



UNIMORE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

NELL'AMBITO DI: "RICERCA PER LO STUDIO DELLE INTERAZIONI TRA GRANDI OPERE DI SBARRAMENTO FLUVIALE, CORRENTI IDRICHE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE, CON RIFERIMENTO AI MANUFATTI REGOLATORI ED ALLE ARGINATURE DI CONTENIMENTO: SVILUPPO DI MODELLI MATEMATICI DI COMPORTAMENTO DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL FIUME PANARO NEL COMUNE DI SAN CESARIO SUL PANARO (MO), DEL BACINO IDROGRAFICO DI MONTE E DEL SISTEMA FLUVIALE DI VALLE (MO-E-1255) (O.P.C.M. 3850/2010 – DECRETO N. 140/2010 "PIANO DEGLI INTERVENTI URGENTI" DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA)."

RELAZIONE TECNICA SULLA VERIFICA FUNZIONALE DELLE ARGINATURE DEL FIUME PANARO

a cura di

Marcello Fiorentini, Giovanni Moretti e Stefano Orlandini

Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Via Vivarelli 10, 41125 Modena

22 Marzo 2016

MOTIVAZIONI E OBIETTIVI DELLO STUDIO	1
IL SISTEMA FLUVIALE DEL PANARO	3
FASI DELLO STUDIO	5
BACINO IDROGRAFICO DI MONTE	6
<i>Analisi statistica diretta delle portate massime osservate a Spilamberto</i>	<i>6</i>
<i>Idrogramma di piena di progettazione della cassa di espansione.</i>	<i>7</i>
<i>Idrogramma di piena di ADBPO</i>	<i>8</i>
<i>Modello idrologico del bacino idrografico: precipitazione sollecitante</i>	<i>9</i>
<i>Modello idrologico del bacino idrografico: generazione dell'idrogramma di piena</i>	<i>13</i>
CASSA DI ESPANSIONE	16
<i>Geometria idraulica</i>	<i>17</i>
<i>Scala di deflusso dal manufatto principale</i>	<i>17</i>
<i>Curva dell'invaso</i>	<i>19</i>
<i>Modello idraulico</i>	<i>20</i>
ASTA FLUVIALE A VALLE DELLA CASSA DI ESPANSIONE	21
<i>Modello idraulico di propagazione dell'onda di piena in HEC-RAS</i>	<i>21</i>
<i>Modello digitale del terreno</i>	<i>23</i>
ANALISI DEL CORPO ARGINALE	24
<i>Definizione delle sezioni critiche</i>	<i>24</i>
<i>Definizione dei parametri idraulici</i>	<i>24</i>
<i>Modello di filtrazione in FEFLOW</i>	<i>25</i>
RISULTATI OTTENUTI	27
ANALISI DELLE PORTATE E DEI VOLUMI DI PIENA IN INGRESSO ALLA CASSA DI ESPANSIONE	27
ANALISI DI FALLANZA DELLA CASSA DI ESPANSIONE.....	29
ANALISI DEI LIVELLI IDRICI	37
<i>Portata smaltibile</i>	<i>38</i>
<i>Distribuzione spaziale dei franchi arginali</i>	<i>42</i>
ANALISI DEI TEMPI DI SATURAZIONE DEL CORPO ARGINALE IN RISPOSTA AI PIANI DI LAMINAZIONE	45
IDENTIFICAZIONE DELLE CRITICITÀ.....	51
INTERVENTI SUGGERITI	53
BIBLIOGRAFIA	55

Motivazioni e obiettivi dello studio

La verifica della funzionalità delle arginature del Fiume Panaro è un aspetto cruciale per la definizione del livello di sicurezza idraulica del sistema fluviale. L'evoluzione delle ultime piene fluviali ed il recente evento alluvionale accorso per la breccia arginale in località San Matteo il 19 gennaio 2014 sul Fiume Secchia ha posto una forte attenzione verso una verifica completa e sistematica del sistema fluviale. In particolare è stato necessario approfondire l'adeguatezza delle arginature del Fiume Panaro in termini di quota della sommità arginale, e larghezza e forma della sezione arginale rispetto ai moti di filtrazione attraverso il rilevato arginale.

Lo studio completo del sistema fluviale inteso come interazione tra bacino idrografico di monte, cassa di espansione ed asta fluviale di valle permette la definizione dello stato attuale a fronte del quale possono essere definiti gli interventi strutturali di adeguamento del corpo arginale dove necessario e gli interventi non strutturali di gestione del rischio idraulico con i piani di laminazione della piena.

Il sistema fluviale del Panaro

Il sistema fluviale del Fiume Panaro è complesso e risulta costituito principalmente da tre unità principali come riportato in Figura 1: 1) il bacino idrografico di monte (poligono giallo in Figura 1), 2) la cassa di espansione in località Sant'Anna (triangolo verde in Figura 1) e 3) l'asta di valle del Fiume Panaro che risulta sottesa da due lunghi corpi arginali che accompagnano il corso d'acqua dalla cassa di espansione alla confluenza con il Fiume Po senza soluzione di continuità. Nel bacino di monte avviene la generazione dell'idrogramma di piena, la cassa di espansione funge da discontinuità idraulica tra il bacino montano ed il sistema idraulico di valle, mentre l'asta fluviale propaga verso valle l'onda di piena nella fascia sottesa ai corpi arginali. Le tre unità principali del sistema idraulico possono essere studiate separatamente, ma il comportamento del sistema fluviale può essere significativamente influenzato da una o più unità principale per cui è stato necessario predisporre uno studio sistematico di tutte le unità in modo di cogliere le reciproche interdipendenze.



Figura 1. Sistema fluviale del Fiume Panaro.

Il bacino idrografico di monte del Fiume Panaro è stato chiuso alla traversa fluviale in ingresso alla cassa di espansione posta in località Sant'Anna subito a valle del ponte dell'autostrada A1 per un'estensione totale di 879854400 m². Il Fiume Panaro ha origine dalla confluenza del Torrente Scoltenna e del Torrente Leo che scendono rispettivamente dalle valli di Fiumalbo-Pievepelago e di Fanano. Il bacino idrografico include la fascia di crinale dell'Appennino Tosco-Emiliano caratterizzata da notevoli precipitazioni stagionali e la vetta del Monte Cimone (2165 m slm) nelle cui zone di versante si possono avere anche forti pendenze del terreno e zone del bacino pedecollinari con pendenze modeste e minori precipitazioni.

La cassa di espansione è situata in località Sant'Anna a San Cesario sul Panaro ed è costituita da un manufatto principale in calcestruzzo che funge da sbarramento del corso d'acqua, un corpo di arginature maestre che sottende un invaso in linea ed uno sfioratore laterale interno all'invaso in linea che regola il deflusso verso un invaso sussidiario fuori linea. L'invaso fuori linea è interno alle arginature maestre dell'invaso in linea, ma risulta protetto da un argine interno secondario sormontabile. Il manufatto regolatore principale è dotato di 5 scarichi di fondo principali munite di paratoie regolabili e 4 scarichi di fondo laterali di servizio. Tale manufatto è sormontabile e presenta una quota di sfioro tale da non provocare la crisi dell'opera per gli eventi di piena rari. L'invaso sussidiario fuori linea è stato ideato per attivarsi poco prima che si raggiunga la quota di sfioro del manufatto regolatore principale in modo da incrementare il volume di laminazione della cassa di espansione. L'argine interno dell'invaso sussidiario fuori linea risulta sormontabile per quote del pelo libero che superano la quota di sfioro del manufatto principale.

L'asta fluviale a valle della cassa di espansione è sottesa da un corpo arginale continuo in destra e sinistra idraulica che accompagnano il corso d'acqua lungo tutto il suo sviluppo di 67.5 km fino alla confluenza con il Fiume Po. Lungo il corso fluviale, il Fiume Panaro riceve in sinistra idraulica le acque di due affluenti: il Torrente Tiepido in località Fossalta (Figura 1) ed il Naviglio a Bomporto (non riportata in Figura 1). Quest'ultima confluenza non è stata considerata in quanto risulta regolata da porte Vinciane che impediscono il reflusso delle acque del Panaro nel Naviglio durante le fasi di piena. Nel presente studio i meccanismi di crisi del sistema fluviale considerati sono stati determinati esclusivamente dall'asta principale del Fiume Panaro, per cui la confluenza del Torrente Tiepido non è stata valutata come fonte di criticità idraulica. Tale scelta è motivata dal fatto che i bacini idrografici del Fiume Panaro e del Torrente Tiepido hanno caratteristiche geomorfologiche differenti per cui il tempo di corrivazione del bacino del Panaro risulta di circa tre volte superiore a quello del Tiepido. La contemporanea e sinergica composizione delle due piene fluviali risulta possibile, ma con bassa probabilità per cui si è proceduto all'analisi delle sole criticità date dalla forzante del Fiume Panaro. Nel caso in cui il contributo del Torrente Tiepido non si ritenga trascurabile, per mantenere il rischio idraulico del sistema fluviale coerente con quanto presentato nel presente studio, per la cassa di espansione di Sant'Anna sarà necessario fare riferimento a portate soglia minori.

Fasi dello studio

Le fasi dello studio sono state focalizzate sulle tre unità di cui si compone il sistema fluviale del Panaro: 1) bacino idrografico di monte, 2) cassa di espansione di Sant'Anna, e 3) asta fluviale di valle per la propagazione dell'onda di piena.

La prima fase di analisi ha riguardato la definizione della forzante idrologica e la predisposizione del modello idrologico in modo tale da poter stimare l'idrogramma di piena con cui sollecitare il sistema costituito dalla cassa di espansione e dall'asta fluviale di valle. Gli idrogrammi ottenuti dall'analisi idrologica del bacino di monte, sono stati propagati all'interno della cassa di espansione di Sant'Anna in modo da descriverne il funzionamento a seguito della sollecitazione con diverse forzanti e di definire i rispettivi idrogrammi rilasciati nel tratto fluviale di valle. Per ciascuno degli idrogrammi in uscita dalla cassa è stata effettuata la propagazione lungo l'asta fluviale di valle in modo da ottenere per ogni sezione considerata l'andamento del livello idrico. La seconda fase è consistita nell'analisi della sicurezza idraulica della cassa di espansione e dell'asta fluviale di valle considerando sia lo stato attuale di rischio che gli effetti prodotti da una regolazione attiva della cassa di espansione al fine di mitigare il rischio idraulico del sistema fluviale e sfruttare tutte le potenzialità della cassa di espansione. Il funzionamento della cassa di espansione è stato studiato in modo da garantire sempre la sicurezza e l'integrità dell'opera in termini di franco di sicurezza per qualsiasi evento considerato secondo quanto stabilito dalla normativa vigente. Sono state definite portate critiche massime compatibili con l'asta di valle che sono rilasciabili in uscita dal manufatto di sbarramento ed in base ad esse è stata condotta un'analisi di fallanza della cassa di espansione. Tale analisi di fallanza ha consentito di determinare il periodo di ritorno di insufficienza idraulica del sistema fluviale nel suo complesso in caso di regolazione passiva degli scarichi di fondo e nel caso di regolazione attiva ottimale delle paratoie di regolazione degli scarichi. In tale fase sono state anche definiti i valori delle portate associate al periodo di ritorno di 50, 100 e 200 anni nel caso in cui si attui una regolazione attiva ottimale delle paratoie nel corso dell'evento di piena. La terza fase dello studio ha considerato la modellazione della filtrazione all'interno del corpo arginale dell'asta fluviale di valle al fine di verificare le condizioni di sicurezza dell'argine in seguito alla propagazione dell'onda di piena. Tale studio ha considerato un livello di piena variabile (condizioni di moto vario) secondo quanto simulato dai codici di calcolo per la propagazione dell'onda di piena lungo l'asta fluviale. Infine si propongono alcune soluzioni progettuali per l'adeguamento del sistema fluviale ad un rischio idraulico omogeneo ed accettabile per la sicurezza del territorio.

L'analisi effettuata è stata condotta avvalendosi di modelli numerici sviluppati dall'Università di Modena e Reggio Emilia per l'idrologia del bacino di monte ed il funzionamento idraulico della cassa di espansione di Sant'Anna, del modello HEC-RAS sviluppato dal U.S. Army Corps of Engineers per la propagazione dell'onda di piena nell'alveo a valle della cassa di espansione e del modello FEFLOW sviluppato da DHI-WASY GmbH per l'analisi in moto vario della filtrazione nei terreni insaturi del corpo arginale in risposta ai livelli di piena modellati con HEC-RAS. I parametri dei modelli sono stati stimati mediante calibrazione, rilevazioni di campo oppure sulla base di prove di laboratorio ottenute con altri studi. Le osservazioni meteo climatiche ed idrologiche utilizzate sono rilevate, immagazzinate e gestite dal servizio Idro-Meteo-Clima di ARPA EMR che vengono rese accessibili mediante il sistema DEXTER.

Bacino Idrografico di Monte

Nella prima fase di studio del bacino idrografico di monte si è focalizzata l'attenzione sull'analisi statistica diretta delle osservazioni idrometriche della sezione di Spilamberto e sugli idrogrammi di piena definiti per la progettazione della cassa di espansione e definiti dall'Autorità di Bacino per il Fiume Po (ADBPO) per la predisposizione del Piano per l'Assetto Idrogeologico (PAI). Tale analisi ha lo scopo di inquadrare e definire le valutazioni effettuate al momento della progettazione della cassa di espansione, e della definizione del PAI e come queste si rapportano con le analisi esposte nel presente studio. Successivamente si è passato alla definizione e sviluppo del modello idrologico con cui descrivere il meccanismo di formazione dell'idrogramma di piena con cui sollecitare la cassa di espansione di Sant'Anna e l'asta fluviale di valle. Il modello idrologico di monte necessita della definizione di 1) precipitazione sollecitante, 2) modello di formazione della precipitazione efficace e 3) modello di generazione dell'idrogramma di piena. I modelli scelti rientrano nella categoria di modelli concentrati lineari e stazionari e sono stati implementati internamente dall'Università di Modena e Reggio Emilia.

Analisi statistica diretta delle portate massime osservate a Spilamberto

Il ponte di Spilamberto sulla SP16 è dotato di un idrometro che acquisisce in tele-misura il livello idrometrico dal 21 novembre 2002, quindi sono disponibili misure su un totale di 12 anni solari completi. Tramite una legge di scala delle portate è possibile convertire le osservazioni del livello in dati di portata. I valori di portata ottenuti sono stati studiati con un'analisi di frequenza allo scopo di costruire una distribuzione di probabilità dei massimi di portata osservati presso la sezione di misura. Tale analisi consente di ottenere un valore di portata di piena al colmo transitabile per un assegnato tempo di ritorno. Il risultato ottenuto si basa su un numero di dati basso per cui tale elaborazione è da ritenersi indicativa, in particolare per tempi di ritorno che superano i 24 anni.

Le scale delle portate definite per la sezione di Spilamberto sono stimate da ARPA-EMR e consentono di convertire le misure di livello dello strumento direttamente in portata transitata secondo la seguente formulazione:

$$Q = b(Y + a)^c + q_0$$

in cui Q è la portata ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), a (m), b ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), c (-) e q_0 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) sono coefficienti di adattamento della relazione ai dati osservati ed Y (m) è il livello idrico osservato dallo strumento. I valori dei coefficienti sono diversi a seconda della scala delle portate che deve essere periodicamente verificata e rideterminata, in particolare a seguito di eventi di piena che causano una parziale risagomatura della sezione. Per lo strumento di Spilamberto sono disponibili due scale delle portate che sono state ritenute valide su un periodo di tempo differente: una prima scala delle portate valida fino all'anno 2009 ed una seconda valida a partire dal 2010. I valori dei coefficienti e gli intervalli

di validità degli stessi sono riportati in Tabella 1. Da notare che a parità di livello idrico osservato, i valori di portata ottenuti con la seconda legge sono inferiori.

Tabella 1. Validità e parametri delle scala delle portate definite da ARPA-EMR.

Anno validità	Livello Idrico, Y (m)	a (m)	b ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	c (-)	$q\theta$ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
2003-2009	$Y \geq 0.447$ e $Y < 1.100$	-0.447	26.066	1.723	0.000
	$Y \geq 1.100$ e $Y < 6.000$	-1.100	351.590	1.359	12.498
2010-2014	$Y \geq 0.419$ e $Y < 3.800$	-0.419	69.228	2.465	0.000

Idrogramma di piena di progettazione della cassa di espansione.

Gli idrogrammi di piena utilizzati per la progettazione della cassa di espansione di Sant'Anna sono riportati in Figura 2 ed in Tabella 2 sono riassunti i dati caratteristici di portata al colmo Q_{max} , volume di piena diretto V_d , ed altezza cumulata di precipitazione efficace h_e che genera il volume di piena diretto.

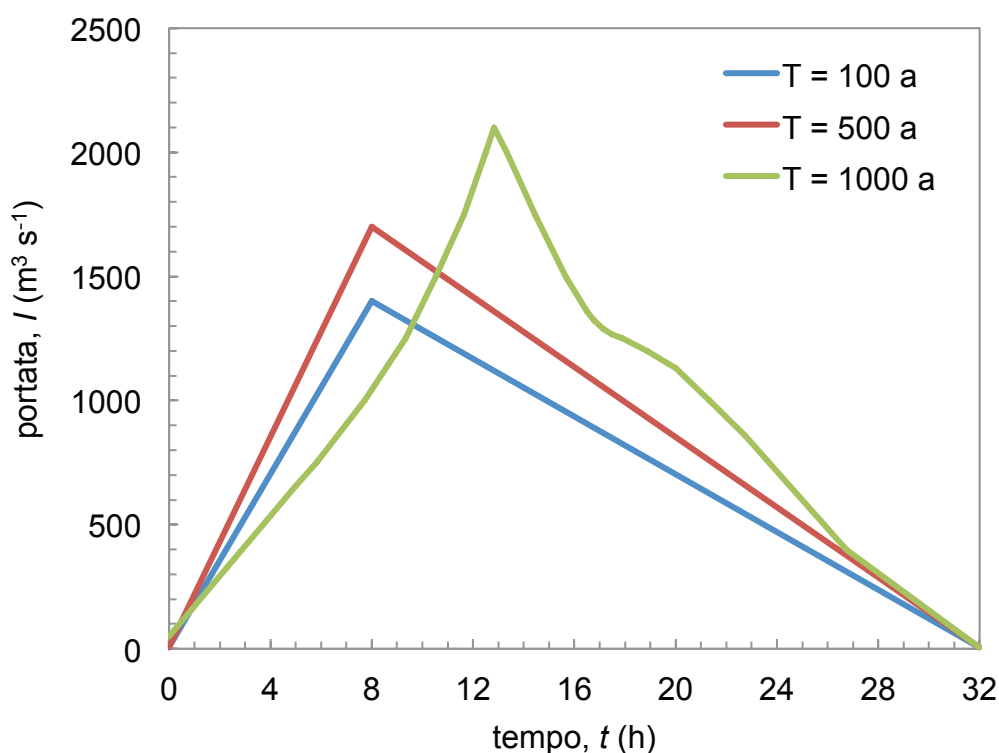


Figura 2. Idrogrammi di piena con periodo di ritorno 100, 500 e 1000 anni utilizzati per la progettazione della cassa di espansione di Sant'Anna.

Gli idrogrammi di piena con tempo di ritorno 100 e 500 anni hanno un tempo totale di 32 ore con 8 ore come tempo di risalita dell'onda di piena, mentre l'idrogramma di piena più severo è stato desunto sulla base del massimo valore di portata che si presumeva fosse transitato a Spilamberto durante l'evento di piena del novembre del 1968. Si osserva in Figura 2 che gli idrogrammi di piena presentano una forma unimodale.

Tabella 2. Dati caratteristici degli idrogrammi di progettazione della cassa di espansione di Sant'Anna in termini di portata di picco, volume di piena, ed altezza cumulativa di precipitazione efficace.

$T(a)$	$Q_{max}(m^3 s^{-1})$	$V_d(10^6 m^3)$	$h_e(mm)$
100	1400	80.928	91.98
500	1700	98.208	111.62
1000	2100	102.507	116.505

Idrogramma di piena di ADBPO

Gli idrogrammi di piena forniti da ADBPO sono riportati in Figura 3 per i periodi di ritorno calcolati di 20, 100 e 200 anni. Gli idrogrammi di piena considerano una forma unimodale come previsto in fase di progettazione della cassa di espansione, ma il ramo di recessione è più rapido.

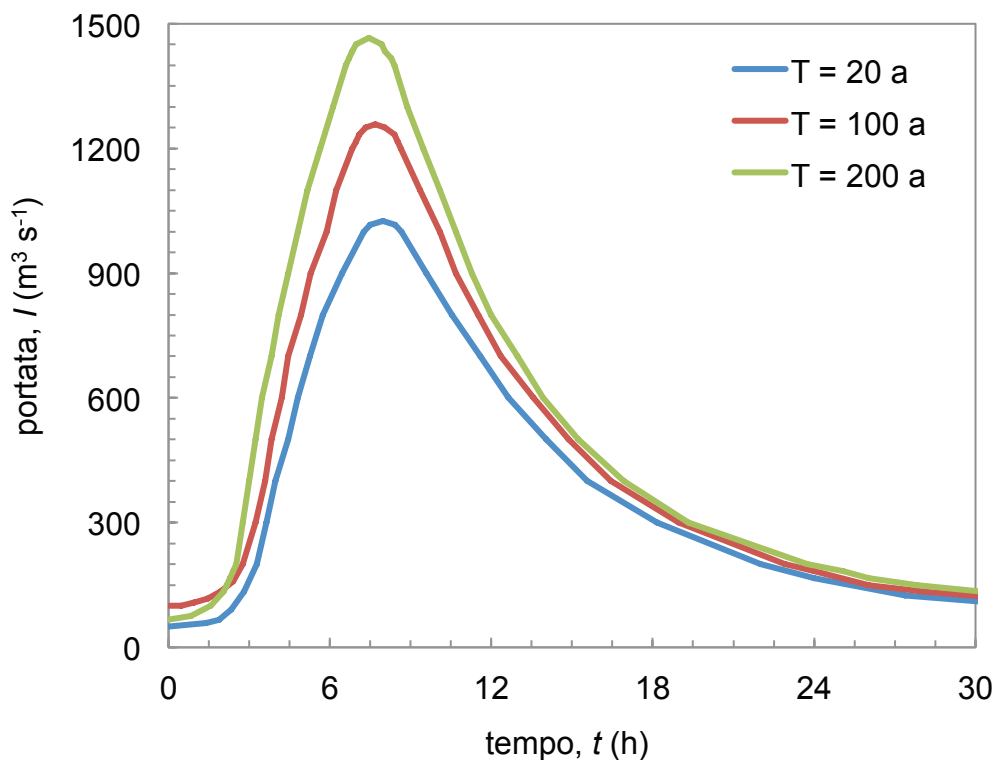


Figura 3. Idrogrammi di piena con periodo di ritorno 20, 100 e 200 anni secondo ADBPO.

In Tabella 3 sono riportati i dati caratteristici dell'idrogramma di piena di ADBPO in termini di portata massima, volume defluito ed altezza cumulata di precipitazione efficace che ha generato l'idrogramma di piena. La rapidità del ramo di recessione degli idrogrammi di piena comportano un volume di piena defluito che, a parità di tempo di ritorno, risulta inferiore a quanto stimato in fase progettuale.

Tabella 3. Dati caratteristici dell'idrogramma di piena per diversi periodi di ritorno secondo dati ADBPO in termini di portata di picco, volume di piena, ed altezza cumulativa di precipitazione efficace.

$T(a)$	$Q_{max} (m^3 s^{-1})$	$V_d (10^6 m^3)$	$h_e (mm)$
20	1025	43.992	50.00
100	1258.333	53.411	60.70
200	1466.667	61.501	69.90

Modello idrologico del bacino idrografico: precipitazione sollecitante

Il modello idrologico del bacino idrografico di monte del Fiume Panaro richiede la definizione della precipitazione sollecitante. Il modello idrologico utilizzato necessita della determinazione della precipitazione media areale caduta sul bacino per cui si deve stimare 1) l'entità della precipitazione caduta, 2) la distribuzione spaziale della precipitazione, e 3) la distribuzione temporale della precipitazione durante l'evento.

