

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA

Provincia di Lodi



studio della componente geologica, idrogeologica e sismica della variante generale al Piano di Governo del Territorio

Aggiornamento alle DGR 30 novembre 2011 - n. IX/2616 riguardante la componente geologica, idrogeologica e sismica del PGT, alla DGR del 30 marzo 2016 n. 5001 concernente le funzioni trasferite ai comuni in materia sismica, DGR 6738 del 19 giugno 2017 relativa all'attuazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza e Regolamenti regionali 23 novembre 2017 - n. 7 e 19 aprile 2019 n. 8 sull'invarianza idraulica e idrologica.

Allegato 2 alla relazione geologica generale

ASPETTI IDROLOGICI E IDRAULICI DELL'ADDA

NOVEMBRE 2021

Dott. Angelo Scotti

via Lungo Adda 24 Pizzighettone (Cr)

n° 763 Ordine dei Geologi della Lombardia

ASPETTI IDROLOGICI E IDRAULICI DEL FIUME ADDA

Sommario

1. PREMESSA.....	2
2. Descrizioni generali del corso d'acqua	2
3. ASPETTI IDROLOGICI	5
4. ASPETTI IDRAULICI.....	11

1. PREMESSA

Il presente allegato costituisce una modesta rielaborazione di quanto esposto nella relazione geologica del PGT del 2009, completata con una sintesi del vigente Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA), documento redatto in attuazione della Direttiva Europea 2007/60/CE "Direttiva Alluvioni" e del d.lgs. n. 49 del 2010, predisposti con lo scopo di ridurre le conseguenze delle alluvioni sul territorio nazionale. Per il Distretto Padano, cioè per la superficie interessata dai corsi d'acqua che confluiscono nel Po, è stato elaborato nel 2015 il primo Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del fiume Po (PGRA-Po), definitivamente approvato con d.p.c.m. del 27 ottobre 2016, che in base alle previsioni contenute negli atti citati dovrà essere aggiornato con una nuova versione ed approvato il mese di dicembre 2021. Per tale scopo sono state effettuate varie revisioni delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni, il cui contenuto tecnico è stato di recente aggiornato con decreto del Segretario generale di ADBPO n. 131 del 31 marzo 2021.

Confrontando le mappe che esprimono la probabilità che si manifesti un evento alluvionale (mappe di pericolosità) nel territorio di Castiglione d'Adda elaborate nel 2013 per il PGRA 2015 con quelle più recenti, che saranno adottate a dicembre 2021 ma che sono già presenti nel Geoportale Regionale, si osserva che il loro contenuto per il territorio di Castiglione d'Adda è del tutto immutato. Lievissime variazioni riguardano il numero di abitanti potenzialmente coinvolti dalle alluvioni, che costituiscono uno degli elementi considerati nelle mappe del rischio, ossia in mappe che esprimono il danno potenziale atteso nelle aree allagate. La differenza consiste solamente un minor numero di abitanti coinvolti nelle vie Marconi e del Mulino.

Le previsioni concernenti la pericolosità delle varie porzioni di territorio a valle della scarpata morfologica principale sono in sostanza tratte dallo studio ideologico e idraulico qui di seguito riassunto, frutto di misure e modellazioni eseguiti nel 2004 dalla società MWH spa di Milano su incarico dell'AUTORITA' DI BACINO DEL FIUME PO e che riguardano la fattibilità della sistemazione idraulica del fiume dell'Adda sublacuale nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, oltre che di parte dei fiumi Brembo e Serio.

2. DESCRIZIONE GENERALE DEL BACINO IMBRIFERO

Il fiume Adda rappresenta l'elemento idrografico principale del territorio comunale e ne delimita per circa 5,1 Km il confine nordorientale. La misura si riduce a 4,52 Km se si considera il reale confine

amministrativo che all'estremità orientale si stacca dall'alveo attivo e percorre l'alveo che il fiume presentava alla fine del 1800. I terreni compresi tra la sponda destra l'alveo fino alla scarpata morfologica principale estesa dal Castello Pallavicini alla Cascina Santa Maria a sud e in direzione ovest fin quasi alla SP ex SS 591, sono stati coinvolti dalla divagazione del corso d'acqua in tempi molto recenti, come mostrato dalla conformazione dei campi e dalla documentazione storico cartografica esaminata, relativa al periodo dai primi decenni del 1700 ad oggi.

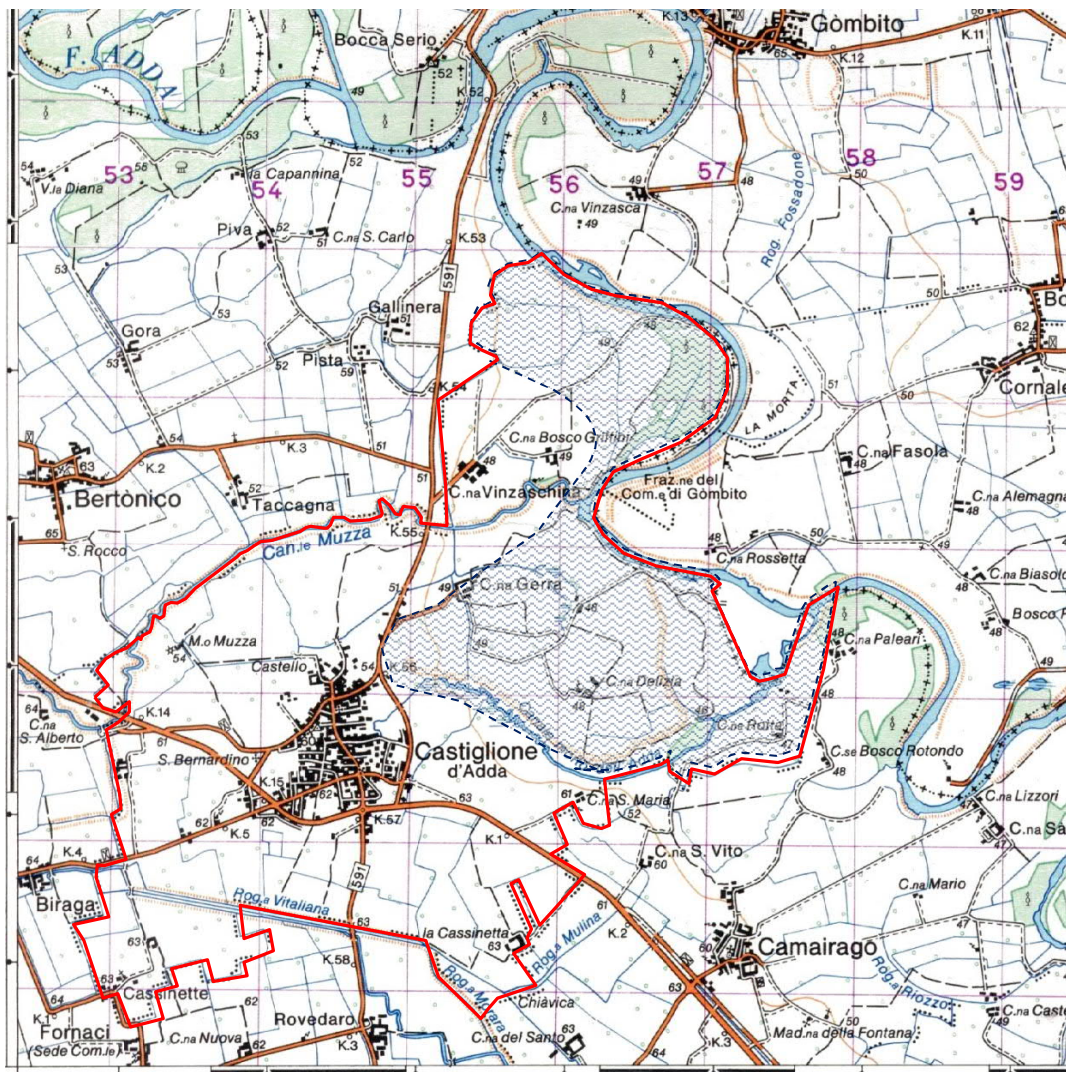


Figura 1: Carta Base IGM scala 1:50.000, foglio 141 – Crema, 1ª Ed, 1980. Il retino sovrapposto indica l'area interessata dalle divagazioni dell'Adda in epoche successive l'inizio del 1700.

In pratica circa 4,8 km² su 13,11 km², quindi circa il 37 % dell'intero territorio amministrato, sono costituiti da depositi molto recenti (alluvioni attuali della carta geologica) segnalati dal retino in Figura 1, che corrisponde approssimativamente alla porzione di territorio identificata dalle fasce A e B del PAI.

Il bacino imbrifero si estende dall'alta Valtellina poco sopra Bormio e determina la formazione di un corso d'acqua esteso per 313 km fino recapito nel fiume Po nel territorio di Castelnuovo Bocca d'Adda. A valle della zona di testata e dopo un percorso di circa 130 Km le acque sfociano a Colico nel Lago di Como, dal quale fuoriescono all'altezza di Lecco racchiudendo un bacino di circa 4570 Km².

A valle di Lecco il fiume si allarga nel Lago di Garlate e poi in quello di Olginate, dove nel 1945 è stata completata l'opera di sbarramento che consente la regolazione del deflusso e la laminazione delle portate. Il

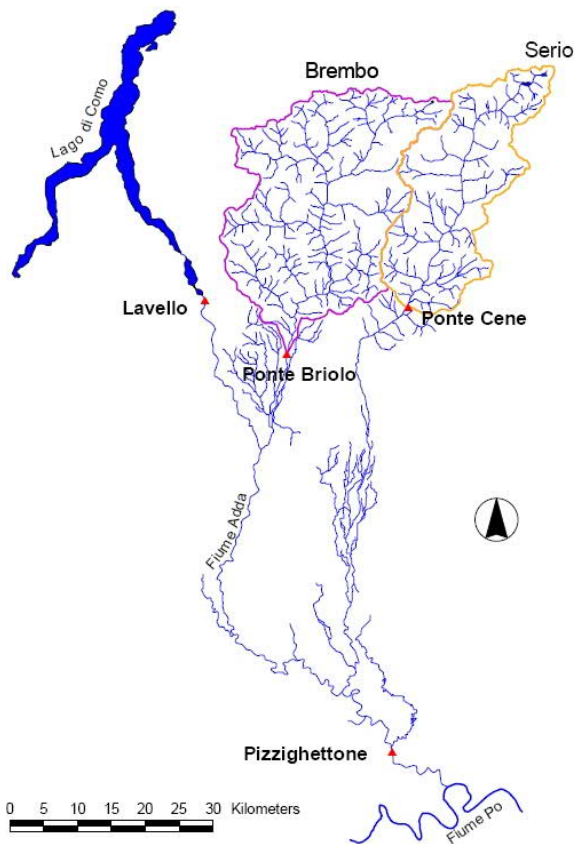


Figura 2: Corsi d'acqua e bacini idrografici dell'Adda Sottolacuale con indicazione dell'ubicazione delle stazioni di misura idrometriche Z. Tratto da *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica: - del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po, - del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda, - del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda*. Attività 3.X.2.1.: Definizione delle portate di piena di riferimento. Elaborato 3.X.2.1./1/1R: Relazione descrittiva e di analisi. Autorità di bacino del fiume Po, 03/06/2003.

massimo livello idrometrico del lago alla stazione di Malgrate (Lecco) con frequenza cinquantennale è di 2,8 m, ed il volume regolato nel lago è di circa 247 milioni di m³ (1).

A valle di Olginate l'Adda inizia il tratto sotto lacuale percorrendo circa 28 Km fino alla confluenza con il Brembo a Canonica d'Adda, cui segue il tratto in alta pianura per 36 Km fino a Lodi, dove il bacino incrementa la sua superficie a circa 6.000 Km². Dopo 28 Km percorsi nella medio – bassa pianura lodigiana, confluisce nell'Adda il Fiume Serio portando il contributo di un bacino di circa 1170 Km².

Oltre tale confluenza il fiume attraversa la bassa pianura fino all'idrometro di Pizzighettone (zero idrometrico a 40.51 m s.l.m.), 16 km a monte della confluenza in Po a Castelnuovo Bocca d'Adda, dove arriva a sottendere un bacino idrografico di 7775 kmq, con altitudine media di 1157 m s.l.m.

