



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO



AREA DI LAMINAZIONE DELLE PIENE DEL TORRENTE GANDALOGGIO E ALTRI NEI COMUNI DI OGGIONO, SIRONE E ANNONE (LC)

Convenzione tra Regione Lombardia e Parco Regionale della Valle del Lambro del 18 novembre
2015

PROGETTO PRELIMINARE RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA

Il progettista
Ing. Daniele Giuffrè

Triuggio, maggio 2016





INDICE

1.	PREMESSA	3
2.	CRITICITÀ DELLO STATO DI FATTO	4
3.	OPERE IN PROGETTO.....	10
4.	IDROLOGIA	13
4.1.	DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEI BACINI	13
4.2.	PLUVIOMETRIA	15
4.3.	MODELLO DI INFILTRAZIONE	18
4.4.	PREDISPOSIZIONE DEL MODELLO NUMERICO IN HEC-HMS	21
4.5.	SIMULAZIONI EFFETTUATE E RISULTATI	24
5.	IDRAULICA.....	30
5.1.	MODELLAZIONE IDRAULICA DELL'AREA DI LAMINAZIONE	31
5.2.	RISULTATI OTTENUTI	32



1. PREMESSA

In questo documento vengono illustrati i dati di partenza, le ipotesi di modellazione adottate e le scelte progettuali effettuate, nonché i risultati ottenuti in relazione al funzionamento idraulico delle opere previste dal presente intervento.

La prima parte consiste dunque in una breve descrizione della situazione idrologico-idraulica attuale dei tre corsi d'acqua coinvolti – Bevera di Molteno, Rio Gandaloglio, Fosso dei Pascoli – e di come tale scenario sia destinato a cambiare in funzione di quanto previsto nel progetto.

Segue la quantificazione delle portate di piena attese nei tre torrenti alla sezione di chiusura considerata per vari tempi di ritorno.

Infine, nella parte idraulica, si presentano le modalità di funzionamento dell'area di laminazione in progetto, identificata nella zona campestre detta "Poncia", in Comune di Oggiono, per il contenimento delle suddette piene.

La relazione fa sovente riferimento a tre precedenti studi realizzati sui bacini di interesse:

- Il progetto esecutivo denominato *Interventi di sistemazione idraulica dei torrenti Bevera e Gandaloglio in comune di Molteno e limitrofi (LC) – Lotto 1* (richiamato d'ora in avanti nel testo come "progetto del 1° lotto"), realizzato, con una serie di aggiornamenti, dallo Studio Paoletti di Milano tra il 2001 e il 2014, la cui implementazione è necessaria agli interventi previsti nel presente progetto;
- Il documento intitolato *Redazione del modello di calcolo e gestione dell'opera da realizzare nell'ambito dei lavori di sistemazione idraulica dei torrenti Bevera e Gandaloglio – 1° Lotto* (richiamato come "manuale di gestione dell'opera"), realizzato sempre dallo Studio Paoletti nel Febbraio 2016 e contenente la modellazione idraulica dell'area di interesse in configurazione di stato di fatto e di progetto citato al punto precedente;
- La tesi di laurea specialistica *Studio del sistema delle aree di laminazione lungo il Lambro sublacuale ed affluenti finalizzata alla stesura del protocollo di gestione integrato per la difesa idraulica della valle e della città di Monza* (richiamato come "studio della aree di laminazione del Lambro") realizzata dall'Ing. Chiara Vellani nel 2013 presso il Politecnico di Milano, utilizzata come fonte per parte dei dati idromorfologici necessari all'implementazione del modello idrologico.



2. CRITICITÀ DELLO STATO DI FATTO

L'area di interesse progettuale è di per sé naturalmente predisposta a fenomeni di tipo alluvionale in quanto posta all'incontro in area semi-urbana di tre corsi d'acqua a carattere torrentizio. La crescente urbanizzazione dei rispettivi bacini, verificatasi negli ultimi anni, unita alla tombinatura della Bevera e del Gandaloglio nel centro abitato di Molteno e alla presenza di numerosi attraversamenti stradali lungo le aste, hanno reso il tratto che va dalle aree a monte della linea ferroviaria Como – Lecco, fino all'attraversamento della SS36 da parte della Bevera, una zona prioritaria in termini di interventi di difesa idraulica, come evidenziato all'interno del PGRA di Regione Lombardia, che la classifica (in buona parte) come area ad alta pericolosità alluvionale, con numerose problematiche riassunte in Figura 1, ed elencate di seguito:

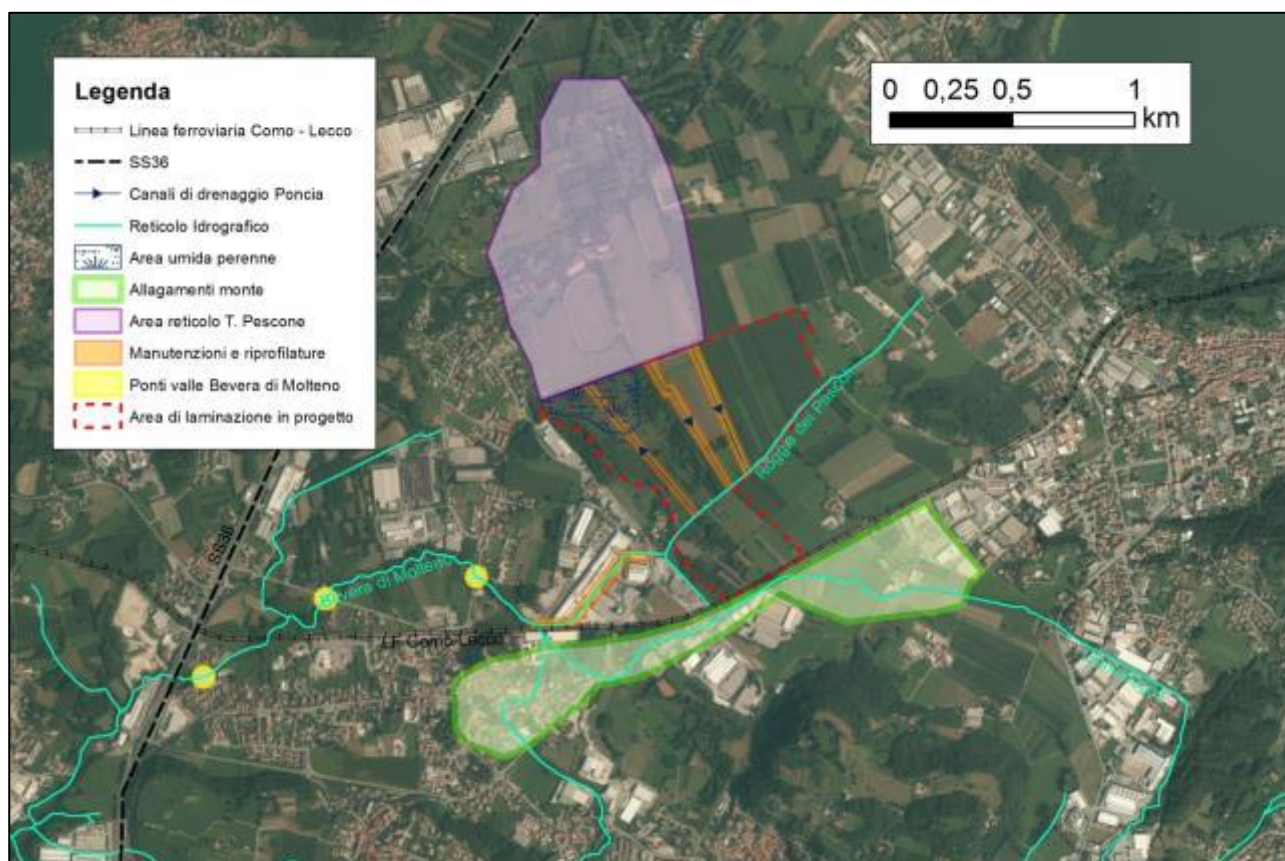


Figura 1: Ortofoto delle criticità presenti nella zona dell'area di progetto

- **Insufficienza idraulica a monte della confluenza.** Le portate di piena in arrivo dai bacini di Bevera e Gandaloglio incontrano ostacoli al deflusso significativi già a monte dell'area di progetto, generando idrogrammi “tagliati” e conseguenti esondazioni in tali zone per eventi relativamente



frequenti (dai 10 anni di tempo di ritorno in poi). In particolar modo, all'interno del progetto del 1° lotto, si evidenziano:

- per la Bevera, il sistema di ponti posti a servizio della SP52, al confine tra Sirone e Molteno, limita la portata in arrivo al centro abitato di Molteno al valore stimato di 25 mc/s;
- per il Gandaloglio, l'onda di piena giunge indisturbata fino a valle del ponte della SP51, in località Cascina Bergamina, per poi ridursi fino a 12.5 mc/s a seguito degli attraversamenti posti nella piana di valle. Parte del volume idrico qui invasato, seguendo il reticolo stradale, defluisce attraverso la zona industriale della Cascina Radaella, fino a raggiungere la SP49, oltrepassare la ferrovia e rientrare nella zona della Poncia (a Est dell'area di laminazione in progetto).

I due corsi d'acqua vengono poi entrambi intubati in corrispondenza del centro storico di Molteno, con sezioni insufficienti a far defluire le relative portate di piena in ingresso, anche se tagliate, causando così ulteriori allagamenti in corrispondenza dell'abitato, dell'area industriale di Sirone e lungo la SP49 (Figura 2);



Figura 2: Esondazione del T. Gandaloglio lungo la SP49, Settembre 1993



- **Ponti a valle della confluenza lungo la Bevera di Molteno.** A valle del centro abitato, i due torrenti tornano a pelo libero in corrispondenza della confluenza del Gandaloglio nella Bevera (Figura 3a), e poche decine di metri a valle vi confluisce anche il Fosso dei Pascoli (Figura 3b). La portata complessivamente ottenuta manda in crisi il sistema di ponti di valle fino all'attraversamento della SS36 (Figura 4) le cui luci sono insufficienti a far transitare i deflussi risultanti anche da eventi di precipitazione di pochi anni di tempo di ritorno. Dallo studio idraulico del progetto del primo lotto, la massima portata compatibile con le luci dei suddetti ponti viene stimata in 29 mc/s, valore inferiore alle portate di picco ottenute alla confluenza per eventi di tempo di ritorno pari o superiore a 10 anni;



Figura 3: confluenza a) di Gandaloglio e Bevera a valle del centro abitato di Molteno e b) del Fosso dei Pascoli nella seconda pochi metri a valle



Figura 4: Veduta a) di monte del ponte di Via Moro e b) di valle del ponte di Via Mazzini lungo il corso della Bevera, in comune di Molteno



- **Rete di drenaggio del Torrente Pescone.** Le portate affluenti all'area di laminazione a valle della linea ferroviaria dal bacino del Fosso dei Pascoli e dal sistema di tombotti esistenti che portano le acque del Gandaloglio attraverso la ferrovia defluiscono verso Nord, generando, già allo stato di fatto, l'allagamento dell'area di progetto. Inoltre il confine settentrionale dell'area ricalca anche in buona parte lo spartiacque tra i bacini della Bevera di Molteni e del Torrente Pescone, coincidente con il rilevato di confine della proprietà "La Nuova Poncia" indicato in Figura 5. Per eventi di pioggia significativi (come successo nel 1993, 2010, 2014, Figura 6) il tirante idrico nell'area di laminazione supera la quota di coronamento del rilevato spagliando verso nord e andando a saturare il reticolo afferente al torrente Pescone. La realizzazione degli interventi previsti nel 1° lotto acuirebbe ulteriormente questa criticità, incrementando le portate in ingresso all'area, senza porre alcun ostacolo al successivo libero spagliamento delle acque al suo interno. Nel manuale di gestione dell'opera viene indicata, in configurazione di progetto, una portata sfiorata di picco di 9 mc/s, circa tre volte superiore alla massima portata attualmente smaltibile;