L'entità dell'altezza di precipitazione è stata ricavata mediante l'uso delle curve di possibilità pluviometrica definite con il progetto VAPI. Le curve utilizzate si riferiscono al baricentro del bacino idrografico del Fiume Panaro chiuso alla traversa del ponte dell'autostrada A1 a monte della cassa di espansione di Sant'Anna. Il baricentro del bacino così individuato cade nella zona B così come definita dal progetto VAPI [Brath et al., 1999]. Le curve di possibilità climatica puntuali considerate sono riportate in Figura 4 e Figura 5 (quest'ultima in scala bi-logaritmica) per i periodi di ritorno di 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni con durate di precipitazione comprese tra 1 e 48 ore. Le curve utilizzate sono confrontabili con le curve di probabilità climatica ottenute con i parametri riportati nel grigliato PAI, Norme di attuazione, Direttiva 2, Allegato 3. La distribuzione spaziale della precipitazione è stata considerata applicando il fattore (adimensionale) di riduzione areale ARF della precipitazione. Tale fattore varia tra 0 ed 1 e corregge il valore puntuale di precipitazione con una funzione dell'area del bacino idrografico e della durata di precipitazione. Maggiore è la durata di precipitazione e più il valore del fattore ARF risulta vicino ad 1. Tra le formulazioni disponibili in letteratura è stata selezionata la legge proposta da Koutsoyannis (1997):

$$ARF(A_b, d) = \max\left(0.25, 1 - 0.048 A_b^{0.36 - 0.01 \ln A_b} d^{-0.35}\right)$$

dove A_b è l'area del bacino idrografico di monte in km^2 e d è la durata di precipitazione in ore. I valori assunti del fattore di riduzione areale della precipitazione sono rappresentati in Figura 6.

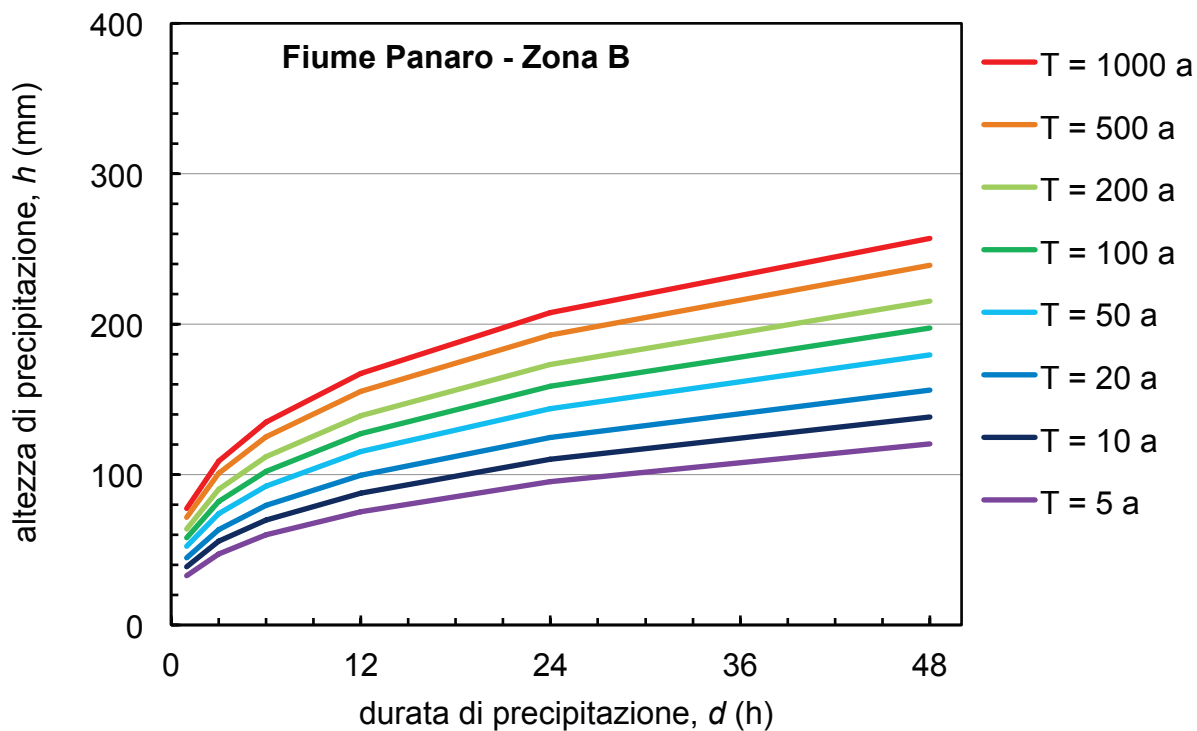


Figura 4. Curve di probabilità pluviometrica del progetto VAPI per il baricentro del bacino del Fiume Panaro.

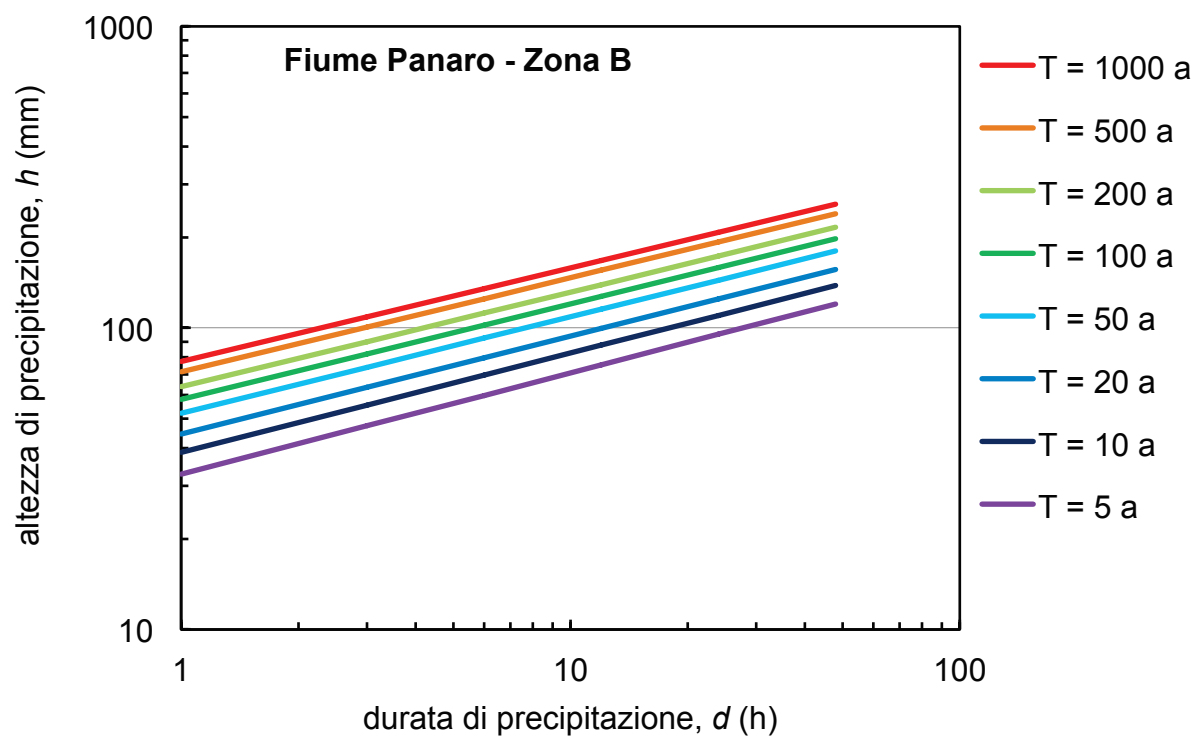


Figura 5. Curve di probabilità pluviometrica in scala bilogaritmica del progetto VAPI per il baricentro del bacino del Fiume Panaro.

La variabilità temporale della precipitazione è stata considerata prendendo come riferimento un evento di precipitazione reale. Le curve di possibilità climatica forniscono per diversi periodi di ritorno e durate di precipitazione il totale di precipitazione cumulata. Tale valore può essere distribuito nel tempo secondo diversi criteri. Il più comune di questi è utilizzare una distribuzione uniforme, ma per questo studio si è proceduto distribuendo il volume di precipitazione calcolato con le curve di possibilità pluviometrica secondo l'andamento di un evento gravoso tra quelli osservati in cui non si fosse manifestato il fenomeno di pioggia su neve. E' stato quindi preso in considerazione l'evento di precipitazione occorso tra le 09:30 del 16/01/2014 e le 09:30 del 20/01/2014. I valori di precipitazione registrati dagli strumenti della rete di pluviometri ARPA-EMR sono stati ragguagliati con i poligoni di Thiessen in modo da ottenere la precipitazione media areale caduta sul bacino idrografico secondo quanto riportato in Figura 7. Lo ietogramma risultante costituirà il riferimento per la stima della distribuzione temporale della precipitazione. Fissato il periodo di ritorno, per ogni durata di precipitazione d è possibile definire l'altezza di precipitazione cumulata con la curva di possibilità climatica al dato periodo di ritorno T , h_{VAPI} . Preso lo ietogramma medio areale di riferimento (Figura 7), si individua la massima altezza di precipitazione cumulata h_{reale} caduta per l'evento reale nella finestra temporale di ampiezza pari a d . Nella durata di precipitazione d sono quindi noti i valori di precipitazione cumulata e la distribuzione temporale interna. Per ogni durata d si può definire il massimo valore di precipitazione cumulata media areale h_{reale} caduta sul bacino per l'evento considerato e contestualmente è noto il valore di precipitazione restituito dalle curve di probabilità pluviometrica del progetto VAPI al dato periodo di ritorno $h_{T,VAPI}$. In questo modo, è possibile definire per ogni valore d un rapporto di scala

$$sf(T, d) = h_{VAPI}(T, d) / h_{reale}^{\max}(d).$$

Fissato il periodo di ritorno T , per ogni durata di precipitazione d si seleziona sullo ietogramma medio areale il massimo di precipitazione cumulata occorso per quella durata e si trascurano tutti gli altri dati di precipitazione media areale dell'evento reale considerato. I valori di precipitazione selezionati si riscalano moltiplicando i valori dello ietogramma individuati per il fattore sf in modo da ottenere un valore di precipitazione cumulata pari al valore fornito dalla curva di possibilità pluviometrica del progetto VAPI. In questo modo, si possono costruire i dati della forzante meteo-climatica in modo da ottenere un volume di precipitazione coerente con le curve di probabilità climatica VAPI riportate in Figura 4 e Figura 5 e contestualmente una distribuzione temporale della precipitazione che ricalca l'evento reale occorso tra il 16/01/2014 ed il 20/01/2014. La totalità dell'evento di precipitazione considerato mostra una forma pluri-modale per cui all'aumentare della durata di precipitazione la finestra temporale di selezione avrà ampiezza maggiore per cui la forzante climatica assumerà una forma a complessità crescente perché tenderà ad includere sempre di più l'intero evento di precipitazione considerato. Viceversa, per piccole durate di precipitazione d l'ampiezza della finestra di selezione è ridotta e si andrà a selezionare solamente un solo picco di precipitazione.

In mancanza di studi precisi e dettagliati dell'Appennino Tosco-Emiliano, si è ritenuto ragionevole considerare tale approccio piuttosto che procedere all'uso di curve di una distribuzione temporale delle precipitazioni che siano state determinate con metodi statistici per bacini idrografici di altre aree geografiche, come fatto da Huff (1967) per il l'Illinois.

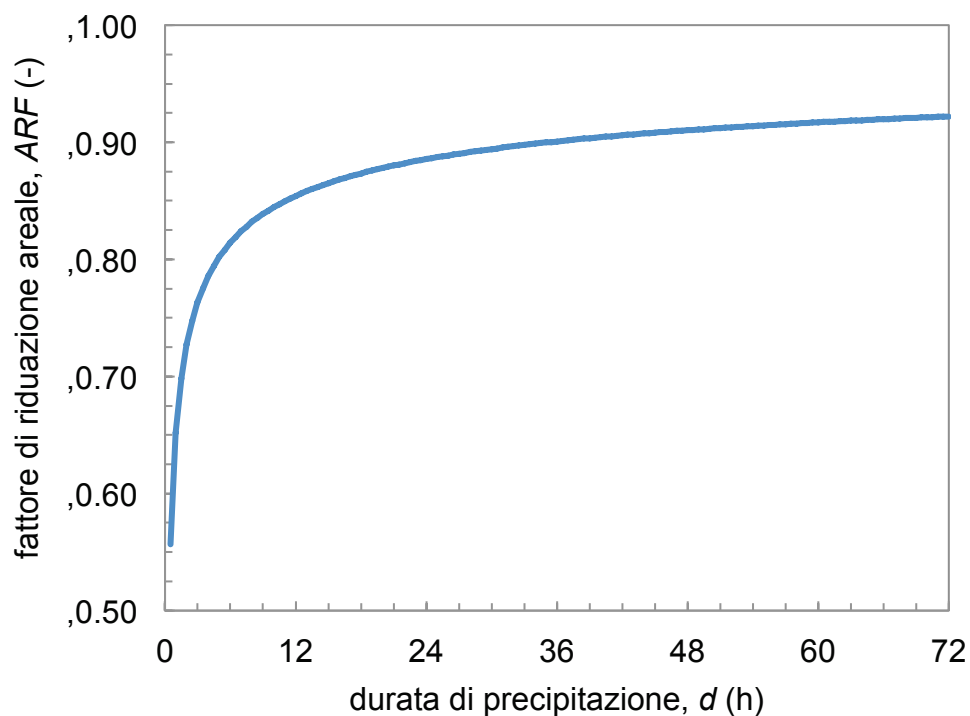


Figura 6. Fattore di riduzione areale della precipitazione per il bacino del Fiume Panaro secondo la formulazione di Koutsoyiannis (1997).

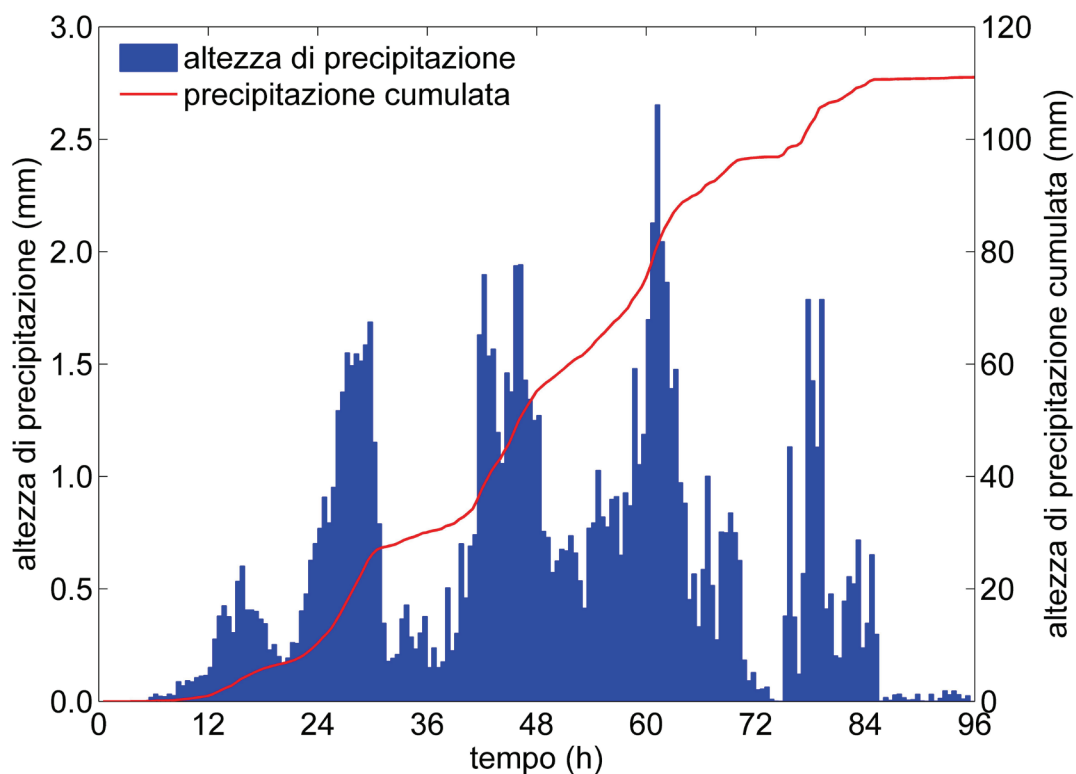


Figura 7. Ietogramma ed altezza di precipitazione cumulata medi areali per l'evento meteo verificatosi tra le 09:30 del 16/01/2014 e le 09:30 del 20/01/2014 sul bacino del Fiume Panaro. I valori sono stati calcolati applicando i poligoni di Thiessen ai dati di precipitazione puntuale registrati dai pluviometri che insistono sul bacino.

Modello idrologico del bacino idrografico: generazione dell'idrogramma di piena

La generazione dell'idrogramma di piena è simulata secondo due modelli idrologici concentrati, lineari e stazionari che considerano 1) la generazione della precipitazione efficace, e 2) la propagazione della precipitazione efficace attraverso il bacino. La precipitazione efficace è stimata con il modello SCS-CN, mentre, a cascata, la generazione dell'idrogramma di piena è simulata con il modello cinematico con velocità di corrivazione uniforme e costante sul bacino.

Il modello SCS-CN consente di valutare la risposta del bacino idrografico alla sollecitazione climatica conoscendo i dati di uso e tipo di suolo, grado imbibizione iniziale dei suoli del bacino e precipitazione sollecitante. I dati di uso del suolo sono desunti dalla cartografia del progetto Corine così come riportato in Figura 8. I dati di tipo di suolo sono stati desunti dalla cartografia dei suoli del servizio cartografico della regione Emilia-Romagna secondo una suddivisione in 4 classi di permeabilità del suolo (da A a D). I dati di uso e tipo suolo sono stati incrociati in modo da ricavare aree ad uso e tipo di suolo omogenee a cui associare un valore dell'indice (adimensionale) di CN per ogni area omogenea. Tali aree sono state utilizzate per stimare il coefficiente CN medio per l'intero bacino idrografico pari al valore di 77.65 nella classe di imbibizione AMC3. Noto il valore CN areale medio del bacino idrografico, è possibile ricavare il volume di massima ritenzione d'acqua del suolo secondo la seguente formulazione

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Dove S è espresso in mm. Noto S , attraverso l'equazione concettuale del metodo, è possibile stimare il valore di precipitazione efficace P_e secondo la formulazione

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a}$$

dove P è la precipitazione totale in mm, ed I_a è la sottrazione iniziale di acqua in mm causata dall'immagazzinamento superficiale di acqua dovuto al ristagno. La sottrazione iniziale è abitualmente stimata sulla base del valore di S secondo un coefficiente di scala λ come

$$I_a = \lambda S$$

Il coefficiente λ rappresenta il fattore di proporzionalità della sottrazione iniziale con la ritenzione idrica del suolo del bacino idrografico ed è stato oggetto di calibrazione. Il metodo SCS-CN utilizza un valore standard di 0.2, ma in fase di ottimizzazione dei parametri del modello SCS-CN è stato ottenuto un valore di 0.05. Tale valore risulta in linea con recenti studi di validazione del modello SCS-CN così come evidenziato, per esempio, da Hawkins (2002).

Uso del Suolo

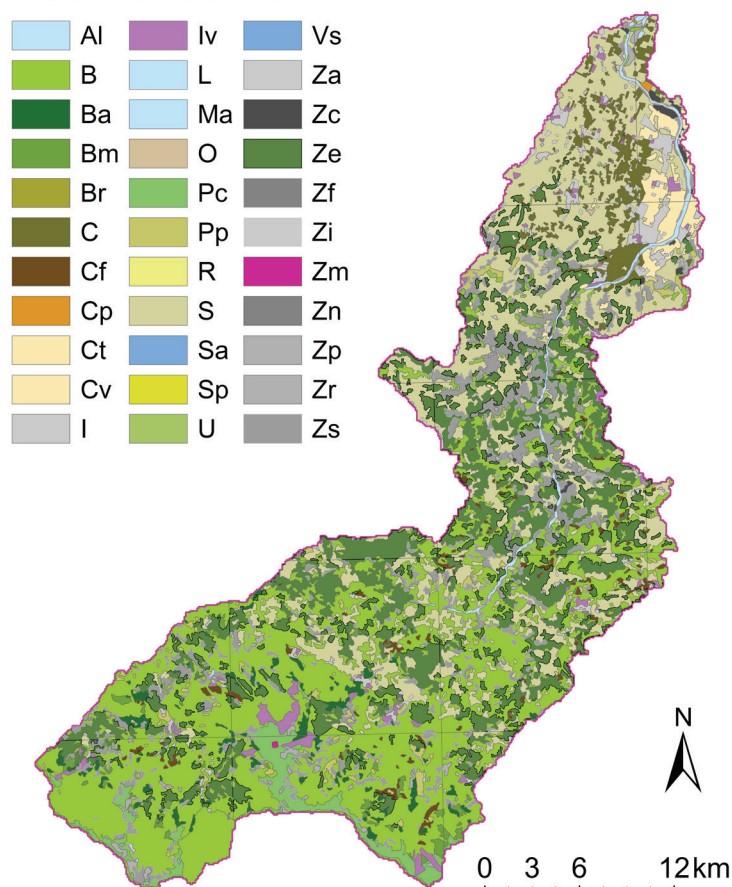


Figura 8. Classificazione dell'uso del suolo sul bacino del Fiume Panaro secondo i dati di rilevamento del progetto Corine 2006.

La propagazione del volume di precipitazione efficace ottenuto applicando il modello SCS-CN è stata simulata con il modello lineare e stazionario della corrivazione applicando una velocità di corrivazione uniforme e costante sul bacino idrografico di 1.75 m s^{-1} che conferisce un tempo di corrivazione del bacino pari a 15.2 h. Il valore della velocità di corrivazione è stato calibrato per i più significativi eventi di piena a partire dal 2011 ad oggi. Tale determinazione ha consentito la stima del diagramma area di monte drenata-tempo di corrivazione ($A-t$) così come mostrato in Figura 9 ed il corrispondente idrogramma unitario istantaneo IUH riportato in Figura 10. La forma dell'idrogramma unitario istantaneo è plurimodale in quanto sono rilevanti i contributi laterali che raggiungono la sezione di chiusura in tempi tra loro sfalsati. Il reticolo di drenaggio del bacino idrografico è stato estratto sul modello digitale del terreno con il metodo D8-LTD sviluppato internamente dal Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari (Orlandini et al., 2003; Orlandini et al., 2009; Orlandini et al., 2014). Il modello digitale del terreno utilizzato per l'estrazione del reticolo di drenaggio ha una risoluzione di 90 m, questo dato è di pubblico dominio ed è stato rilevato durante il progetto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) dalla NASA.