Il territorio di Castiglione d'Adda inizia 1,7 Km a SE della confluenza del fiume Serio, al Km 264,275 dell'Adda, ovvero al Km 103,320 del tratto sottolacuale, e termina al Km 269,390, ovvero al Km 108,435, interessando il territorio per 5,115 km.

Oltre a ricevere il Brembo e il Serio, il fiume è alimentato da un bacino di pianura incerta definizione generato dalla fitta rete di canali e corsi d'acqua minori che determinano interscambi con i bacini limitrofi.

¹ Sintesi con modifiche dal volume "Le caratteristiche del bacino del fiume Po e primo esame dell'impatto ambientale delle attività umane sulle risorse idriche" Autorità di bacino del fiume Po, aprile 2006.

A valle della confluenza del fiume Brembo, l'alveo è suddivisibile in tre tronchi omogenei per caratteristiche geometriche, morfologiche e idrauliche.

A monte è presente un alveo meandriforme su alluvioni costituite in massima parte da ciottoli e ghiaia grossolana, che comportano condizioni di deflusso irregolari con fenomeni di instabilità morfologica.

Nel tronco intermedio, fino alla confluenza con il Serio, l'alveo è meandriforme e permangono fenomeni di instabilità morfologica, dove l'alveo contraddistinto da una larghezza media di 80-100 m e da un'altezza di sponda media di 5,5 m. Le formazioni alluvionali presenti (ghiaie e sabbie medio-fine) sono alimentate dall'apporto del Brembo e dalle erosioni di sponda riscontrabili in numerosi tratti.

Il tronco finale, a valle di Gombito, ha un andamento a meandri con curvatura accentuata su cui sono inserite opere spondali e presenta locali tendenze all'erosione. L'alveo mostra una larghezza media pari a 100-120 m, con valori più ridotti all'uscita delle curve, e un'altezza media delle sponde di 6-7 m. Il materiale d'alveo è di tipo ghiaioso, con presenza di lenti di sabbia molto consistenti.

L'Adda è caratterizzato da un regime pluviometrico di tipo continentale, con massimi estivi e minimi invernali. I sottobacini del Brembo e del Serio si distinguono per l'elevata piovosità, con contributi specifici unitari del Brembo dell'ordine di $3 \text{ m}^3/\text{s km}^2$, e del Serio a Ponte Cene di $1,15 \text{ m}^3/\text{s km}^2$, mentre per l'Adda a Pizzighettone si stimano valori di $0,2 \text{ m}^3/\text{s km}$.

3. ASPETTI IDROLOGICI

Le considerazioni di seguito esposte sono una estrema sintesi delle informazioni contenute nell'indagine realizzata dall'Autorità di bacino del Po citata in nota ⁽²⁾, messa parzialmente a disposizione dello scrivente dall' Unità Operativa Tutela e Valorizzazione del Territorio della Direzione Territorio e Urbanistica della Regione Lombardia, come previsto dall'allegato 1 al d.g.r. 28 maggio 2008 n. 7/7374.

L'elaborato ha avuto come base di partenza le stime delle portate di piena effettuate dall'Autorità di bacino per la redazione del PAI, rispetto alle quali rappresenta un aggiornamento e un approfondimento.

Il risultato consente una più dettagliata valutazione del rischio idrogeologico dell'area perifluviale, che tiene conto nell'elaborazione dei più recenti eventi di piena dell'Adda (novembre 2002), ma al momento esso rappresenta esclusivamente un contributo tecnico e non modifica i perimetri e la specifica regolamentazione delle fasce fluviali individuate dal PAI.

² Studio di fattibilità della sistemazione idraulica:- del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po,- del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda, del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda. Attività 3.X.2.1.: Definizione delle portate di piena di riferimento. Elaborato 3.X.2.1./1/1R: Relazione descrittiva e di analisi. Autorità di bacino del fiume Po, 03/06/2003.

Solo qualora questi studi indicassero valori di portata o profili di piena di riferimento superiori ai corrispondenti valori indicate nelle tabelle della "direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica" adottata con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 del 26 aprile 2001, saranno assunte come riferimento per la progettazione delle opere di protezione idraulica e per le verifiche di compatibilità da compiersi sulle strutture interferenti, sia esistenti sia di nuova realizzazione, ai sensi degli articoli 19, 19bis, 19 ter, 38, 38 bis e 38 ter delle NA del PAI ³.

Lo studio idrologico è stato preceduto da un'ampia raccolta di dati idrometrici relativi alle principali piene storiche osservate nelle sezioni di misura di Lavello e Pizzighettone sull'Adda, di Ponte Briolo sul Brembo e di Ponte Cene sul Serio, completata con l'acquisizione di tutte le scale di deflusso pubblicate e di quelle non pubblicate reperite presso le sedi dell'Ufficio Idrografico per il Po.

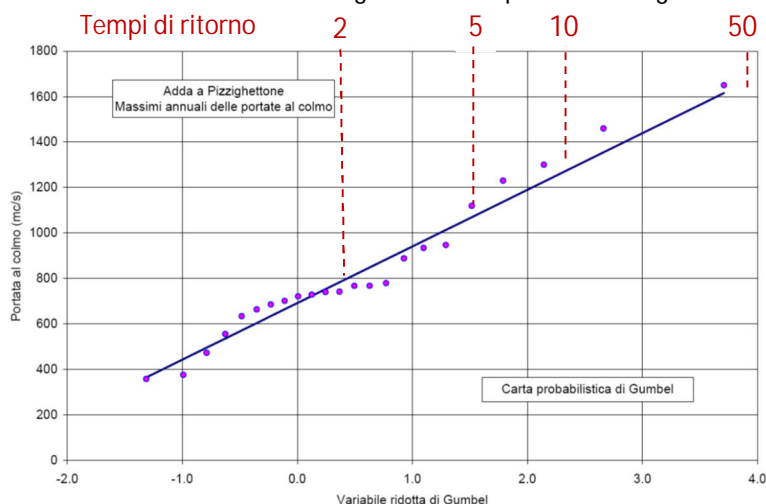
Il campione ottenuto è di 74 elementi per l'Adda a Lavello, contro i 35 sui cui erano basate le analisi del PAI e che sono riportati nei relativi documenti, di 60 elementi per il Brembo a Ponte Briolo, a fronte dei 26 riportati nei documenti di PAI, e di 52 elementi per il Serio a Ponte Cene, per il quale il PAI non riportava la serie storica. Per quanto riguarda invece il campione relativo alla sezione di Pizzighettone, è stato possibile reperire tre nuove osservazioni dei massimi annuali.

Fiume Adda a Pizzighettone
Serie storica dei massimi annuali delle portate al colmo di piena

Anno	Q (mc/s)
1888	1650.0
1921	376.0
1922	555.6
1923	740.4
1924	742.0
1925	473.0
1926	1230.0
1927	947.0
1928	1460.0
1929	358.0
1930	729.0
1931	634.0
1932	721.0
1933	701.0
1934	779.0
1935	767.0
1936	767.9
1937	1119.6
1938	685.5
1939	888.0
1940	934.0
1957	664.0
1966	1300.0

Per le due stazioni idrometrografiche di Lavello e di Pizzighettone sono state stimate le distribuzioni di probabilità dei massimi annuali delle portate al colmo di piena, prendendo in considerazione il modello probabilistico di Gumbel.

L'elaborazione relativa a Pizzighettone ha portato ai seguenti risultati:



Fiume Adda a Pizzighettone	Stime locali delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno anni	Q(T) (mc/s)	stime PAI
2	783		
5	1066		
10	1252		
20	1432		1440
50	1664		
100	1838		1840
200	2011		2000
500	2239		2200

Figura 3: Confronto tra la distribuzione di frequenza osservata dei massimi annuali delle portate al colmo di piena per l'Adda a Pizzighettone e la distribuzione di probabilità teorica di Gumbel.

³ AdbPo – deliberazione del Comitato Istituzionale del 18 marzo 2008 n. 12/2008. "Indirizzi e modalità per la redazione del quadro conoscitivo del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) ai sensi ed in adempimento dell'art. 1 comma 9 dell'elaborato 7 di tale Piano Stralcio (norme di Attuazione).".

Le stime delle portate ottenute attraverso l'inferenza statistica su base puntuale, sono inoltre messe a confronto con le corrispondenti stime degli studi del PAI (tabella a destra della figura precedente), che evidenzia un accordo molto buono nel caso dell'Adda a Pizzighettone, diversamente da Lavello dove le portate PAI sono sistematicamente inferiori del 24 -27 % per tutti i tempi di ritorno.

Per valutare la distribuzione di probabilità delle portate al colmo di piena per l'Adda sublacuale nelle sezioni fluviali prive di osservazioni, gli autori hanno implementato un modello statistico regionale basato sulle due stazioni dell'Adda sublacuale, considerando le misure relative agli anni comuni ed hanno reso adimensionale la misura, assumendo quale portata indice la media del campione disponibile per ciascuna stazione. Il risultato ottenuto evidenzia come le distribuzioni relative alle due stazioni siano praticamente identiche.

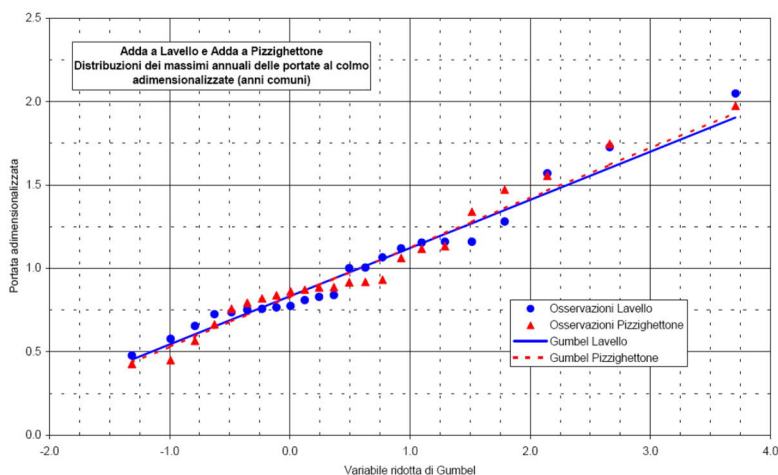


Figura 4 Distribuzioni di frequenza dei massimi annuali delle portate al colmo di piena adimensionalizzate per l'Adda a Lavello ed a Pizzighettone. Sono considerati solo gli anni per cui si dispone dell'osservazione sia a Lavello che a Pizzighettone.

Sulla base di tale modello probabilistico sono state stimati i valori di assegnato tempo di ritorno della portata adimensionalizzata $X(T)$:

Stime regionali delle portate al colmo adimensionalizzate di assegnato tempo di ritorno per l'Adda a Lavello e Pizzighettone

anni (T)	X(T)(-)
2	0.946
5	1.238
10	1.431
20	1.617
50	1.857
100	2.037
200	2.217
500	2.453

Adda a Pizzighettone. stime regionali delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno

anni (T)	Q(T)(m ³ /s)
2	790
5	1035
10	1196
20	1351
50	1552
100	1703
200	1853
500	2050

La stima su base regionale delle portate di assegnato tempo di ritorno $Q(T)$ può essere ottenuta moltiplicando la stima del fattore di crescita adimensionale $X(T)$ di pari tempo di ritorno, tabella a fianco, per la portata indice relativa alla sezione di interesse, ossia al valore atteso del massimo annuale della portata al colmo di piena μQ , che può essere assunta pari al valore medio della serie storica, che a Pizzighettone è $\mu Q = 835,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si ottengono in tal modo le stime su base regionale delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno $Q(T)$, che sono state effettivamente impiegate per valutazioni di carattere idraulico in luogo di quelle ottenute su base locale, precedentemente riportate.

La stima delle portate al colmo di piena nelle sezioni non strumentate tra Lavello e Pizzighettone, secondo quanto riferito dagli autori, è molto difficoltosa perché le piene uniscono onde in uscita dal Lago di Como ed il contributo degli affluenti sublacuali, fra cui spicca il Brembo.

Un ruolo fondamentale è esercitato dai fenomeni di laminazione lungo l'asta principale dell'Adda, i cui effetti ovviamente non possono essere rappresentati tramite modelli di regionalizzazione statistica che usano parametri di sintesi a scala di bacino.