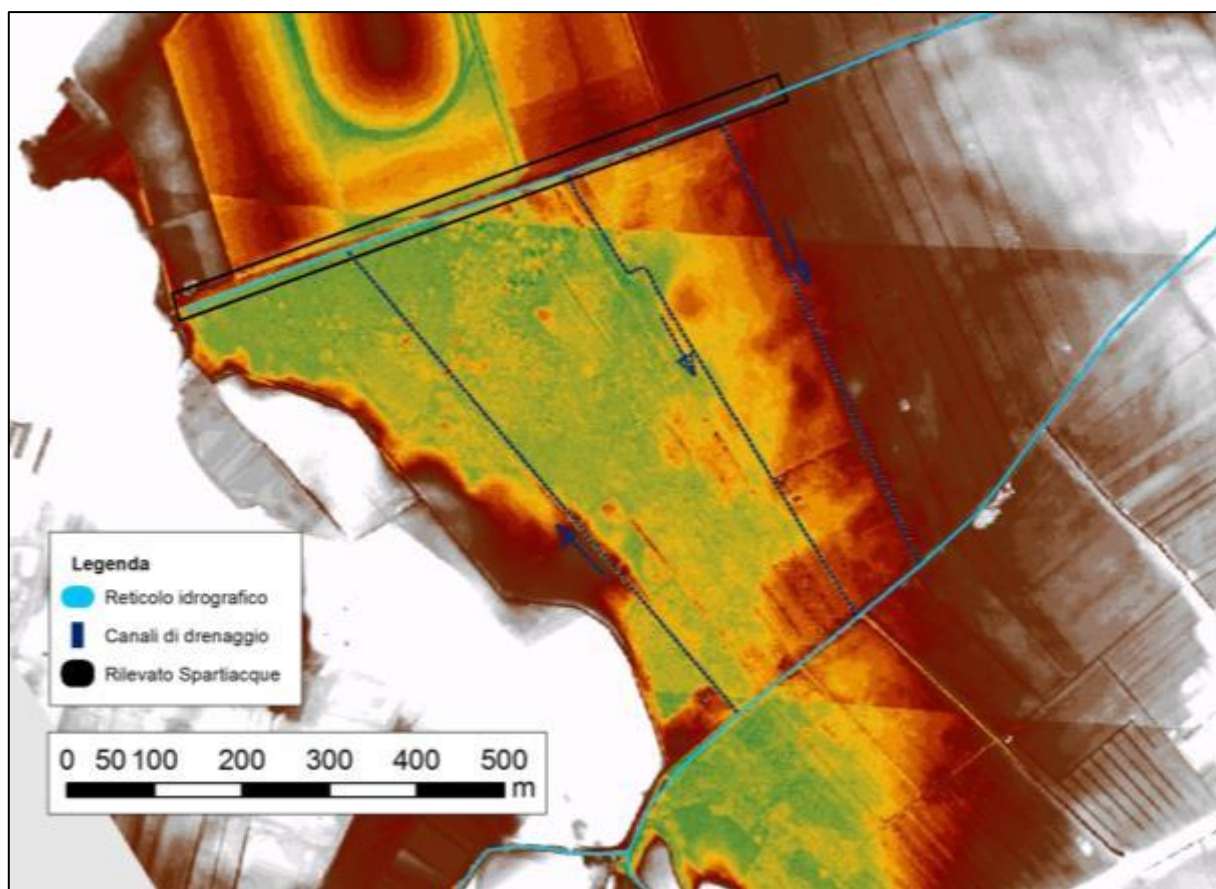


Figura 5: rilievo LIDAR delle quote dell'area di progetto, a crescere dal verde al marrone

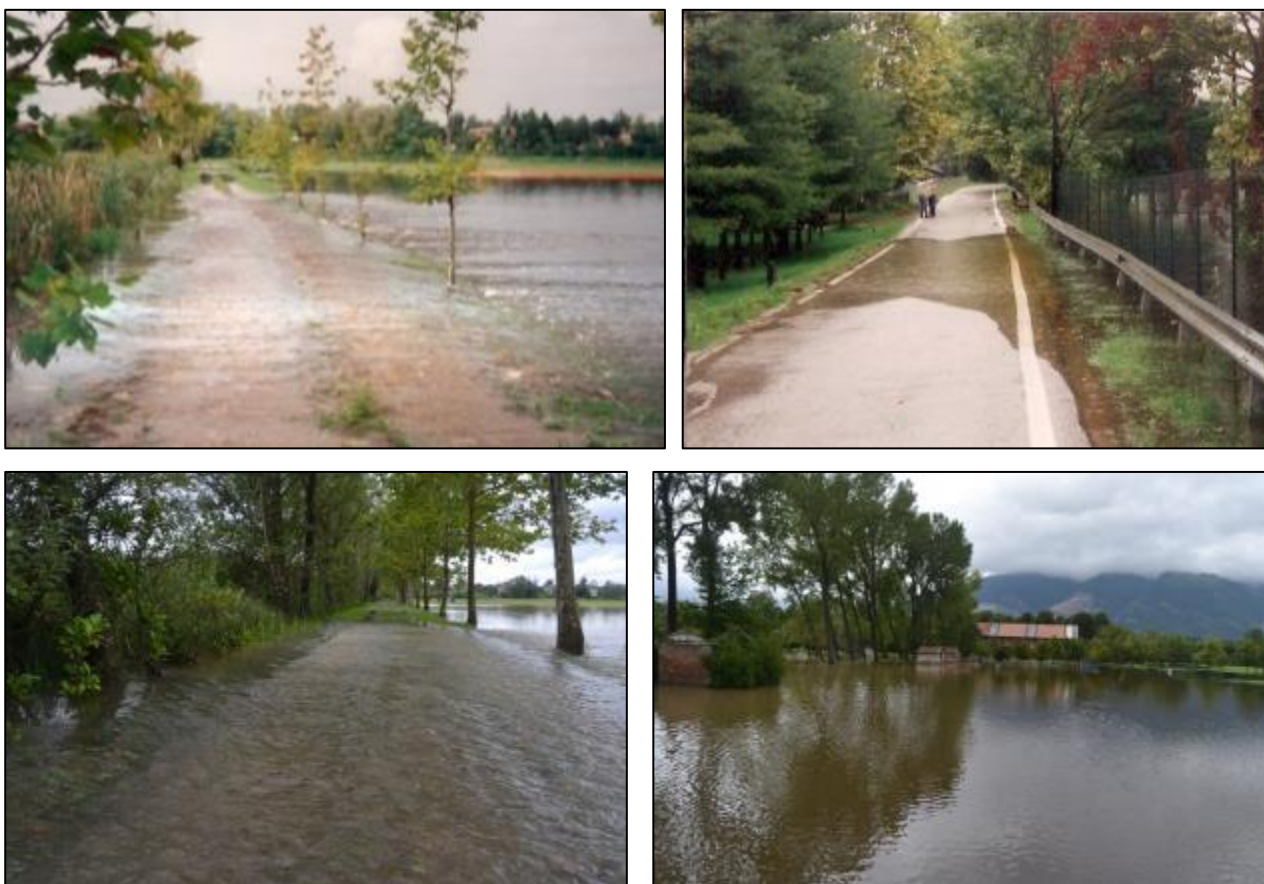


Figura 6: sormonto del rilevato spartiacque lungo il confine della proprietà "La nuova Poncia" durante gli eventi di piena del a) Settembre 1993 e c) Agosto 2010; inondazione della strada lungo il confine settentrionale della proprietà (1993) e d) allagamento della proprietà stessa (2010)

- **Rete di drenaggio dell'area della "Poncia".** L'attuale stato della rete di drenaggio interna all'area di laminazione, di cui sono indicati in Figura 1 i tratti più importanti, è inadeguato a garantirne un corretto funzionamento in fase di svuotamento: la mancanza di manutenzione sui fossi, in una zona di per sé caratterizzata da pendenze particolarmente ridotte, ha portato al progressivo interrimento degli stessi, generando così una zona di ristagno perenne nella parte più settentrionale (Figura 1, Figura 7), dove le quote sono più basse. Sempre in un'ottica di gestione post-evento di piena anche il tratto di Fosso dei Pascoli in uscita dall'area di laminazione fino alla confluenza con la Bevera si presenta in uno stato di scarsa manutenzione che precluderebbe l'ottimale funzionamento della vasca in fase di svuotamento.



Figura 7: panoramica dell'area umida perenne nella parte settentrionale dell'area di laminazione



3. OPERE IN PROGETTO

La configurazione progettuale adottata (si rimanda alla relazione illustrativa per la spiegazione dettagliata delle alternative prese in considerazione) ricalca una delle prime proposte presentate per la risoluzione dei problemi idraulici della zona che prevedeva un contenimento parziale dell'area di laminazione al fine di trattenere l'esondazione di Gandaloglio e Fosso dei Pascoli all'interno della "Poncia", anziché consentire il libero spagliamento delle acque come avverrebbe nel caso della sola realizzazione del 1° lotto. Dal punto di vista idraulico l'insieme delle opere unitamente agli interventi previsti per il 1° lotto andrà a costituire un'area di laminazione mista, con un comportamento "in linea" per il Fosso dei Pascoli, e "in derivazione" per il torrente Gandaloglio.

I principali interventi previsti in questo progetto sono quindi:

- Realizzazione di due rilevati per il confinamento delle acque all'interno della "Poncia" Il primo, interamente in terre sciolte, a delimitare il lato SUD-EST dell'area, mentre il secondo, che delimita il lato NORD, è previsto in parte in terre sciolte e in parte, lungo i tratti attualmente carrabili, in terre armate. Le caratteristiche geometriche indicative per entrambi sono elencate Tabella 1, mentre in Figura 8 se ne mostrano i particolari costruttivi.

Rilevato	L_{arm} [m]	$L_{non arm}$ [m]	W_{cor} [m]	H_{avg} [m]	H_{max} [m]	$\alpha_{sponde arm}$ [°]	$\alpha_{sponde non arm}$ [°]
1 (SUD-EST)	0	915	4	0,4	1,2	/	34°
2 (NORD)	715	500	4	0,8	1,5	70°	34°

Tabella 1: caratteristiche geometriche di base dei rilevati previsti all'interno del progetto

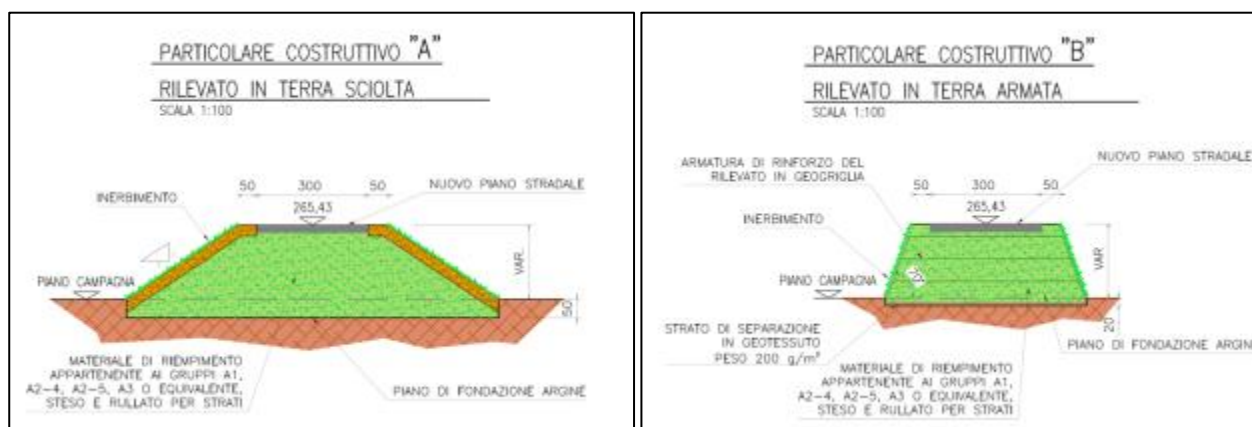


Figura 8: sezione trasversale delle due tipologie di rilevati previsti



La quota di coronamento scelta per entrambi, 265.43 m s.l.m., garantisce la protezione naturale degli altri lati per l'evento di riferimento pari ad un tempo di ritorno di 50 anni. Il lato SUD è infatti delimitato dalla linea ferroviaria Como – Lecco il cui punto più depresso del piano del ferro si trova circa 1 metro più in alto della quota di coronamento; il lato OVEST è interamente protetto da una dorsale naturale che corre lungo Via dell'Industria (vedi relazione geologico-geotecnica), eccezion fatta per il tratto in corrispondenza del Fosso dei Pascoli che costituirà l'efflusso dalla vasca e verrà adeguatamente connesso alla dorsale esistente come spiegato al punto successivo; infine lungo il lato EST non si prevede alcuna arginatura, in quanto il terreno giunge a livello con la quota di coronamento al limitare dell'area della Poncia. Entrambi i terrapieni saranno dotati di valvole a clapet poste in corrispondenza dei canali di drenaggio in ingresso all'area, al fine di garantirne il regolare deflusso durante i periodi di magra;

- Opera di restituzione. Ipotizzando che lo svuotamento della vasca avvenga per intero tramite il Fosso dei Pascoli si prevede l'installazione di un'opera di regolazione (paratoia) all'uscita di quest'ultimo dall'area di laminazione in modo da garantire un deflusso controllato dei volumi idrici invasati verso la Bevera. Nello specifico è previsto che il collegamento dell'opera alla dorsale del lato OVEST mediante rilevato in terra nonché la struttura di alloggiamento vengano realizzati al di fuori di questo progetto e all'interno di un finanziamento erogato al Comune di Sirone da parte di Regione Lombardia, lasciando a carico del presente progetto la sola posa dell'opera di regolazione;
- Riprofilature e manutenzioni dei corsi d'acqua. Sempre al fine di ottimizzare il processo di svuotamento è prevista la pulizia e l'adeguamento del tratto del Fosso dei Pascoli che dall'opera di restituzione conduce alla confluenza in Bevera in modo da garantirne il funzionamento idraulico in sicurezza (il fosso è fiancheggiato da due aree industriali in questo tratto) per le portate attese in uscita. Analogamente, si prevede la riprofilatura di un canale di drenaggio minore che attualmente scarica i suoi deflussi nell'angolo nord-occidentale della Poncia: dal momento che la realizzazione del rilevato "2" ne impedirà lo scarico, per evitare l'accumulo delle sue acque all'interno della proprietà "La Nuova Poncia", se ne devierà il flusso verso il reticolo minore affluente al Torrente Pescone ormai scaricato dalle acque provenienti da Gandaloglio e Fosso dei Pascoli;

Alle opere del presente progetto vanno aggiunti gli interventi previsti, nonché già aggiudicati, all'interno del 1° lotto di lavorazioni, consistenti in:

- un canale scolmatore realizzato sul Gandaloglio a monte del centro storico di Molteni, che attraverserà la linea ferroviaria Como – Lecco mediante uno scatolare intubato, entrando nell'area di laminazione, fino a raggiungere il Fosso dei Pascoli;



- la risagomatura e manutenzione della rete di drenaggio interna alla Poncia, al fine di ottenere un sistema di canali, afferenti al Fosso dei Pascoli, in grado di convogliare e far defuire il volume idrico accumulato durante l'evento di piena in direzione dell'opera di restituzione nel più breve tempo possibile.