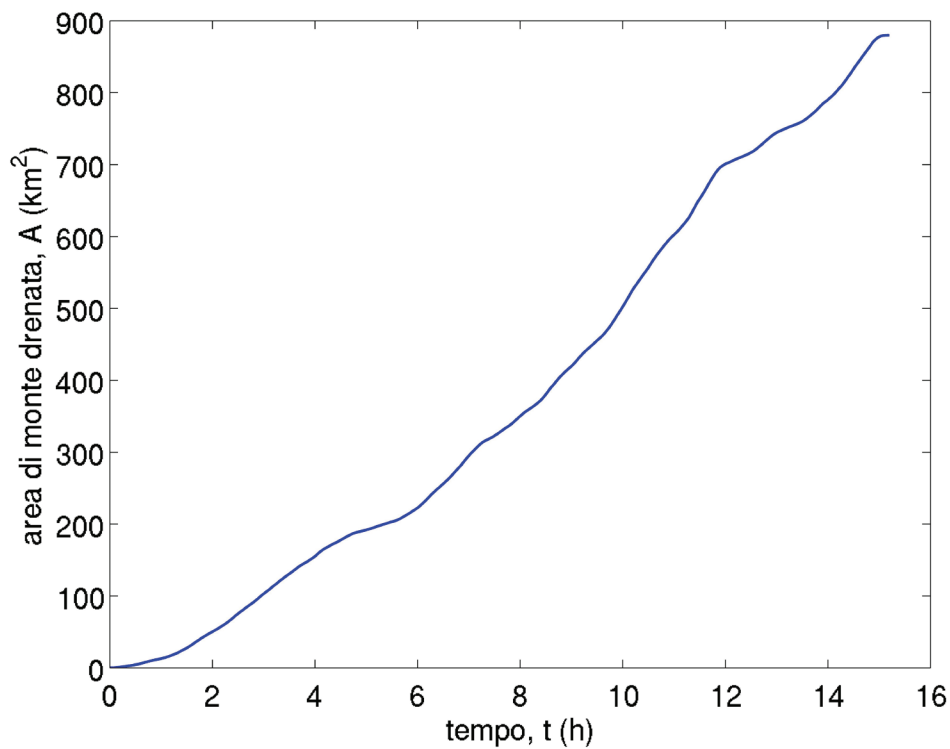


Figura 9. Curva tempo di corrivazione-area di monte drenata del bacino del Fiume Panaro ottenuto considerando una velocità media di corrivazione di 1.75 m s^{-1} uniforme su tutto il bacino.

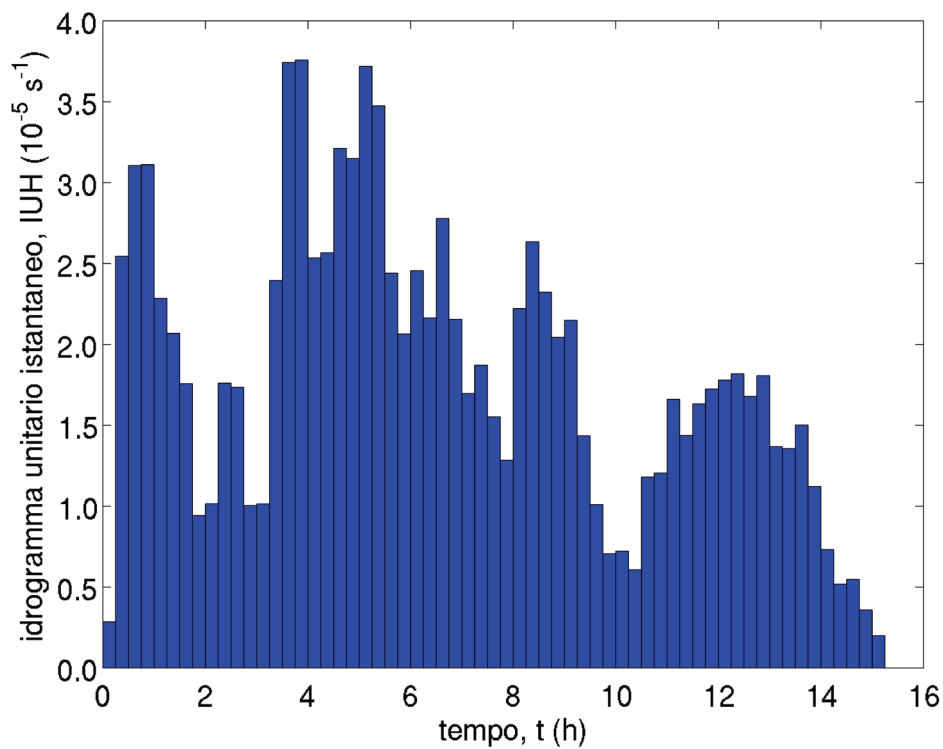


Figura 10. Idrogramma unitario istantaneo del bacino del Fiume Panaro ricavato con il metodo cinematico utilizzando una velocità media di corrivazione uniforme nello spazio di 1.75 m/s .

Cassa di Espansione

La cassa di espansione di Sant'Anna sul Fiume Panaro si compone di due invasi che possono essere modellati opportunamente con l'equazione di continuità

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t, H)$$

in cui la variazione nel tempo t del volume d'acqua S immagazzinato nell'invaso dipende dalla differenza tra l'idrogramma in ingresso I e quello in uscita Q . In Figura 11 è riportato uno schema della struttura di un generico invaso per il controllo delle piene in cui si possono identificare la quota del fondo degli scarichi di fondo H_B , la quota del coronamento del manufatto regolatore principale H_S , la quota del pelo libero H , il volume immagazzinato nell'invaso S , la quota del coronamento dell'arginatura H_L , la portata in ingresso I e la portata in uscita Q composta dalla portata in uscita dagli scarichi di fondo Q_g e dallo sfioratore superficiale Q_s .

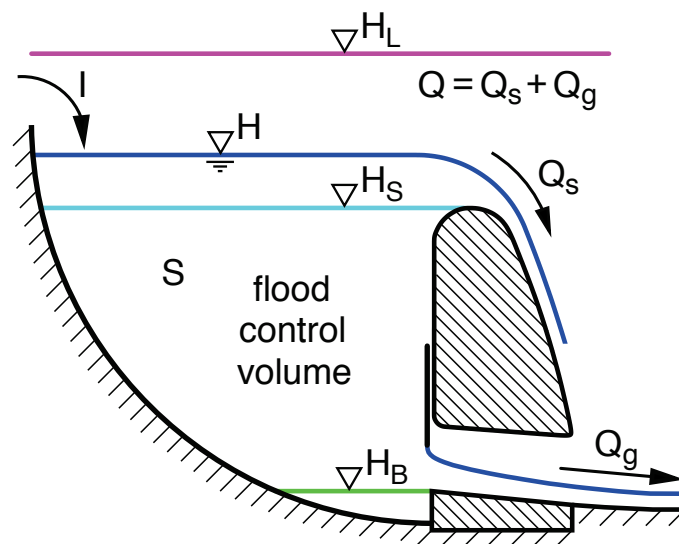


Figura 11. Schema concettuale del funzionamento di una cassa di espansione.

La cassa di espansione di Sant'Anna presenta un invaso sussidiario dotato di arginatura interna sormontabile a quota H_{L2} inferiore del coronamento dell'arginatura maestra H_L ed uno sfioratore laterale a quota H_{S2} inferiore della quota di sfioro del manufatto regolatore principale H_S . L'invaso della cassa sussidiaria comunica con l'invaso principale mediante una condotta a sezione circolare munita di valvola di non ritorno tipo *clapet*. La soluzione dell'equazione di continuità applicata alla cassa di espansione richiede la definizione della geometria idraulica dell'invaso e dei manufatti che lo costituiscono a cui si aggiunge la definizione delle due curve caratteristiche: la curva dell'invaso e la legge di deflusso dal manufatto regolatore principale.

La geometria idraulica della cassa di espansione effettivamente costruita differisce leggermente da quanto stabilito in fase progettuale. In Tabella 4 si riportano i valori di alcune grandezze caratteristiche della cassa di espansione relative alla geometria dell'opera. I dati utilizzati nel modello sono il risultato della sintesi di diverse fonti dei dati: modelli digitali del terreno ricavati da rilievi LiDAR effettuati negli ultimi 10 anni e rilievi topografici disponibili. Si segnala che generalmente i dati relativi alla geometria della cassa di espansione e dell'asta fluviale di valle risultano frequentemente non coerenti tra loro con differenze che mediamente oscillano di circa 30 cm con differenze massime che possono essere anche di 1 m. Per ridurre le incertezze legate alla modellazione numerica del sistema è necessario predisporre un rilievo di dettaglio unitario che metta in relazione relativa tra loro la geometria delle opere del sistema fluviale e degli idrometri installati in modo che siano coerenti tra loro.

Tabella 4. Dati della geometria della cassa di espansione utilizzati per lo studio.

Dato	Valore
Quota del fondo degli scarichi, H_B (m slm)	29.28
Altezza degli scarichi di fondo, h_l (m)	2.80
Larghezza degli scarichi di fondo, L_l (m)	7.00
Quota di sfioro del manufatto principale, H_S (m slm)	40.95
Larghezza netta dello sfioro del manufatto principale, L (m)	150.00
Quota di sfioro dello sfioratore laterale, H_{S2} (m slm)	40.12
Larghezza netta di sfioro dello sfioratore laterale, L_2 (m)	300.00
Lunghezza dell'argine interno, LA (m)	1550.00
Quota del coronamento dell'arginatura maestra, H_L (m slm)	44.85

Scala di deflusso dal manufatto principale

La scala di deflusso dal manufatto regolatore principale lega il livello di invaso H con la portata uscente Q ed è stata determinata mediante uno studio su modello fisico in scala 1:50 al laboratorio idraulico AIPO di Boretto (Mignosa et al., 2011). Sono state definite quattro configurazioni di operatività degli scarichi di fondo corrispondenti a 2, 3, 4 e 5 luci completamente aperte sulla base delle quali sono state determinate 4 scale di deflusso come riportato in Figura 12. Il modello fisico costruito presso il laboratorio di Boretto utilizza la geometria di progetto del manufatto regolatore (Tabella 4) per cui le relazioni stimate dal modello idraulico sono state adattate alla geometria misurata con il rilievo MOME 2012 ed il risultato è mostrato in Figura 12.

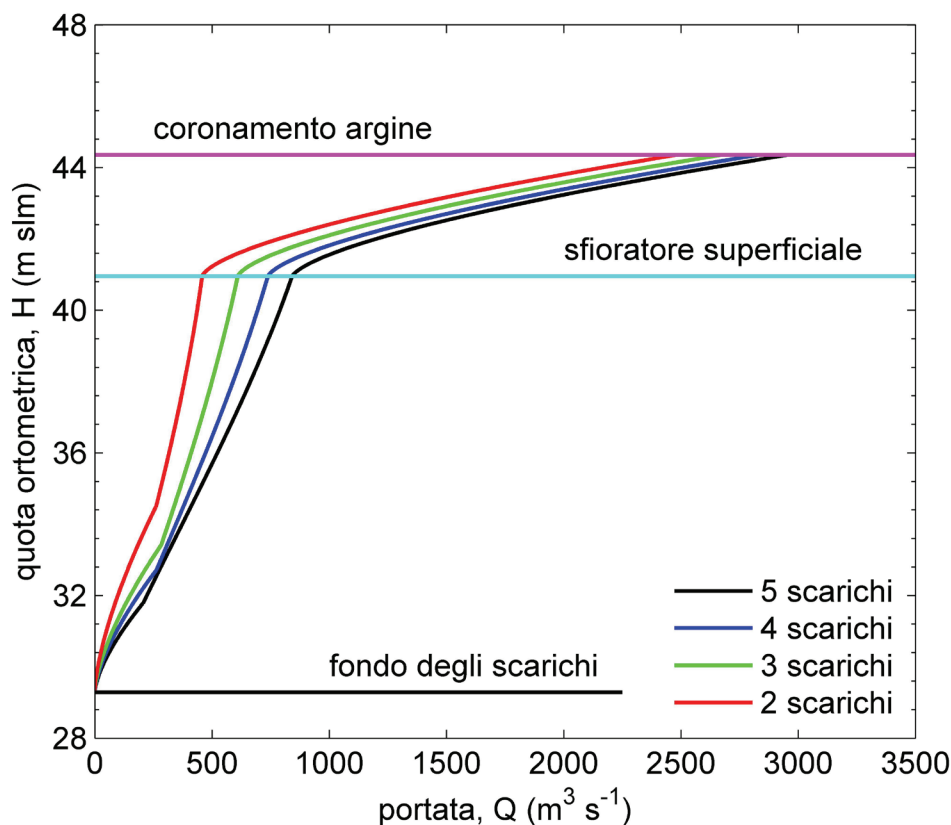


Figura 12. Legge di efflusso dal manufatto regolatore principale della cassa di espansione di Sant'Anna secondo quanto ricavato dalle prove sperimentali su modello fisico predisposto al laboratorio AIPO di Boretto.

Per ricavare la legge di deflusso dal manufatto regolatore è stato necessario definire le condizioni di valle in quanto l'uscita della cassa risente delle condizioni di rigurgito dell'asta fluviale di valle. La portata in uscita risulta una funzione del livello idrico nell'invaso e del livello nell'alveo di valle che di fatto limita la portata uscente. Il primo studio ha consentito di determinare la legge di deflusso dal manufatto regolatore, ma le condizioni di valle utilizzate sottostimano l'impatto del rigurgito da valle per cui è stato necessario predisporre un secondo studio che valutasse più correttamente tale influenza (Mignosa et al. 2011 e 2015). Nel presente studio non sono state considerate le nuove curve ricavate con lo studio più recente (Mignosa et al. 2015), ma è stato definito un coefficiente moltiplicativo medio della portata effluente dal manufatto di 0.75 per considerare al meglio la riduzione di portata data dall'effetto di rigurgito del livello di valle. La legge di efflusso utilizzata è stata dedotta attraverso la ricostruzione di eventi osservati negli anni a partire dal 2010 ed è stata periodicamente verificata ad ogni nuovo evento di piena verificatosi. Tale legge risulta in ragionevole accordo con i risultati di laboratorio forniti a gennaio 2016 (Mignosa et al., 2015). La ricostruzione della legge di efflusso è stata effettuata per la configurazione con cinque paratoie mobili operative, mentre non è stato possibile ricostruire in modo analogo la legge per le altre configurazioni. Si è ritenuto che l'effetto di riduzione della portata effluente sia paragonabile anche per le altre configurazioni di operatività degli scarichi di fondo del manufatto regolatore.

Curva dell'invaso

La curva di invaso della cassa di espansione è una relazione che collega il livello di invaso H con il volume invaso S è stata ottenuta utilizzando il modello digitale del terreno ricavato dal rilievo Lidar 2015 con risoluzione 50 cm. Data la geometria della cassa di espansione, è stato necessario definire tre curve di invaso così come riportato in Figura 13: 1) la curva relativa all'invaso principale in linea, 2) la curva dell'invaso sussidiario fuori linea, e 3) la curva totale che consideri entrambi gli invasi. Nelle elaborazioni delle curve di invaso è stata considerata la presenza di volumi interni all'invaso principale che collaborano al volume di immagazzinamento solo quando viene superata la quota dell'arginello che li protegge. Per tale ragione, la curva dell'invaso principale riportata in Figura 13 presenta un aumento repentino del volume immagazzinato in prossimità delle quote di "attivazione" dei volumi interni.

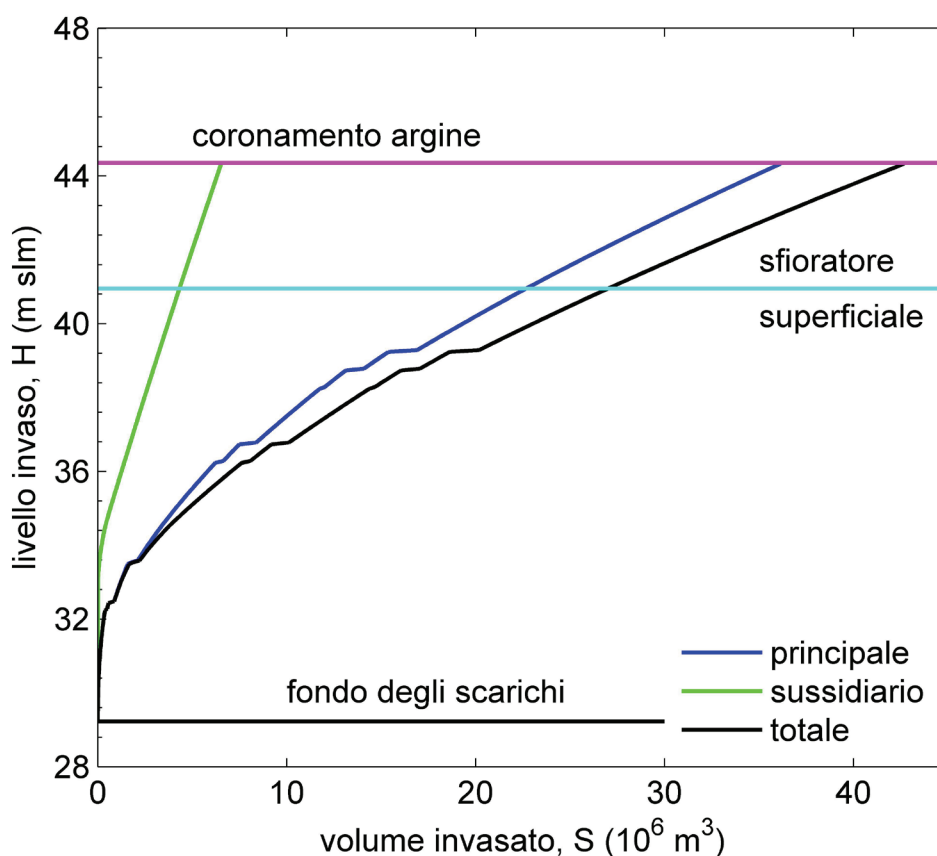


Figura 13. Curva dell'invaso ricavata dall'elaborazione del modello digitale del terreno a risoluzione 50 cm ottenuto dal rilievo Lidar del 2015

Secondo tali elaborazioni, alla quota di sfioro del manufatto principale $H_S = 40.95 \text{ m slm}$ corrispondono un volume immagazzinato di $22.687 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ nell'invaso in linea, $4.328 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per l'invaso sussidiario fuori linea ed un invaso totale di $27.015 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. I volumi invasati con un franco di 1.67 m rispetto alla sommità arginale di 44.85 m slm (quota 43.18 m slm) risultano di 31.342, 5.779, $37.121 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ rispettivamente per l'invaso in linea, fuori linea e totale.

Il modello numerico utilizzato per la descrizione del funzionamento idraulico della cassa di espansione risolve l'equazione di continuità sulla quota del pelo libero di invaso H con un metodo di Runge-Kutta del quarto ordine. Le curve caratteristiche utilizzate sono riportate in Figura 12 e Figura 13 ed i dati geometrici utilizzati sono stati quelli della geometria misurati con il rilievo MOME 2012. Il modello consente di gestire le fasi di riempimento dell'invaso fuori linea in cui la portata che effluisce dall'invaso in linea a quello sussidiario attraverso lo sfioratore interno tiene conto del grado di sommergenza DOS come fattore di riduzione della portata sfiorata. Il livello dell'invaso fuori linea H_2 viene stimato iterativamente con il metodo della bisezione ed una volta che i livelli dei due invasi si possono ritenere equiparabili (bassi valori di DOS) il sistema si comporta come un unico serbatoio.

Nel modello è possibile inserire un criterio di regolazione della portata, per cui questa può essere limitata ad un valore massimo fino a quando il fenomeno può essere regolato. Tale implementazione consente di valutare gli effetti di una regolazione ottimale delle paratoie per predisporre un piano di laminazione della cassa di espansione. La regolazione si attiva quando la portata supera il valore obiettivo e viene mantenuta fino alla quota di sfioro del manufatto regolatore principale H_S . Superata la quota di sfioro, le paratoie sono ancora manovrabili, ma si innesca lo sfioratore superficiale. La regolazione si ritiene soddisfatta fino al raggiungimento della quota per cui la portata obiettivo si ottiene esclusivamente con lo sfioratore superficiale in quanto le paratoie degli scarichi di fondo si considerano completamente chiuse. Superato questo livello la portata uscente non è più regolabile ed il sistema fallisce oltrepassando il valore obiettivo di regolazione. Per come è stato implementato il modello, le paratoie una volta chiuse non vengono più aperte se non per consentire lo svuotamento dell'invaso nella fase di recessione dell'evento o per garantire il livello massimo in corrispondenza del quale viene soddisfatto il franco di sicurezza rispetto alla sommità delle arginature principali della cassa.

Il modello numerico della cassa di espansione di Sant'Anna è stato utilizzato per definire l'idrogramma di piena rilasciato nell'asta fluviale di valle in modo da valutare gli effetti in termini di franchi di sicurezza e persistenza dei livelli idrici. Gli idrogrammi di piena in ingresso al modello di funzionamento della cassa di espansione sono stati stimati con il modello idrologico del bacino di monte sollecitato secondo diverse durate e periodi di ritorno delle curve di probabilità climatica VAPI. Il modello numerico di descrizione del funzionamento della cassa di espansione risulta in cascata in sequenza al modello idrologico del bacino idrografico di monte del Fiume Panaro.

Asta Fluviale a Valle della Cassa di Espansione

L'asta fluviale a valle della cassa di espansione di Sant'Anna è stata descritta con il modello numerico HEC-RAS al fine di valutare la propagazione dell'onda di piena. L'idrogramma in ingresso al sistema fluviale vallivo considerato è l'idrogramma in uscita dal modello di funzionamento della cassa di espansione di Sant'Anna. Il modello HEC-RAS utilizzato è la versione 4.1.0 per la soluzione numerica dell'equazione dinamica di de-Saint Venant 1-D. Nel modello numerico è stata implementata una geometria fluviale con la confluenza del Torrente Tiepido in località Fossalta, mentre non è stata implementata la confluenza del Naviglio a Bomporto.

Modello idraulico di propagazione dell'onda di piena in HEC-RAS

La geometria idraulica del modello deve essere definita con accuratezza in termini di sezioni fluviali e di manufatti presenti lungo l'alveo che possano interagire con la propagazione dell'onda di piena. Le sezioni fluviali sono stati definite a partire dal modello digitale del terreno (DEM) a risoluzione 50 cm elaborato da un rilievo LiDAR condotto a marzo-aprile 2015. Il modello numerico propaga l'onda di piena in una sola dimensione, quindi è necessario definire le sezioni in modo che risultino perpendicolari alla direzione dei flussi. Per tale ragione le sezioni risultano avere una forma detta "a zampa di cane" come mostrato dalle tracce verdi nella rappresentazione sinistra mostrata in Figura 14.

La geometria del sistema fluviale di valle è arricchita ulteriormente con la definizione della geometria delle opere d'arte idrauliche che interferiscono con la propagazione delle acque come possono essere, ad esempio, i ponti. A titolo di esempio è riportato il ponte di Sant'Ambrogio in alto a destra nella Figura 14. La geometria delle opere d'arte è inserita considerando, quando possibile, i dati di progetto delle opere stesse aggiornati da rilievi topografici effettuati in campo ed aiutati dall'analisi di fotografie aeree dell'opera. Sono state considerate solo le opere di cui si ritiene significativa l'interazione con la propagazione delle acque così come elencato in Tabella 5.

Il modello HEC-RAS considera le progressive delle sezioni lungo il thalweg a partire da valle fino a monte. Il tratto di Fiume Panaro implementato va a ritroso dalla confluenza con il Fiume Po fino all'uscita dalla cassa di espansione per un totale di 67.502 km circa di asta fluviale, mentre per il Torrente Tiepido l'asta fluviale implementata va dalla confluenza nel Panaro a Fossalta fino al ponte di San Donnino sulla strada Gherbella per un totale di 5.708 km. Per ogni sezione sono state definite tre aree distinte tra loro da diversi coefficienti di conduttanza (di Strickler) o resistenza (di Manning) idraulica secondo la suddivisione in canale centrale di alveo attivo (*channel*) e due aree laterali di golena (*left overbank* e *right overbank*). In aggiunta sono stati definiti i punti di massima elevazione del rilevato arginale sia in destra che sinistra idraulica. Complessivamente l'asta fluviale del Fiume Panaro è stata suddivisa in 918 sezioni e 12 ponti, mentre il Torrente Tiepido è implementato di 121 sezioni ed 1 ponte. La distanza media delle sezioni del Fiume Panaro è di 73.53 m; vice versa per il Torrente Tiepido è di 47.79 m.