Gli autori per tale scopo hanno suddiviso il tratto sublacuale in tre tronchi: il primo tra Lavello e foce Brembo, il secondo tra foce Brembo e foce Serio ed il terzo a valle di foce Serio.

Per quanto concerne quest'ultimo, di diretto interesse per Castiglione d'Adda, la brevità del tratto considerato e le caratteristiche morfologiche dell'alveo consentono di stimare che gli effetti di laminazione siano modesti, pari a circa il 5%. Si può ritenere che le portate al colmo di piena e le relative onde di assegnato tempo di ritorno valutate in corrispondenza della sezione di misura di Pizzighettone siano estendibili anche al tratto a monte fino alla sezione posta immediatamente a valle della confluenza del Serio in Adda, eventualmente con una modesta maggiorazione.

Le stime ottenute per il tratto a valle della confluenza del Serio sono riferite nella tabella sotto riportata, e sono quindi quelle da assumere per il territorio di Castiglione d'Adda.

Adda a valle confluenza Serio.
Stima delle portate al colmo di assegnato tempo di ritorno

anni (T)	Q(T)(m ³ /s)
2	830
5	1087
10	1256
20	1419
50	1630
100	1788
200	1946
500	2153

Per quanto riguarda la stima dei volumi e delle onde di piena di assegnato tempo di ritorno nelle sezioni di interesse, sono state ottenute le serie continue dei valori medi della portata in intervalli temporali di durata D di durate comprese tra D = 1 ora (passo di campionamento massimo degli idrogrammi di piena) e D = 168 ore (pari a 7 giorni).

L'elaborazione ha consentito di desumere le cosiddette leggi (o curve) di riduzione dei colmi di piena: $\epsilon_{DT} = Q_D T / Q T$ che forniscono il rapporto tra

$Q_D(T)$ e la portata massima annuale istantanea di pari tempo di ritorno T, $Q(T)$.

Si è innanzitutto verificato come, anche nel caso delle quattro sezioni fluviali esaminate, tali rapporti di riduzione siano poco dipendenti dal tempo di ritorno T.

Per quanto riguarda l'Adda a Pizzighettone, le curve di riduzione dei colmi di piena sono state costruite a partire dai dati delle

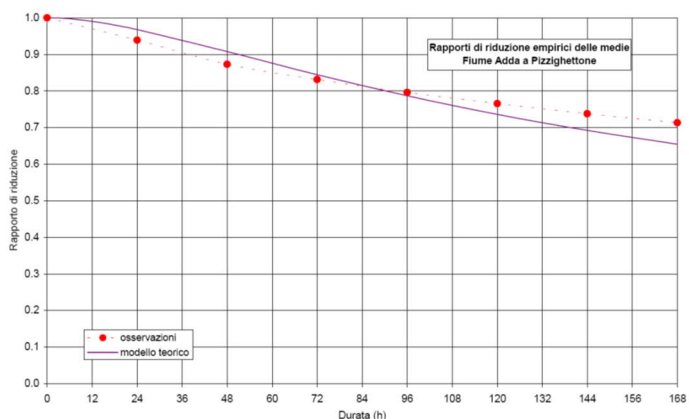


Figura 5: rapporti di riduzione dell'Adda a Pizzighettone.

portate medie giornaliere, e nella figura seguente sono rappresentati gli andamenti dei rapporti di

riduzione ϵ_D , regolarizzati con la legge di riduzione teorica proposta da Bacchi e Brath, 1990 ⁽⁴⁾. Il valore della scala di fluttuazione θ ottenuto dalla calibrazione di tale legge è di 90 ore.

Da tale analisi gli autori hanno dedotto la stima delle portate medie di assegnata durata e tempo di ritorno e la stima degli idrogrammi sintetici di assegnato tempo di ritorno, a partire dalla legge di riduzione dei colmi di piena, imponendo che la massima portata media in assegnata durata dell'idrogramma coincida con quella prevista dalla curva di riduzione stessa. La forma dell'idrogramma è definita desumendo dall'analisi degli idrogrammi osservati la posizione del picco nelle onde di piene storiche disponibili ed effettuando la media dei valori osservati per le varie onde di piena.

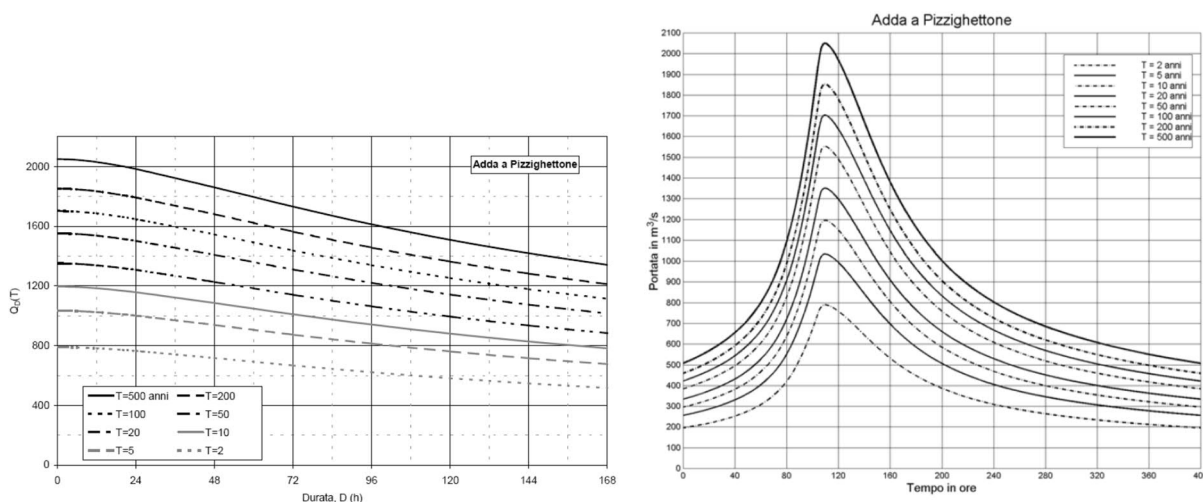


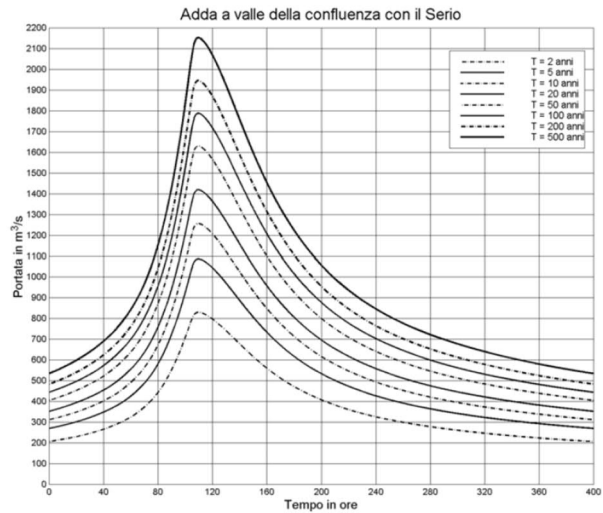
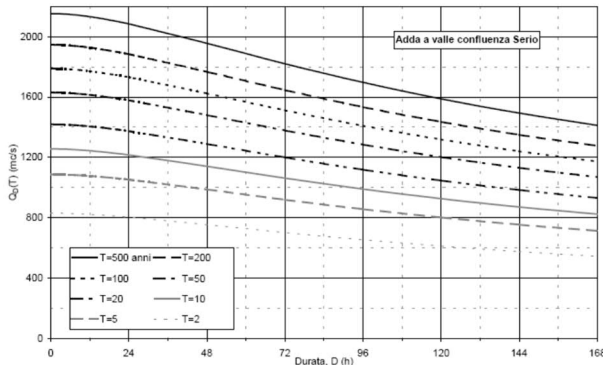
Figura 6: Stime delle portate medie di assegnata durata e tempo di ritorno $Q_D(T)$ per il Fiume Adda a Pizzighettone, e a destra l'onda sintetica di piena di assegnato tempo di ritorno.

Mediante un procedimento di regionalizzare del parametro θ , utilizzando i valori stimati con metodi inferenziali diretti nelle sezioni fluviali di misura, si è ottenuto per sezioni prive di misure idrometriche la stima delle portate medie di assegnata durata D e tempo di ritorno T .

Per quella posta immediatamente a valle di confluenza Serio il risultato è espresso dal grafico seguente, che può essere adottato per valutare la forma dell'onda di piena a Castiglione d'Adda.

Per la valutazione delle curve di durata delle portate, che è un'informazione di possibile utilità ai fini degli studi sul bilancio di trasporto solido relativi in particolare agli affluenti, gli autori hanno elaborato i valori di portata pubblicati, integrati con quelli relativi alla portata al colmo massima annuale, che rappresenta la portata cui può essere attribuita durata nulla, e con quelli della portata massima media giornaliera, cui può essere assimilata la portata di durata pari ad 1 giorno.

⁴ Bacchi, B. e A. Brath – Stima delle leggi di attenuazione delle massime portate in assegnata durata, L'Energia Elettrica, 4, pp. 157-170, 1990.



ore	Tempo di ritorno (anni)							
	2	5	10	20	50	100	200	500
0	830	1087	1256	1419	1630	1788	1946	2153
1	830	1087	1256	1419	1630	1788	1946	2153
2	830	1087	1256	1419	1629	1787	1945	2152
3	829	1086	1255	1418	1629	1787	1945	2152
6	828	1084	1253	1415	1626	1783	1941	2147
9	825	1081	1249	1411	1621	1778	1935	2141
12	822	1077	1244	1405	1614	1771	1927	2132
16	817	1070	1236	1396	1604	1759	1915	2119
20	811	1061	1226	1386	1592	1746	1900	2102
24	804	1052	1216	1374	1578	1731	1884	2084
48	754	987	1141	1289	1481	1624	1768	1956
72	702	919	1062	1200	1378	1512	1646	1821
96	654	857	990	1118	1285	1409	1534	1697
120	612	802	926	1046	1202	1319	1435	1588
144	576	754	871	984	1131	1240	1350	1493
168	544	713	824	931	1069	1173	1276	1412

ore	Tempo di ritorno (anni)							
	2	5	10	20	50	100	200	500
0.00	206.5	270.4	312.4	353.0	405.5	444.8	484.1	535.5
2.00	208.5	273.2	315.5	356.5	409.5	449.2	488.9	541.0
4.00	210.7	276.0	318.9	360.2	413.8	453.9	494.0	546.6
6.00	213.0	278.9	322.2	364.0	418.1	458.7	499.3	552.3
8.00	215.2	281.9	325.7	368.0	422.7	463.7	504.6	558.3
10.00	217.6	284.9	329.2	372.0	427.4	468.7	510.2	564.4
12.00	220.1	288.2	333.0	376.2	432.2	474.1	515.9	570.8
24.00	236.8	310.1	358.3	404.8	465.0	510.0	555.1	614.1
36.00	257.9	337.8	390.3	441.0	506.5	555.6	604.7	669.1
48.00	286.0	374.5	432.8	488.9	561.6	616.1	670.5	741.8
60.00	325.4	426.1	492.4	556.3	639.0	701.0	762.8	844.0
72.00	385.1	504.2	582.6	658.3	756.2	829.5	902.8	998.8
84.00	482.3	631.6	729.8	824.4	947.0	1038.9	1130.7	1250.9
96.00	640.2	838.5	968.8	1094.5	1257.3	1379.1	1501.1	1660.8
108.00	827.6	1083.9	1252.5	1415.1	1625.5	1783.0	1940.6	2147.0
120.00	797.0	1043.8	1206.1	1362.6	1565.3	1716.9	1868.7	2067.4
134.00	715.5	937.1	1082.8	1223.3	1405.2	1541.4	1677.7	1856.1
148.00	627.2	821.4	949.1	1072.3	1231.8	1351.1	1470.5	1626.9
160.00	559.8	733.2	847.2	957.2	1099.6	1206.2	1312.6	1452.3
172.00	503.2	659.1	761.6	860.4	988.4	1084.2	1180.0	1305.5
184.00	456.7	598.1	691.1	780.7	896.8	983.8	1070.7	1184.7
196.00	418.5	548.0	633.2	715.4	821.9	901.5	981.1	1085.5
208.00	387.0	506.9	585.7	661.6	760.0	833.7	907.4	1003.9
220.00	360.9	472.7	546.2	617.1	708.8	777.4	846.1	936.2
232.00	339.0	444.0	513.0	579.6	665.7	730.3	794.9	879.4
244.00	320.4	419.7	484.9	547.9	629.3	690.2	751.3	831.2
256.00	304.5	398.8	460.8	520.5	597.9	655.9	713.9	789.8
268.00	290.6	380.6	439.8	496.9	570.7	626.0	681.4	753.8
280.00	278.5	364.7	421.3	476.0	546.8	599.9	652.9	722.3
292.00	267.7	350.6	405.1	457.7	525.7	576.7	627.6	694.4
304.00	258.0	338.0	390.5	441.2	506.8	556.0	605.1	669.4
316.00	249.5	326.7	377.5	426.5	489.9	537.4	584.8	647.0
328.00	241.6	316.4	365.6	413.0	474.4	520.4	566.4	626.7
340.00	234.4	307.0	354.7	400.8	460.4	505.0	549.7	608.1
352.00	227.9	298.5	344.9	389.6	447.6	491.0	534.4	591.2
364.00	221.9	290.6	335.7	379.3	435.7	477.9	520.2	575.5
376.00	216.3	283.3	327.4	369.7	424.7	466.0	507.1	561.1
388.00	211.1	276.5	319.5	361.0	414.6	454.8	495.0	547.7
400.00	207.1	271.2	313.4	354.0	406.7	446.1	485.5	537.2