Infine, si ribadisce l'importanza delle opere di manutenzione e adeguamento del reticolo di drenaggio del T. Pescone, a Nord dell'area di laminazione in progetto, indicate all'interno della relazione illustrativa e a carico dei privati. Bisogna infatti considerare che l'area della Poncia, nella configurazione proposta dal presente progetto, come tutti gli invasi di laminazione, è ipotizzata per funzionare correttamente fino a eventi del tempo di ritorno di progetto (50 anni, lo stesso considerato per il 1° lotto); è pertanto fondamentale che, per eventi più gravosi, il sistema di drenaggio di valle sia in grado di smaltire in sicurezza le portate in ingresso derivanti dal sormonto del rilevato "2".

La localizzazione dei vari interventi è indicata in Figura 9.

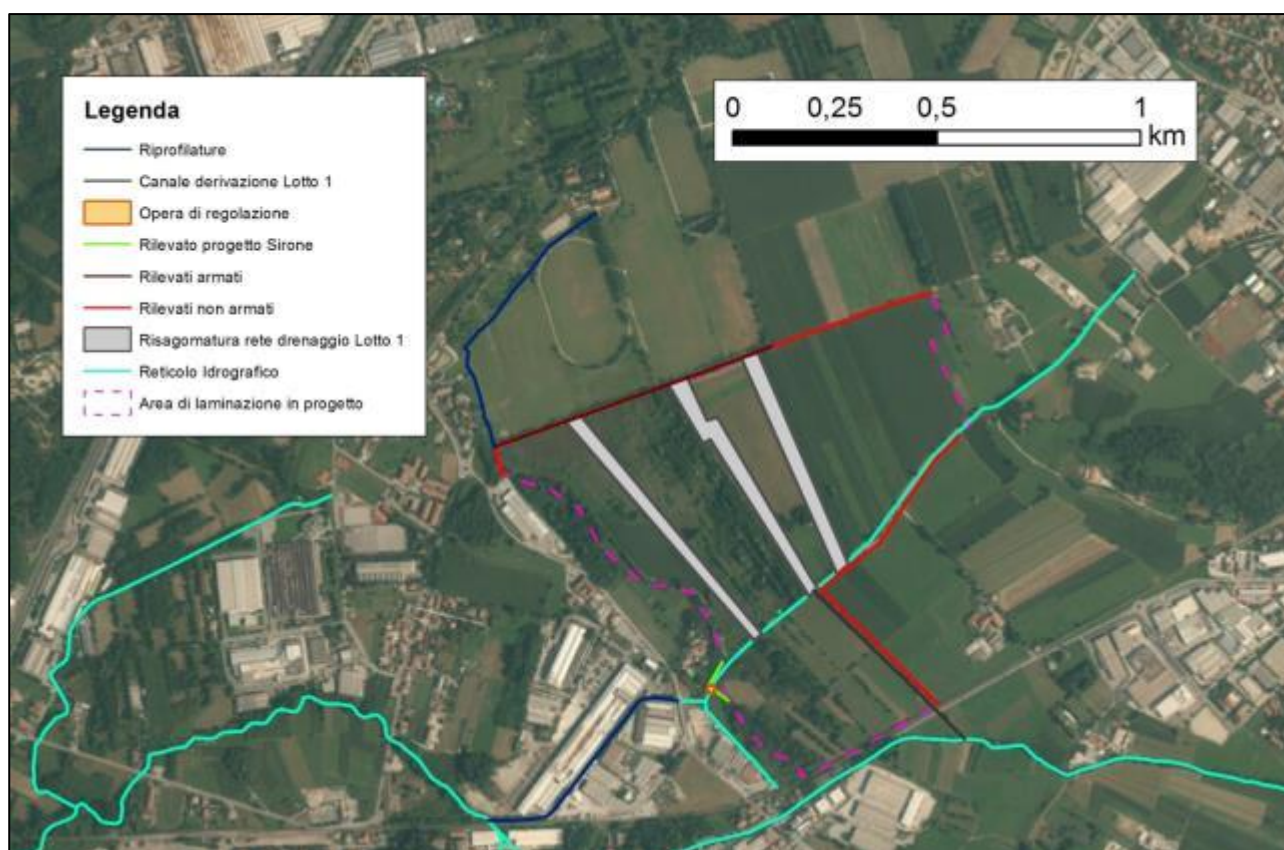


Figura 9: sintesi degli interventi



4. IDROLOGIA

Per la determinazione delle portate di piena affluenti alla confluenza dei tre corsi d'acqua – Bevera di Molteno, Torrente Gandaloglio e Fosso dei Pascoli – coinvolti nel progetto, visto il livello di dettaglio dei dati a disposizione, è stato adottato un modello afflussi-deflussi di tipo concettuale, ovvero in cui le caratteristiche idrologiche del bacino sono sintetizzate in una serie di parametri, atti a definirne la risposta a una certa precipitazione, anche se impiegato in maniera semi-distribuita: data la notevole varietà delle caratteristiche idrogeomorfologiche e di urbanizzazione presenti al suo interno, il bacino chiuso alla confluenza dei tre torrenti è stato suddiviso in una serie di sottobacini omogenei, modellati singolarmente, in modo da poter valutare con maggior precisione e livello di dettaglio le tempistiche di corrivazione e l'entità degli afflussi che progressivamente drenano nella rete di smaltimento delle acque. Tale modello afflussi-deflussi è stato realizzato mediante il software HEC-HMS, sviluppato dall'*US Army Corp of Engineers*.

4.1. DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEI BACINI

La caratterizzazione idromorfologica per i tre bacini dei torrenti in esame è stata ricavata dallo studio delle aree di laminazione del Lambro citato in premessa, contenente una dettagliata schematizzazione in sottobacini delle aree d'interesse, adottata come base di riferimento, con locali approfondimenti dove necessario (soprattutto per il bacino del Fosso dei Pascoli), mediante l'utilizzo dei seguenti dati:

- Rilievo altimetrico di precisione (1x1 m) ottenuto mediante tecnica di telerilevamento LIDAR, e fornito dall'archivio cartografico di Regione Lombardia;
- DTM 20x20 metri dell'area di interesse, ottenuto dall'archivio cartografico del Sistema Informativo Nazionale Ambientale (SINAnet);
- Carta geologica, carta di uso del suolo (scala 1:50000), reticolo idrografico e schema dei sottobacini dell'area di interesse, ottenute dall'archivio cartografico della Regione Lombardia;
- Rilievi aerofotogrammetrici comunali dei quattro comuni coinvolti nel progetto (Oggiono, Molteno, Sirone, Annone Brianza);
- Relazione geologico-tecnica realizzata per il presente progetto;
- Ortofoto dell'area di interesse.

La suddivisione in sottobacini per la Bevera di Molteno e il Rio Gandaloglio, contenuta nel sopracitato studio, è avvalorata dal confronto complessivo delle aree e delle lunghezze delle aste risultanti con i valori adottati nell'ambito della progettazione del 1° lotto, mentre sussiste una notevole differenza nella valutazione del bacino drenato dal Fosso dei Pascoli, come indicato in Tabella 2 .



	Bevera di Molteno		Rio Gandaloglio		Fosso dei Pascoli	
	L _{ASTA PR.} [km]	A _{DRENATA} [km ²]	L _{ASTA PR.} [km]	A _{DRENATA} [km ²]	L _{ASTA PR.} [km]	A _{DRENATA} [km ²]
<i>Prog. 1° Lotto</i>	12,4	17,7	9,2	10,2*	2,7	5,6
<i>Studio Aree Laminaz. Lambro</i>	12,8	18,4	8,9	11,7	1,6	1,24

* + 1,5 kmq non considerati dai progettisti in quanto parte della città di Oggiono drenante nel Lago di Annone, scelta precauzionalmente esclusa in fase preliminare in mancanza di un sopralluogo dettagliato dell'area.

Tabella 2: aree e aste principali dei bacini in esame

Tutti i valori indicati prendono come sezione di chiusura la confluenza (pressoché puntuale) dei tre corsi d'acqua a valle dell'abitato di Molteno.

Vista la notevole discrepanza relativa al Fosso dei Pascoli, si è optato per determinarne autonomamente il bacino, sulla base dei dati a disposizione: dal momento che l'estensione del rilievo LIDAR copre solo parzialmente l'area di interesse, e il DTM 20x20 si è dimostrato troppo grossolano per le lievi pendenze del bacino in questione (il reticolo idrografico da questo ottenuto terminerebbe nel Lago di Annone) si è scelta come soluzione più affidabile quella ottenuta dal DTM ricavato interpolando le quote degli aerofotogrammetrici comunali, integrata da considerazioni *ad-hoc* in presenza di ostacoli al deflusso (ad es. la ferrovia), nonché dai risultati dei sopralluoghi effettuati in sito. Il bacino drenato così ottenuto per il Fosso dei Pascoli risulta estendersi per circa 2.2 km², e viene mostrato in Figura 10 insieme ai sottobacini degli altri due corsi d'acqua (8 per la Bevera di Molteno e 2 per il Gandaloglio). A seguito di sopralluogo effettuato sull'area si considera invece affidabile la lunghezza dell'asta adottata nello studio delle aree di laminazione del Lambro, pari a 1.57 km, pur essendone stato abbassato il valore della pendenza media, da 5% a 1.2%.

I parametri necessari all'analisi idrologica (area, lunghezza e pendenza dell'asta principale, % di area impermeabile, etc.) relativi ai singoli sottobacini sono contenuti all'interno del sottoparagrafo 4.4.

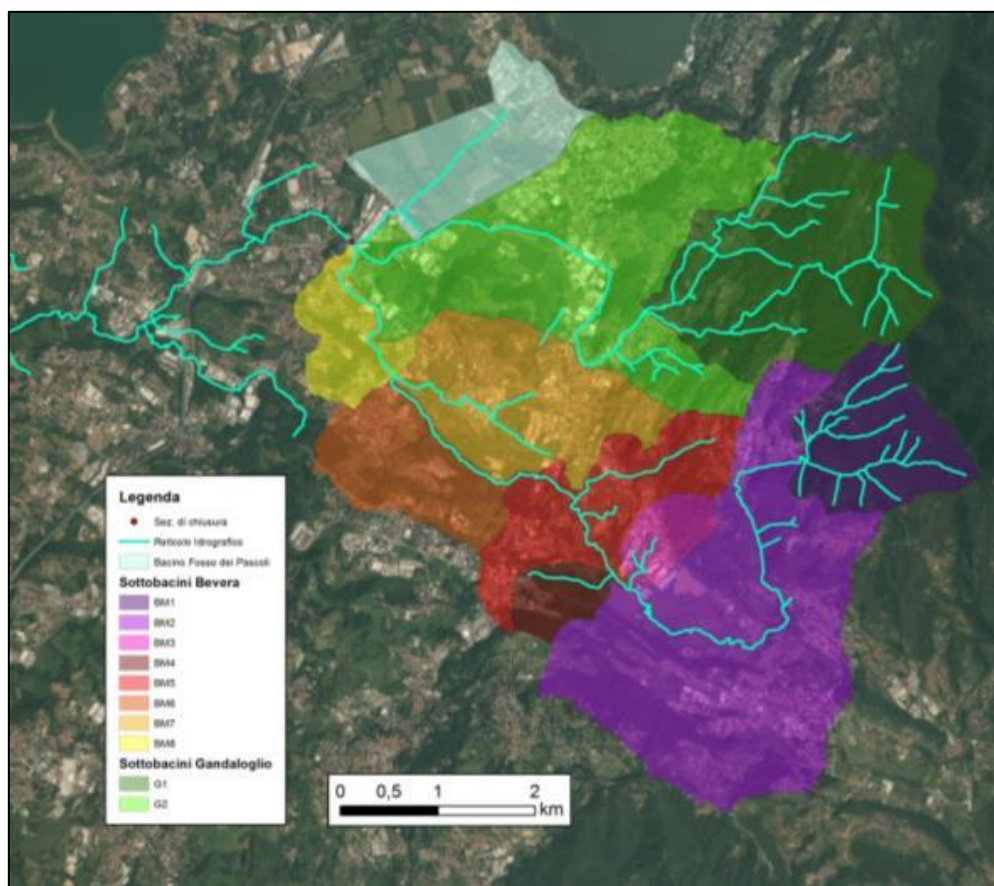


Figura 10: suddivisione in sottobacini adottata per il modello idrologico

4.2. PLUVIOMETRIA

Dal punto di vista meteorologico si è deciso di verificare il comportamento delle aree di espansione per precipitazioni di diverso tempo di ritorno, a partire da eventi poco più che ordinari ($T = 2$ anni), fino all'evento cinquantennale sul quale sono state dimensionate le opere del 1° lotto dell'intervento. Sempre per ragioni di continuità con il precedente progetto è stato utilizzato lo ietogramma Chicago (Keifer e Chu, 1957), le cui caratteristiche – forma impulsiva e intensità media pari a quella della Curva di Possibilità Pluviometrica (CPP) – garantiscono, per una precipitazione di una durata pari o superiore al tempo di corrvazione del bacino principale, la presenza all'interno di essa delle piogge critiche per tutti i sottobacini, il che solleva dalla ricerca dell'evento critico per i singoli bacini. L'andamento temporale dello ietogramma Chicago, prima e dopo il picco, è dato dalle seguenti espressioni:

$$\begin{cases} i(t) = n_T a_T \left(\frac{t_p - t}{k} \right)^{n_T - 1} & t \leq t_p \\ i(t) = n_T a_T \left(\frac{t - t_p}{1 - k} \right)^{n_T - 1} & t > t_p \\ t_p = k\vartheta \end{cases}$$



dove n_T [/] e a_T [mm/h] sono i parametri della CPP per assegnato tempo di ritorno, ϑ [h] è la durata della precipitazione e t_p [h] l'istante di picco. Il valore medio di $i(t)$ è coincidente con la corrispondente CPP per il tempo di ritorno considerato:

$$i(\vartheta) = a_T \vartheta^{n_T-1}$$

Nel caso specifico è stata considerata una precipitazione di durata 24 ore, valore significativamente superiore ai tempi di corrivazione dei tre corsi d'acqua alla sezione di chiusura considerata (compresi tra 3 e 6 ore secondo il progetto del 1° lotto), con un picco posizionato a 10 ore ($k=0.4$, Grafico 2).