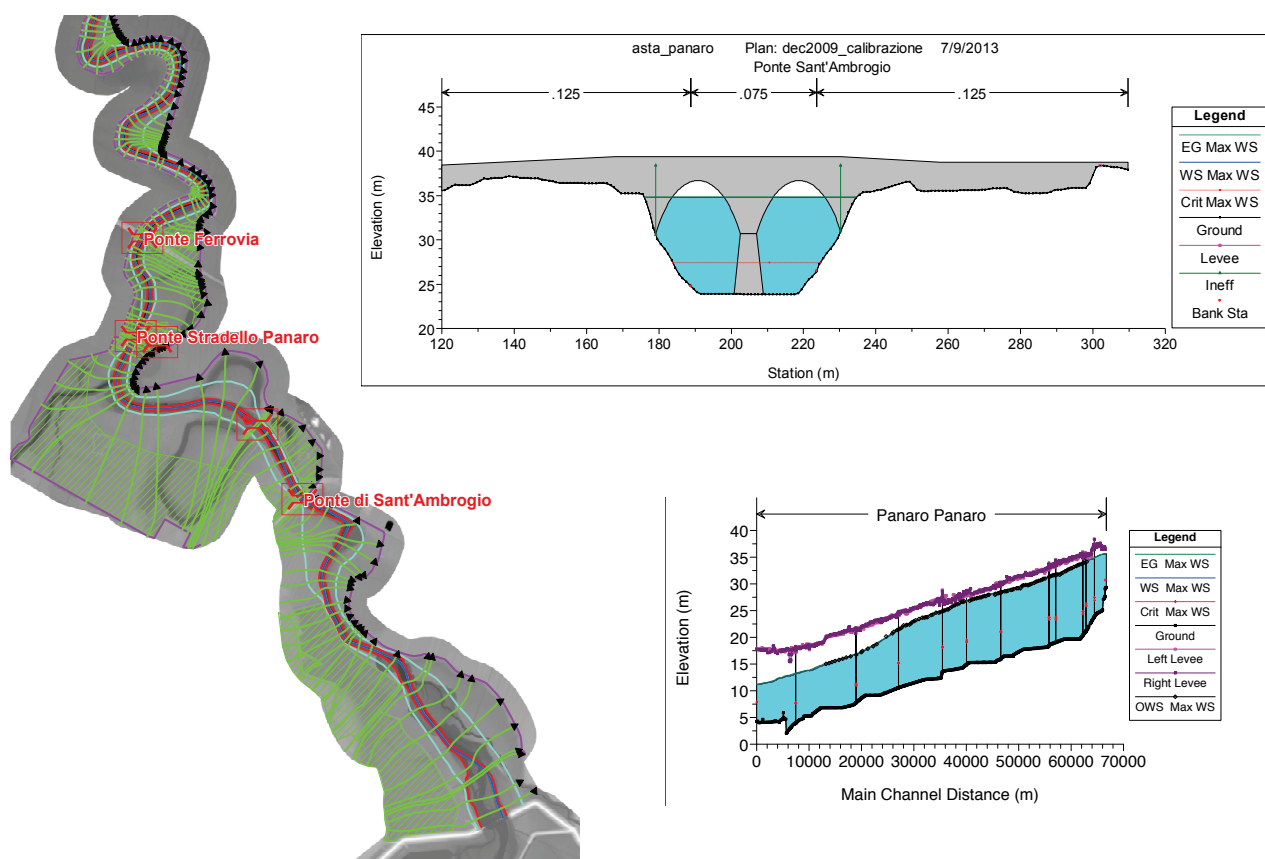


Figura 14. Schema dell'implementazione dell'asta fluviale a valle della cassa di espansione di Sant'Anna nel modello numerico HEC-RAS. A sinistra sono riportate le tracce delle sezioni fluviali utilizzate per definire la geometria idraulica nel tratto principale del Fiume Panaro tra il manufatto regolatore principale della cassa di espansione di Sant'Anna ed il ponte della ferrovia Modena-Bologna. In alto a destra è rappresentata l'implementazione del Ponte di Sant'Ambrogio, mentre in basso a destra è riportato l'involuppo dei massimi livelli dell'onda di piena verificatesi nel periodo 24-29 dicembre 2009.

Tabella 5. Ponti implementati nel modello HEC-RAS con la rispettiva posizione lungo la progressiva delle rispettive aste fluviali in cui sono localizzate le opere.

Nome Ponte	Distanza progressiva HEC-RAS (m)	Asta Fluviale
Sant'Ambrogio	65228.36	Panaro
Stradello Modena	63600.69	Panaro
Ferrovia Modena-Bologna	63019.96	Panaro
Ponte di servizio TAV	57842.87	Panaro
Navicello	56551.73	Panaro
Bomporto	47350.36	Panaro
Solara	40819.95	Panaro
Camposanto	36223.98	Panaro
Ca' Bianca	27841.92	Panaro
Finale Emilia	19728.08	Panaro
Bondeno, via Virgiliana	8222.71	Panaro
Bondeno	7424.62	Panaro
Ponte di Fossalta	776.33	Tiepido

Il modello numerico di propagazione implementato in HEC-RAS è stato calibrato considerando il picchettamento della piena del 24-29 dicembre 2009, la piena del 11-12 novembre 2012 e gli eventi di piena verificatisi in successione tra il 20 dicembre 2013 ed il 4 febbraio 2014. L'esito della calibrazione del modello numerico ha consentito la stima dei valori dei coefficienti di Manning n lungo l'asta fluviale. I risultati hanno portato alla definizione di valori di n variabili nello spazio lungo il corso d'acqua in funzione delle caratteristiche della vegetazione presente in alveo e delle caratteristiche morfodinamiche locali dell'asta fluviale. I valori di Manning diminuiscono da monte verso valle e sono compresi tra un massimo di 0.075 ed un minimo di $0.035 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ per l'alveo attivo e tra un massimo di 0.125 ed un minimo di $0.075 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ per le aree golenali in destra e sinistra.

Modello digitale del terreno

Il profilo delle sezioni fluviali è stato tracciato a partire da un modello digitale del terreno a risoluzione 0.50 m ottenuto da un rilievo LiDAR eseguito nel marzo/aprile 2015. Tale modello digitale del terreno rappresenta la geometria del terreno con un'elevata risoluzione per cui è stato possibile definire nel dettaglio la geometria delle sezioni fluviali con una distanza media tra le sezioni contenuta e, conseguentemente, un elevato numero di sezioni modellate. In questo modo è stato possibile definire con grande accuratezza l'intera geometria idraulica fluviale del Fiume Panaro e del Torrente Tiepido.

Analizzando i dati ottenuti dal rilievo LiDAR si evidenzia tuttavia la presenza di elevati livelli idrici lungo tutta l'asta fluviale tale per cui si è dovuti procedere alla correzione delle sezioni fluviali considerando i rilievi batimetrici condotti da AIPO nel corso del 2011. Le informazioni riguardo la batimetria sono state eseguite applicando una correzione del modello digitale del terreno nella porzione dell'alveo fluviale che risulta sommersa dall'acqua. Infatti con il rilievo LiDAR è impossibile valutare la quota delle porzioni di terreno sommerse. Disponendo del rilievo condotto nel 2011 effettuato con tecniche tradizionali, è stato possibile quindi, tramite interpolazione lineare, correggere le informazioni di quota relative alle parti di terreno sommerse. In questo modo all'informazione dettagliata del terreno per le parti di territorio emerse, si aggiungono le informazioni disponibili al 2011 di andamento del profilo delle sezioni fluviali delle parti sommerse al tempo del rilievo LiDAR.

L'andamento della geometria fluviale delle parti sommerse potrà aver subito una naturale evoluzione nel corso dei 4 anni intercorsi tra i due rilievi, ma trattandosi della porzione di alveo attivo, si può ritenere che tale porzione di sezione fluviale presenti caratteristiche geometriche che non hanno subito grosse variazioni temporali. Tale ipotesi è avvalorata dal fatto che la porzione di alveo attivo in genere non è interessata da importanti fenomeni di sedimentazione come invece può accadere per le aree golenali in cui i sedimenti possono modificare significativamente la geometria della sezione.

Analisi del Corpo Arginale

Al fine di studiare l'interazione tra le onde di piena rilasciate dalla cassa di espansione e le arginature dell'alveo a valle è stato predisposto per un certo numero di sezioni arginali un modello matematico bidimensionale sul piano verticale di filtrazione. Tali modelli sono stati realizzati con il software di calcolo agli elementi finiti Feflow, sviluppato e distribuito da DHI-WASY, che permette la soluzione delle equazione di Richards per i suoli insaturi in condizioni di moto vario.

Definizione delle sezioni critiche

La scelta delle sezioni è stata effettuata analizzando il Modello Digitale del Terreno a 0.5 m x 0.5 m, prendendo in esame quelle che per sagoma, dislivello tra sommità arginale e piano campagna al piede della schiena dell'argine, prossimità di centri abitati, risultavano essere le più critiche. In generale quindi per quanto riguarda la sagoma, si sono scelte le sezioni in cui non vi fosse la presenza di una banca a campagna o la cui larghezza fosse esigua; per quanto riguarda il dislivello invece, si sono scelte sezioni in cui vi fosse un elevato dislivello tra sommità arginale e piano campagna. Infine si sono scelte sezioni che soddisfacessero i criteri precedentemente menzionati e che nello stesso tempo fossero in prossimità di centri abitati. Da questa analisi si è comunque rilevato che le tipologie arginali lungo tutto il corso del Panaro dalla cassa di espansione fino alla confluenza con il fiume Po sono piuttosto varie e disomogenee: si alternano tratti in cui è presente una banca a campagna a tratti in cui l'arginatura è particolarmente esigua in spessore. Inoltre, in prossimità dei centri abitati, che sono addossati ai rilevati arginali, le sezioni generalmente manifestano le larghezze inferiori in quanto la presenza di edifici contigui alle arginature ne ha evidentemente impedito storicamente uno sviluppo in larghezza contestuale a quello in altezza.

Definizione dei parametri idraulici

Per la definizione dei parametri idraulici caratterizzanti le arginature si sono utilizzati risultati ottenuti dalle indagini geognostiche effettuate da Elletipi per conto di AIPO nella primavera del 2015 e dalle prove effettuate su campioni dell'arginatura del Secchia nell'ambito degli studi della commissione omonima per lo studio delle cause della rottura arginale del Gennaio 2014. Sono state comparate le granulometrie dei provini relativi agli strati più superficiali, quelli che interessano il rilevato arginale del Panaro o le sue zone di imposta, risultanti dai sondaggi a carotaggio continuo del 2015 con le granulometrie dei provini delle arginature del Secchia analizzati nel 2014. Pur nella variabilità insita nelle terre costituenti rilevati arginali costruiti per ampliamenti successivi durante alcuni secoli, da questa analisi comparativa si è evidenziata una certa omogeneità tra i materiali delle arginature del fiume Panaro e quelle del fiume Secchia. Per estensione quindi, in assenza di prove più dettagliate per le arginature del fiume Panaro, si sono utilizzati per esse, considerate omogenee ed isotrope, i parametri medi delle equazioni costitutive di Van Genuchten utilizzati negli studi della Commissione Secchia.

Tutte le sezioni fluviali prese in considerazione per tale analisi sono state modellate in Feflow estendendo il dominio di calcolo di 150 m sia in destra idraulica sia in sinistra idraulica ed in profondità di 30 m dal piano campagna. Tale estensione del dominio è sufficiente perché la zona di interesse non risenta delle condizioni al contorno. La condizione iniziale riportata in Figura 15 è stata prodotta eseguendo una simulazione di 365 giorni partendo da una condizione di falda orizzontale e imponendo nell'alveo per ciascuna sezione il battente corrispondente ad un profilo di moto permanente con una portata di $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Tale procedura è stata applicata a tutte le sezioni considerate in questa analisi. In queste simulazioni preparatorie, la condizione iniziale di falda orizzontale omogenea su tutta la sezione è stata definita 1.5 metri al di sotto del piano campagna. Nelle sezioni dove vi è differenza in quota tra il piano campagna in destra ed in sinistra idraulica, il livello della falda freatica è stato considerato 1.5 metri al di sotto del piano campagna sul lato della sezione dove è situato alla quota più bassa. Data l'estensione degli acquiferi della bassa pianura rispetto alla dimensione del fiume, si è ipotizzato che, a prescindere dall'effetto drenante o alimentante del fiume, in funzione dei battenti che vi si instaurano, la falda freatica si estenda in modo omogeneo su tutta la sezione. Il valore di 1.5 metri è stato scelto analizzando le misure dei livelli di falda effettuate dalla Regione Emilia Romagna e riportate sul portale FaldaNET-ER. Inoltre è stata poi verificata la congruità di tale livello con la piena occorsa nel dicembre 2009. Utilizzando tale livello di falda per le sezioni più critiche si è visto che durante il transito della piena del dicembre 2009 si è verificata la saturazione dei corpi arginali senza però l'emersione del fronte saturo al piede dell'argine a lato campagna. Poiché in tale evento non si sono manifestati fenomeni di risorgiva o fontanazzi si può presumere che il livello di falda a 1.5 metri dal piano campagna possa essere considerato un valore contemporaneamente cautelativo e rappresentativo della quota a cui si attestano i livelli di falda. Per completezza sono state effettuate verifiche con livelli di falda a quote inferiori e superiori, tali prove hanno messo in evidenza come livelli di falda a quote superiori, ad esempio un metro sotto il piano campagna, portino alla saturazione delle arginature e delle zone a campagna limitrofe anche per eventi in cui questi fenomeni non si sono verificati, viceversa per quote di falda inferiori sia difficile raggiungere la saturazione in sezioni dove si è verificata. Una volta definite le condizioni iniziali, il modello di filtrazione di ciascuna sezione è stato corredato da condizioni al contorno. In corrispondenza dell'alveo, ai nodi al contorno della griglia di calcolo è stata associata una condizione di carico imposto variabile nel tempo pari al battente idrico che si instaura al transito dell'onda di piena. In ciascuna sezione l'idrogramma è stato ottenuto propagando nel modello idraulico monodimensionale dell'asta fluviale del Fiume Panaro descritto in precedenza, l'idrogramma in uscita dalla cassa, tra tutti i calcolati, caratterizzato da una portata massima pari a $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e il maggior tempo di permanenza della portata al di sopra del valore di $450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

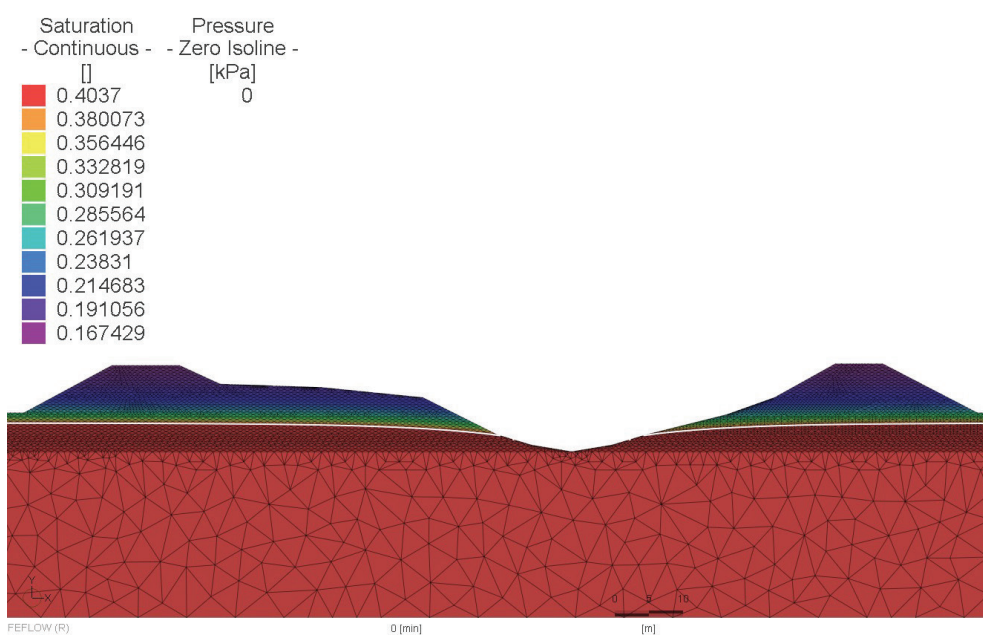


Figura 15. Contenuto idrico volumetrico iniziale di una delle sezioni prese in considerazione per l'analisi dei moti di filtrazione. Tale configurazione è stata ottenuta eseguendo una simulazione di 365 giorni partendo da una condizione di falda costante a 1.5 m sotto il piano campagna e un livello nel fiume corrispondente al transito di una portata di magra pari a $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Risultati ottenuti

Le analisi condotte hanno permesso di definire un quadro di insieme del sistema fluviale e degli idrogrammi che lo possono sollecitare; è seguita poi un'analisi di fallanza del sistema sia nello stato attuale che nel caso in cui si effettuasse una regolazione attiva delle paratoie mobili degli scarichi di fondo per mitigare il rischio idraulico. Gli idrogrammi rilasciati dalla cassa di espansione sono stati propagati nell'asta fluviale di valle per verificare la sicurezza idraulica delle arginature con particolare riguardo a fenomeni di sormonto della loro sommità e alla filtrazione attraverso i rilevati. Si è quindi pervenuti alla stima del periodo di ritorno di crisi del sistema sia nel caso in cui si effettuasse un controllo attivo sia nel caso in cui si effettuasse un controllo passivo della cassa di espansione. Contestualmente, noto il profilo di propagazione dell'onda di piena rilasciata dalla cassa di espansione, è possibile definire un franco minimo di progetto al fine di garantire lungo tutto il corso d'acqua un livello di rischio idraulico omogeneo sulla base del quale impostare un'ipotesi progettuale di adeguamento della sommità arginale.

Analisi delle portate e dei volumi di piena in ingresso alla cassa di espansione

La stazione idrometrica di Spilamberto risulta attiva dal novembre 2002 per cui sono disponibili nel database DEXTER fornito da ARPAE i dati dei livelli rilevati dallo strumento di misura. Avvalendosi della scala delle portate è stato possibile determinare le massime portate annuali osservate dall'idrometro dai cui valori sono stati stimati i parametri della distribuzione di probabilità di Gumbel. Un'analisi analoga può essere condotta sulle portate simulate massime in ingresso alla cassa di espansione simulate dal modello idrologico predisposto per il presente studio, come riportato in Figura 16. I valori di portata ottenuti con l'adattamento della distribuzione alle osservazioni di Spilamberto e le portate simulate dal modello idrologico sono riportate in Tabella 6.

Tabella 6. Valori di portata con assegnato periodo di ritorno ottenuti dall'adattamento della distribuzione di probabilità di Gumbel alle portate massime osservate a Spilamberto e le massime portate simulate dal modello idrologico in ingresso alla cassa di espansione di Sant'Anna.

Periodo di ritorno, T (a)	Portata ricostruita dalle osservazioni a Spilamberto ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Portata simulata dal modello idrologico ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
5	653.030	847.249
10	825.134	1008.134
20	1002.205	1162.459
50	1249.886	1362.217
100	1440.535	1511.907
200	1632.395	1661.052
500	1901.391	1857.819
1000	2104.330	2006.532

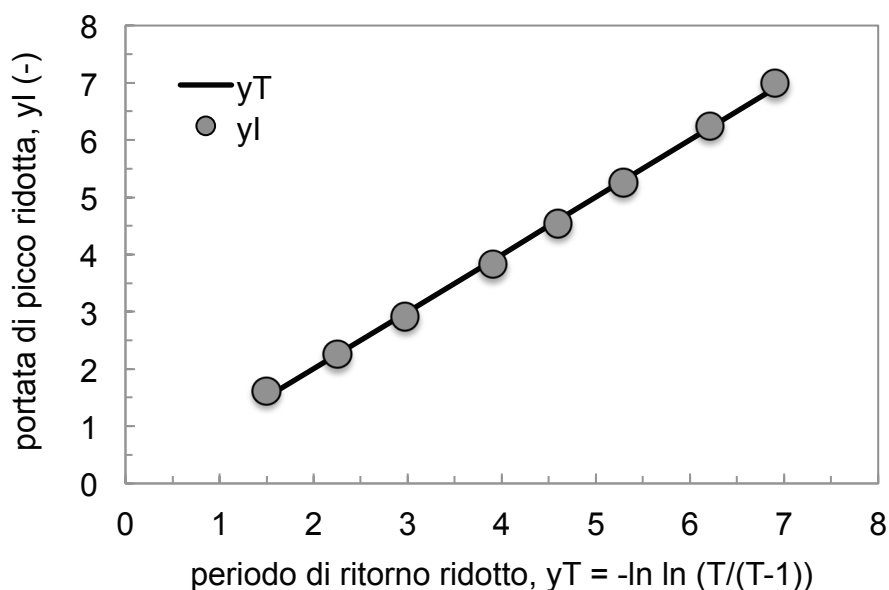


Figura 16. Adattamento dei dati della variabile ridotta relativa alla portata di picco dell'idrometro di Spilamberto (punti grigi) alla distribuzione teorica di probabilità di Gumbel (linea continua).

Date le osservazioni disponibili a Spilamberto, è possibile confrontare i massimi valori del volume di piena transitato per diverse durate d con i valori simulati con le curve di probabilità climatica VAPI utilizzando il modello idrologico (Figura 17).

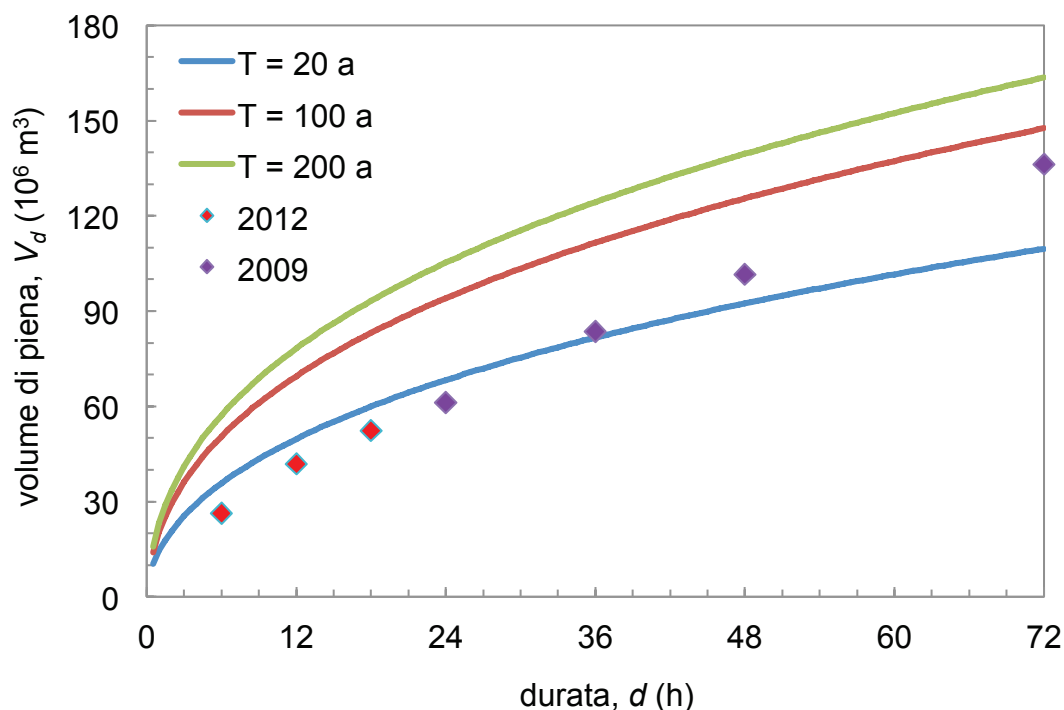


Figura 17. Confronto dei massimi volumi di piena osservati, per diverse durate, alla sezione di Spilamberto nel periodo 2003-2014 (punti) con i volumi di piena simulati considerando la risposta del modello del bacino idrografico di monte alla precipitazione data, per diverse durate di precipitazione, dalle curve di possibilità pluviometrica VAPI con periodo di ritorno pari a 20, 100 e 200 anni

Analisi di fallanza della cassa di espansione

Date le curve di possibilità climatica VAPI per gli 8 periodi di ritorno 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, e 1000 anni e diverse durate di precipitazione, si possono definire gli idrogrammi di piena generati dal bacino idrografico di monte mediante l'utilizzo del modello idrologico implementato e presentato precedentemente. Sono state considerate per ogni periodo di ritorno 144 durate di precipitazione comprese tra 0.5 e 72.0 h con un passo regolare di 0.5 h. Tali simulazioni sono state infittite generando un maggiore numero di curve di possibilità climatica per interpolazione sul piano bilogarithmico $h-d$ rappresentato in Figura 5. Partendo dalle 8 curve VAPI, sono state stimate 61 curve di probabilità climatica corrispondenti ad un periodo di ritorno pari a 10^n dove n varia tra 0 e 3 con un passo regolare di 0.05. Le nuove curve di possibilità climatica consentono di estendere il numero di simulazioni condotte ad un totale di 8784 per ogni configurazione considerata. Data la disponibilità di 4 leggi di efflusso dal manufatto regolatore principale, sono state considerate 4 configurazioni della cassa di espansione che corrispondono al caso in cui siano operative 2, 3, 4, o 5 paratoie mobili, mentre le rimanenti risultano completamente chiuse e non manovrabili. In questo modo il numero di simulazioni complessive per ogni caso studiato risulta di 35136.