Figura 7 : Stime delle portate medie di assegnata durata e tempo di ritorno QD(T) per il Fiume Adda immediatamente a valle della confluenza del Serio, e a destra l'onda sintetica di piena di assegnato tempo di ritorno. Grafici e relative tabelle (sintesi).

Si è quindi ricavata la curva di durata per i singoli anni di osservazione e considerata poi la curva media annua, ottenuta mediando le portate di assegnata durata relative a ciascun anno di osservazione.

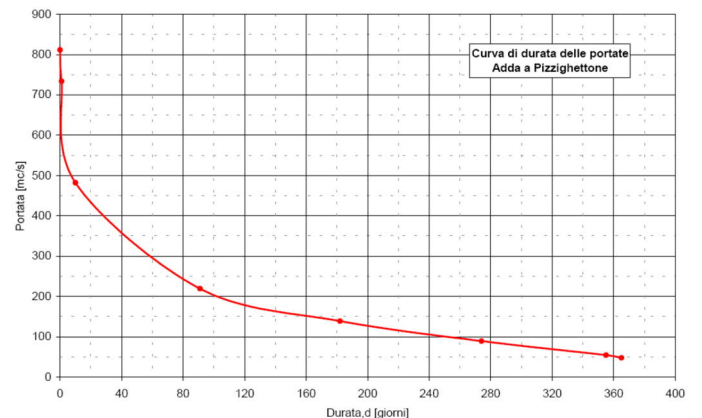


Figura 8: curva di durata delle portate a Pizzighettone.

4. ASPETTI IDRAULICI

Lo studio precedentemente citato, nota ⁽²⁾, comprende l'analisi idraulica monodimensionale di tutto il fiume Adda sublacuale da Lavello allo sbocco in Po, di cui è stato possibile esaminare parzialmente il contenuto (ATTIVITÀ 3.1.2.2. PRODOTTO 3.1.2.2./1 ELABORATO 3.1.2.2./1/1R - Autorità di bacino del fiume Po, 14/07/2004), sommariamente riassunto di seguito.

L'analisi si fonda su modello matematico di moto vario risolto numericamente ai volumi finiti, che simula la propagazione dell'onda di piena di assegnato tempo di ritorno in alveo.

Il modello è stato tarato riproducendo i livelli di pelo liquido osservati nel corso della piena del 15-30 novembre 2002 e ha consentito di perimetrare le aree inondabili per valori per tempo di ritorno $T = 20, 200, 500$ anni.

La geometria dell'alveo è stata discretizzata con 313 sezioni trasversali poste ad interasse medio di poco superiore ai 400 m, assegnando i valori del coefficiente di resistenza al moto secondo Manning sulla base della granulometria e degli usi del suolo, coerentemente con la procedura proposta dall'Autorità di Bacino del Po.

Lungo l'asta fluviale si hanno significative e brusche variazioni della larghezza dell'alveo di piena, che mediamente è di poco superiore a 660 m.

I calcoli di piena fanno riferimento agli idrogrammi riportati nella Relazione Idrologica che, attraverso opportune procedure di regionalizzazione, ha esteso ad alcune sezioni non strumentate (valle foce Brembo e valle foce Serio) i valori di portata ad assegnato tempo di ritorno calcolati nelle sezioni idrometrografiche.

Il modello è stato implementato applicando varie tecniche matematiche di integrazione delle equazioni di moto vario di una corrente monodimensionale a superficie libera, adottando particolari accorgimenti dove sono presenti manufatti (soglie e ponti) che creano dissipazione di energia e innescano locali cambiamenti di regime della corrente, con rigurgiti che si propagano verso monte. Tali particolari condizioni non sono però presenti nel territorio di Castiglione d'Adda e nei tratti di monte e di valle per alcuni chilometri.

Per quanto riguarda l'ALVEO INCISO, i valori dei coefficienti di resistenza al moto secondo Manning sono stati stimati mediante la formula di Cowan (Chow 1959) $n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$ ove n_i sono i coefficienti di resistenza che dipendono da vari fatti idraulici.

Nel presente caso è stato considerato il contributo di due coefficienti: n_0 , che dipende dalla granulometria del materiale, n_4 , che tiene conto dalla presenza di vegetazione in alveo, e m_5 del grado di sinuosità del tracciato planimetrico del fiume, che è stato considerato pari a 1.

n_1, n_2, n_3 , danno conto rispettivamente di irregolarità trasversali e longitudinali delle sezioni e della presenza di eventuali ostruzioni presenti in alveo, ma in questo caso, in relazione ad alcune caratteristiche della metodologia di calcolo, sono stati assunti nulli.

n_0 è stato stimato (con la relazione di Keulegan, Yen 1992), in funzione del diametro medio del materiale di fondo alveo, dedotto dalle analisi granulometriche su campioni prelevati lungo il Brembo, e corretto tramite un coefficiente di amplificazione per tenere conto anche della resistenza offerta dalle forme di fondo. Per la stima di n_0 è stata utilizzata la relazione di Keulegan (Yen 1992): $n_0 = 0.0395 D_{50}^{1/6}$

dove D_{50} è il diametro medio, espresso in metri, del materiale di fondo alveo. Questo valore è stato dedotto sulla base delle analisi granulometriche condotte su campioni prelevati lungo il corso dell'Adda (5-8 mm a Castiglione d'Adda).

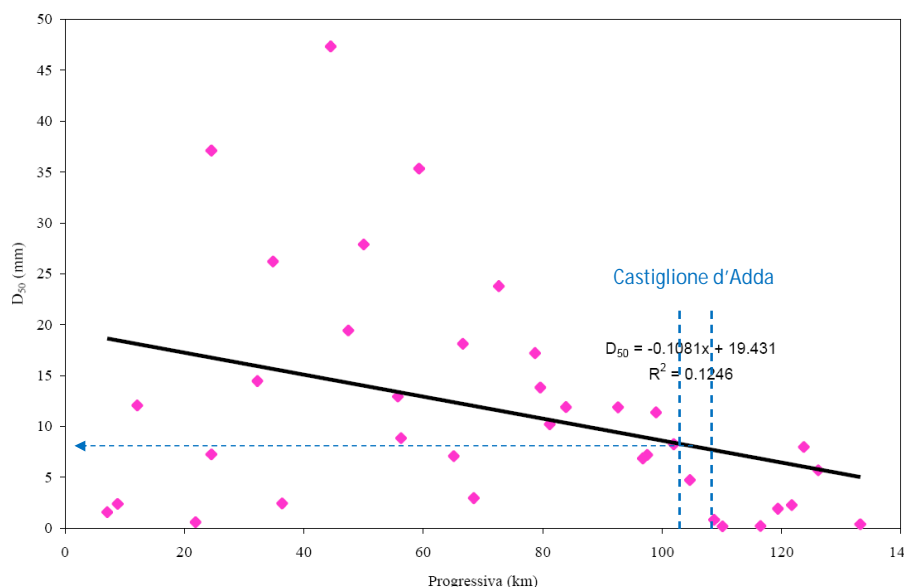


Figura 9: Andamento del diametro medio dei sedimenti d'alveo lungo l'asta fluviale

I valori di n_0 ottenuti sono stati amplificati per tenere conto delle forme di fondo, calcolando in ciascuna sezione dello sforzo di trascinamento adimensionale t^* dovuto alla sola granulometria dell'alveo, e $t^* = t' + t''$ che rappresenta lo sforzo di trascinamento totale adimensionale con t'' sforzo dovuto alle sole forme di fondo.

Allo scopo è stata utilizzata la formula proposta da Engelund (Chang 1988):

$$t^* = 1.581(t - 0.06) \quad \text{per } t^* < 0.55 \quad \text{e} \quad t^* = t \quad \text{per } 0.55 < t^* < 1.0$$

$$t^* = (1.425 t^{1* - 1.8} - 0.425)^{1/1.8} \quad \text{per } t^* > 1.0$$

noti i valori di t^* in ogni sezione di calcolo sono stati ricavati i valori del coefficiente di Manning n_0'' che tengono conto anche della forme di fondo e i relativi valori dei rapporti $r = n_0''/n_0$.

I valori di n_0 calcolati con la relazione di Keulegan sopra riportata, sono stati quindi amplificati moltiplicandoli per il valor medio su tutta l'asta del rapporto r .

I valori di n_4 sono stati assegnati per le diverse sezioni di calcolo in funzione della densità di vegetazione presente in alveo (informazioni ricavate dal Catalogo delle Opere Idrauliche).

Densità Vegetazione	n_4
Assente (0%)	0
Sporadica (0-20%)	0.007
Rada (20-40%)	0.015
Prevalente (>40%)	0.03

Per quanto riguarda le SPONDE E AREE GOLENALI i valori dei coefficienti di resistenza al moto sulle aree golenali sono stati definiti sulla base della Carta degli Usi del Suolo, distinguendo aree antropizzate (tessuto urbano, zone industriali e ricreative) da aree agricole ovvero con vegetazione rada o assente.

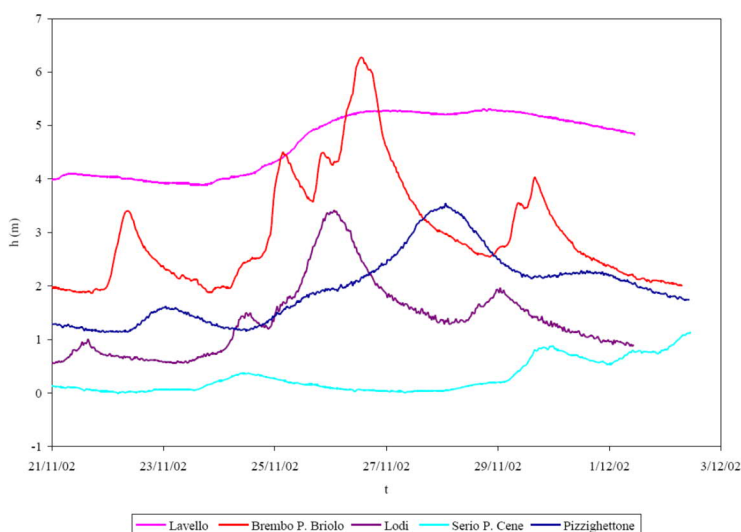
Per le aree con vegetazione boschiva o arbustiva il coefficiente di resistenza al moto è stato calcolato in funzione della distribuzione spaziale, dello stadio di sviluppo vegetativo e dell'ingombro della vegetazione.

I valori dei coefficienti di resistenza al moto così stimati, sono stati considerati come configurazione di primo tentativo per la ricostruzione dell'evento di piena del novembre 2002. La simulazione dell'evento ha portato ad aggiustamenti locali dei coefficienti di resistenza.