Per la scelta delle CPP, le curve adottate per il 1° lotto, ricavate da apposita elaborazione statistica dei dati di pioggia osservati alla stazione pluviografica di Costa Masnaga, sono state confrontate con le più recenti curve fornite per l'area d'interesse dal Piano d'Assetto Idrogeologico (PAI). Risultando più severe le prime (Tabella 3), si è deciso di mantenerle per il presente lavoro (Grafico 1) calcolandole per diversi tempi di ritorno al fine di valutare il funzionamento delle aree di espansione in condizioni progressivamente più severe.

<u>CPP</u>	<u>1° Lotto</u>		<u>PAI</u>	
T_R	a	n	a	n
2	34,924	0,2914	65,43	0,309
3	41,855	0,3032		
5	49,573	0,3123		
7	54,352	0,3165		
10	59,268	0,3201		
15	64,738	0,3235		
20	68,567	0,3255		
30	73,915	0,3279		
50	80,503	0,3305	84,85	0,31
100	89,621	0,3334		
200			93,11	0,31
500			104,04	0,31

Tabella 3: parametri delle CPP dell'area di interesse

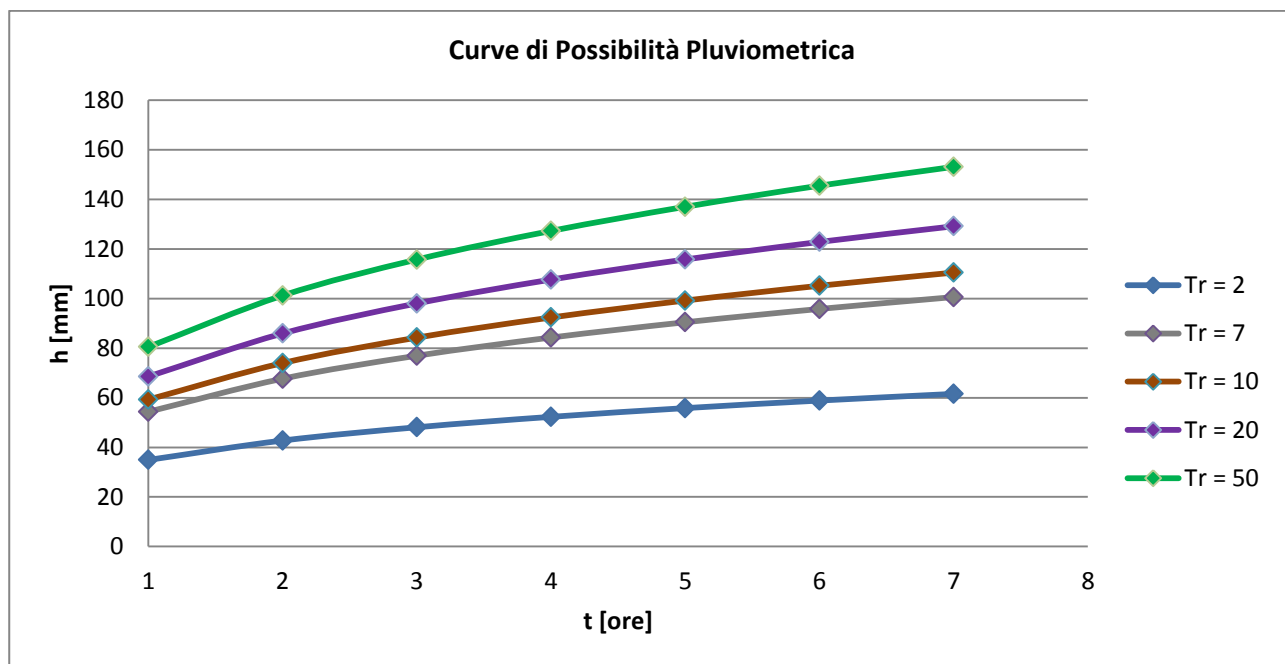


Grafico 1: curve di possibilità pluviometrica di progetto

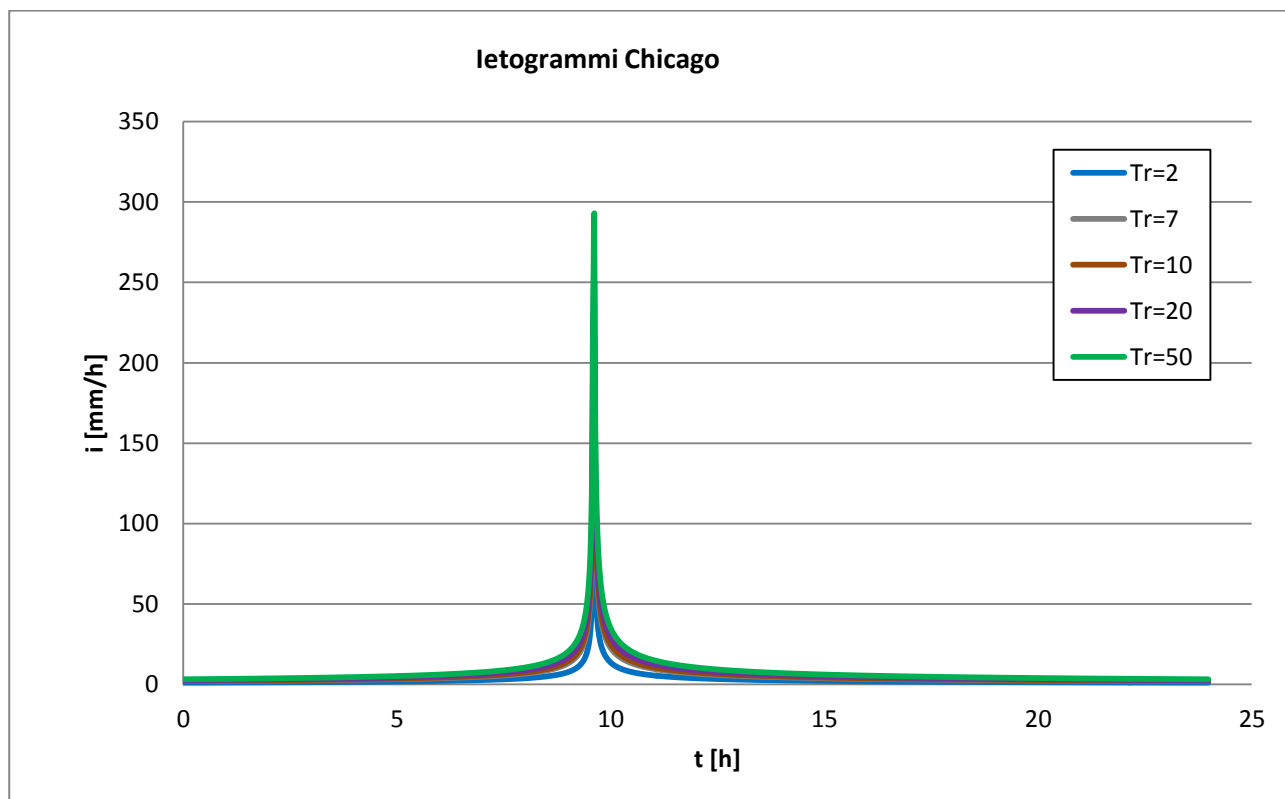


Grafico 2: ietogrammi di progetto



4.3. MODELLO DI INFILTRAZIONE

Per determinare la quota di precipitazione lorda in ingresso contribuente al deflusso superficiale e dunque alla formazione dell'onda di piena, è stato adottato il metodo SCS-Curve Number sviluppato dal Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture. Tale metodologia semi-empirica lega il coefficiente di afflusso della pioggia in maniera non lineare alla sua durata, sulla base di due relazioni fondanti:

- continuità. L'altezza di pioggia lorda (I) viene bilanciata nel modello dalla somma di imbibimento iniziale (I_a), infiltrazione (F) e deflusso superficiale (P), tutte espresse in mm:

$$I = I_a + F + P ;$$

- "moto". In realtà è un'equazione empirica di proporzionalità, che stabilisce che il deflusso superficiale sta alla precipitazione lorda, depurata dell'imbibimento iniziale, come la quantità di acqua filtrata sta al potenziale di ritenzione idrica del terreno (S):

$$\frac{P}{I - I_a} = \frac{F}{S} ;$$

Combinando le due equazioni, si ottiene l'altezza di pioggia netta in funzione di quella lorda:

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

Dal momento che, in genere, si considera l'imbibimento iniziale come una quota parte di S (in mancanza di dati precisi sui tassi di infiltrazione si può assumere, per aree non significativamente urbanizzate, $I_a = 0.2S$), il potenziale di ritenzione del terreno rimane l'unico parametro da stabilire all'interno del modello. Lo si ottiene attraverso la seguente formula:

$$S = S_0 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

dove S_0 è il massimo potenziale di ritenzione idrica di un terreno, pari a 254 mm, e CN è il Curve Number, un indice empirico che, sulla base delle caratteristiche geologiche e di uso del suolo, definisce il grado di rifiuto del terreno nei confronti della pioggia in ingresso. È compreso tra 1, infiltrazione massima, e 100, deflusso massimo.

Per valutare il CN , dapprima si stabilisce una classe idrologica per il bacino, sulla base delle informazioni ottenute dalla carta geologica (si va da A – suoli più drenanti - a D – suoli più impermeabili), calcolando poi il valore del Curve Number complessivo come media pesata dei singoli valori assegnati alle varie aree a seconda destinazione d'uso del rispettivo suolo. Il risultato così ottenuto è il cosiddetto CN_{II} , o CN medio, a sua volta modificabile, a seconda delle condizioni di imbibimento iniziale del terreno, attraverso alcune relazioni empiriche.



Relativamente a Bevera e Gandaloglio, sono stati considerati validi i valori di CN indicati nello studio dell'Ing. Vellani, la cui media pesata sui singoli sottobacini (rispettivamente pari a 65.4 e 63.6) fornisce valori molto simili a quelli adottati nella modellazione idrologica del 1° lotto (65 per entrambi), mentre ancora una volta le notevoli differenze relative al bacino del Fosso dei Pascoli (76 del presente studio contro 50 del precedente), hanno richiesto un'analisi *ad hoc*. Basandosi sulle osservazioni contenute nella relazione geologica-geotecnica di questo progetto, l'area di esondazione, che costituisce gran parte del bacino drenato dal Fosso, presenta caratteristiche piuttosto eterogenee, con alternanza di limi non consolidati di origine paleolacustre, a bassa permeabilità ($10^{-7}/10^{-8}$ m/s) e depositi grossolani di natura fluvio-glaciale, a permeabilità moderata (10^{-5} m/s), fino ad almeno 15 metri di profondità. Si è dunque optato per una classe idrologica intermedia, tra B e C, che mediasse le due condizioni rispetto all'intera superficie. Sulla base della carta di uso dei suoli, si è infine assegnato un valore di CN per ciascuna area a uso omogeneo (Figura 11, Figura 12, Figura 13)