Ogni simulazione consiste nella generazione dei valori di precipitazione media areale caduta sul bacino, il calcolo della precipitazione efficace con un'implementazione del modello SCS-CN, la propagazione dell'onda di piena determinata con un modello della corrivazione e la trasformazione dell'idrogramma di piena attraverso la cassa di espansione. Gli scarichi di fondo della cassa di espansione risultano manovrabili per cui sono stati analizzati diversi casi studio di regolazione ottimale della paratoie: nel caso zero non si è considerata nessuna regolazione delle paratoie, mentre gli altri otto casi studio sono ciascuno caratterizzati da una portata di regolazione ottimale Q_r rispettivamente di 400, 450, 500, 550, 600, 700, 800 e 900 $m^3 s^{-1}$. Tali portate di regolazione possono essere superate nel caso in cui gli scarichi di fondo siano completamente chiusi ed il livello dell'invaso si attesti sullo sfioratore di superficie per un'altezza maggiore di quella che determina lo scarico delle portate stesse. Considerando un numero complessivo di 35136 simulazioni per ognuno dei 9 casi studio considerati, il numero totale di simulazioni condotte per l'analisi di fallanza della cassa di espansione risulta di 316224.

L'analisi della frequenza di fallanza si basa sulla valutazione del numero di volte in cui avviene il superamento di una condizione fissata che stabilisce la soglia critica oltre la quale si verifica la crisi del sistema. Sono state portate a termine due analisi: la prima in cui la condizione soglia è stata fissata sulla portata in uscita rilasciata dal manufatto regolatore principale, la seconda invece in cui la condizione soglia è stata fissata sul livello raggiunto dall'invaso della cassa di espansione. La generica frequenza di fallanza può essere definita per ogni periodo di ritorno T e per ogni configurazione c come

$$f_T^c = \frac{N_s}{N_{tot}},$$

dove N_s è il numero di eccedenze della variabile X rispetto alla soglia X_t e N_{tot} è il numero totale di simulazioni condotte per il dato periodo di ritorno, che è pari a 144. I risultati delle simulazioni si

possono riassumere in grafici della frequenza di fallanza della cassa di espansione in cui, per ogni configurazione delle paratoie, si mette in relazione il periodo di ritorno con la fallanza del sistema.

L'analisi della fallanza del sistema consente di avere un singolo valore di frequenza di fallanza per ogni periodo di ritorno e per ogni configurazione considerata (2, 3, 4, o 5 paratoie mobili operative). Questo valore considera tutti gli eventi con durata di precipitazione compresa tra 0.5 e 72 h con un passo uniforme di 0.5 h. I valori di frequenza di fallanza possono oscillare tra 0 e 1 che indicano, rispettivamente, assenza e certezza di fallanza del sistema. Le 8 curve di probabilità climatica VAPI sono state infittite, come precedentemente descritto, in modo da avere 61 curve di probabilità climatica equispaziate sul piano bilogarithmico. Per ogni configurazione del caso studio, risulta possibile tracciare una linea di 61 punti che esprime l'andamento della frequenza di fallanza al variare del periodo di ritorno dell'evento meteo climatico simulato. Ogni punto della linea risulta la sintesi di 144 simulazioni e, conseguentemente, ogni linea è la sintesi di 8784 simulazioni.

I risultati di ciascuno dei nove casi studio sono stati riassunti in quattro grafici che mettono in relazione il periodo di ritorno e la frequenza di fallanza per controllo stazionario della portata e per controllo non stazionario. Per controllo stazionario si intende una regolazione delle paratoie passiva in cui si è fissato il grado di apertura delle paratoie che non subisce alcuna regolazione successiva durante l'evento di piena. Viceversa, per controllo non stazionario si intende una regolazione attiva ed in tempo reale delle paratoie degli scarichi di fondo al fine di contenere, finché è possibile compatibilmente con le condizioni di sicurezza delle arginature perimetrali della cassa, la massima portata in uscita dal manufatto regolatore principale entro un valore soglia di riferimento indicato come Q_t . Nelle figure di seguito riportate sono riportati in particolare i risultati ottenuti per la portata soglia Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ che come sarà descritto in seguito è la massima che allo stato attuale riesce ad essere smaltita dall'alveo a valle della cassa di espansione.

L'analisi di fallanza sulla portata soglia Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ nel caso di controllo stazionario della portata è mostrata nella Figura 18. Il funzionamento della cassa di espansione di Sant'Anna con controllo stazionario rappresenta lo stato attuale del sistema in cui gli scarichi di fondo operativi siano completamente liberi. Le configurazioni analizzate sono quelle con 2, 3, 4, e 5 paratoie mobili operative (le rimanenti sono completamente chiuse) come rappresentato, rispettivamente, dalle linee rossa, verde, blu e nera (Figura 18). Nell'inserito della Figura 18 in basso a destra sono riportati un esempio dei risultati delle simulazioni di un singolo punto delle linee delle frequenze di fallanza in cui per il periodo di ritorno pari a 100 anni, la data configurazione con 5 scarichi operativi sono riportati, per le diverse durate di precipitazione considerate, i massimi valori di portata in uscita dalla cassa di espansione. La linea rossa riportata nell'inserito rappresenta la portata soglia Q_t ed il numero dei punti che superano tale linea sono il numeratore per il calcolo della frequenza di fallanza. Nel caso riportato in Figura 18 si osserva una frequenza di fallanza per i 5 scarichi operativi e periodo di ritorno di 100 anni che è circa il 96%. Come si può osservare dalle curve, allo stato attuale ed in assenza di regolazione attiva delle paratoie mobili, i risultati migliori in termini di frequenza di fallanza si ottengono con la configurazione a 3 scarichi di fondo operativi.

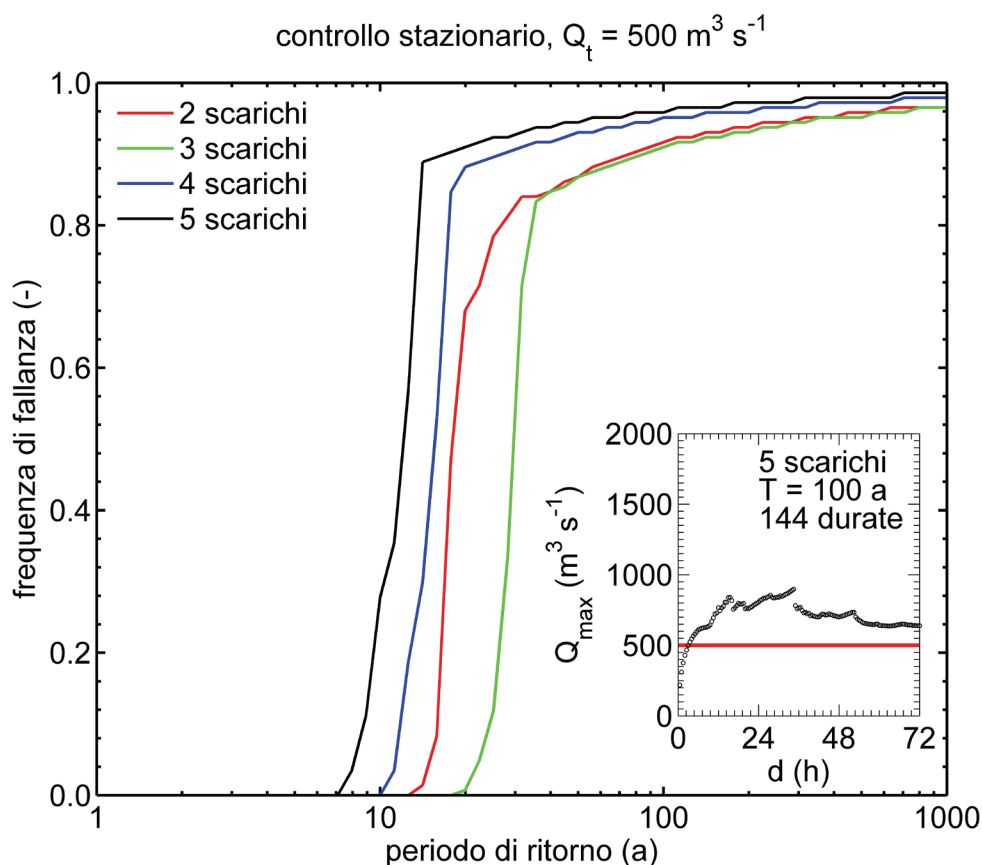


Figura 18. Analisi di fallanza della cassa di espansione di Sant'Anna rispetto alla portata in uscita di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con 2, 3, 4 e 5 scarichi senza regolazione delle paratoie. In basso a destra sono riportati i valori delle portate uscenti con 5 scarichi di fondo funzionanti per diverse durate di precipitazione e periodo di ritorno di 100 anni; in rosso è evidenziata la linea del criterio soglia sulla portata per valutare la fallanza del sistema.

L'analisi di fallanza può essere condotta anche sul livello idrico ed in particolare nella Figura 19 è presentata un'analisi in cui il criterio critico di fallanza è costituito dalla quota di sfioro del manufatto regolatore principale H_S . In tale figura sono mostrate le curve di fallanza del sistema rispetto al raggiungimento dello sfioro del manufatto regolatore principale per le configurazioni con 2, 3, 4, e 5 scarichi operativi con un controllo stazionario delle paratoie per 61 periodi di ritorno. Nell'inserto sono riportati gli esiti delle simulazioni per ogni punto dell'analisi di fallanza in cui vengono mostrati per un periodo di ritorno pari a 100 anni, la data configurazione con 5 scarichi operativi i valori del massimo livello raggiunto dall'invaso. Il numero di simulazioni che eccedono il criterio di fallanza (linea rossa) rispetto al numero totale di simulazioni effettuate rappresenta la frequenza di fallanza del sistema che, per il caso considerato, è circa il 92%.

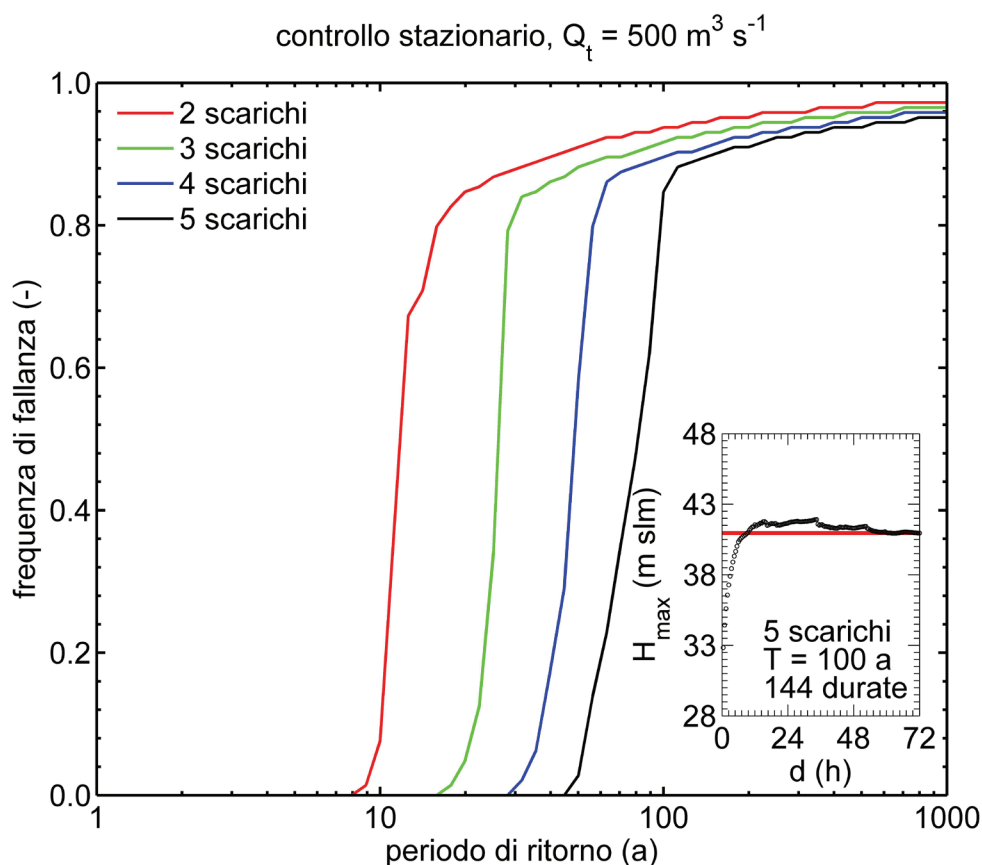


Figura 19. Analisi di fallanza della cassa di espansione di Sant'Anna rispetto alla quota di sfioro del manufatto regolatore principale con 2, 3, 4 e 5 scarichi senza regolazione delle paratoie. In basso a destra sono riportati i valori del livello di invaso massimo raggiunto con la configurazione con 5 scarichi di fondo funzionanti per diverse durate di precipitazione e periodo di ritorno di 100 anni; la linea rossa evidenzia il criterio soglia, ovvero la quota di sfioro del manufatto regolatore principale di 40.95 m slm.

Le due analisi di fallanza del sistema mostrate nella Figura 18 e nella Figura 19 sono complementari e mostrano lo stato attuale della cassa di espansione. La fallanza del sistema alla portata soglia Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ per la configurazione con 5 scarichi di fondo operativi risulta peggiore delle altre configurazioni perché dagli scarichi di fondo esce una portata maggiore di Q_t per livelli idrici inferiori alla quota di sfioro dal manufatto regolatore principale. Diversamente, le configurazioni che garantiscono una minore fallanza sulla portata Q_t causano una fallanza maggiore sul livello idrico rispetto alla quota di sfioro del manufatto regolatore principale. È importante osservare che l'attivazione dello sfioratore superficiale presenta criticità elevate in quanto l'efflusso dallo stramazzone non risulta regolabile in alcun modo.

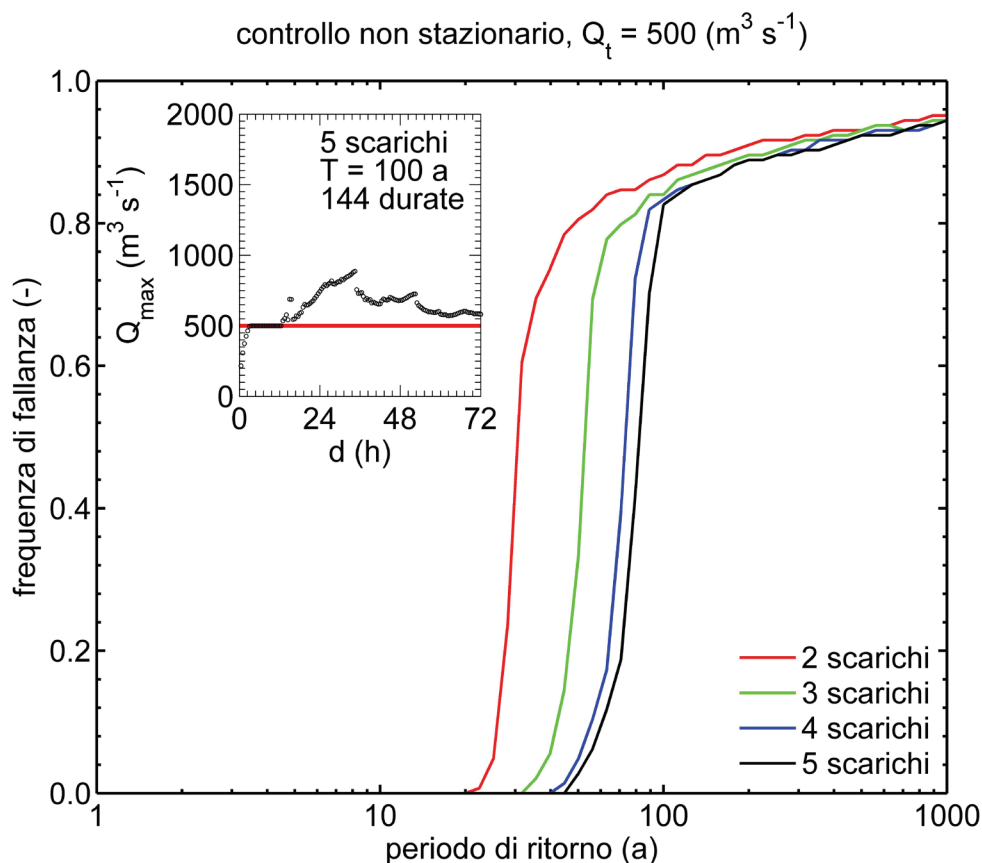


Figura 20. Analisi di fallanza delle portate massime in uscita della cassa di espansione di Sant'Anna con regolazione della portata a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ considerando una configurazione con 2, 3, 4 e 5 scarichi operativi. La regolazione non prevede la riapertura delle paratoie una volta raggiunta la fallanza del sistema. In alto a sinistra sono riportati i valori delle portate uscenti con 5 scarichi di fondo operativi per diverse durate di precipitazione e periodo di ritorno di 100 anni; in rosso è evidenziata la linea del criterio soglia di fallanza.

I risultati dell'analisi di fallanza per il controllo non stazionario per la portata soglia Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sono riportati nella Figura 20 e nella Figura 21. Come si può osservare nella Figura 20, la migliore curva di fallanza della portata Q_t è relativa alla configurazione con 5 scarichi di fondo operativi, mentre la curva peggiore è ottenuta con 2 scarichi di fondo operativi. Rispetto ai risultati mostrati in Figura 18, si può notare come, con una regolazione attiva delle paratoie, cambiano le curve di fallanza della cassa di espansione: si modifica la sequenza delle curve e si spostano verso periodi di ritorno maggiori. Questo implica che per tempi di ritorno bassi la capacità di laminazione dell'invaso è stata sfruttata al massimo con la regolazione non stazionaria, mentre per periodi di ritorno maggiori il sistema risulta comunque insufficiente rispetto alla portata soglia Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. In Figura 21 sono infine presentate le curve di fallanza del massimo livello idrico raggiunto nella cassa di espansione rispetto alla quota di sfioro del manufatto regolatore principale. Confrontando le curve di fallanza riportate in Figura 19 con quelle riportate in Figura 21, si osserva che il livello dell'invaso della cassa di espansione raggiunge la quota di sfioro del manufatto regolatore principale per periodi di ritorno inferiori per effetto della regolazione non stazionaria delle paratoie mobili.

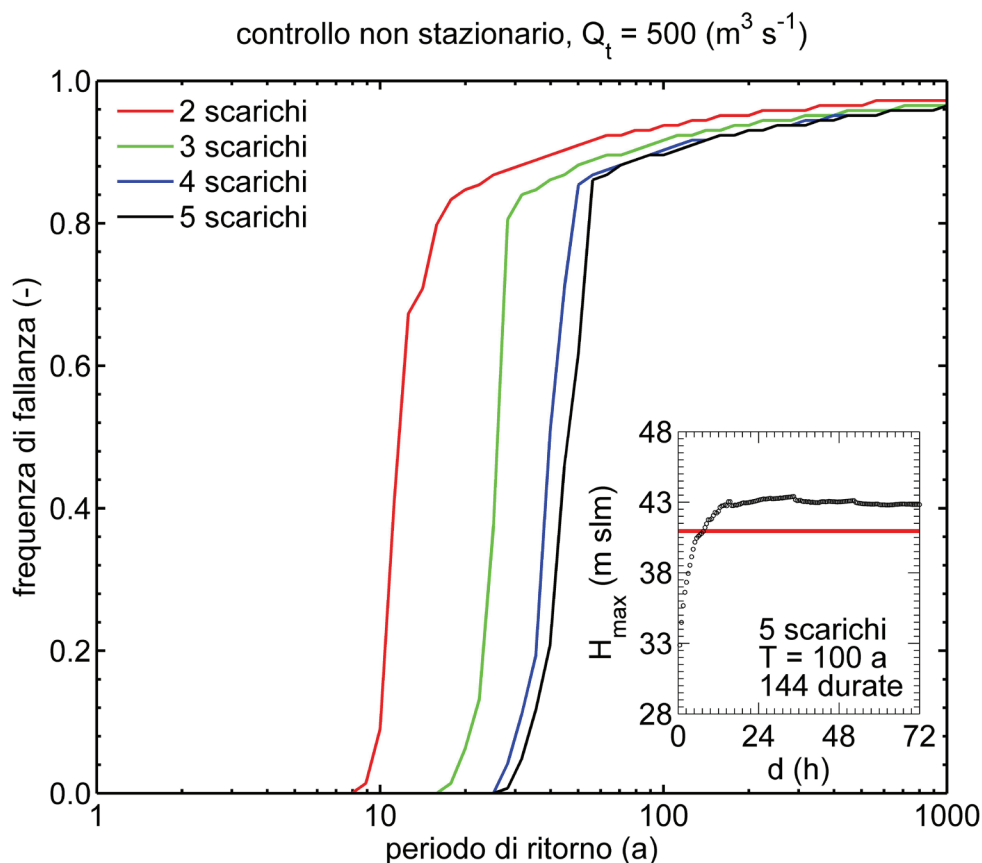


Figura 21. Analisi di fallanza della cassa di espansione di Sant'Anna rispetto alla quota di sfioro del manufatto regolatore principale con 2, 3, 4 e 5 scarichi operativi con regolazione della portata massima uscente a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. In basso a destra sono riportati i valori del livello di invaso massimo raggiunto con la configurazione con 5 scarichi di fondo operative per diverse durate di precipitazione e periodo di ritorno di 100 anni; la linea rossa evidenzia la quota di sfioro del manufatto regolatore principale di 40.95 m slm.