I risultati finali sono stati sintetizzati su tavole sulle quali sono riportati i valori finali dei coefficienti di resistenza al moto per tutte le sezioni rilevate.

Tali tavole non sono a disposizione dello scrivente, ma si ritenerne utile sottolinearne la presenza perché possono costituire una utile base di informazioni da impiegare per la valutazione di compatibilità idraulica di interventi collocati nelle aree prossime al fiume.

Durante l'evento di piena 25-27 novembre 2002 furono registrati i livelli idrometrici alle stazioni di Lavello, Lodi e Pizzighettone sull'Adda, a Ponte Briolo sul Brembo e a Ponte Cene sul Serio (Figura 10).



I diagrammi evidenziano che la piena dell'Adda a Lodi è stata causata dalla concomitanza dei rilasci di Lavello con l'onda di piena nel Brembo, mentre poco rilevante risulta il contributo del Serio, che ha fornito una portata al colmo molto minore di quella del Brembo (250 m³/s contro oltre 1200 m³/s). Inoltre, come già rilevato nella Relazione Idraulica relativa al Brembo, l'onda di piena si propaga con laminazione trascurabile per cui le portate

Figura 10: ideogrammi della piena di novembre 2002

misurate a Ponte Briolo sono molto simili a quelle che sboccano in Adda.

Dai calcoli di taratura si conclude che durante l'evento transitarono al colmo di piena circa 1800 m³/s: sulla base delle stime idrologiche si può concludere che l'evento è caratterizzato da un tempo di ritorno centennale.

Confrontando gli inviluppi misurati sulla base delle tracce lasciate dalla piena e quelli calcolati delle quote di pelo liquido da Lavello a Pizzighettone, gli autori concludono che il modello riproduce i massimi livelli di piena in modo accettabile con scostamenti inferiori al metro.

I calcoli idraulici sono stati eseguiti imponendo che nelle stazioni di misura si ottengano gli stessi idrogrammi di portata stimati con le elaborazioni idrologiche. Tuttavia, le stime idrologiche hanno valutato una laminazione significativa dell'onda di piena, al punto da avere portate al colmo decrescenti a valle dell'immissione del Brembo. Per questa ragione i calcoli idraulici sono stati effettuati considerando:

- apporto nullo a valle di Lavello fino al Brembo,
- immissione localizzata del Brembo,
- apporto nullo a valle di foce Brembo.

I calcoli sono stati effettuati per i tempi di ritorno $T= 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500$ anni.

Le velocità locali sono state calcolate solo per le sezioni in corrente subcritica, mentre per le sezioni in corrente critica o supercritica (in corrispondenza dei ponti principalmente) è stata riportata solo la velocità media sulla sezione per evitare incongruenze di calcolo quando alcuni settori della sezione sono in corrente supercritica e altri in corrente subcritica.

Nel tratto terminale dell'Adda, comprendente Castiglione d'Adda, ove il deflusso è subcritico, i massimi livelli di piena per assegnato tempo di ritorno possono realizzarsi a causa del rigurgito provocato da una piena in Po con la stessa rarità. Naturalmente l'evento concomitante di piena duecentennale su Adda e Po ha una frequenza di accadimento molto minore e non è preso in esame.

Ai fini delle perimetrazione delle aree inondabili per le piene estreme ($T= 200$ e 500 anni) è stato considerato l'inviluppo delle quote di pelo liquido ottenute con i due diversi scenari: il primo prevede che si verifichi un evento duecentennale o cinquecentennale nell'Adda mentre nel corpo recettore, il Po, è presente una piena ordinaria; il secondo prevede invece che la piena duecentennale o cinquecentennale si verifichi nel Po, mentre nell'Adda è presente una piena ordinaria.

I calcoli hanno mostrato che nel tratto terminale dell'Adda sono dominanti le piene del Po: il rigurgito si estende verso monte per una distanza di circa 20 km dalla confluenza, ovvero sin circa a Formigara, 5 Km a valle del limite inferiore del territorio di Castiglione d'Adda.

Il modello ha consentito infine di perimetrare nella cartografia le aree a rischio uniforme di inondazione, riportando:

1. i contorni delle aree inondabili per i tempi di ritorno di 20, 200, 500 anni;
2. i punti che delimitano, sulle sezioni di calcolo, l'estensione della fascia A "idraulica" definita conformemente al piano delle Fasce Fluviali dell'Autorità di Bacino del fiume Po, ossia ove transita l'80% della portata duecentennale ovvero dove la velocità della corrente è maggiore di 0.4 m/s.
3. le condizioni di deflusso attraverso i ponti, identificando il deflusso a superficie libera, in pressione o con sormonto dell'estradosso.

I limiti delle aree inondabili sono stati tracciati a partire da quelli identificati col calcolo idraulico sulle sezioni trasversali. I limiti delle aree inondabili sono stati raccordati nei tratti tra le sezioni utilizzando, il DTM con passo 5 o 20 m, ortofotocarta in scala 1:10.000 o la CTR, con apposite integrazioni in sito.

Le tavole con i contorni delle fasce inondabili sono state realizzate utilizzando come base cartografica l'ortofotocarta in scala 1:10.000.

I contorni delle aree inondabili sono stati rappresentati con una linea continua per indicare le zone direttamente interessate dal flusso della corrente e con una linea tratteggiata per indicare le aree potenzialmente allagabili per permeazione, per connessione idraulica, per ostruzioni in alveo che causerebbero l'innalzamento del pelo liquido fino alla quota del carico totale.

Dal confronto tra la perimetrazione delle aree allagabili con T= 200 e la fascia B definita nel PAI (Piano per l'Assetto Idrogeologico), si è notato che la fascia B e la perimetrazione duecentennale sono sostanzialmente in accordo tra Lavello e Fara Gera d'Adda, e nel tratto a valle di Lodi.

Invece la fascia C del PAI molto spesso sovrastima l'area allagabile rispetto alla cinque centennale lungo tutto il corso dell'Adda. Si ritiene che tali differenze siano imputabili al fatto che per questo studio erano disponibili informazioni topografiche di maggior dettaglio rispetto a quelle utilizzate per la redazione delle fasce del PAI.

La delimitazione della fascia A definita dal PAI viene riconfermata dai risultati di calcolo con l'eccezione dei di alcuni tratti, tra i quali quello tra Gombito e la foce, quindi comprendente Castiglione d'Adda, dove la fascia A del PAI risulta eccessivamente larga.

Le fasce delle piene, duecentennale e cinquecentennale, sono risultate molto simili in buona parte dell'Adda per il fatto che la grande estensione trasversale delle sezioni di passaggio in corrispondenza delle aree golenali ha ridotto notevolmente le differenze di livello dovute a portate diverse.

I contorni delle aree inondabili sono inoltre stati confrontati con i rilievi delle aree allagate durante l'evento di piena del novembre 2002, effettuati sia dall'Autorità di Bacino sia dalla Provincia di Lodi, risultando sempre comprese nella fascia duecentennale.

Gli autori forniscono infine alcuni dettagli su tratte significative dell'Adda, tra le quali quella compresa tra Gombito e Camairago, centrata quindi sul territorio di Castiglione d'Adda.

Tra la sezione 58 e la sezione 49 in destra (Castiglione d'Adda è compreso tra la sezione 57 e la sezione 47) si ha un'ampia area soggiacente alle massime quote di pelo liquido che è potenzialmente allagabile a causa dei moti di filtrazione che potrebbero verificarsi durante gli eventi di piena duecentennale e cinquecentennale (area tra la SP ex SS 591, la C.na Gerra, l'Adda Morta e l'alveo attivo).

Si rileva che l'argine in corrispondenza della sezione 53 (1 km ENE di C.na Bosco Griffini) garantisce un franco di 1.5m con la piena duecentennale, e di 1.2m con la cinque centennale in territorio Cremonese, mentre quello tra le sezioni 51 e 49 ha un franco rispettivamente di 0.58m e 0.28m.

A chiarimento si riportano le sezioni 53 e 49 (quest'ultima da C.na Santa Maria all'alveo dell'Adda) con la quota di pelo liquido (in blu) ed il carico totale (in rosso) per la portata al colmo della piena duecentennale.