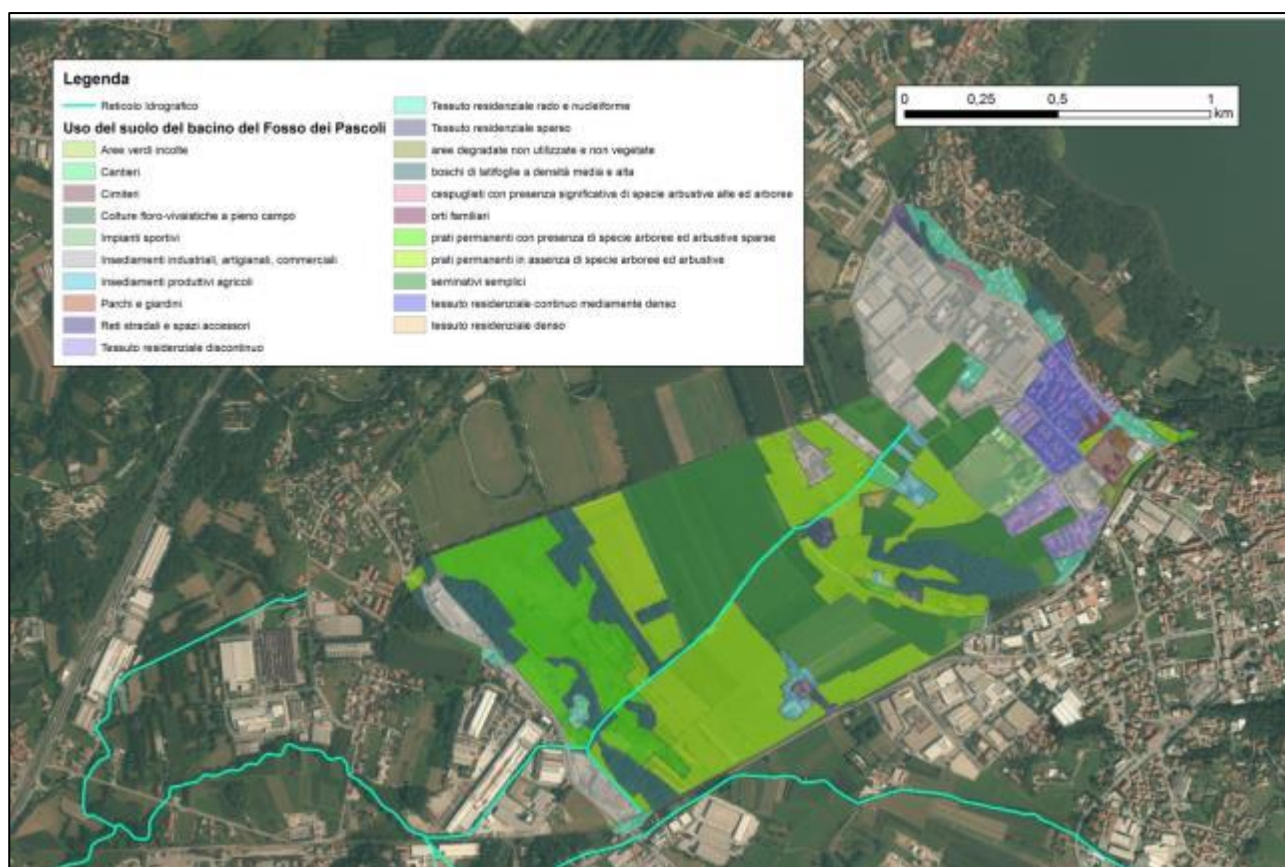


Figura 11: mappatura DUSAF4 dell'uso del suolo per il bacino del Fosso dei Pascoli



Tipo idrologico di suolo	Descrizione
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde, molto permeabili.
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.
D	Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza delle superfici.

Figura 12: Classi di tipo idrologico di suolo e relativa descrizione

Valori del parametro CN (adimensionale)	← Tipo idrologico Suolo →			
↓ Tipologia di Uso del Territorio	A	B	C	D
Coltivazioni, in presenza di pratiche di conservazione del suolo	62	71	78	81
Coltivazioni, in assenza di pratiche di conservazione del suolo	72	81	88	91
Terreno da pascolo: cattive condizioni	68	79	86	89
buone condizioni	39	61	74	80
Boschi, in presenza di copertura rada e senza sottobosco	45	66	77	83
Boschi e foreste, in presenza di copertura fitta e con sottobosco	25	55	70	77
Spazi aperti con manto erboso superiore al 75% dell'area	39	61	74	80
Spazi aperti con manto erboso compreso tra il 50 ed il 75% dell'area	49	69	79	84
Spazi aperti con manto erboso inferiore al 50% dell'area	68	79	86	89
Zone industriali (area impermeabile 72%)	81	88	91	93
Zone commerciali e industriali (area impermeabile 85%)	89	92	94	95
Zone residenziali, lotti fino a 500 m ² (area impermeabile 65%)	77	85	90	92
Zone residenziali, lotti di 500÷1000 m ² (area impermeabile 38%)	61	75	83	87
Zone residenziali, lotti di 1000÷1500 m ² (area impermeabile 30%)	57	72	81	86
Zone residenziali, lotti di 1500÷2000 m ² (area impermeabile 25%)	54	70	80	85
Zone residenziali, lotti di 2000÷5000 m ² (area impermeabile 20%)	51	68	79	84
Zone residenziali, lotti di 5000÷10000 m ² (area impermeabile 12%)	46	65	77	82
Parcheggi, tetti, autostrade, ...	98	98	98	98
Strade pavimentate o asfaltate, dotate di drenaggio	98	98	98	98
Strade con letto in ghiaia	76	85	89	91
Strade battute in terra	72	82	87	89

Figura 13: tabella dei Curve Number assegnati a determinati usi e tipi idrologici del suolo

Dalla media, pesata rispetto alle aree, dei CN assegnati alle varie zone è stato ottenuto un valore del Curve Number complessivo per il bacino pari a 74.3. Per i valori relativi ai singoli sottobacini di Bevera e Gandaloggio si rimanda al paragrafo successivo.



4.4. PREDISPOSIZIONE DEL MODELLO NUMERICO IN HEC-HMS

Dai dati ottenuti in seguito alle elaborazioni illustrate nei paragrafi precedenti, è stato impostato un modello afflussi-deflussi di tipo lineare (ossia i cui parametri descrivono interamente la risposta del sistema) e semi-distribuita (in cui più sottobacini concentrati sono collegati tra loro – in cascata o in parallelo – fino al raggiungimento della sezione di chiusura), per valutare le onde di piena attese alla sezione di chiusura. Coincidente con la confluenza dei tre corsi d'acqua.

HEC-HMS è un software che produce in output idrogrammi di piena, una volta ricevute come input una serie di informazioni. In particolare, il programma è costituito dalle seguenti sezioni:

- a. Basin Model. Contiene tutti i dati relativi alla rappresentazione fisica del bacino, quali:
 - a.1. *Elementi del bacino*: sottobacini, tratti di canale, confluenze, invasi, etc;
 - a.2. *Perdite di bacino*: scelta del modello di infiltrazione nel terreno per ciascun sottobacino;
 - a.3. *IUH*: scelta del tipo di risposta idrologica da associare a ciascun sottobacino;
 - a.4. *Deflusso a pelo libero*: scelta del modello di trasporto delle acque all'interno dei tratti di canale.

È stata importata nel modello la rete dei sottobacini descritta al paragrafo 1.1, collegandoli tra loro mediante dei tratti di canale (*reach*), che simulano il flusso a pelo libero all'interno degli alvei, come mostrato in Figura 14.

Scelto il metodo SCS-CN in condizione media (II) con i valori indicati in Tabella 4, per valutare le perdite di bacino rimane da assegnare una tipologia di risposta idrologica, o idrogramma unitario istantaneo (IUH). Si è optato dunque per adottare l'IUH (acronimo di Idrogramma Unitario Istantaneo) di Clark per ciascuno dei sottobacini: questo modello offre una risposta che tiene conto sia dei fenomeni corrivativi, sia di quelli diffusivi che generalmente si sviluppano all'interno di un bacino idrografico durante un evento di precipitazione. L'idrogramma di Clark è funzione di due parametri, ciascuno relativo a uno dei due processi fisici fondamentali simulati durante l'analisi di risposta:

- il tempo di concentrazione (T_C , in ore), una leggera variante del tempo di corrivazione del bacino: è definito come il tempo necessario alla cella idrologicamente più lontana dalla sezione di chiusura per raggiungere il primo tratto di canale, caratterizza la componente corrivativa del moto (quella che avviene dunque nella direzione di deflusso) degli eventi di piena. Calcolabile mediante varie formule empiriche, tarate per piccoli bacini soggetti a eventi di precipitazione intensa, per questo progetto si è deciso, al fine di considerare il maggior numero di parametri idrologici influenzanti le dinamiche corrivative di un bacino, di effettuare la media tra tre formule proposte dall'USGS, di seguito indicate:



$$T_C = 87.5L^{0.868}(I + 1)^{-1.563}P^{0.78} \quad \text{Melching – Marquardt, length based (1996)}$$

$$T_C = 39.1A^{0.577}(I + 1)^{-1.146}P^{0.781} \quad \text{Melching – Marquardt, area based (1996)}$$

$$T_C = 1.54L^{0.875}S^{-0.181} \quad \text{Straub et al. (2000)}$$

dove L rappresenta la lunghezza dell'asta principale, in miglia, I la percentuale di area impermeabile, P l'altezza di pioggia netta caduta durante l'evento, in pollici, A l'area, in mi^2 , S la pendenza dell'asta principale, in ft/mi ;

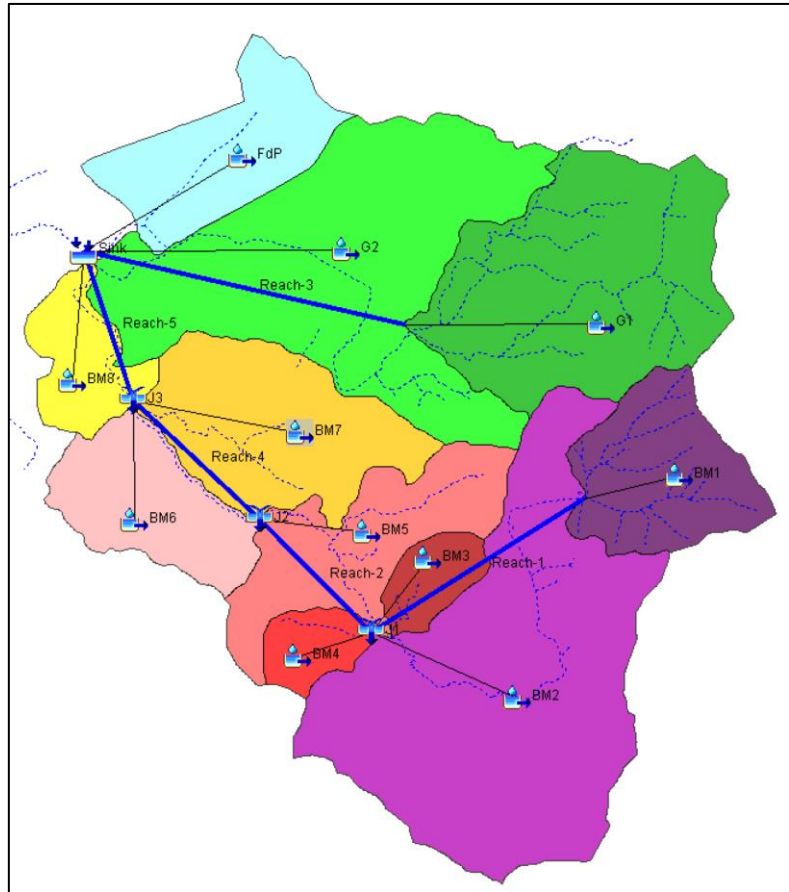


Figura 14: schematizzazione del modello idrologico impostato in HEC-HMS

- Il coefficiente di immagazzinamento (R , in ore), ha la stessa valenza che nel modello del serbatoio lineare, e definisce dunque il ritardo medio del deflusso in uscita, relativo a un ingresso impulsivo, per un modello di piena diffusivo, in cui cioè il bacino idrografico viene considerato alla stregua di un invaso di laminazione lineare. Anche per questo parametro è stata utilizzata la media sulle tre formule proposte come al punto anteriore:

$$R = 81.1L^{0.759}(I + 1)^{-0.994} \quad \text{Melching – Marquardt, length based (1996)}$$

$$R = 123A^{0.39}(I + 1)^{-0.772}S^{-0.303} \quad \text{Melching – Marquardt, area based (1996)}$$

$$R = 16.4L^{0.342}S^{-0.79} \quad \text{Straub et al. (2000)}$$



Il metodo di Clark produce una prima onda di piena frutto del solo processo corrivativo, valutata sulla base di una curva area-tempi realizzata a partire dal valore del tempo di concentrazione. In seguito l'onda così ottenuta viene fatta passare attraverso il serbatoio lineare avente come tempo caratteristico il coefficiente di immagazzinamento calcolato, al fine di ottenere un idrogramma finale laminato che tenga conto di entrambi i fenomeni.

In Tabella 4 e Tabella 5 sono sintetizzate le caratteristiche idromorfologiche dei singoli sottobacini e i relativi parametri del modello di Clark. Naturalmente, la precipitazione netta cumulata è un valore funzione della severità dell'evento meteorologico di riferimento, pertanto è stato ottenuto un tempo di concentrazione differente per ciascun tempo di ritorno considerato.