Dalle curve di fallanza si può desumere il periodo di ritorno caratteristico del sistema rispetto alla variabile soglia di fallanza. Il periodo di ritorno del sistema si considera come il massimo valore del periodo di ritorno della curva di probabilità climatica che restituisce una frequenza di fallanza pari a zero, ovvero quel punto da cui le linee di fallanza nelle Figure 17-20 si staccano dall'asse delle ascisse. Se si considera come soglia la portata Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, il periodo di ritorno della cassa di espansione nel caso in cui si attui un controllo stazionario delle paratoie mobili è compreso tra 5.62 (pari a $10^{0.75}$) anni e 17.78 (pari a $10^{1.25}$) anni per 5 e 3 scarichi di fondo operativi, rispettivamente. Nel caso di regolazione attiva con un controllo non stazionario delle paratoie mobili il periodo di ritorno risulta invece compreso tra 19.95 (pari a $10^{1.30}$) anni e 44.67 (pari a $10^{1.65}$) anni per 2 e 5 scarichi operativi, rispettivamente. Si ricorda che la piena del 24-29 dicembre 2009 ha avuto un valore di portata al colmo di $550 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in uscita dalla cassa di espansione (controllata con regolazione stazionaria) secondo quanto stimato da ARPA Emilia Romagna (oggi ARPAE) ne *Rapporto sull'evento meteo idrogeologico e idraulico del 22-28 dicembre 2009*. Il periodo ritorno della fallanza del sistema sul raggiungimento del livello di sfioro del manufatto

regolatore principale risulta compreso tra 7.94 (pari a $10^{0.90}$) anni e 31.62 (pari a $10^{1.50}$) anni per una regolazione stazionaria delle configurazioni con 2 e 5 scarichi di fondo operativi, rispettivamente, mentre per la regolazione non stazionaria ad una portata Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ è stato simulato compreso tra 7.94 (pari a $10^{0.90}$) anni e 22.39 (pari a $10^{1.35}$) anni per le configurazioni con 2 e 5 scarichi di fondo operativi, rispettivamente.

Risulta chiaro dai risultati delle simulazioni condotte, che un'ottimizzazione del funzionamento della cassa di espansione per garantire una minore portata massima al sistema fluviale vallivo comporta un aumento dei livelli di invaso. Per tale ragione, è stata condotta un'ulteriore analisi per verificare il rispetto del franco di sicurezza di 1.67 dell'arginatura maestra della cassa di espansione. Dato una quota ortometrica del coronamento degli argini maestri della cassa di espansione H_L pari a 44.85 m slm, la quota di massimo invaso H_{MI} che garantisce il rispetto del franco di sicurezza di 1.67 m è pari a 43.18 m slm. Le onde di piena generate da precipitazioni con periodo di ritorno pari a 100 anni non determinano il superamento del livello di massimo invaso H_{MI} , mentre periodi di ritorno maggiore causano il superamento del livello massimo. Il raggiungimento della quota di massimo invaso comporta un efflusso dallo sfioratore superficiale superiore a $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ secondo quanto stimato dal modello fisico del manufatto regolatore principale per cui il sistema ha comunque raggiunto la fallanza. Inoltre, il rispetto di H_{MI} deve essere garantito ai sensi della vigente normativa. Da ciò risulta necessario interrompere la regolazione della portata di piena attraverso le paratoie mobili. All'interruzione della regolazione, le paratoie mobili degli scarichi operativi vengono riaperte con un tasso di apertura che corrisponde a 20 minuti per ogni paratoia movimentata ed un tempo massimo totale di riapertura pari a 100 minuti. Le quote dei livelli di invaso a cui interrompere la regolazione non stazionaria della portata in uscita per diversi periodi di ritorno delle precipitazioni sollecitanti e per diverse portate di regolazione Q_t sono riportate in Tabella 7. Gli idrogrammi di piena generati da precipitazioni con periodo di ritorno pari a 200 anni consentono di regolare attivamente le paratoie mobili fino a quote vicine al livello di massimo invaso per diversi valori della portata di regolazione. Maggiore è la portata di regolazione Q_t e più il livello di fine regolazione è vicino a H_{MI} (Tabella 7). Viceversa, per idrogrammi generati da precipitazioni aventi periodo di ritorno pari a 1000 anni, le quote di fine regolazione sono decisamente inferiori alla quota di massimo invaso di 43.18 m slm come mostrato in Tabella 7. Anche in questo caso la massima altezza di fine regolazione è crescente con l'aumentare della portata di regolazione Q_t , ma per portate di regolazione maggiori di $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ la quota di fine regolazione si attesta al valore di 41.95 m slm.

In ultimo, sono state stimate le portate massime che devono essere smaltite dall'asta fluviale di valle con il controllo stazionario e non stazionario tali per cui il sistema soddisfi un periodo di ritorno di 50, 90, 100, e 200 anni. Per ogni periodo di ritorno sono state determinate le portate che devono essere soddisfatte dall'asta fluviale di valle affinché questo si possa ritenere idraulicamente sufficiente contro un evento di assegnata probabilità di accadimento. I valori di portata al colmo calcolati costituiscono la portata di riferimento a cui adeguare l'asta fluviale di valle per garantire condizioni di sicurezza idraulica ad determinato periodo di ritorno con un controllo stazionario e non stazionario della cassa di espansione di Sant'Anna. I risultati sono riassunti in Tabella 8 e sono stati ottenuti per la configurazione con 5 scarichi di fondo operativi.

Tabella 7. Quota del livello di invaso della cassa di espansione alla quale terminare la regolazione della portata a Q_t delle paratoie mobili (e quindi inizio della riapertura delle stesse) allo scopo di garantire per ogni caso il rispetto del franco di sicurezza di 1.67 m nella configurazione con 5 scarichi di fondo operativi. Sono riportati i casi per idrogrammi di piena in ingresso alla cassa di espansione che siano generati da precipitazioni VAPI per periodi di ritorno di 200 e 1000 anni.

Portata di regolazione, ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Quota dell'invaso di fine regolazione per la salvaguardia del franco di sicurezza (m slm)	
	$T = 200 \text{ a}$	$T = 1000 \text{ a}$
400	42.80	39.35
500	42.95	40.95
600	43.00	41.35
700	43.05	41.60
800	43.10	41.85
900	-	41.95
1000	-	41.95

Tabella 8. Portata massima rilasciata dalla cassa di espansione di Sant'Anna nell'asta fluviale di valle per assicurare il rispetto di un dato periodo di ritorno del sistema con un controllo stazionario e non stazionario delle paratoie. È stata considerata la configurazione con 5 scarichi di fondo operativi.

Periodo di ritorno, $T \text{ (a)}$	Portata massima gestibile dal sistema fluviale ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	
	Controllo stazionario	Controllo non stazionario
50	675	525
90	875	600
100	900	650
200	1100	875

Dai risultati riportati in Tabella 8 si può osservare come, a parità di periodo di ritorno, l'ottimizzazione della cassa di espansione consente di abbattere in modo significativo le portate in uscita dal manufatto di regolazione principale.

Analisi dei livelli idrici

Le onde di piena in uscita dalla cassa di espansione sono state poste come condizione al contorno di monte del modello numerico HEC-RAS in modo da valutare l'effetto della propagazione dell'onda di piena lungo il Fiume Panaro fino alla confluenza con il Fiume Po. L'obiettivo di tale studio è la determinazione della portata smaltibile dall'asta fluviale e la definizione della portata di progetto di riferimento da cui partire per la valutazione degli interventi da realizzare per la mitigazione e l'omogeneizzazione del rischio idraulico lungo tutta l'asta stessa. L'insufficienza può essere dovuta al sormonto dell'arginatura o al collasso per saturazione del rilevato dovuto ai moti di infiltrazione. Tra gli idrogrammi di piena generati con le simulazioni eseguite sulla cassa di espansione, sono stati scelti gli idrogrammi ritenuti più gravosi per la sicurezza idraulica dell'asta fluviale sia in termini di portata al picco che di persistenza nel tempo di portate elevate. Per tale motivo per ogni portata soglia di regolazione Q_t considerata sono stati selezionati gli idrogrammi caratterizzati dal maggior tempo di permanenza della portata di $450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. In Figura 22 è mostrato un esempio della laminazione dell'onda di piena simulata con il modello della cassa di espansione. L'idrogramma in uscita è quello che ha la massima persistenza delle portate ed è stato utilizzato per la propagazione nell'asta fluviale di valle.

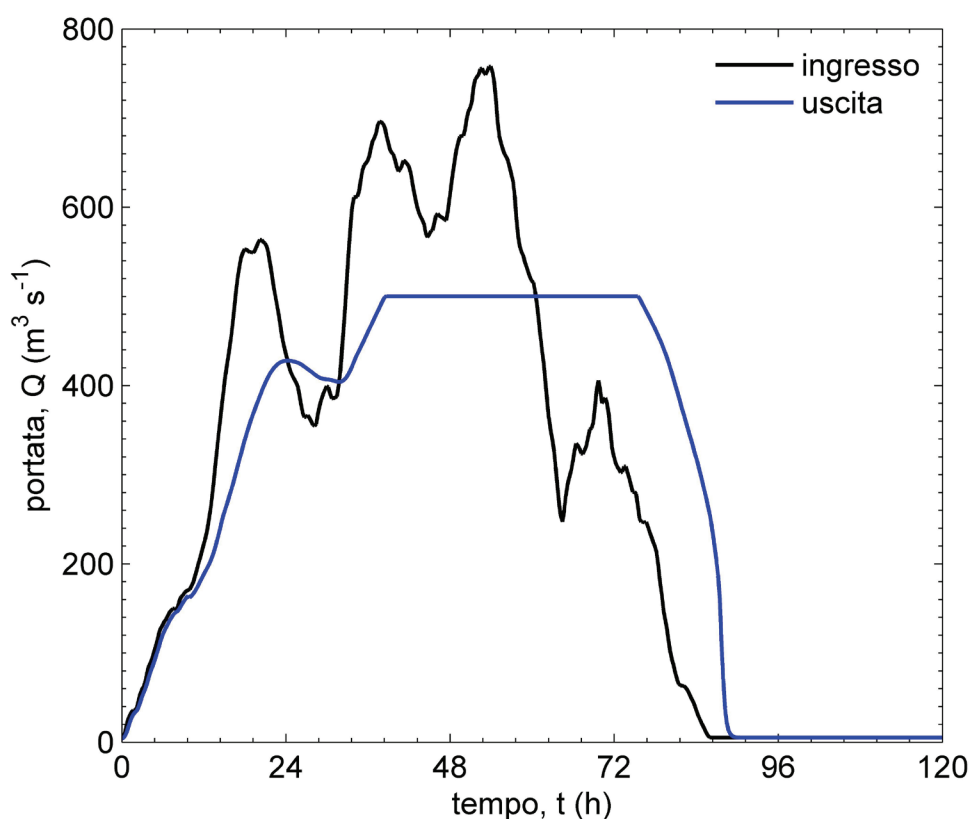


Figura 22. Idrogramma di piena in ingresso ed in uscita dalla cassa di espansione di Sant'Anna per il massimo tempo di regolazione delle paratoie ottenuto senza che vi sia il superamento della portata di regolazione Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. È stata considerata la configurazione con cinque scarichi di fondo operativi.

Le condizioni al bordo della sezione di valle dal Fiume Panaro considerate è stato un livello costante di 15 m slm del pelo libero durante tutte le simulazioni. Tale livello è quello massimo che approssimativamente si è raggiunto sul Fiume Po durante la piena del 2000, si pone circa 3 m al di sotto della sommità arginale alla confluenza Po-Panaro ed è stato considerato per tenere conto di condizioni di scarsa capacità di smaltimento della piena alla foce del Fiume Panaro. Le condizioni iniziali di ogni simulazione sono $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sull'asta del Fiume Panaro fino alla confluenza con il Torrente Tiepido, $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sul Tiepido e $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ per l'asta del Fiume Panaro dalla confluenza con il Torrente Tiepido fino alla foce con il Fiume Po. Nelle simulazioni condotte il contributo del Torrente Tiepido in termini di portata è considerato trascurabile per cui l'idrogramma assunto per il Torrente è costante e pari alla condizione di portata iniziale di $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. L'implementazione della geometria del Torrente Tiepido e della confluenza nel Fiume Panaro consente comunque di considerare l'effetto di rigurgito e laminazione della piena che tale zona fluviale attua sull'idrogramma di piena. Nel caso in cui sia prevista un'onda di piena del Tiepido concomitante con la piena del Panaro, la regolazione della cassa di espansione dovrà tenere conto della sovrapposizione degli effetti che il contributo di portata aggiuntivo apporta alla confluenza.

Portata smaltibile

I risultati ottenuti sono mostrati con due tipologie di grafici: la prima mostra il profilo longitudinale dell'asta fluviale con le quote dei livelli di piena simulati (Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26), mentre la seconda illustra in pianta i franchi idraulici lungo l'asta fluviale (Figura 27, Figura 28). Nelle figure sono riportati anche gli andamenti dell'argine sinistro e dell'argine destro. In particolare si può notare come in sinistra idraulica si evidenzino criticità superiori per una certa disomogeneità delle quote arginali. Nelle rappresentazioni sono riportati anche i profili di piena stimati dall'Autorità di Bacino per il fiume Po (ADBPO) per la portata bicentenaria pari a $940 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (PAI, Norme di attuazione, Direttiva 2, Tabella 31) ed il profilo di piena raggiunto per la piena del 24-29 dicembre 2009 in cui i livelli massimi raggiunti sono stati rilevati con un picchettamento.

La portata smaltibile dall'asta fluviale a valle della cassa di espansione di Sant'Anna è $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a meno di tre criticità in sinistra come mostrato nella Figura 23, Figura 24, Figura 25. L'interno profilo longitudinale dell'onda di piena con le quote della sommità dei rilevati arginali è riportata in Figura 23 per l'argine destro e in Figura 24 per l'argine sinistro. In ascissa, in basso, si trovano i valori della distanza progressiva lungo il thalweg dell'asta fluviale dalla confluenza al Po fino all'uscita della cassa di espansione. Viceversa, in alto, sempre lungo l'ascissa, sono riportati gli stanti biottometrici presenti lungo gli argini del Fiume Panaro nel territorio della provincia di Modena; si noti che la numerazione degli stanti segue una progressiva che parte dall'argine di monte (dopo la cassa di espansione di Sant'Anna) ed incrementa lungo il percorso del corso d'acqua verso la foce.

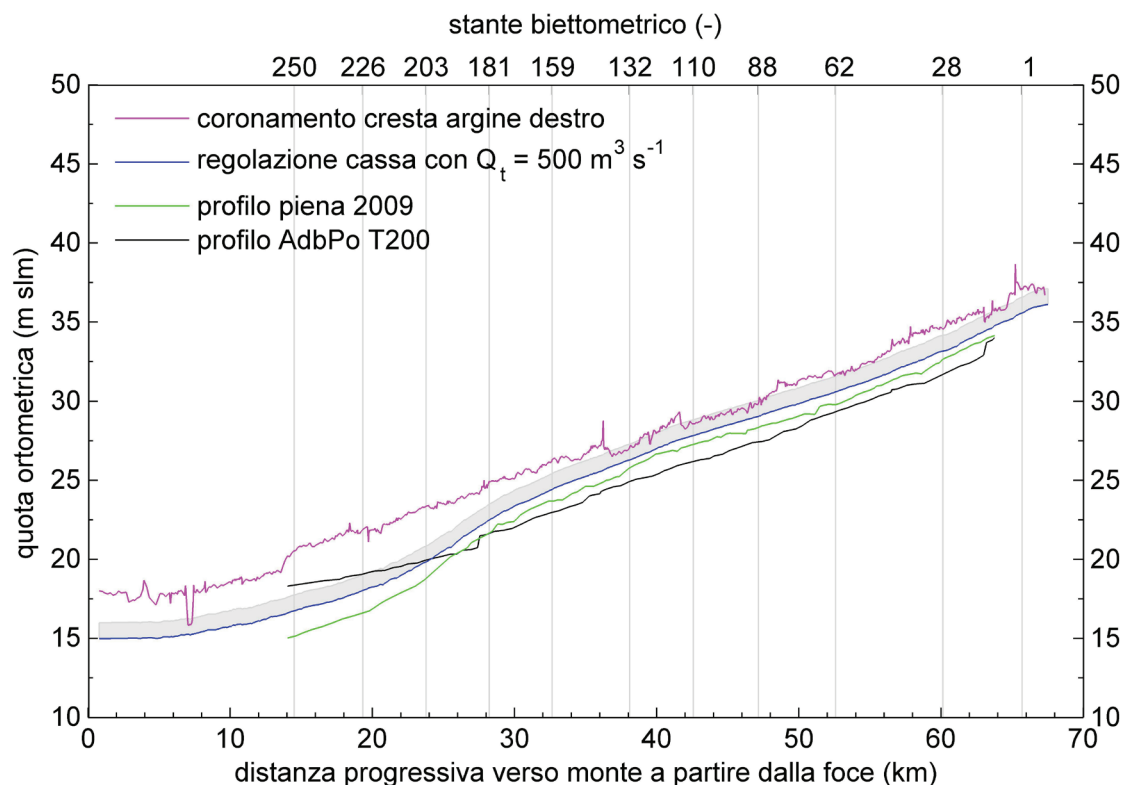


Figura 23. Profilo longitudinale di quote del coronamento arginale destro, livelli di piena raggiunti con la propagazione dell'onda di piena con portata di regolazione con controllo non stazionario della cassa di espansione Q_t di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, livelli di piena osservati nel 2009, livelli di piena per la portata con periodo di ritorno pari a 200 anni secondo ADBPO. In grigio è riportata l'area compresa tra il livello di piena raggiunto ed il franco di sicurezza di 1 m.

Le analisi sviluppate mostrano che lungo l'asta fluviale i livelli idrici critici sono raggiunti nelle sezioni di monte: dalla progressiva 28000 m circa fino a 67502.11 m, ovvero per stanti inferiori a 180 (sia in destra che sinistra) come mostrato nelle Figura 23 e Figura 24. Lungo tale porzione di alveo, i livelli idrici sono particolarmente elevati ed il deflusso è lento, mentre per progressive inferiori la capacità di smaltimento dell'alveo è efficace e mantiene dei franchi di sicurezza di dai 2 ai 4 m per la portata Q_t di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. I livelli di piena simulati risultano superiori sia del picchettamento della piena del 24-29 dicembre 2009, sia del profilo di piena bicentenario indicato da ADBPO. E' bene sottolineare come nel caso di regolazione della portata in uscita dalla cassa di espansione con controllo non stazionario la permanenza dei livelli può essere molto lunga ed arrivare anche a 48 h. In questo modo, maggiore è il tempo di permanenza della portata e più i livelli di piena raggiunti si avvicinano ai livelli ottenibili in moto permanente riducendo l'effetto di laminazione dell'onda di piena. I livelli simulati mostrano che le maggiori criticità sono in sinistra idraulica dove 3 sezioni risultano insufficienti per una portata Q_t di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in prossimità della via Emilia alla confluenza del Tiepido nel Panaro (intorno alla progressiva da valle di 64000 m), mentre le restanti non hanno il superamento della quota della sommità arginale come evidenziato in Figura 24, in Figura 25 e in Figura 26.

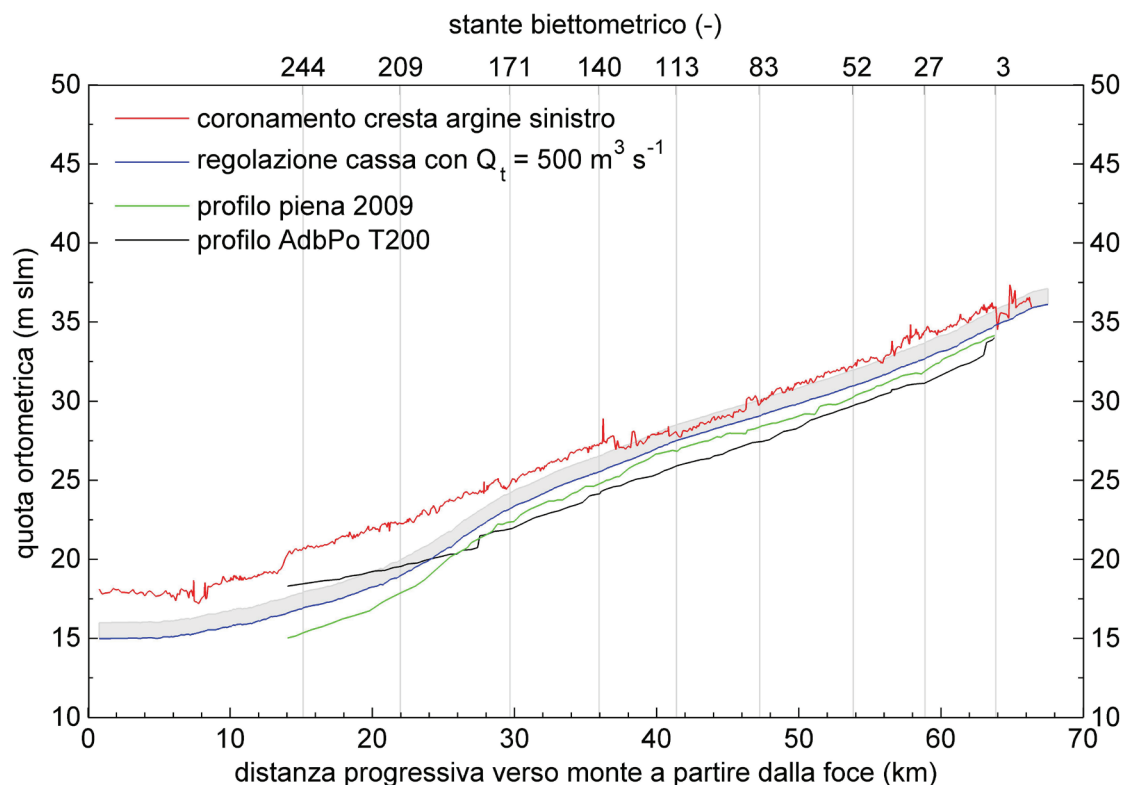


Figura 24. Profilo longitudinale di quote del coronamento arginale sinistro, livelli di piena raggiunti con la propagazione dell'onda di piena con portata di regolazione con controllo non stazionario della cassa di espansione Q_t di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, livelli di piena osservati nel 2009, livelli di piena per la portata con periodo di ritorno pari a 200 anni secondo ADBPO. In grigio è riportata l'area compresa tra il livello di piena raggiunto ed il franco di sicurezza di 1 m.

I risultati mostrano che per la portata di regolazione con controllo non stazionario Q_t di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ non è soddisfatto il franco di sicurezza minimo di 1 m per molte sezioni nel tratto di monte dell'asta fluviale compreso tra l'abitato di Camposanto (il ponte di Camposanto è posto alla progressiva da valle 36223.98 m) e la cassa di espansione di Sant'Anna (la vasca di dissipazione è posta alla progressiva da valle 67502.11 m) come mostrato in Figura 23 e in Figura 24, e, in particolare, in Figura 25 e in Figura 26.

I livelli di piena raggiunti con le altre portate soglia di regolazione con controllo non stazionario sono maggiori e comportano un incremento del numero di sezioni e della lunghezza dell'alveo interessati a fenomeni di insufficienza per superamento della quota massima del rilevato arginale. In Tabella 9 sono riportati per sezioni ritenute significative i valori del dislivello tra il livello simulato con la portata di regolazione Q_t di $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (pari al periodo di ritorno di 90 e 100 anni rispettivamente) ed il livello raggiunto dalla portata di riferimento con Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Una rapida indicazione dei valori intermedi simulati, fatto salvo criticità locali, possono essere ricavati per interpolazione.