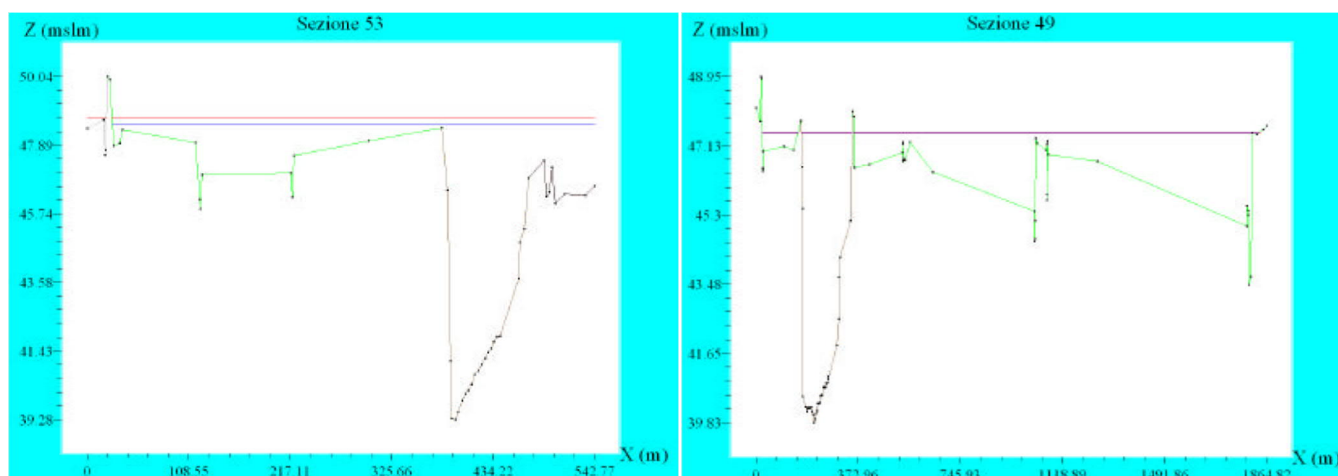


Figura 11 : sezioni 53 e 49 viste da monte

Allegato 2: ASPETTI IDROLOGICI E IDRAULICI DELL'ADDA

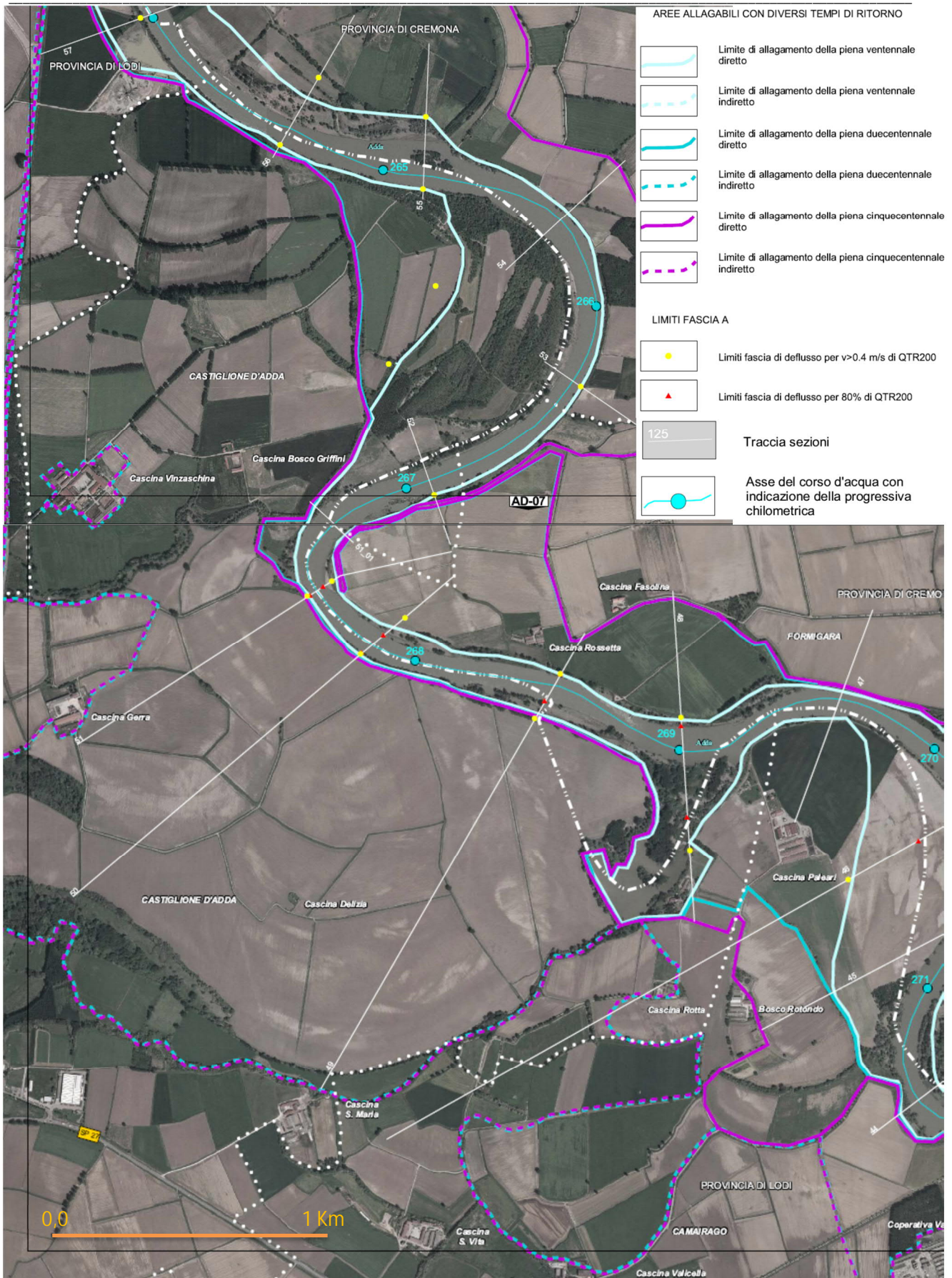


Figura 12: esito dell'elaborazione idrologica ed idraulica con definizione planimetriche delle aree inondabili. Scala grafica

RISULTATI DI CALCOLO: INVILUPPI DELLE QUOTE DI PELO LIQUIDO E CARATTERISTICHE IDRAULICHE DELLA CORRENTE PER VARI TEMPI DI RITORNO (TR) NELLA CONDIZIONE DI STATO DI FATTO

TR=2 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	Sr	Q (m³/s)
57	103047.77	47.05	47.10	5.81	41.24	1.05	0.18	0.00019	796.70
56	103696.65	46.72	46.89	5.68	41.04	1.80	0.34	0.00045	795.50
55	104206.66	46.60	46.67	6.99	39.60	1.21	0.24	0.00038	794.50
54	104724.33	46.42	46.51	7.30	39.12	1.31	0.22	0.00025	793.50
53	105344.82	45.98	46.22	6.70	39.28	2.20	0.34	0.00067	792.40
52	105977.70	45.58	45.81	5.43	40.15	2.12	0.33	0.00065	791.20
051_01	106349.67	45.52	45.62	5.93	39.58	1.44	0.23	0.00029	790.50
51	106622.83	45.35	45.52	10.11	35.24	1.84	0.26	0.00043	812.30
50	106898.85	45.27	45.40	5.99	39.28	1.58	0.27	0.00043	811.80
49	107560.95	45.05	45.14	5.22	39.83	1.37	0.24	0.00034	810.60
48	108076.75	44.87	44.95	5.19	39.68	1.19	0.25	0.00035	809.60
47	108679.79	44.50	44.71	8.54	35.96	2.01	0.29	0.00047	808.40

TR=5 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	Sr	Q (m³/s)
57	103047.77	47.79	47.85	6.55	41.24	1.10	0.19	0.00017	1050.40
56	103696.65	47.46	47.64	6.42	41.04	1.84	0.35	0.00044	1048.80
55	104206.66	47.37	47.45	7.77	39.60	1.23	0.21	0.00028	1047.60
54	104724.33	47.21	47.31	8.09	39.12	1.40	0.23	0.00024	1046.30
53	105344.82	46.73	47.02	7.45	39.28	2.35	0.43	0.00070	1044.80
52	105977.70	46.30	46.58	6.15	40.15	2.37	0.36	0.00068	1043.20
051_01	106349.67	46.26	46.39	6.67	39.58	1.59	0.24	0.00029	1042.30
51	106622.83	46.05	46.27	10.81	35.24	2.09	0.29	0.00052	1064.00
50	106898.85	45.99	46.14	6.71	39.28	1.68	0.28	0.00044	1063.40
49	107560.95	45.77	45.88	5.95	39.83	1.48	0.23	0.00032	1061.70
48	108076.75	45.61	45.70	5.93	39.68	1.20	0.25	0.00033	1060.50
47	108679.79	45.16	45.44	9.20	35.96	2.31	0.32	0.00055	1059.00

TR=10 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	Sr	Q (m³/s)
57	103047.77	48.22	48.28	6.98	41.24	1.12	0.20	0.00017	1217.10
56	103696.65	47.89	48.08	6.85	41.04	1.86	0.34	0.00043	1215.30
55	104206.66	47.82	47.90	8.22	39.60	1.25	0.21	0.00025	1213.90
54	104724.33	47.66	47.77	8.54	39.12	1.42	0.28	0.00024	1212.40
53	105344.82	47.16	47.47	7.88	39.28	2.39	0.43	0.00072	1210.60
52	105977.70	46.70	47.02	6.55	40.15	2.51	0.38	0.00070	1208.80
051_01	106349.67	46.67	46.82	7.09	39.58	1.68	0.25	0.00029	1207.80
51	106622.83	46.44	46.70	11.21	35.24	2.25	0.31	0.00054	1229.40
50	106898.85	46.41	46.56	7.13	39.28	1.74	0.27	0.00042	1228.60
49	107560.95	46.20	46.32	6.37	39.83	1.55	0.23	0.00031	1226.70
48	108076.75	46.05	46.14	6.37	39.68	1.20	0.24	0.00031	1225.30
47	108679.79	45.54	45.86	9.58	35.96	2.49	0.34	0.00061	1223.60

Allegato 2: ASPETTI IDROLOGICI E IDRAULICI DELL'ADDA

TR=20 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo	V1	V2	V3	V4	V5
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	S _r	Q (m ³ /s)	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
57	103047.77	48.59	48.66	7.36	41.24	1.14	0.20	0.00016	1404.98	0.31	1.22	0.02		
56	103696.65	48.27	48.47	7.23	41.04	1.89	0.33	0.00042	1404.86	0.81	2.21	0.10		
55	104206.66	48.21	48.29	8.61	39.60	1.29	0.20	0.00023	1404.74	0.15	0.15	0.48	1.29	0.04
54	104724.33	48.05	48.16	8.93	39.12	1.41	0.27	0.00024	1404.60	0.36	1.60	0.16		
53	105344.82	47.53	47.86	8.25	39.28	2.43	0.44	0.00073	1404.51	2.72	0.30			
52	105977.70	47.04	47.40	6.89	40.15	2.63	0.41	0.00073	1404.50	0.03	2.68	0.42		
051_01	106349.67	47.02	47.19	7.44	39.58	1.77	0.25	0.00030	1404.48	0.16	1.81	0.23		
51	106622.83	46.77	47.06	11.53	35.24	2.39	0.32	0.00057	1404.45	0.42	2.40	0.32		
50	106898.85	46.75	46.92	7.47	39.28	1.82	0.28	0.00041	1404.25	1.84	1.22	0.48	0.05	
49	107560.95	46.55	46.68	6.72	39.83	1.62	0.24	0.00031	1404.02	1.62				
48	108076.75	46.40	46.49	6.72	39.68	1.21	0.24	0.00030	1403.93	0.02	1.58	0.32		
47	108679.79	45.84	46.21	9.88	35.96	2.67	0.36	0.00066	1403.85	0.23	2.67			

I termini V sono le velocità della corrente nei vari tratti nei quali è divisa la sezione

TR=50 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	S _r	Q (m ³ /s)
57	103047.77	49.05	49.12	7.81	41.24	1.14	0.21	0.00016	1586.20
56	103696.65	48.72	48.93	7.68	41.04	1.94	0.32	0.00041	1583.80
55	104206.66	48.67	48.76	9.07	39.60	1.33	0.22	0.00021	1582.00
54	104724.33	48.51	48.63	9.40	39.12	1.42	0.26	0.00023	1580.10
53	105344.82	47.97	48.33	8.69	39.28	2.48	0.43	0.00075	1577.80
52	105977.70	47.46	47.85	7.31	40.15	2.73	0.45	0.00075	1575.40
051_01	106349.67	47.45	47.64	7.87	39.58	1.88	0.28	0.00031	1574.10
51	106622.83	47.17	47.51	11.93	35.24	2.57	0.34	0.00061	1595.50
50	106898.85	47.17	47.36	7.89	39.28	1.90	0.28	0.00041	1594.40
49	107560.95	46.97	47.12	7.15	39.83	1.71	0.24	0.00031	1592.00
48	108076.75	46.84	46.93	7.16	39.68	1.22	0.23	0.00029	1590.10
47	108679.79	46.21	46.63	10.24	35.96	2.88	0.38	0.00071	1587.90

TR=100 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	S _r	Q (m ³ /s)
57	103047.77	49.28	49.34	8.04	41.24	1.05	0.25	0.00016	1742.30
56	103696.65	48.93	49.15	7.89	41.04	1.88	0.38	0.00044	1739.70
55	104206.66	48.87	48.97	9.27	39.60	1.38	0.24	0.00022	1737.70
54	104724.33	48.71	48.83	9.60	39.12	1.35	0.31	0.00024	1735.60
53	105344.82	48.28	48.54	9.00	39.28	1.97	0.53	0.00067	1733.10
52	105977.70	47.63	48.07	7.48	40.15	2.87	0.46	0.00081	1730.60
051_01	106349.67	47.62	47.83	8.04	39.58	1.99	0.30	0.00034	1729.10
51	106622.83	47.33	47.68	12.09	35.24	2.52	0.75	0.00067	1750.40
50	106898.85	47.33	47.48	8.05	39.28	1.59	0.55	0.00041	1749.30
49	107560.95	47.23	47.26	7.40	39.83	0.70	0.22	0.00015	1746.60
48	108076.75	47.06	47.15	7.39	39.68	1.12	0.26	0.00028	1744.50
47	108679.79	46.50	46.86	10.54	35.96	2.48	0.60	0.00068	1742.10

Allegato 2: ASPETTI IDROLOGICI E IDRAULICI DELL'ADDA

TR=200 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo	V1	V2	V3	V4	V5
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	S _f	Q (m ³ /s)	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
57	103047.77	49.51	49.57	8.27	41.24	1.02	0.25	0.00016	1948.45	0.29	1.29	0.13	0.08	
56	103696.65	49.16	49.38	8.12	41.04	1.90	0.38	0.00045	1948.22	0.82	2.49	0.08		
55	104206.66	49.10	49.20	9.49	39.60	1.40	0.27	0.00023	1947.98	0.17	0.38	0.64	1.46	0.10
54	104724.33	48.94	49.06	9.82	39.12	1.34	0.30	0.00024	1947.73	0.36	1.80	0.26		
53	105344.82	48.53	48.77	9.25	39.28	1.87	0.50	0.00065	1947.21	0.62	2.81	0.46		
52	105977.70	47.81	48.29	7.67	40.15	2.99	0.47	0.00086	1946.75	0.64	3.18	0.77		
051_01	106349.67	47.81	48.04	8.23	39.58	2.08	0.31	0.00037	1946.53	0.14	2.18	0.30		
51	106622.83	47.55	47.85	12.31	35.24	2.15	0.90	0.00067	1946.37	0.25	2.81	0.31		
50	106898.85	47.55	47.68	8.27	39.28	1.41	0.51	0.00039	1945.96	0.32	1.98	1.35	0.64	0.31
49	107560.95	47.46	47.49	7.64	39.83	0.65	0.19	0.00013	1945.18	0.17	1.17	0.38		
48	108076.75	47.29	47.38	7.61	39.68	1.11	0.27	0.00029	1944.46	0.26	1.73	0.31		
47	108679.79	46.75	47.09	10.79	35.96	2.34	0.65	0.00068	1944.15	0.53	2.99	0.48		