SOTTOBACINI	A _{DREN.} [km ²]	A _{IMP.} [%]	L _{ASTA PR.} [km]	S _{ASTA PR.} [%]	CN _{II} [/]	P _{T2} [mm]	P _{T7} [mm]	P _{T10} [mm]	P _{T20} [mm]	P _{T50} [mm]
BM1	2.17	7.00%	1.8	15.0%	55	8.55	36.39	45.33	63.77	89.03
BM2	7.87	26.60%	4.89	7.0%	67	21.20	61.41	73.06	96.19	126.61
BM3	0.6	28.80%	0.71	2.0%	63	16.41	52.64	63.46	85.16	114.04
BM4	0.58	17.20%	0.97	2.0%	58	11.23	42.27	51.95	71.67	98.38
BM5	2.16	20.30%	2.15	4.0%	66	19.95	59.18	70.63	93.42	123.46
BM6	1.65	24.30%	1.86	2.0%	63	16.41	52.64	63.46	85.16	114.04
BM7	2.32	34.00%	2.11	1.0%	72	28.01	72.93	85.53	110.25	142.32
BM8	1.02	45.60%	1.89	1.0%	69	23.81	65.95	77.99	101.78	132.89
G1	5.06	13.90%	3.89	13.0%	59	12.20	44.29	54.20	74.34	101.50
G2	6.69	33.30%	4.980	2.0%	67	21.20	61.41	73.06	96.19	126.61
FdP	2.18	26.80%	1.578	1.2%	74	31.54	78.53	91.54	116.91	149.67

Tabella 4: caratteristiche idromorfologiche dei sottobacini inserite nel modello idrologico

SOTTOBACINI	T _{CT2} [h]	T _{CT7} [h]	T _{CT10} [h]	T _{CT20} [h]	T _{CT50} [h]
BM1	1.25	3.34	3.92	5.04	6.46
BM2	1.56	2.66	2.94	3.48	4.14
BM3	0.30	0.49	0.54	0.64	0.76
BM4	0.43	0.81	0.91	1.11	1.36
BM5	0.93	1.67	1.86	2.22	2.67
BM6	0.71	1.19	1.32	1.56	1.87
BM7	0.86	1.28	1.39	1.58	1.83
BM8	0.60	0.81	0.86	0.96	1.08
G1	1.53	3.28	3.75	4.65	5.79
G2	1.51	2.30	2.50	2.88	3.36
FdP	0.86	1.37	1.50	1.74	2.04

Tabella 5: parametri dell'idrogramma di Clark per i singoli sottobacini ai vari T



Infine, per la simulazione del deflusso all'interno della rete idrografica (ossia i tratti di canale/*reach*), è stato adottato il modello di Muskingum, basato sul semplice approccio di conservazione della massa per la propagazione dell'onda lungo il corso d'acqua, nell'ipotesi di linearità della relazione tra volume invasato e portata uscente lungo il tratto. In questo modo il programma è in grado di calcolare il deflusso dell'onda nella rete attraverso la definizione di due parametri: K, corrispondente al tempo di traslazione (espresso in ore e calcolato ipotizzando una velocità di propagazione dell'onda di piena di 2.4 m/s), e X, che tiene in considerazione il fenomeno di attenuazione dell'onda (adimensionale, compreso tra 0 = massima attenuazione e 0.5 = non attenuazione), assunto pari 0.5 a favore di sicurezza. In Tabella 6 sono riportati i parametri in ingresso per il metodo di Muskingum:

CANALE	L _{ASTA PR.} [km]	K [h]	X [/]
Reach1	4.89	0.57	0.5
Reach2	2.15	0.25	0.5
Reach3	4.98	0.58	0.5
Reach4	1.86	0.22	0.5
Reach5	1.89	0.22	0.5

Tabella 6: parametri del modello di Muskingum per i tratti di canale

- b. Meteorologic Model e Times Series Data. Insieme, forniscono il modello di precipitazione lorda adottato in ingresso a ciascun sottobacino della schematizzazione. Come affermato in precedenza, si è optato per un evento di precipitazione con ietogramma di tipo Chicago uguale per tutti i sottobacini dell'area in esame, ricavato dalle CPP derivanti dall'analisi statistica dei massimi annuali di pioggia effettuata per il 1° lotto di lavorazioni dell'intervento. I tempi di ritorno presi in considerazione sono 2, 7, 10, 20 e 50 anni.
- c. Control specifications. Componente che gestisce la durata della simulazione, da calibrare in relazione alla durata critica dell'evento meteorologico.

4.5. SIMULAZIONI EFFETTUATE E RISULTATI

Una volta forniti tutti i dati e i parametri necessari al modello, si sono dunque ottenuti gli idrogrammi in arrivo alla sezione di chiusura – la confluenza dei tre corsi d'acqua a valle del centro abitato di Molteni – per i vari tempi di ritorno considerati.

I risultati ottenuti, rappresentati nei grafici che seguono mostrano sia le portate idrologiche (teoriche) attese che quelle “effettive”, derivanti dal recepimento delle considerazioni sugli ostacoli al deflusso per i bacini di monte di Bevera e Gandaloglio, contenute nel progetto del 1° lotto, e che fissano le massime



portate in ingresso all'abitato di Molteno (dove i due torrenti vengono tombati) rispettivamente a 25 e 12.5 mc/s, nonché delle scelte fatte per i flussi in uscita dall'area di laminazione attraverso il Fosso dei Pascoli. Si indicano inoltre i volumi sottesi dalle varie onde di piena; infine viene evidenziata la condizione di attivazione dell'opera di regolazione sul Gandaloglio, ossia il raggiungimento del valore di portata di 29 m³/s per la Bevera di Molteno a valle della confluenza, valore indicato nel progetto del 1° lotto come limite per la sicurezza idraulica dei ponti posti a valle lungo l'asta del corso d'acqua.

- Tempo di ritorno: 2 anni

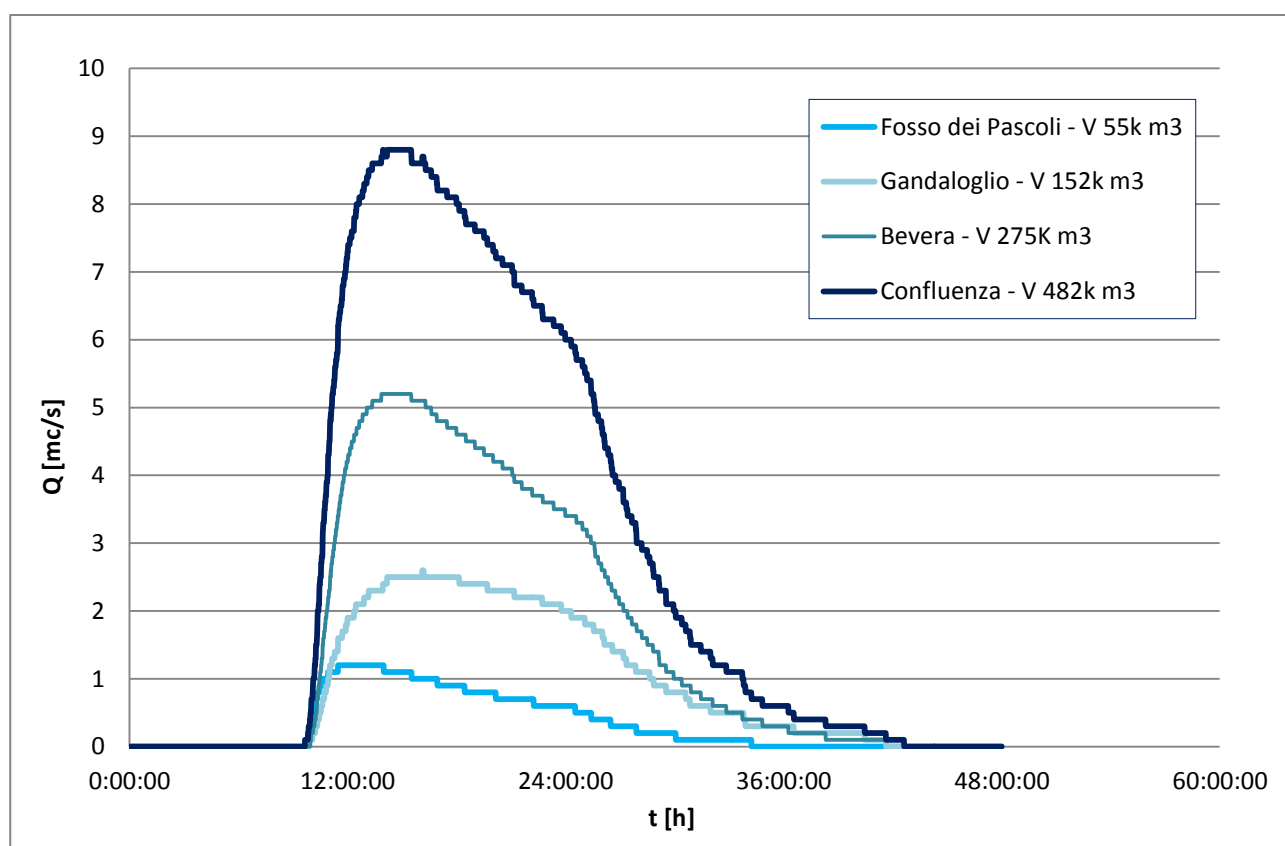


Grafico 3: idrogrammi di piena alla sezione di chiusura - T = 2 anni

Per piogge poco più che ordinarie il sistema nel suo complesso si dimostra sufficiente dal punto di vista idraulico, con le portate di picco di Bevera e Gandaloglio in ingresso sensibilmente inferiori ai rispettivi valori limite imposti da monte, esattamente come per l'idrogramma complessivo alla confluenza dei tre corsi d'acqua. Ciò consente di ipotizzare, per questo tipo di situazioni, un completo deflusso dell'onda di piena del Fosso dei Pascoli in Bevera con trascurabili effetti di rigurgito di quest'ultima e al più localizzate esondazioni del Fosso nel suo transito all'interno della vasca di laminazione.



- Tempo di ritorno: 7 anni

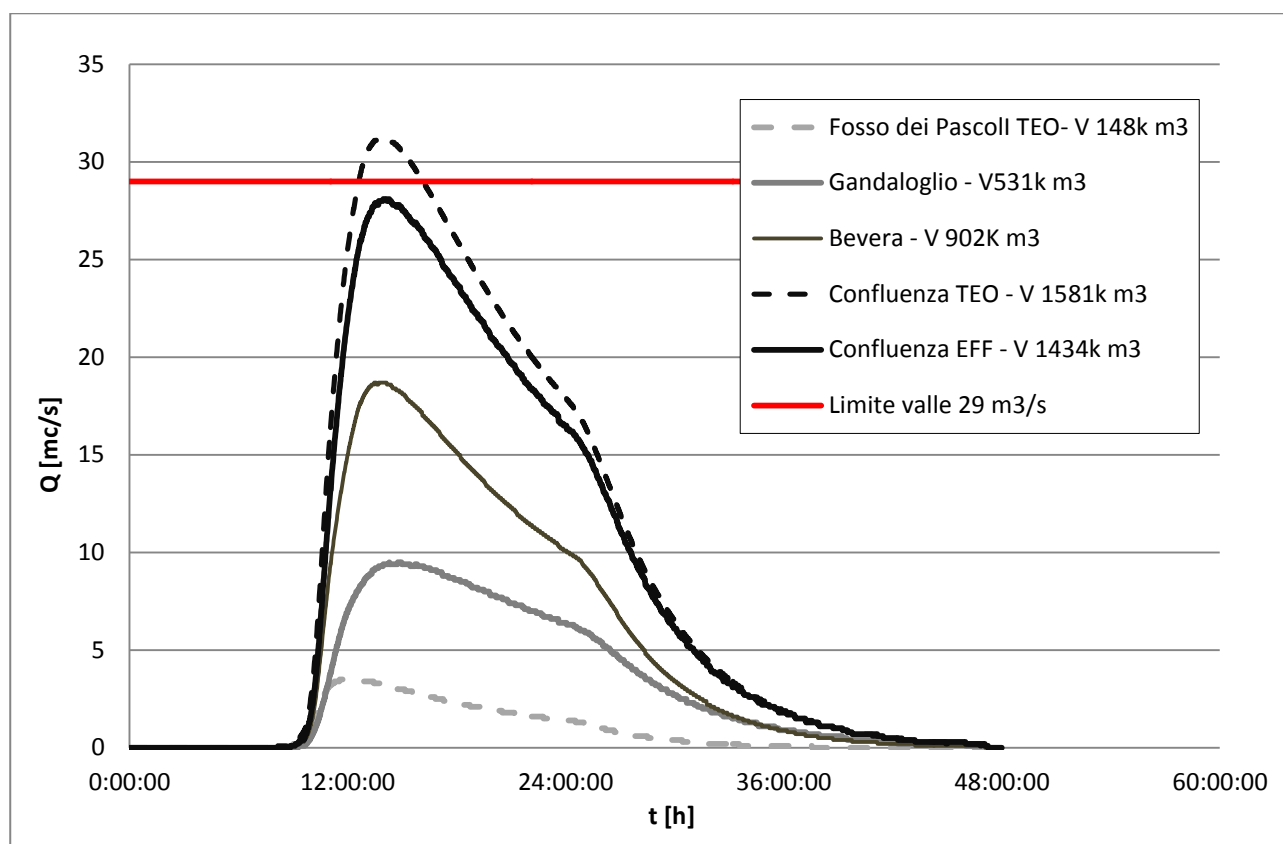


Grafico 4: idrogrammi di piena alla sezione di chiusura - T = 7 anni

Eventi di precipitazione di questa intensità costituiscono una situazione ai limiti dell'accettabilità dal punto di vista idraulico: le onde di piena di Bevera e Gandaloglio arrivano ancora alla sezione di chiusura senza esondazioni a monte ma l'idrogramma complessivo a valle della confluenza dei tre torrenti supera, al suo picco, il valore limite fissato per il tratto di valle (31.2 contro 29 m³/s). In realtà, ciò ha senso solo a livello idrologico, dal momento che un alto tirante in Bevera dettato da portate vicine alle massime transitabili comporta un rigurgito all'interno del Fosso dei Pascoli che praticamente annulla i flussi di quest'ultimo in uscita dall'area di laminazione indipendentemente dalla presenza di un'opera di regolazione allo scarico, come illustrato all'interno del manuale di gestione dell'opera redatto dallo studio Paoletti. Considerando dunque l'onda di piena del Fosso dei Pascoli (anche per tutti i casi successivi) interamente contenuta all'interno dell'area di progetto fino al termine dell'evento, il deflusso a valle della confluenza ritorna al di sotto del valore limite di 29 m³/s.