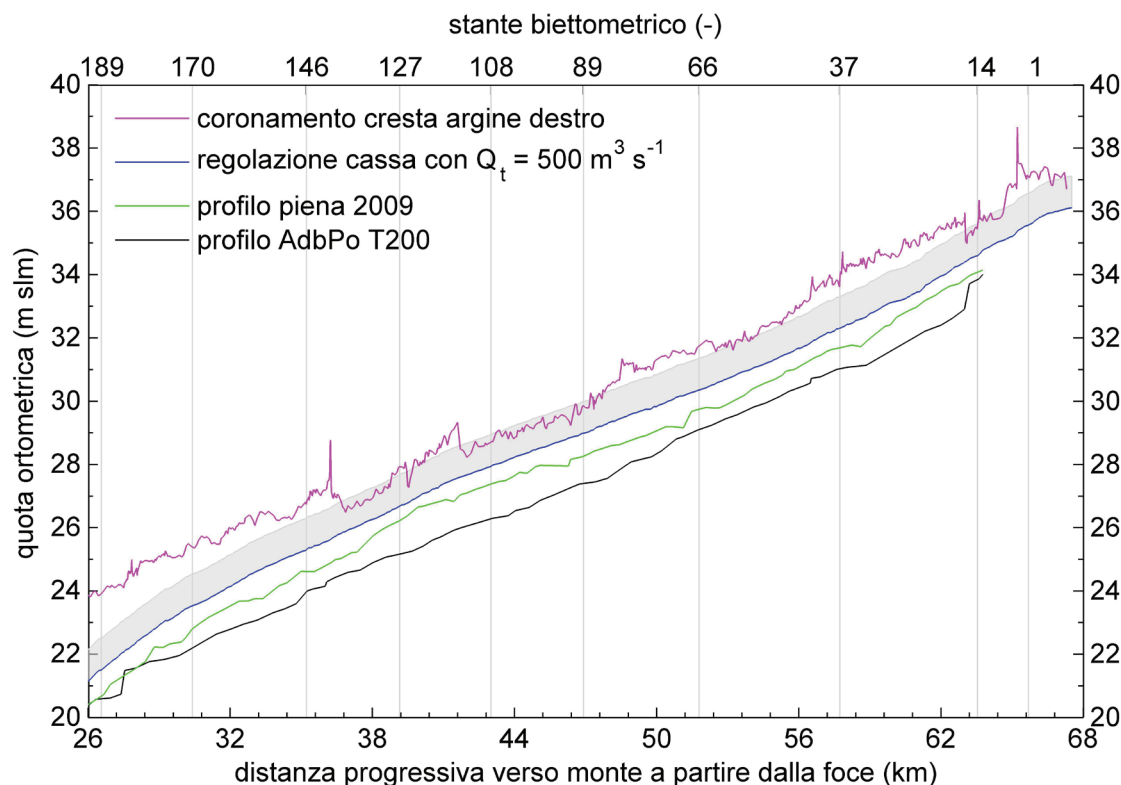


Figura 25. Particolare del profilo longitudinale nel tratto a monte del corso d'acqua a valle della cassa di espansione di Sant'Anna. Sono rappresentati le quote del coronamento arginale destro, i livelli di piena raggiunti con la propagazione dell'onda di piena con portata di regolazione con controllo non stazionario della cassa di espansione Q_t di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, livelli di piena osservati nel 2009, livelli di piena per la portata con periodo di ritorno pari a 200 anni secondo ADBPO. In grigio è riportata l'area compresa tra il livello di piena raggiunto ed il franco di sicurezza di 1 m.

Tabella 9. Differenze tra il livello massimo simulato con i profili di piena calcolati con il periodo di ritorno di 90 anni ($600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e 100 anni ($650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) rispetto al profilo ottenuto con la portata di regolazione di riferimento Q_t pari a $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in prossimità di sezioni ritenute significative e tra le quali l'andamento dei livelli si può ritenere approssimabile, a meno di criticità locali, con l'interpolazione lineare dei valori.

Sezione progressiva da valle (m)	Differenza del livello simulato rispetto all'idrogramma con portata $Q_t = 500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (m)	
	Profilo con $Q_t = 600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Profilo con $Q_t = 650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
777.09	0.00	0.00
15155.82	0.41	0.56
24591.71	0.60	0.82
28709.80	0.70	0.95
33260.80	0.75	1.02
40061.93	0.80	1.10
42159.75	0.85	1.17
46839.52	0.87	1.20
47953.50	0.90	1.27
52494.72	0.85	1.20
65805.26	0.90	1.32

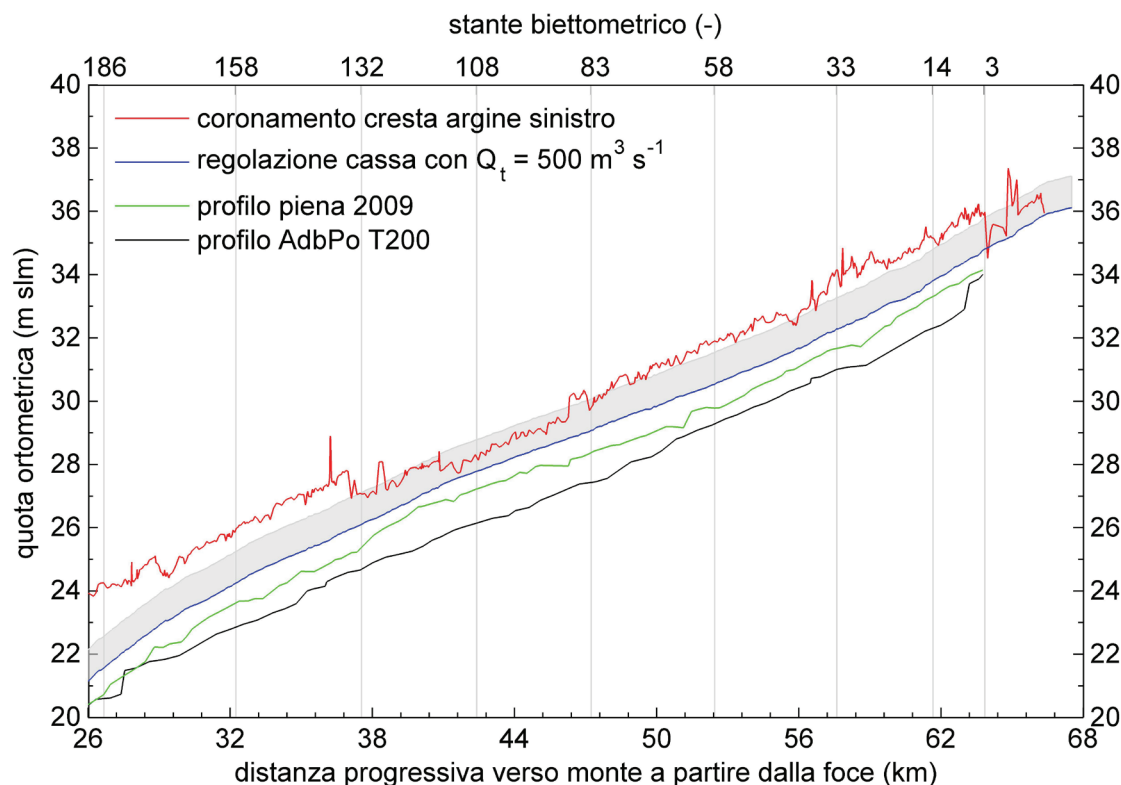


Figura 26. Particolare del profilo longitudinale nel tratto a monte del corso d'acqua a valle della cassa di espansione di Sant'Anna. Sono rappresentati le quote del coronamento arginale sinistro, i livelli di piena raggiunti con la propagazione dell'onda di piena con portata di regolazione con controllo non stazionario della cassa di espansione Q_t di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, livelli di piena osservati nel 2009, livelli di piena per la portata con periodo di ritorno pari a 200 anni secondo ADBPO. In grigio è riportata l'area compresa tra il livello di piena raggiunto ed il franco di sicurezza di 1 m.

Distribuzione spaziale dei franchi arginali

I franchi di sicurezza disponibili lungo l'asta fluviale possono essere anche rappresentati in pianta come mostrato nella Figura 27 e nella Figura 28 per l'argine in destra e sinistra idraulica, rispettivamente. I punti riportati nelle due figure rappresentano l'intersezione tra la sezione fluviale implementata nel modello numerico di HEC-RAS e la linea che rappresenta la sommità del rilevato arginale. I punti di intersezione sono stati rappresentati con dei cerchi che risultano colorati in funzione di 7 classi. Come evidenziato dai risultati mostrati in Figura 23, in Figura 24, in Figura 25 e in Figura 26, la destra idraulica presenta meno criticità della sinistra idraulica che soffre di arginature più basse in quota e per una lunghezza maggiore. I tratti fluviali maggiormente critici sono relativi ai tratti arginati tra gli abitati di Camposanto e Bomporto (Figura 27 e Figura 28), e la confluenza tra il Panaro ed il Tiepido. Nella confluenza, l'argine sinistro del Panaro è costituito dal rilevato stradale della via Emilia che dopo il Ponte di Fossalta presenta una depressione delle quote ortometriche. Inoltre, in sinistra idraulica si evidenziano delle criticità locali quali la corda molle vicino a Solara ed una depressione fittizia a Bondeno probabilmente dovuta ai filtri applicati per ricavare il modello digitale del terreno dal rilievo LiDAR.

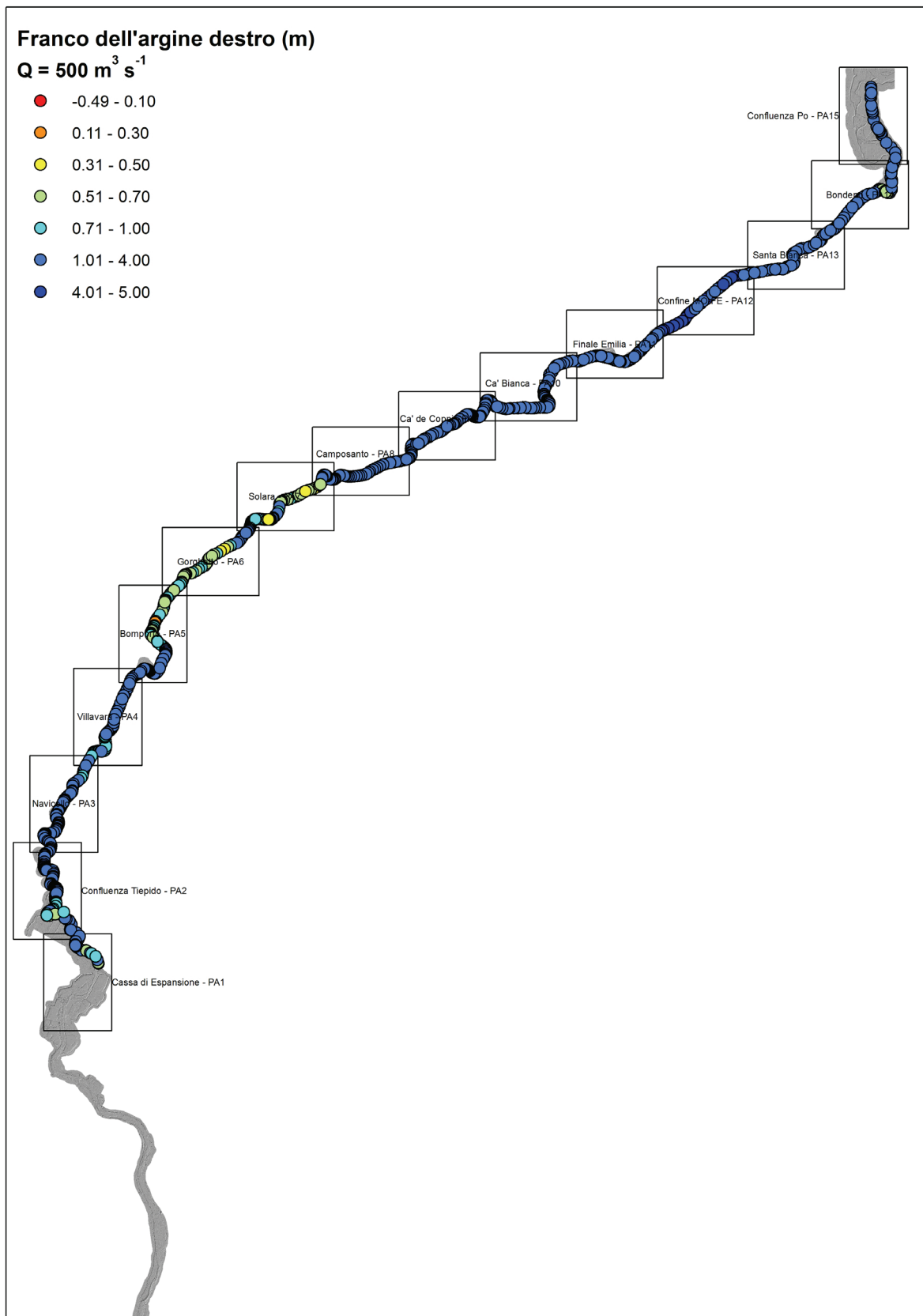


Figura 27. Quadro di insieme dei franchi arginali in destra idraulica del profilo di piena ottenuto propagando, con il modello numerico HEC-RAS, l'onda di piena riportata in Figura 21.

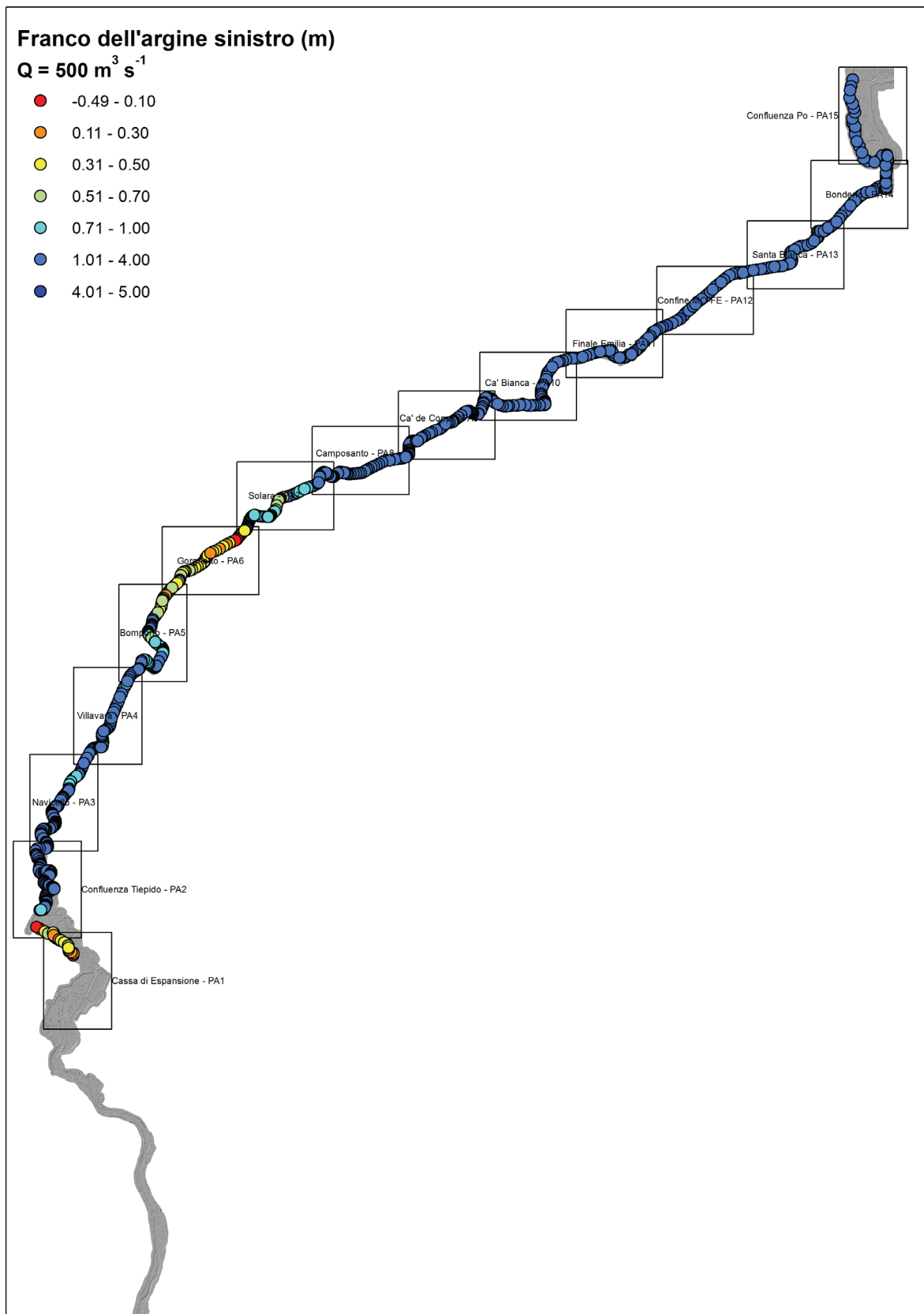


Figura 28. Quadro d'insieme dei franchi arginali in sinistra idraulica del profilo di piena ottenuto propagando, con il modello numerico HEC-RAS, l'onda di piena riportata in Figura 21.

Analisi dei tempi di saturazione del corpo arginale in risposta ai piani di laminazione

Per analizzare le eventuali criticità dei rilevati arginali si è scelto l'idrogramma più critico sia per livelli raggiunti sia per permanenza di tali livelli. La scelta è caduta sull'idrogramma in uscita dalla cassa di espansione riportato in Figura 22 caratterizzato da una portata massima pari a $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e dal maggior tempo di permanenza della portata al di sopra del valore di $450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ tra tutti quelli generati con le analisi descritte in precedenza. Attraverso il modello idraulico tale idrogramma è stato propagato lungo l'asta fluviale per determinare l'andamento dei livelli nelle sezioni di interesse. In Figura 29 è riportata la condizione di saturazione massima di una delle sezioni considerate in cui è evidente come la linea di saturazione interessi il piede dell'argine.

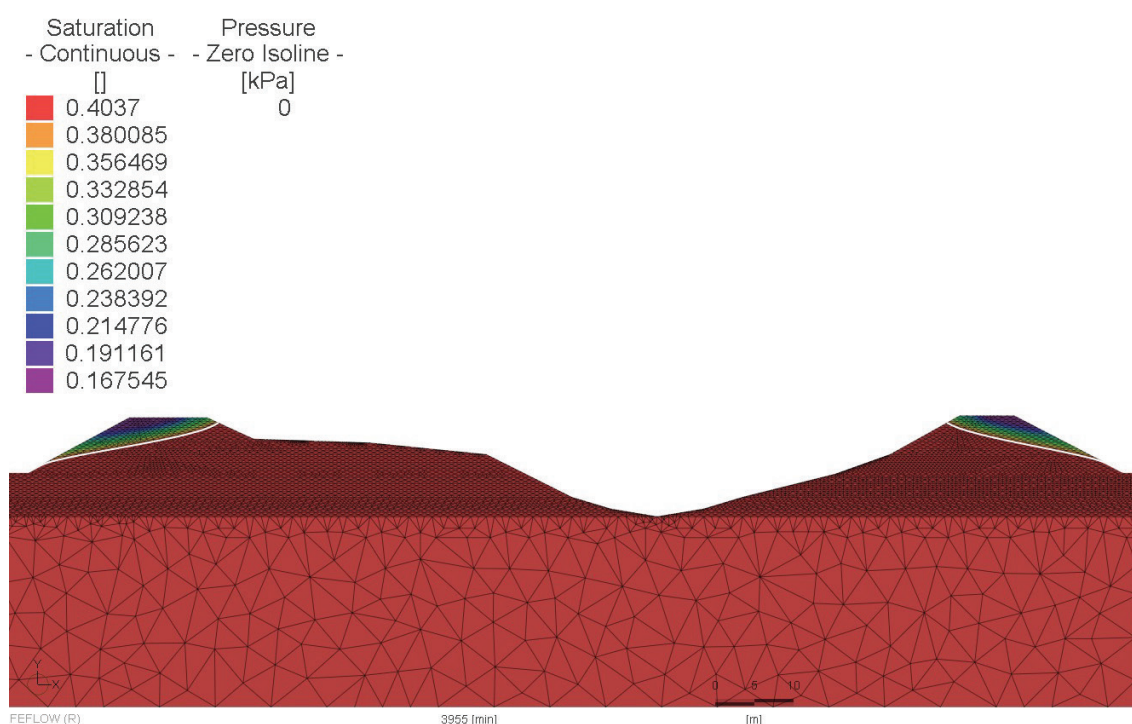


Figura 29. Contenuto idrico volumetrico massimo di una delle sezioni prese in considerazione per l'analisi dei moti di filtrazione. Tale configurazione è stata ottenuta eseguendo una simulazione in cui nei nodi della griglia di calcolo corrispondenti al alveo fluviale è stato imposto l'andamento del livello del fiume risultante dal modello idraulico.

Per ciascuna sezione elaborata sono stati quindi raccolti il tempo di saturazione del piede dell'argine e l'eventuale altezza del fronte saturo raggiunta sulla schiena dell'argine partendo dal piede. Il tempo di saturazione del piede dell'argine è stato calcolato come il tempo che intercorre tra l'inizio del ramo di risalita dell'idrogramma e il momento in cui il fronte saturo raggiunge il piede dell'argine. Nel caso in cui tale condizione non si verifichi il tempo di saturazione è considerato infinito per l'evento considerato. L'altezza del fronte saturo invece è la distanza misurata sulla verticale del punto massimo raggiunto dalla linea di saturazione lungo la schiena dell'argine e il piano campagna. Nel caso in cui non vi sia intersezione tra la linea di saturazione e la schiena

dell'argine tale altezza è pari a zero. I risultati sono stati raccolti nella Figura 30 e nella Figura 31 rispettivamente per la sinistra idraulica e per la destra idraulica. Nelle figure il diametro dei cerchi è direttamente proporzionale all'altezza del fronte saturo sulla schiena, i cerchi con il diametro più piccolo corrispondono ad un'altezza pari a zero, la massima altezza raggiunta è pari a 1.25 metri. Come si può notare l'altezza del fronte saturo non è legata al tempo di saturazione del piede dell'argine in quanto vi sono sezioni arginali aventi il medesimo tempo di saturazione in cui non si raggiunge la medesima altezza del fronte saturo sulla schiena. Così come non è emersa una correlazione tra il tempo di saturazione, la larghezza dell'argine in corrispondenza del piano campagna o la larghezza del petto a fiume. Dalle sezioni che sono state analizzate, caratterizzate da varie configurazioni in quanto a sagome arginali, altezza falda e altezza piano campagna, si evince che è difficile trovare una stretta correlazione tra le caratteristiche geometriche delle sezioni e i tempi di saturazione. La correlazione più stretta è con il volume di terreno antistante il petto dell'argine: appare quindi ai fini della saturazione importante la presenza di antipetti. E' bene sottolineare però che, se la distanza tra il petto dell'argine e l'alveo inciso è notevole, venendosi quindi a configurare più che un antipetto una golenza vera e propria, le condizioni iniziali della falda possono risultare in prossimità dell'argine indisturbate ed insensibili al richiamo dell'alveo inciso con battenti di magra. Questa condizione è risultata sfavorevole nel preservare condizioni insature in prossimità del piede dell'argine in quanto i volumi di terreno a disposizione per l'immagazzinamento delle acque di infiltrazione sono già pressoché saturi. In Figura 32 e in Figura 33 sono riportate invece in pianta le sezioni analizzate e i rispettivi tempi di saturazione e evidenziati con diversi colori. Sia dai grafici riportati in Figura 30 e in Figura 31 che dalle mappe riportate in Figura 32 e in Figura 33 si può notare come vi sia una certa disomogeneità dei risultati: a sezioni in cui i tempi di saturazione sono molto elevati si susseguono immediatamente sezioni in cui i tempi di saturazione sono minori, riflettendo quindi anche nei risultati ottenuti la disomogeneità in sagoma delle arginature lungo il percorso evidenziata in precedenza.

