzione del tirante idrico e della velocità di scorrimento;
2. Zonazione del rischio.

7.1 ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ

La definizione delle classi di pericolosità è stata condotta a partire dalle modalità di propagazione dell'onda di piena in corrispondenza di un evento con tempo di ritorno di 100 anni basandosi sui valori del tirante idrico e della velocità (Figura 7.1).

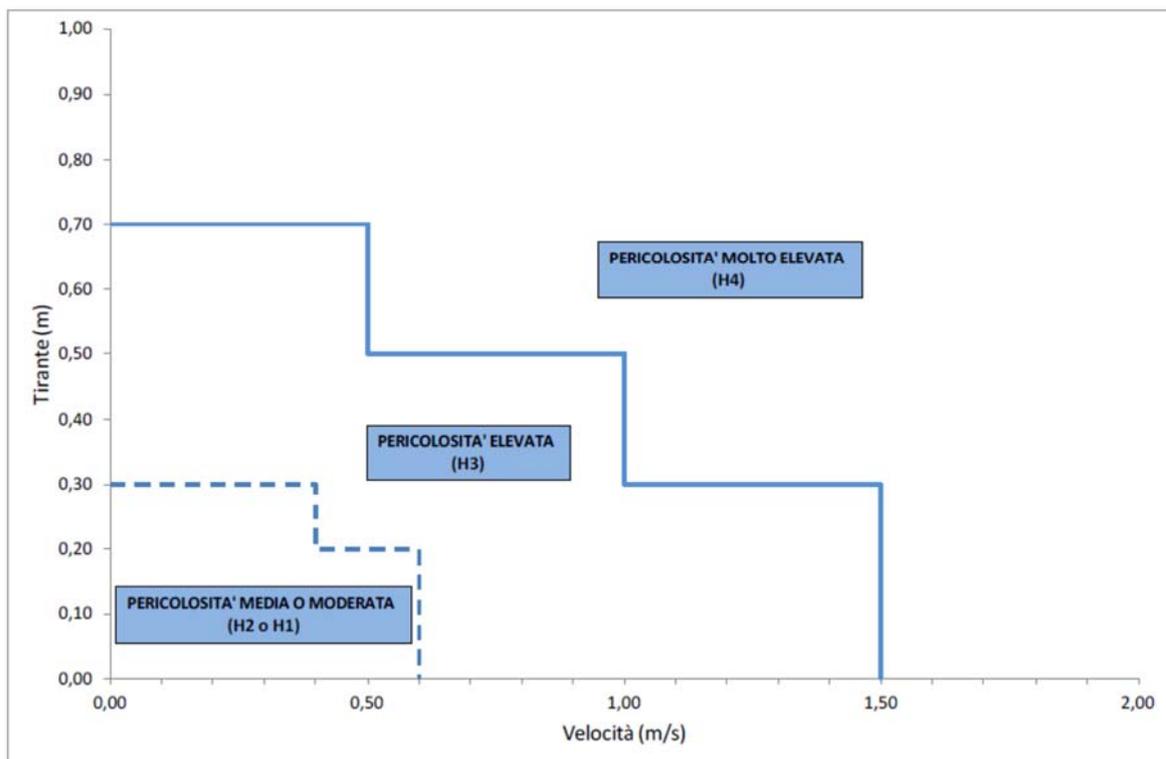


Figura 7.1 – Zonazione della pericolosità (Par. 3.4, All. 4, D.G.R. n° IX/2616 del 30/11/11)

Il grafico individua tre condizioni a differente livello di pericolosità:

- pericolosità molto elevata (H4) con velocità >1,5 m/s e tirante > 0,7 m;

#

- pericolosità elevata (H3) con velocità compresa tra 0,5 e 1,5 m/s e tirante compreso tra 0,3 e 0,7 m;
- pericolosità medio o moderata (H2/H1) con velocità compresa tra 0 e 0,6 m/s e tirante compreso tra 0 e 0,3 m.

In particolare le classi di pericolosità, sul fiume Ticino, in comune di Pavia, verranno ricavate sovrapponendo la mappa del tirante idrico alla mappa della distribuzione della velocità che si otterranno dal modello HEC-RAS. Dalla sovrapposizione si otterrà la carta della pericolosità idraulica.

7.2 ZONAZIONE DEL RISCHIO

La definizione delle classi di rischio è stata condotta incrociando il grado di pericolosità (H) e la relativa classe di danno potenziale (E), secondo le direttive contenute nell'allegato 4 alla D.G.R. n. IX/2616 del 30/11/11. Inoltre si è tenuto conto delle definizioni di rischio suggerite dal PAI (art. 7 delle NdA del PAI) e di seguito riportate:

- R1 (rischio moderato): possibili danni sociali ed economici marginali;
- R2 (rischio medio): possibili danni minori agli edifici e alle infrastrutture che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e lo svolgimento delle attività socio-economiche;
- R3 (rischio elevato): possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi e l'interruzione delle attività socio-economiche, danni al patrimonio culturale;
- R4 (rischio molto elevato): possibile perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici e alle infrastrutture, danni al patrimonio culturale.

Le classi del danno potenziale (E) vengono determinate in funzione degli elementi a rischio contenuti (Tabella 7.1).

Tabella 7.1 – Classi di danno potenziale (Par. 3.5, All. 4, D.G.R. n° IX/2616 del 30/11/11)

DANNO POTENZIALE	ELEMENTI A RISCHIO
Grave (E4)	Centri urbani, beni architettonici, storici, artistici, insediamenti produttivi, principali infrastrutture viarie, servizi di elevato valore sociale
Medio (E3)	Aree a vincolo ambientale e paesaggistico, aree attrezzate di interesse comune, infrastrutture viarie secondarie
Moderato (E2)	Aree agricole di elevato pregio (vigneti, frutteti)
Basso (E1)	Seminativi

Ponendo, a favore di sicurezza, la vulnerabilità (V) pari a 1, il rischio idraulico deriva dall'intersezione tra la pericolosità e il danno potenziale come di seguito riportato:

#

Tabella 7.2 – Classificazione del rischio (Par. 3.5, All. 4, D.G.R. n° IX/2616 del 30/11/11)

	H4	H3	H2	H1
E4	R4	R4	R2	R2
E3	R3	R3	R2	R1
E2	R2	R2	R1	R1
E1	R1	R1	R1	R1

L'individuazione della classe di rischio, relativa al territorio di Pavia, è stata effettuata incrociando la carta delle pericolosità idraulica (H) e la carta del danno potenziale (E).

Utilizzando la matrice sopra riportata verranno evidenziate le aree a differente rischio.

I tecnici

Dott. Geol. Efrem Ghezzi

Dott. Geol. Pietro
Breviglieri

Dott. Ing. Marta Gaboardi