I termini V sono le velocità della corrente nei vari tratti nei quali è divisa la sezione

TR=500 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo	V1	V2	V3	V4	V5
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	S _f	Q (m ³ /s)	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
57	103047.77	49.80	49.86	8.56	41.24	0.98	0.24	0.00015	2161.42	0.33	1.30	0.02	0.02	
56	103696.65	49.42	49.66	8.38	41.04	1.92	0.43	0.00048	2161.29	0.79	2.64	0.11		
55	104206.66	49.36	49.47	9.76	39.60	1.41	0.27	0.00023	2161.13	0.25	0.45	0.70	1.52	0.14
54	104724.33	49.20	49.32	10.09	39.12	1.35	0.29	0.00025	2160.96	0.44	1.87	0.29		
53	105344.82	48.83	49.05	9.55	39.28	1.80	0.45	0.00061	2160.58	0.75	2.80	0.49		
52	105977.70	48.03	48.56	7.88	40.15	3.16	0.49	0.00094	2160.25	0.79	3.39	0.90		
051_01	106349.67	48.03	48.29	8.45	39.58	2.20	0.32	0.00040	2160.09	0.18	2.34	0.34		
51	106622.83	47.85	48.07	12.61	35.24	1.71	0.69	0.00060	2159.97	0.43	2.74	0.42		
50	106898.85	47.82	47.93	8.54	39.28	1.22	0.43	0.00035	2159.63	0.42	1.93	1.32	0.66	0.36
49	107560.95	47.74	47.77	7.92	39.83	0.61	0.16	0.00011	2159.20	0.22	1.11	0.40		
48	108076.75	47.57	47.66	7.89	39.68	1.09	0.28	0.00029	2158.74	0.34	1.80	0.30		
47	108679.79	47.08	47.38	11.11	35.96	2.16	0.56	0.00063	2158.42	0.59	2.98	0.64		

I termini V sono le velocità della corrente nei vari tratti nei quali è divisa la sezione

RISULTATI DI CALCOLO: INVILUPPI DELLE QUOTE DI PELO LIQUIDO E CARATTERISTICHE IDRAULICHE DELLA CORRENTE PER VARI TEMPI DI RITORNO (TR) NELLA CONDIZIONE DI PROGETTO

TR=200 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	S _r	Q (m ³ /s)
57	103047.77	49.51	49.57	8.27	41.24	1.02	0.25	0.000156	1948.4
56	103696.65	49.16	49.38	8.12	41.04	1.90	0.38	0.000446	1948.0
55	104206.66	49.10	49.20	9.50	39.60	1.39	0.27	0.000225	1947.8
54	104724.33	48.94	49.06	9.83	39.12	1.34	0.30	0.000244	1947.7
53	105344.82	48.53	48.77	9.25	39.28	1.87	0.50	0.000645	1947.2
52	105977.70	47.82	48.29	7.67	40.15	2.99	0.47	0.000863	1946.8
051_01	106349.67	47.81	48.04	8.23	39.58	2.08	0.31	0.000367	1946.5
51	106622.83	47.55	47.85	12.31	35.24	2.15	0.90	0.000665	1946.3
50	106898.85	47.55	47.68	8.27	39.28	1.41	0.50	0.000389	1946.0
49	107560.95	47.47	47.50	7.64	39.83	0.65	0.19	0.000131	1945.2
48	108076.75	47.30	47.38	7.62	39.68	1.11	0.27	0.000288	1944.4
47	108679.79	46.75	47.09	10.79	35.96	2.34	0.65	0.000679	1944.1

TR=500 anni

Codice	Progressiva	Quota di pelo libero	Carico Totale	Tirante	Quota del fondo	Vel. media	Num. di Froude	Cadente	Portata al colmo
Sezione	x (m)	Y (m slm)	H (m slm)	H (m)	Z (m slm)	U (m/s)	F	S _r	Q (m ³ /s)
57	103047.77	49.80	49.86	8.56	41.24	0.98	0.24	0.000151	2161.5
56	103696.65	49.42	49.66	8.38	41.04	1.92	0.43	0.000477	2161.3
55	104206.66	49.36	49.47	9.76	39.60	1.41	0.27	0.000229	2161.1
54	104724.33	49.20	49.32	10.09	39.12	1.35	0.29	0.000249	2160.9
53	105344.82	48.83	49.05	9.55	39.28	1.80	0.45	0.000607	2160.5
52	105977.70	48.03	48.56	7.88	40.15	3.16	0.49	0.000936	2160.2
051_01	106349.67	48.03	48.29	8.45	39.58	2.20	0.32	0.000401	2160.0
51	106622.83	47.85	48.07	12.61	35.24	1.71	0.69	0.000600	2160.0
50	106898.85	47.82	47.93	8.54	39.28	1.22	0.43	0.000349	2159.7
49	107560.95	47.74	47.77	7.92	39.83	0.61	0.16	0.000112	2159.2
48	108076.75	47.57	47.66	7.89	39.68	1.09	0.28	0.000290	2158.7
47	108679.79	47.08	47.38	11.11	35.96	2.16	0.56	0.000634	2158.4

Le tabelle riportano le condizioni di deflusso durante le piene di assegnato tempo di ritorno nelle condizioni rilevate per lo studio (stato di fatto), e di seguito nelle condizioni conseguenti gli interventi di adeguamento del sistema di difesa idraulica del fiume Adda (condizione di progetto), definiti a livello di fattibilità nella documentazione non in possesso dello scrivente.

Le attività consistono in interventi di contenimento dei livelli nelle sezioni indicate nella tabella in Figura 13. Il modello considera che le difese in progetto (in tutti e tre i casi esaminati: Adda, Brembo, Serio), non siano sormontate nemmeno dalla piena 500-ennale. Ciò comporta una probabile amplificazione locale dei livelli di piena 500-ennale. Per quanto riguarda il tratto di Castiglione d'Adda si evidenzia che gli interventi previsti non comportano alcuna modificazione delle condizioni di deflusso (portate, velocità, regime) rispetto allo stato di fatto, come emerge confrontando le tabelle sopra riportate.

Tronco fluviale interessato		Opera di contenimento dei livelli in sponda		Località
Sez. inizio	Sez. fine	sinistra	destra	
209	207			Airuno
203	199_01			Brivio
163	162_1			Vaprio d'Adda
157_2	158_1			Groppello d'Adda
140	139			Rivolta d'Adda
107_2	101_2			Lodi
70_1	66_1			Bocca Serio
68	66			Bocca Serio

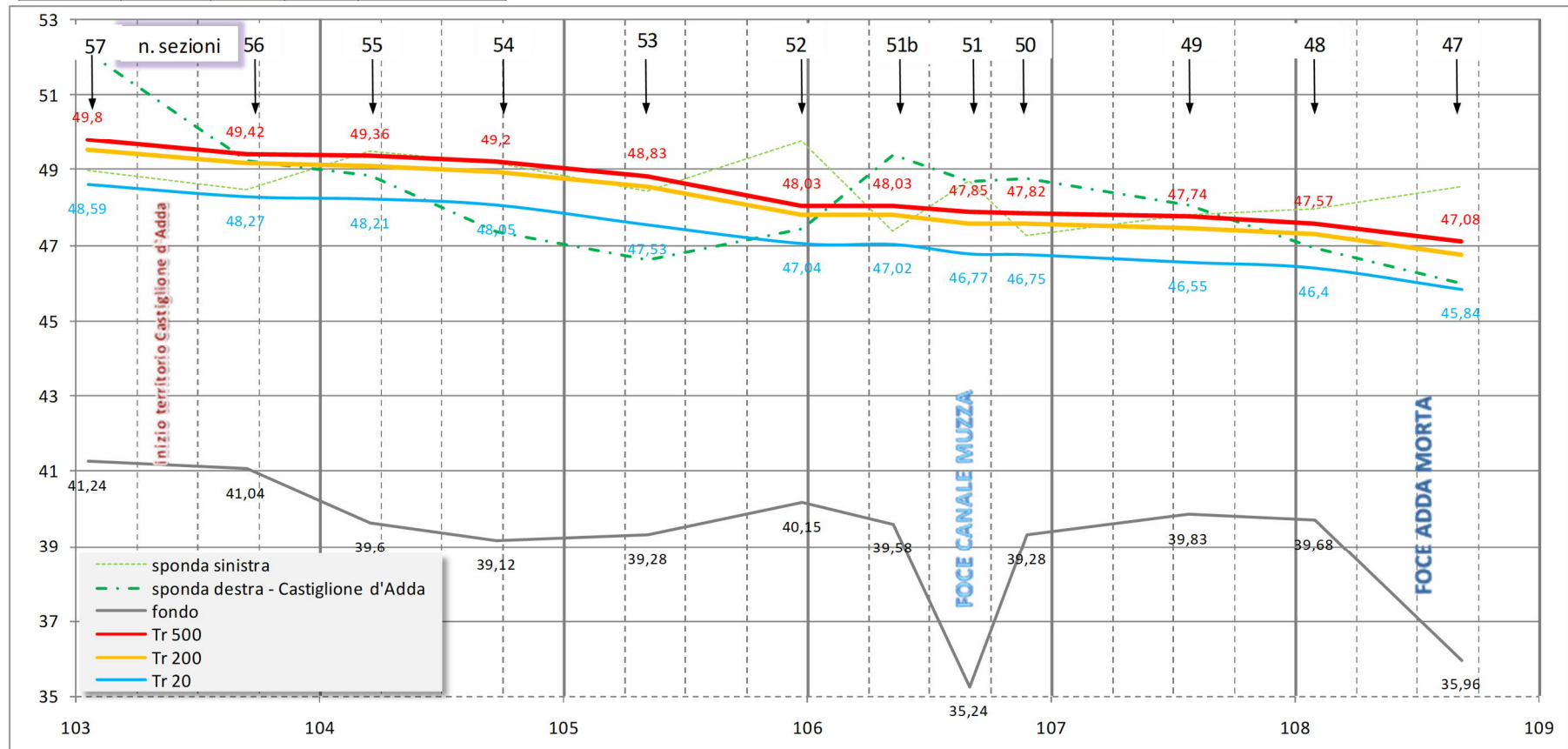


Figura 13: sezione nelle condizioni di stato di fatto nel territorio di Castiglione d'Adda. Ascisse Km da inizio tratto sublacuale Adda, ordinate in m s.l.m.

5. Elaborati del PGRA

Come accennato nel § 1, gli studi in precedenza illustrati sono stati impiegati per determinare le superfici allagabili in occasione di fenomeni di piena con vari tempi di ritorno, applicando criteri e dati che sono differenti da quelli utilizzati in precedenza per l'individuazione delle fasce fluviali del Piano per l'Assetto Idrogeologico (PAI), che è il principale atto amministrativo realizzato per la tutela dal rischio idrogeologico, approvato con DPCM 24 maggio 2001 e tuttora pienamente vigente. L'elaborato comprende, oltre alle fasce fluviali (Fascia A, Fascia B, Fascia B di progetto e Fascia C) dell'asta del Po e dei suoi principali affluenti, la classificazione delle aree in dissesto per frana, valanga, esondazione torrentizia e conoide, la perimetrazione e la zonazione delle aree a rischio idrogeologico molto elevato in ambiente collinare e montano e sul reticolo idrografico principale e secondario nelle aree di pianura, nonché le norme alle quali le aree esaminate sono assoggettate (Elaborato 7 del PAI - Norme di attuazione).

Lo scopo della Direttiva 2007/60/CE «Direttiva alluvioni» e del D. Lgs. 49/2010 che ne dà attuazione in Italia, è quello di istituire un quadro per valutare e gestire i rischi di alluvioni partendo dall'individuazione dei territori interessati dai fenomeni, dalla stima dei livelli di rischio valutata in relazione al valore dei beni coinvolti e mediante la redazione di un piano per la mitigazione degli effetti negativi, estendendo le analisi compiute con il PAI ad altre posizioni di territorio, come alcuni tratti di monte del reticolo principale, alle aree costiere dei laghi e a parte del reticolo idrico secondario.