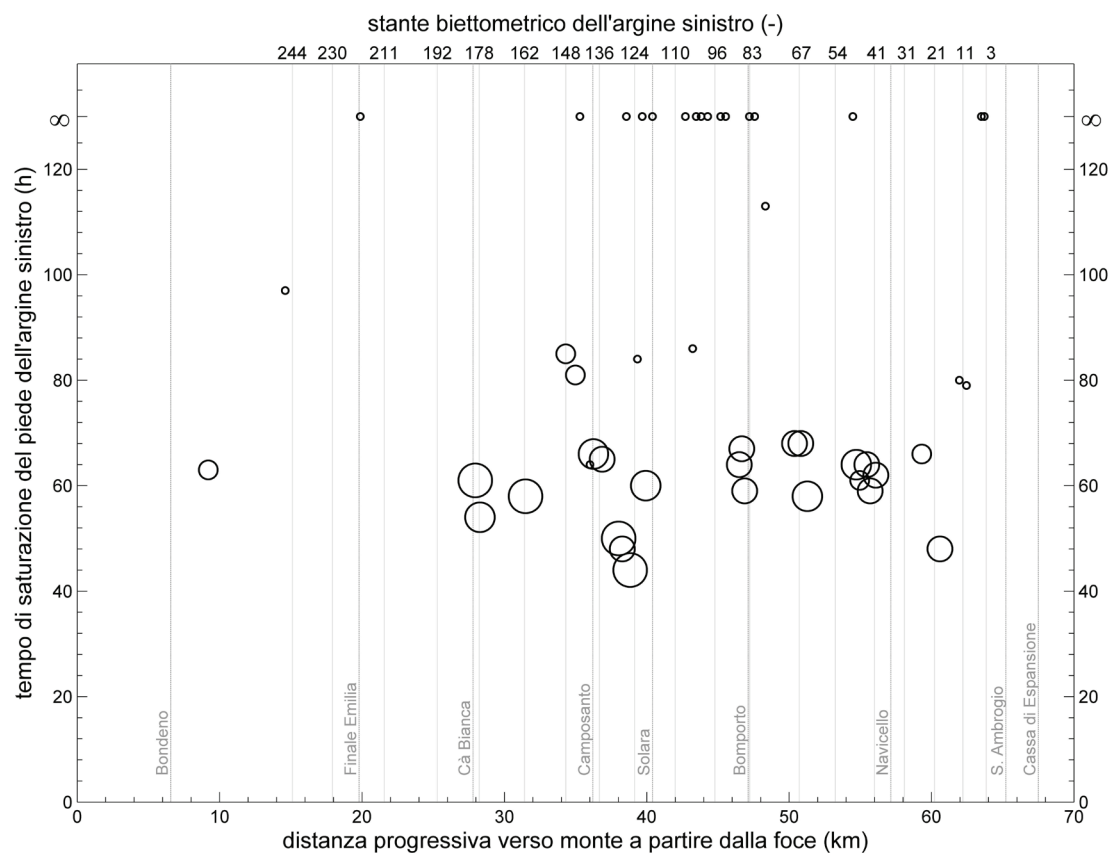


Figura 30. Tempo di saturazione dell'argine sinistro in risposta ai livelli di piena simulati con il modello numerico HEC-RAS in risposta all'idrogramma di piena riportato in Figura 22.

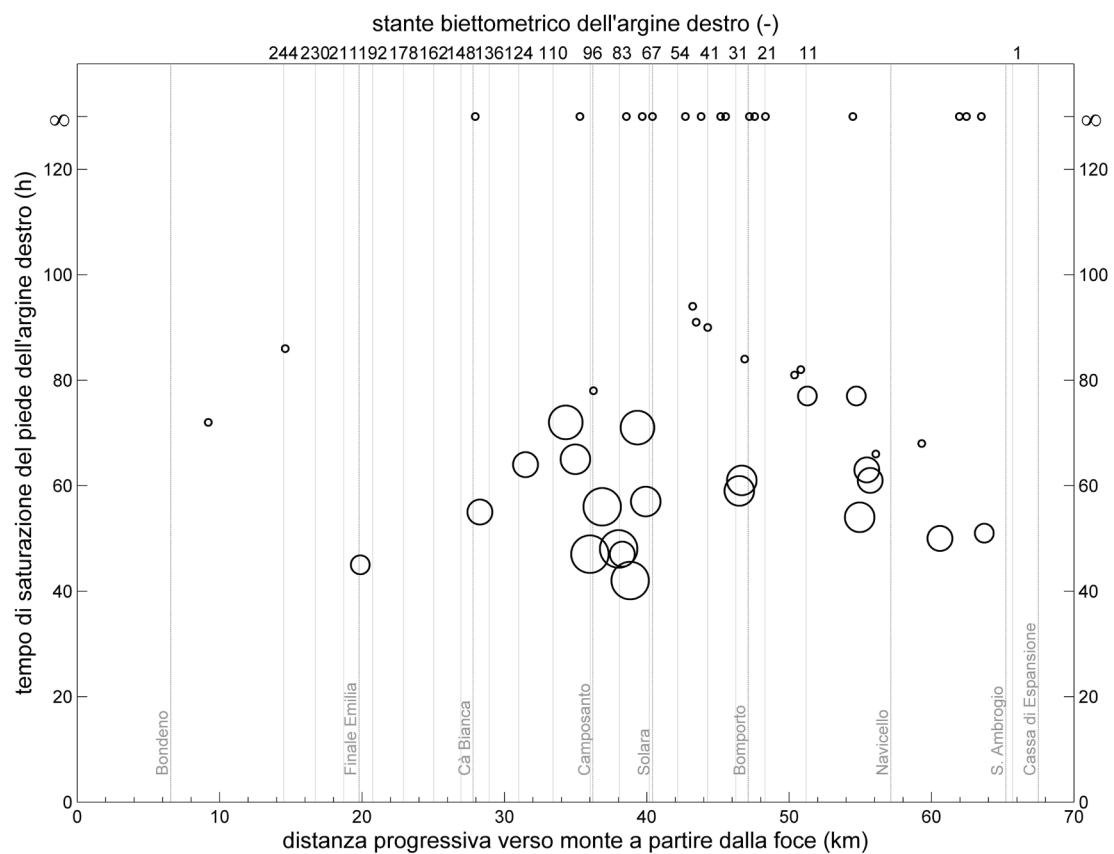


Figura 31. Tempo di saturazione dell'argine destro in risposta ai livelli di piena simulati con il modello numerico HEC-RAS in risposta all'idrogramma di piena riportato in Figura 22.

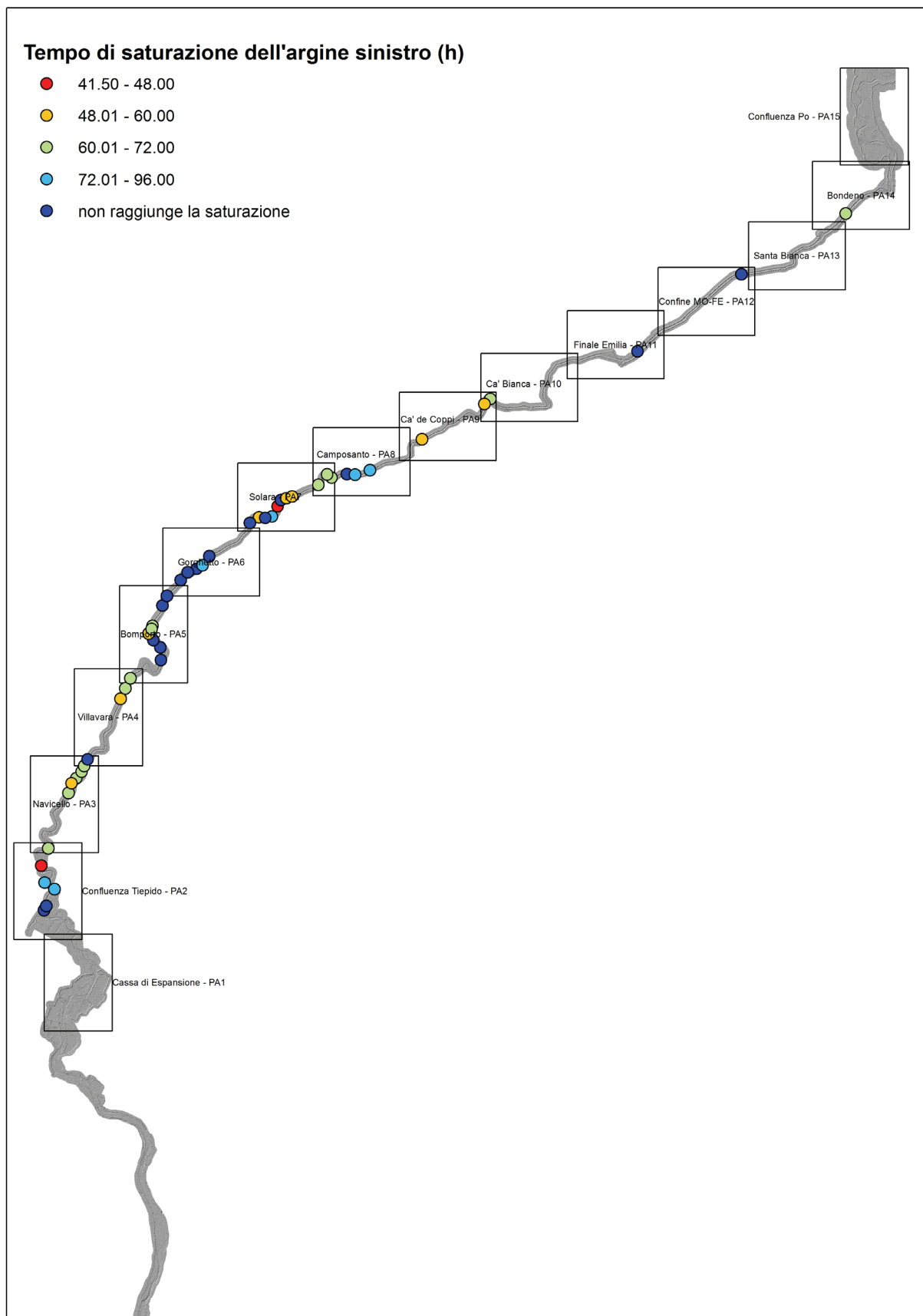


Figura 32. Tempi di saturazione dei corpi arginali in sinistra idraulica del profilo di piena ottenuto propagando, con il modello numerico HEC-RAS, l'onda di piena riportata in Figura 22.

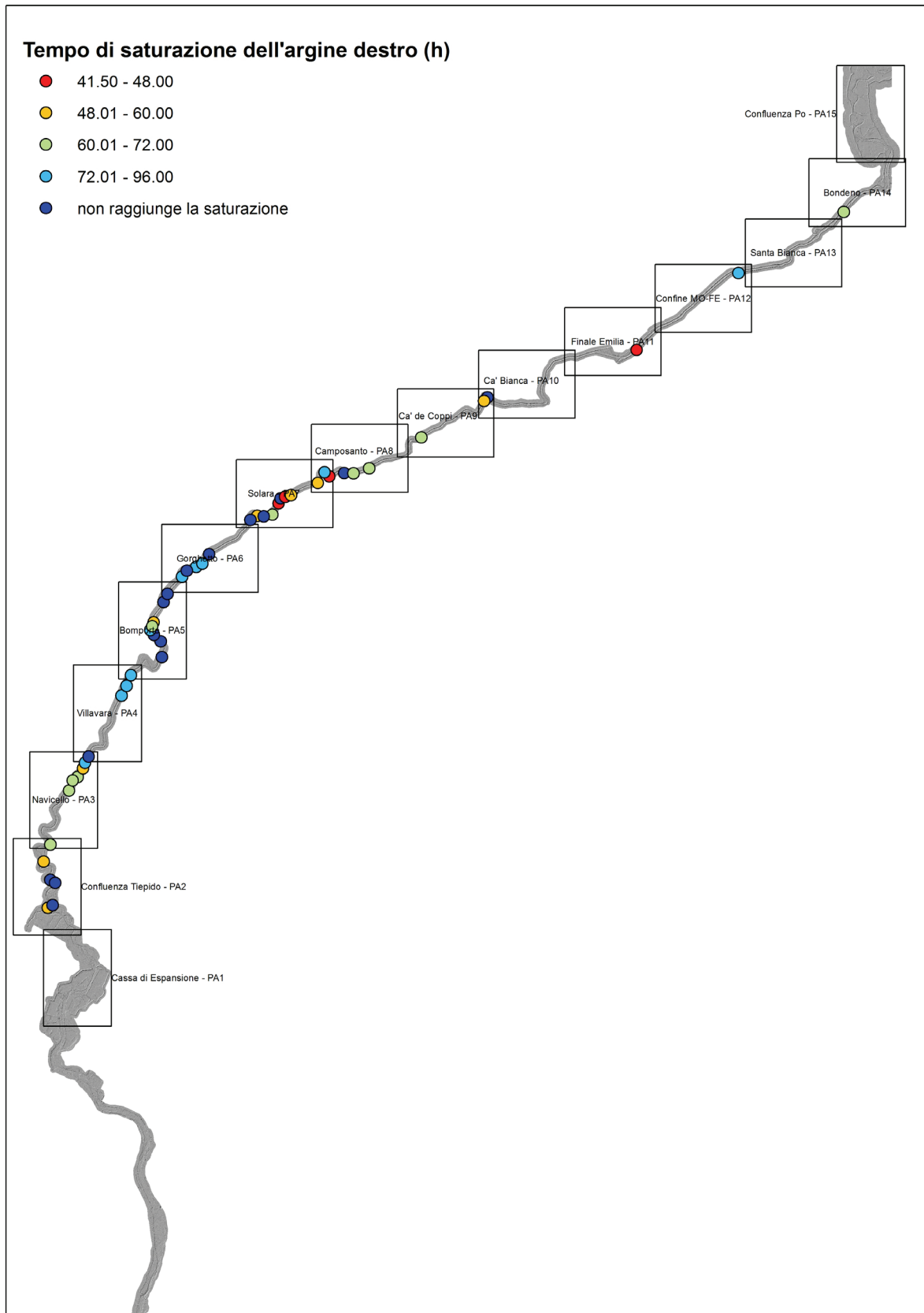


Figura 33. Tempi di saturazione dei corpi arginali in destra idraulica del profilo di piena ottenuto propagando, con il modello numerico HEC-RAS, l'onda di piena riportata in Figura 22.

Identificazione delle criticità

Le criticità individuate sono relative al funzionamento della cassa di espansione ed alla sicurezza idraulica lungo l'asta fluviale in termini di sormonto del rilevato arginale e fenomeni di filtrazione. La cassa di espansione di Sant'Anna ha mostrato che per una regolazione passiva delle paratoie mobili la configurazione che garantisce una migliore curva di fallanza è quella con tre paratoie operative (Figura 18). Tuttavia, è necessario notare che disattivando uno o più scarichi di fondo si incrementa in modo significativo il numero di casi in cui si raggiunge allo sfioro del manufatto regolatore principale (Figura 19). Se si passa ad una regolazione attiva delle paratoie mobili, allora la configurazione migliore in termini di curve di fallanza è rappresentato dalla configurazione con cinque paratoie operative (Figura 20 e Figura 21). In ogni caso considerato non si raggiunge mai il sormonto dell'arginatura maestra della cassa di espansione, ma per eventi di piena generati da precipitazioni con periodi di ritorno maggiori di 100 anni, non sempre si riesce a soddisfare il franco di sicurezza pari a 1.67 m. Garantire il rispetto del franco di sicurezza significa mantenere il livello di massimo invaso entro i 43.18 m slm a fronte di un'altezza delle arginature di 44.85 m slm. Per soddisfare la quota di massimo invaso è necessario definire una quota di invaso raggiunta la quale le paratoie devono essere aperte provocando di fatto il fallimento della regolazione in quanto da quel momento in poi si eccederà la portata Q_t . In Tabella 6 sono riportate le quote alle quali iniziare la riapertura delle paratoie in funzione delle diverse portate soglia di regolazione Q_r e dei periodi di ritorno di 200 e 1000 anni delle precipitazioni sollecitanti.

La portata defluibile nel corso d'acqua a valle della cassa di espansione ottenuta dalle simulazioni condotte con la regolazione attiva delle paratoie mobili è di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Tale portata di piena sormonta gli argini definiti dalla via Emilia in sinistra idraulica in prossimità della confluenza con il Torrente Tiepido in tre sezioni. Tali criticità sono locali e possono essere risolte con un intervento di adeguamento del rilevato arginale. Le criticità maggiori in termini di sormonto del rilevato arginale si concentrano maggiormente in sinistra idraulica, ma è da notare che per la portata di riferimento Q_t di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ il franco di sicurezza pari a 1 m non è soddisfatto per vari tratti fluviali compresi tra l'uscita della cassa di espansione e Camposanto (Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26). Il corso d'acqua presenta quindi un livello di rischio idraulico differente in quanto a monte di Camposanto i franchi di sicurezza disponibili sono regolarmente inferiori a quelli disponibili nel tratto fluviale a valle dell'abitato stesso.

Le analisi della saturazione dei rilevati arginali hanno messo in evidenza come le criticità sotto questo aspetto siano leggermente più distribuite lungo tutta l'asta fluviale anche se è indubbio che sia per quanto riguarda il tempo di saturazione del corpo arginale, sia per quanto riguarda l'altezza massima del fronte saturo sul piano campagna il tratto più vulnerabile appare sempre quello a monte in particolare tra il ponte di Sant'Ambrogio e la località Cà Bianca.

E' comunque bene sottolineare che il presente studio mette in luce come una regolazione attiva delle paratoie della cassa di espansione di Sant'Anna possa migliorare sensibilmente l'efficienza della cassa stessa ai fini della laminazione del colmo delle piene determinando però ovviamente idrogrammi in uscita dalla cassa e sollecitanti l'asta di valle caratterizzati da portate al colmo inferiori ma di durate maggiori. L'asta di valle così sollecitata mette in luce due vulnerabilità: una minore capacità di laminazione, la permanenza di livelli elevati per lungo tempo avvicina il suo

comportamento a quello ottenibile in condizioni di moto permanente, e una maggiore propensione alla saturazione dei corpi arginali sempre legata ad una maggiore permanenza di elevati battenti.

In conclusione, si segnala la criticità relative ai dati delle caratteristiche geometriche delle opere e degli strumenti posizionati lungo l'asta fluviale del Fiume Panaro. I rilievi ed i modelli digitali del terreno ad alta risoluzione disponibili non sono completamente coerenti tra loro in quanto le differenze relative tra le quote delle principali caratteristiche geometriche possono essere comprese tra valori medi di 30 cm e valori massimi di 100 cm. Tali differenze si rilevano sia sulla geometria delle opere idrauliche quali ad esempio i cigli di sfioro e coronamenti arginali, sia sulle quote relative agli strumenti di misura come ad esempio lo zero idrometrico.

Interventi suggeriti

I risultati ottenuti dall'analisi di fallanza della cassa di espansione mostrano che una regolazione attiva delle paratoie mobili contribuisce significativamente alla mitigazione del rischio idraulico per l'asta fluviale di valle. Tuttavia, per garantire il franco di sicurezza minimo rispetto al coronamento delle arginature principali della cassa di espansione, per portate con periodi di ritorno maggiori di 100 anni, è necessario abbandonare la manovra di regolazione della portata in uscita ed iniziare una manovra di apertura delle paratoie. La quota di inizio di tale manovra dipende dal periodo di ritorno dell'evento pluviometrico e dalla portata soglia di regolazione Q_r come riportato in Tabella 6.

I risultati mostrano una ridotta capacità di smaltimento della portata della parte dell'asta fluviale dalla cassa di espansione all'abitato di Camposanto per una lunghezza complessiva di 30 km del corso d'acqua. La portata di riferimento Q_r di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ non transita con un franco di sicurezza di 1 m su tutta l'asta fluviale per cui un primo intervento potrebbe essere quello di adeguare le quote dei rilevati arginali in destra e sinistra idraulica al fine di rendere più omogenee le condizioni di criticità. Come si può osservare in Tabella 9, se viene considerato un adeguamento in quota per garantire un franco minimo di sicurezza di 1 m sul profilo di riferimento, la portata massima transitabile in alveo con franco nullo o risulterebbe essere per Q_r di $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, che corrisponde ad un periodo di ritorno di circa 90 anni. Viceversa, se si decidesse di garantire un franco minimo di 1.5 m sul profilo di riferimento, allora la portata transitabile con franco nullo sarebbe di poco superiore alla portata Q_r di $650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. I risultati delle simulazioni ottenute ipotizzando un intervento che garantisca il transito della Q_r di $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con 1.5 m di franco, mostrano che la portata con periodo di ritorno 100 anni potrebbe passare nelle sezioni così adeguate con un franco minimo di circa 10 cm. Questa seconda ipotesi, però, comporta un'estensione degli interventi di adeguamento della quota arginale che è significativamente superiore alla prima ipotesi di franco di sicurezza minimo di 1 m. L'adeguamento in quota delle arginature per garantire il passaggio della portata con periodo di ritorno bicentenario non è stato preso in considerazione in quanto comporta un adeguamento dell'intero tratto arginato dalla cassa di espansione all'abitato di Camposanto.

I risultati delle simulazioni di filtrazione hanno evidenziato che il processo di saturazione per filtrazione dell'argine è influenzato dal volume di terreno insaturo disponibile per l'immagazzinamento dell'acqua di infiltrazione. La complessità dei processi coinvolti e la variabilità della geometria delle sezioni fluviali causa un notevole impatto sulla variabilità delle condizioni critiche rispetto al fenomeno della saturazione del rilevato arginale. Si ritiene necessario quindi un adeguamento delle sezioni dei rilevati arginali contestuali alle operazioni di adeguamento in quota della sommità degli argini.

Al fine di ridurre le incertezze legate alla modellazione del sistema fluviale, si ritiene necessario predisporre una campagna di rilievo dettagliata che renda coerenti tra di loro le quote relative alla geometria delle opere idrauliche e degli strumenti installati lungo il corso d'acqua. Inoltre, tra gli ulteriori interventi per la riduzione del grado di incertezza dei modelli si suggerisce la predisposizione di un'accurata campagna di raccolta dati per la validazione dei modelli sviluppati. La validazione dovrebbe essere finalizzata alla valutazione delle leggi di efflusso dal manufatto principale ed dei profili propagazione dell'onda di piena lungo l'asta fluviale in modo da riprodurre fedelmente il funzionamento del sistema fluviale durante un rilascio controllato di una piena

fluviale. Si ritiene opportuno che tali prove si predispongano per diverse portate di piena di media entità prima delle prove di invaso per il collaudo funzionale della cassa di espansione di Sant'Anna.

Bibliografia

ARPA – Servizio Idro Meteo Clima (2010). *Rapporto sull'evento meteo idrogeologico e idraulico del 22-28 dicembre 2009*. Rapporto tecnico. Centro Funzionale Regione Emilia Romagna.

Brath, A., M. Franchini, G. Galeati, Valutazione regionale degli indici di rischio idropluviometrico in alcune regioni dell'Italia centrale e settentrionale, CNR-GNDCI, Rapporto Interno, presentato in occasione della Riunione Annuale delle UU.OO. della Linea 1, Roma, 8 Aprile 1999

Huff F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, 3, 1007-1019.

Hawkins, R.H., R. Jiang, D.E. Woodward, A.T.m Hjelmfelt, J.A Van Mullem. (2002). Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. *Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, Nevada (U.S. Geological Survey), doi: 10.1111/j.1752-1688.2006.tb04481.x

Koutsoyiannis, D., (1997). *Statistical Hydrology* (in Greek), 4th Edition, Department of Water Resources, Hydraulic and Maritime Engineering - National Technical University of Athens, Greece.

Mignosa, P., F. Giuffredi, M. Valente, A. Belardi, M. D'Oria, L. Chiapponi, A. Zanini, S. Terzi, R. Fontana, M. Gasparini, F. Cupola (2011). *Prove su modello fisico del manufatto regolatore della cassa di espansione sul fiume Panaro*. Relazione tecnica.

Mignosa, P., L. Chiapponi, M. D'Oria, A. Prandi, F. Prost, S. Baldini, F. Pellegrini (2015). *Esecuzione di prove sul modello fisico del manufatto di regolazione della cassa di espansione sul fiume Panaro*. Relazione tecnica.

Orlandini, S., and G. Moretti (2009), Determination of surface flow paths from gridded elevation data, *Water Resour. Res.*, 45, W03417, doi:10.1029/2008WR007099

Orlandini, S., G. Moretti, and J. D. Albertson (2015), Evidence of an emerging levee failure mechanism causing disastrous floods in Italy, *Water Resour. Res.*, 51 (10), 7995-8011, doi: 10.1002/2015WR017426