- Tempo di ritorno: 10 anni

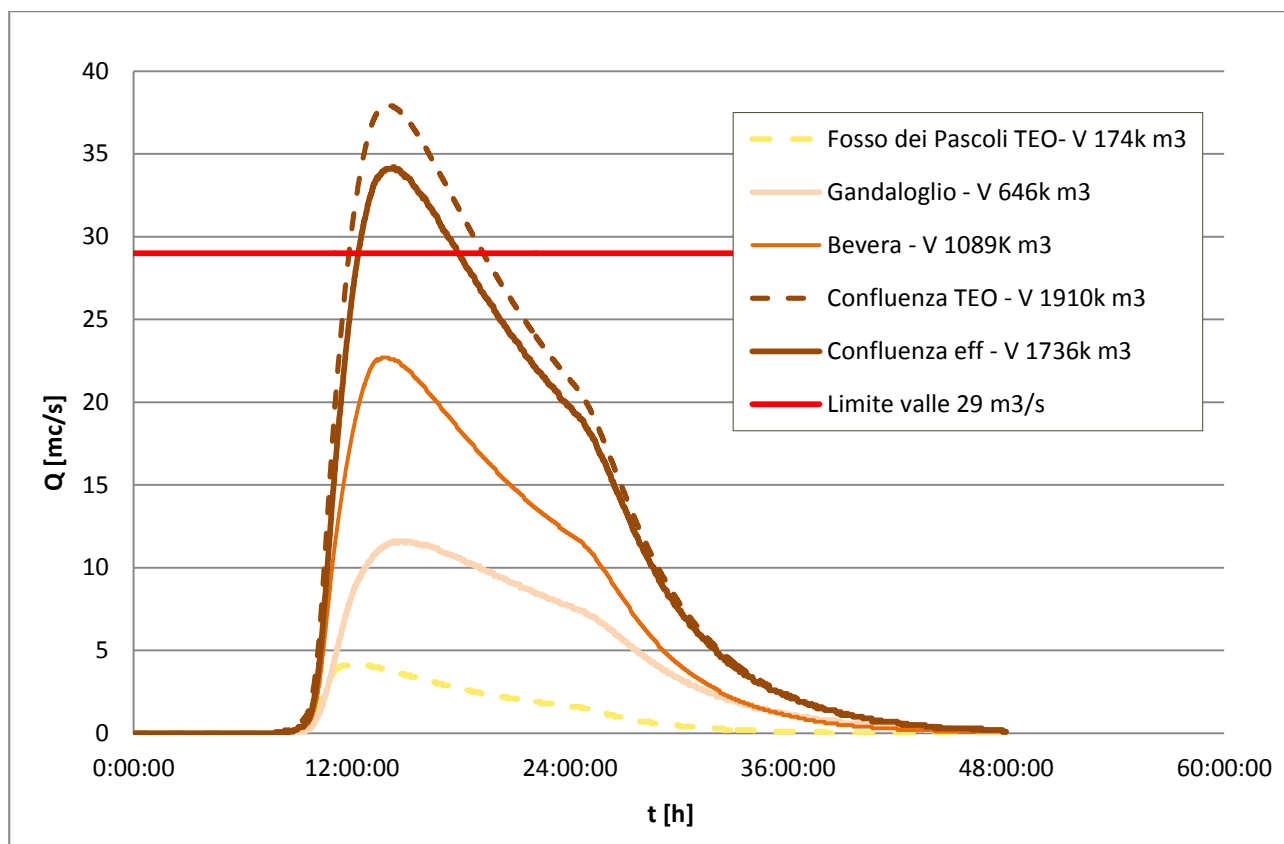


Grafico 5: idrogrammi di piena alla sezione di chiusura - T = 10 anni

Aumentando ulteriormente il tempo di ritorno dell'evento gli idrogrammi in ingresso da monte di Bevera e Gandaloglio giungono alla sezione di chiusura ancora "indisturbati"; tuttavia, nonostante il contenimento del Fosso dei Pascoli all'interno dell'area di laminazione, la portata complessiva a valle della confluenza supera il limite fissato ($34 \text{ m}^3/\text{s}$). Ciò implica che, per tempi di ritorno pari o superiori a 10 anni, per ottenere deflussi compatibili con le limitazioni di valle dell'asta della Bevera diventa necessario scaricare anche parte della piena del Gandaloglio all'interno dell'area di progetto, come illustrato nel capitolo successivo.

- Tempo di ritorno: 20 e 50 anni

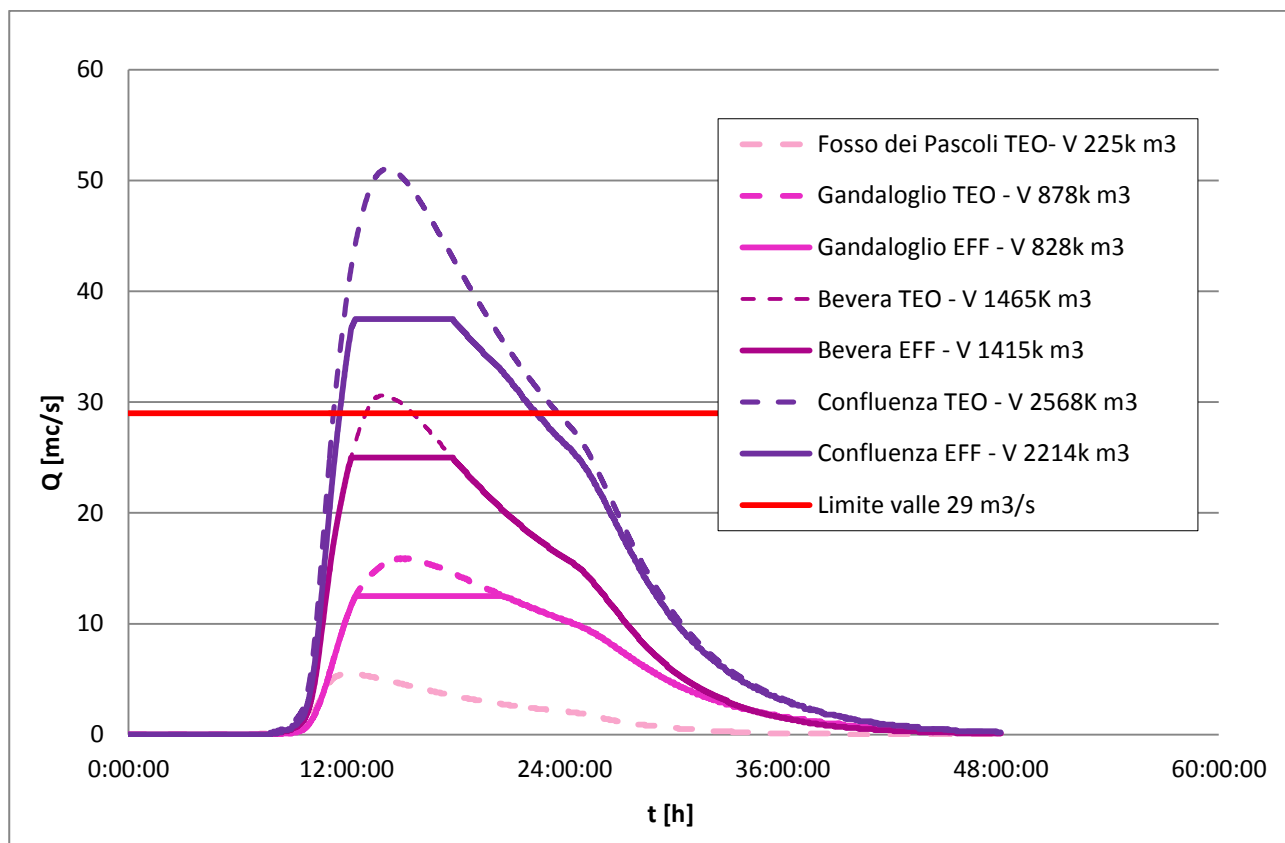


Grafico 6: idrogrammi di piena alla sezione di chiusura - T = 20 anni

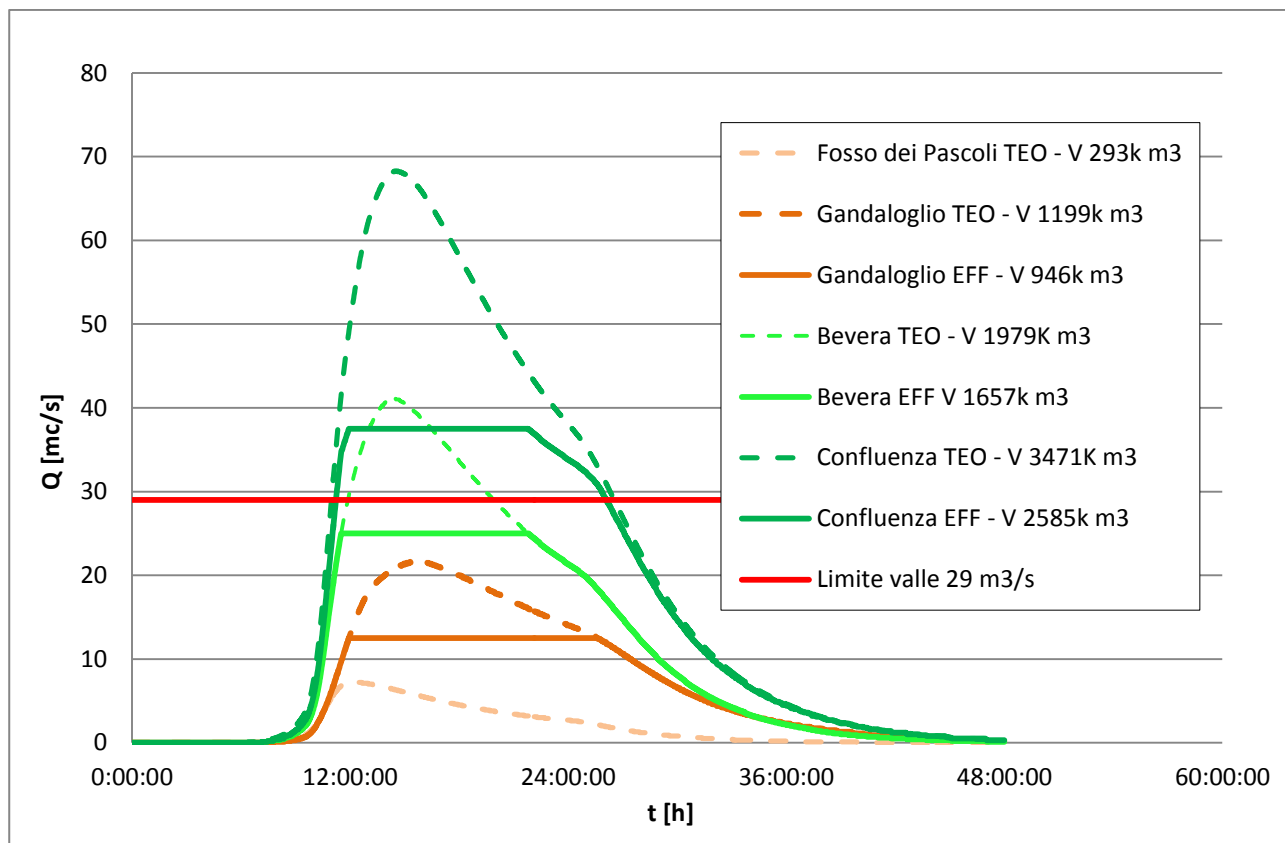


Grafico 7: idrogrammi di piena alla sezione di chiusura - T = 50 anni



Considerando infine gli eventi ventennale e cinquantennale, per il secondo dei quali sono state progettate le opere previste all'interno del 1° lotto degli interventi, si può osservare una situazione differente dal punto di vista delle volumetrie in gioco, ma analoga nella sostanza: Bevera e Gandaloglio giungono alla sezione di chiusura con idrogrammi "tagliati", essendo già esondati nei rispettivi tratti a monte dell'abitato di Molteno. Ciononostante, la somma delle loro onde di piena (sempre considerando nullo l'apporto del Fosso dei Pascoli), porta a un deflusso di valle abbondantemente superiore al limite fissato (37.5 contro 29 m³/s). All'aumentare del tempo di ritorno bisogna dunque ricorrere a una deviazione del Gandaloglio in misura sempre maggiore all'interno dell'area di laminazione al fine di assicurare la sufficienza idraulica a valle della confluenza.