Gli studi per la delimitazione delle aree allagabili del reticolo principale di pianura (RP) hanno individuato nelle aree perifluviali tre categorie di pericolosità rappresentandole nelle mappe con un codice e con un retino uniforme come indicato qui di seguito:

- P3 o H (High frequency) - Alluvioni frequenti (Tr 20-50 anni) blu scuro
- P2 o M (Medium frequency) - Alluvioni poco frequenti (Tr ≥ 100-200 anni) azzurro
- P1 o L (Low frequency) - Alluvioni rare di estrema intensità (> 500 anni) celeste



Si precisa che le mappe riportano informazioni sull'estensione delle aree allagabili per i diversi tempi di ritorno (TR), ma non danno indicazioni rispetto alle altezze e alle velocità della corrente.

Le modellazioni PAI e degli studi di fattibilità (SdF) esistenti, come quello descritto nei paragrafi precedenti, sono state aggiornate sulla base delle opere collaudate e della nuova topografia disponibile giungendo alla formazione delle mappe come quella riguardante il territorio di Castiglione d'Adda illustrata nella Figura 14 e nella tavola 2b allegata alla relazione generale della studio geologico (Carta idrogeologica PAI – PGRA), che mostra come la principale differenza rispetto all'esito dello studio di fattibilità consista nella collocazione dell'area a nord della Cascina Vinzaschina nella categoria P2/M, in luogo della C indicata nello

studio di PGT del 2009, che come precisato in seguito comporta l'assoggettamento dell'area alle prescrizioni previste per la fascia B.

L'aggiornamento delle norme di attuazione del PAI, infatti, attuato con la deliberazione del Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino del Po n. 5 del 07 dicembre 2015 e approvato con decreto del Presidente del Consiglio dei ministri il 22 febbraio 2018, ha disposto con l'art. 58 denominato "*Aggiornamento agli indirizzi alla pianificazione urbanistica, ai sensi dell'art. 65, comma 6 del D. lgs 11. 152/2006*" che le aree appartenenti al reticolo principale collocate nella categoria P3/H del PGRA debbano essere sottoposte alle prescrizioni previste per la fascia A del PAI, quelle collocate nella categoria P2/M alle prescrizioni della fascia B e quelle collocate nella categoria P1/L alle prescrizioni della fascia C, disponendo anche l'obbligo da parte delle Regioni di emanare regolamentazioni concernenti l'attuazione del PGRA nel settore urbanistico.

La Regione Lombardia ha ottemperato a tale obbligo con la deliberazione di giunta regionale n. X/6738 del 19 giugno 2017 che nel § 3.1.4. "*disposizioni per i corsi d'acqua già interessati nella pianificazione di bacino vigente dalla delimitazione delle fasce fluviali*", precisa che le mappe delle aree allagabili NON sostituiscono le fasce fluviali ma rappresentano un aggiornamento e una integrazione e che fino all'adozione delle specifiche varianti PAI a scala di asta fluviale con le relative norme di salvaguardia (ad oggi non predisposte), entrambe le perimetrazioni restano in vigore. In caso di sovrapposizione deve essere applicata la classificazione e di conseguenza la norma più restrittiva e ciò comporta, come detto, che nelle aree interessate da alluvioni frequenti (aree P3/H), si applicano le limitazioni e prescrizioni previste per la Fascia A e in modo analogo nelle aree P2/M e P1/L, quelle per le fasce B e C.

Le classi di fattibilità geologica per le aree ricadenti nelle fasce PAI sono precisate nella Tabella 1bis – della deliberazione di Giunta regionale 30 novembre 2011 - n. IX/2616 di aggiornamento dei "*Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio...*", dove si specifica che in Fascia A all'esterno dei centri edificati la classe di fattibilità è la 4 e si applicano gli artt. 29, 38, 38 bis, 38 ter, 39 e 41 N.d.A. del PAI, che in Fascia B all'esterno dei centri edificati la classe è la 3 e sono consentiti solo gli interventi previsti dagli artt. 30, 38, 38bis, 38 ter, 39 e 41 delle N.d.A. del PAI e che in fascia C la classe deve essere attribuita in base alle problematiche riscontrate, fermo restando quanto stabilito dall'art. 31 delle N.d.A. del PAI, e che i Comuni sono tenuti a predisporre programmi di previsione e prevenzione tenuto conto delle ipotesi di rischio derivanti dalle indicazioni del presente Piano.

In questo caso poiché la probabilità di allagamento è modesta, si ritiene che la prescrizione debba riguardare solo l'obbligo, da parte del proprietario e del progettista delle opere, di dichiarare di aver letto e considerato nella redazione del progetto le soluzioni contenute dal documento "EDIFICI IN AREE A RISCHIO DI ALLUVIONE COME RIDURNE LA VULNERABILITÀ" redatto a cura dell'Autorità di bacino del Fiume Po e dell'Università degli Studi di Pavia (febbraio 2009) reperibile all'indirizzo [opuscolo1.indd \(adbpo.it\)](http://opuscolo1.indd (adbpo.it)).

Il citato articolo 58 delle Norme di attuazione prevede inoltre che le disposizioni concernenti l'attuazione del PGRA nel settore urbanistico siano coordinate con quelle assunte in materia di Protezione civile ai sensi della legge 12 luglio 2012 n. 100, mentre la disciplina regionale dispone l'obbligo verificare tale coerenza, tra il Piano di Emergenza Comunale (PEC) vigente e il PGRA, e di procedere se necessario con l'aggiornamento del PEC.

Oltre agli obiettivi di completamento delle conoscenze del territorio sopra descritti, il PGRA prevede di classificare gli elementi esposti ricadenti entro le aree allagabili in quattro gradi di rischio crescente (da R1, rischio moderato a R4, rischio molto elevato), impiegando nelle mappe i colori e i simboli riportati di seguito, collocandoli in base ai criteri di seguito illustrati.



Dalla pericolosità (P) al rischio (R): $R = P * (E * V)$ dove

P = Pericolosità o probabilità di accadimento di un evento alluvionale di data intensità in un intervallo di tempo prefissato e su una determinata area.

E = Valore degli elementi a rischio intesi come persone, beni, patrimonio culturale ed ambientale ecc. presenti nell'area inondabile

V = Vulnerabilità degli elementi a rischio, è il grado di perdita o danno associato a un elemento o a un gruppo di elementi a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data magnitudo.

Dipende sia dalla capacità degli elementi a rischio di sopportare l'evento che dall'intensità dell'evento stesso. Varia da 0 (nessun danno/perdita) a 1 (danno/perdita totale).

Secondo l'**Allegato 2A alla relazione del PGRA. Mappatura pericolosità e rischio, § 3.2** "in mancanza di specifiche curve del danno correlate alla tipologia, magnitudo e frequenza dell'evento considerato e al comportamento delle strutture e agli usi delle stesse, la vulnerabilità è stata assunta in modo semplificato assegnando, a favore di sicurezza, un valore costante uguale ad 1 a tutti gli elementi esposti considerati. Anche la stima del danno è stata condotta in modo qualitativo e sulla base di un giudizio esperto, attribuendo un peso crescente da 1 a 4 a seconda dell'importanza della classe d'uso del suolo. Sono stati assegnati i pesi maggiori alle classi residenziali che comportano una presenza antropica costante e pesi decrescenti alle diverse tipologie di attività produttive, privilegiando le attività maggiormente concentrate (attività industriali), rispetto alle attività estensive (attività agricole)."

La finalità delle valutazioni del rischio sull'edificato esistente è quella di individuare la necessità di interventi locali di riduzione dello stesso negli edifici e prioritariamente sulle infrastrutture per la gestione dell'emergenza (centri di coordinamento, aree di emergenza e viabilità di collegamento), così come risultanti dalla pianificazione di emergenza vigente e di guidare, attraverso idonee prescrizioni costruttive ed edilizie, le trasformazioni urbanistiche in modo che non subiscano danni significativi in caso di evento alluvionale.

Altri scopi sono quelli di individuare le aree da assoggettare a eventuali piani di demolizione e di restituire spazi ai corsi d'acqua, nonché di definire specifici scenari di rischio e i relativi modelli d'intervento nel piano di emergenza comunale. Infine il modello potrà supportare l'amministrazione stessa nell'individuazione degli ambiti di esclusione dall'applicazione della l.r. 10 marzo 2017, n. 7 "Recupero dei vani e locali seminterrati esistenti" come previsto dall'articolo 4 della legge regionale stessa.

Il PGRA prevede che gli obiettivi dichiarati siano raggiunti attuando ciclicamente *misure di Prevenzione, misure di Protezione, misure di Preparazione e misure di Ritorno alla normalità e analisi*, comprendendo le misure che si ritengono necessarie da attuarsi in fase di evento, secondo uno schema concettuale rappresentato nella figura a fianco.



Di seguito si riportano le mappe di pericolosità e del rischio mostrate sul Geoportale per il territorio di Castiglione d'Adda, che sono riferite in scala 1: 10.000 nella Tavola 2 del presente studio geologico di PGT.

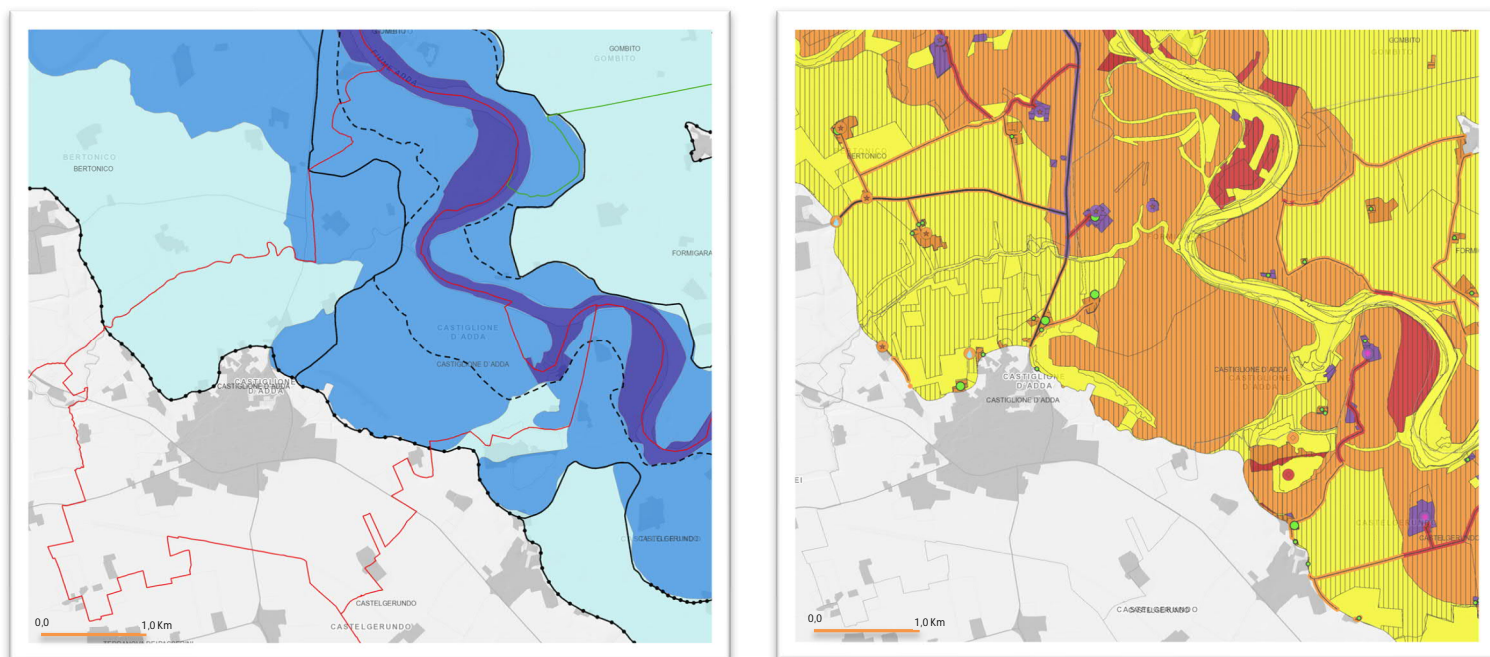


Figura 14: a sinistra rappresentazione in scala 1:72.000 circa delle mappe di pericolosità (P3, P2, P1) e dei limiti delle fasce PAI (A, B, C) del reticolo principale. A destra mappa del rischio del reticolo principale.