5. IDRAULICA

Come descritto in precedenza (vedi capitolo 3) il sistema di opere previste ha lo scopo di rendere l'area di progetto una zona di allagamento controllato in cui immagazzinare (parzialmente o totalmente) i volumi idrici di piena in arrivo dal Fosso dei Pascoli (per esondazione diretta, in linea) e dal Gandaloglio (in derivazione, mediante lo scolmatore previsto dal progetto del 1° lotto), con il duplice fine di attenuare gli idrogrammi in arrivo al centro storico di Molteno e al sistema di attraversamenti a valle lungo il corso della Bevera, nonché di contenere al suo interno i deflussi altrimenti diretti verso il Torrente Pescone e causa di allagamenti estesi nel territorio di Annone Brianza. Tale area sarà cintata da un sistema di rilevati che ne delimiterà l'occupazione per eventi con tempo di ritorno fino a 50 anni, oltre i quali l'eccesso di portata tracimerà in maniera distribuita lungo tutto il loro perimetro.

La scelta di non adottare alcun franco di sicurezza per i rilevati è motivata da una serie di considerazioni emerse dall'analisi dei documenti citati nell'introduzione, nonché dai sopralluoghi effettuati nell'area e nei suoi dintorni. In particolare:

- a) per continuità con il progetto del primo lotto, l'area di laminazione deve essere efficace per eventi di tempo di ritorno fino a 50 anni;
- b) deve essere garantita la funzionalità del canale scolmatore sul Gandaloglio previsto nel progetto del 1° lotto, e ciò comporta una limitazione al massimo tirante sostenibile all'interno dell'area senza causare pericolosi rigurgiti nei pressi del tratto intubato del canale, al di sotto della linea ferroviaria Como – Lecco, che comporterebbero l'allagamento della SP 49 e in generale un ulteriore aggravio della zona di monte compresa tra la Cascina Bergamina e l'intubamento del corso d'acqua prima del centro abitato di Molteno. Soprattutto per quest'ultima ragione è stata scartata l'ipotesi numero 3, indicata nella relazione illustrativa, che prevedeva la suddivisione della Poncia in due aree di laminazione mediante la realizzazione di un terzo rilevato, con la prima area destinata a contenere gli eventi di minore intensità, causando allagamenti localizzati ma a tiranti piuttosto elevati. Ad ulteriore detrimento dell'ipotesi di un ulteriore innalzamento degli argini sta la possibilità, molto prossima, di un aumento del rischio di valle (area industriale di Sirone e area urbana di Molteno). Questo perché l'instaurazione nella piana di livelli superiori potrebbe comportare dinamiche non più correttamente prevedibili di deflusso incontrollato verso valle attraverso la via preferenziale del Fosso dei Pascoli ma non solo;
- c) il lato SUD dell'area è delimitato dalla linea ferroviaria Como – Lecco, il cui piano del ferro, da rilievo LIDAR, si attesta ad una quota minima di 266.5 m s.l.m. È stato ritenuto opportuno, vista l'importanza di tale infrastruttura, mantenere almeno 1 metro di franco tra tale quota e il tirante massimo interno all'area;



- d) un ribassamento localizzato dell'arginatura per la realizzazione di uno sfioratore di superficie, ipotesi avanzata in alcuni passaggi della redazione del presente progetto, oltretutto essere in contrasto con quanto scritto al punto a) comporterebbe la necessità di avere a valle un ulteriore canale scolmatore in grado di far defluire le portate in eccesso in uscita dall'area per eventi molto intensi ($T > 50$ anni) dirigendole verso l'unico recapito ipotizzabile nelle vicinanze, ossia il lago di Annone. Tale soluzione non è percorribile visti gli elevati picchi di piena attesi in tali circostanze, non compatibili, date le esigue pendenze, con la capacità del reticolo esistente a Nord dell'area di progetto. Per tempi di ritorno superiori a quello di progetto è previsto dunque il libero spagliamento dei volumi idrici in eccesso lungo l'intero perimetro dell'area (escluso il tratto ferroviario), come già avviene allo stato di fatto anche per gli eventi a minore intensità.

5.1. MODELLAZIONE IDRAULICA DELL'AREA DI LAMINAZIONE

Il dimensionamento idraulico della vasca è stato realizzato adottando un modello di laminazione di tipo statico, ossia nell'ipotesi di velocità di propagazione orizzontale dell'onda di piena interna all'area trascurabile rispetto alla velocità di variazione del tirante idrico. Una modellazione di questo tipo prevede la risoluzione del seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} Q_i(t) - Q_u(t) = dW(t)/dt \\ Q_u(t) = Q_u(h(t)) \\ W(t) = W(h(t)) \end{cases}$$

dove la prima equazione rappresenta l'equazione di continuità, la seconda la legge di efflusso complessiva in uscita dall'area, e la terza la curva altezze – volumi, caratteristica intrinseca dell'area, legata alla sua geometria. $Q_i(t)$ è la portata in ingresso, $Q_u(t)$ la portata in uscita, $W(t)$ il volume invasato, $h(t)$ il tirante idrico.

Tale sistema è stato risolto alle differenze finite, sotto le seguenti ipotesi:

- portata in ingresso, $Q_i(t)$, nota in ogni istante e data dalla somma dell'idrogramma di piena del Fosso dei Pascoli e della quota parte di idrogramma del Gandaloglio proveniente dal canale scolmatore contenuto nel progetto del 1° lotto. Il secondo è ricavato imponendo come condizione al contorno di attivazione di tale opera il raggiungimento del valore di 29 mc/s per la portata complessiva in Bevera a valle della confluenza dei tre corsi d'acqua, valore indicato come limite per la sufficienza idraulica dei ponti posti lungo il tratto di valle;
- portata in uscita, $Q_u(t)$, considerata nulla per l'intera durata dell'evento di piena. Tale scelta è motivata da due ragioni: in primis, è necessario verificare quantitativamente la portata effettiva in



uscita dall'area tramite il fosso dei Pascoli in caso di efflusso non regolato, dal momento che gli studi precedenti forniscono risultati contrastanti, a seconda dell'impatto causato dal rigurgito della Bevera, da valutare con attenzione; in secondo luogo, si esclude la possibilità di smaltire parte dei volumi in ingresso mediante imbibimento iniziale o infiltrazione sotterranea, vista la soggiacenza molto ridotta della falda (meno di un metro in media) e la presenza localizzata di aree umide perenni;

- curva d'invaso dell'area di laminazione ottenuta dal rilievo LIDAR, rappresentata nel Grafico 8.

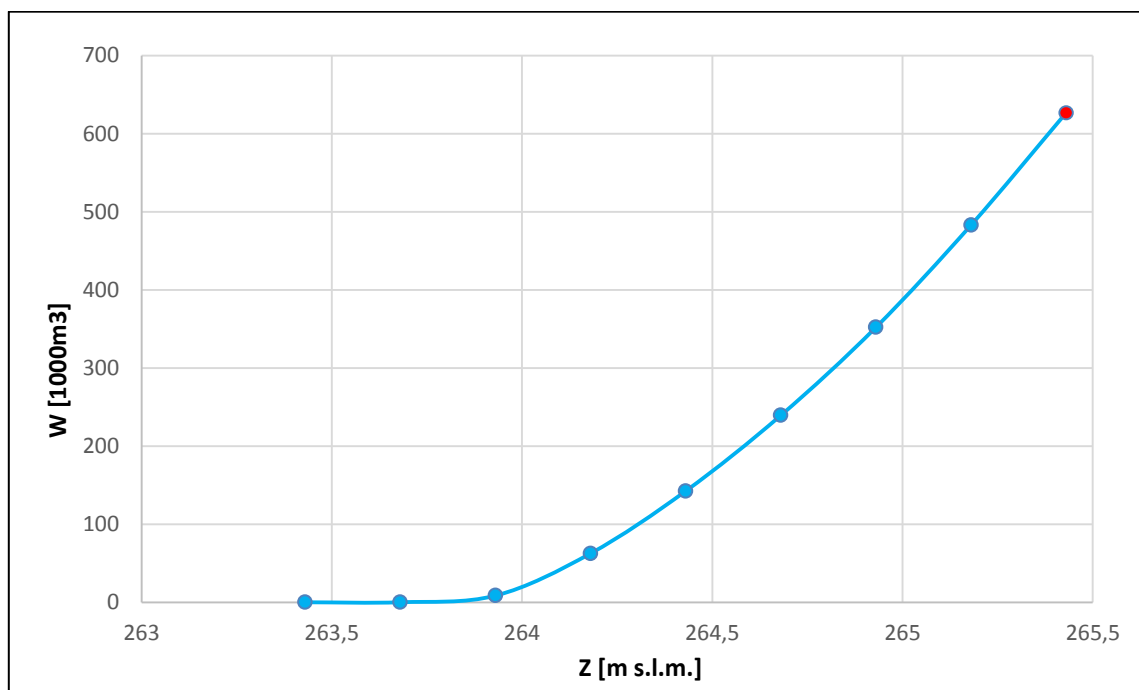


Grafico 8: curva d'invaso dell'area di laminazione

5.2. RISULTATI OTTENUTI

Sulla base della curva altezze - volumi, delle ipotesi e dei vincoli iniziali illustrati al punto precedente, nonché delle volumetrie in ingresso all'area ricavate dai relativi idrogrammi, si è fissata la quota di coronamento dei rilevati a 265.43 m s. l. m.

Tale quota rappresenta il miglior compromesso tra le condizioni sovraesposte, garantendo un volume invasabile approssimativamente pari a 625'000 m³, sufficienti per il contenimento di eventi leggermente inferiori alla cinquantennale, senza creare problemi di rigurgito al canale scolmatore del Gandolghio. Si riportano (Grafico 9, Grafico 10, Grafico 11) rispettivamente gli idrogrammi del Gandolghio a valle dell'opera di regolazione, e della Bevera di Molteno a valle della confluenza, nell'ipotesi di attivazione del canale scolmatore secondo la condizione al contorno di progetto (portata di valle pari a 29 m³/s), nonché il progressivo riempimento dell'area stessa durante l'evento di precipitazione.

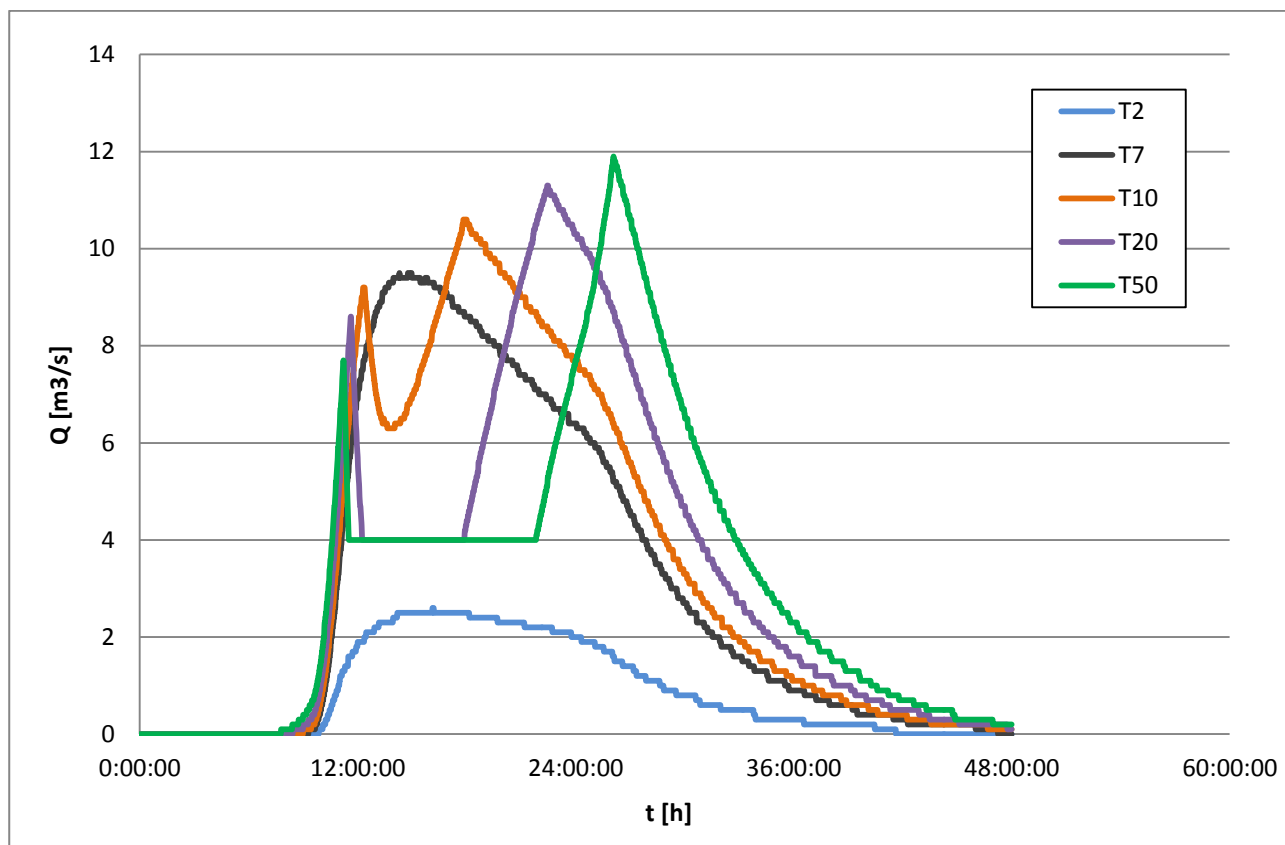


Grafico 9: idrogrammi del Gandoglio a valle del canale scolmatore in configurazione di progetto ai vari T

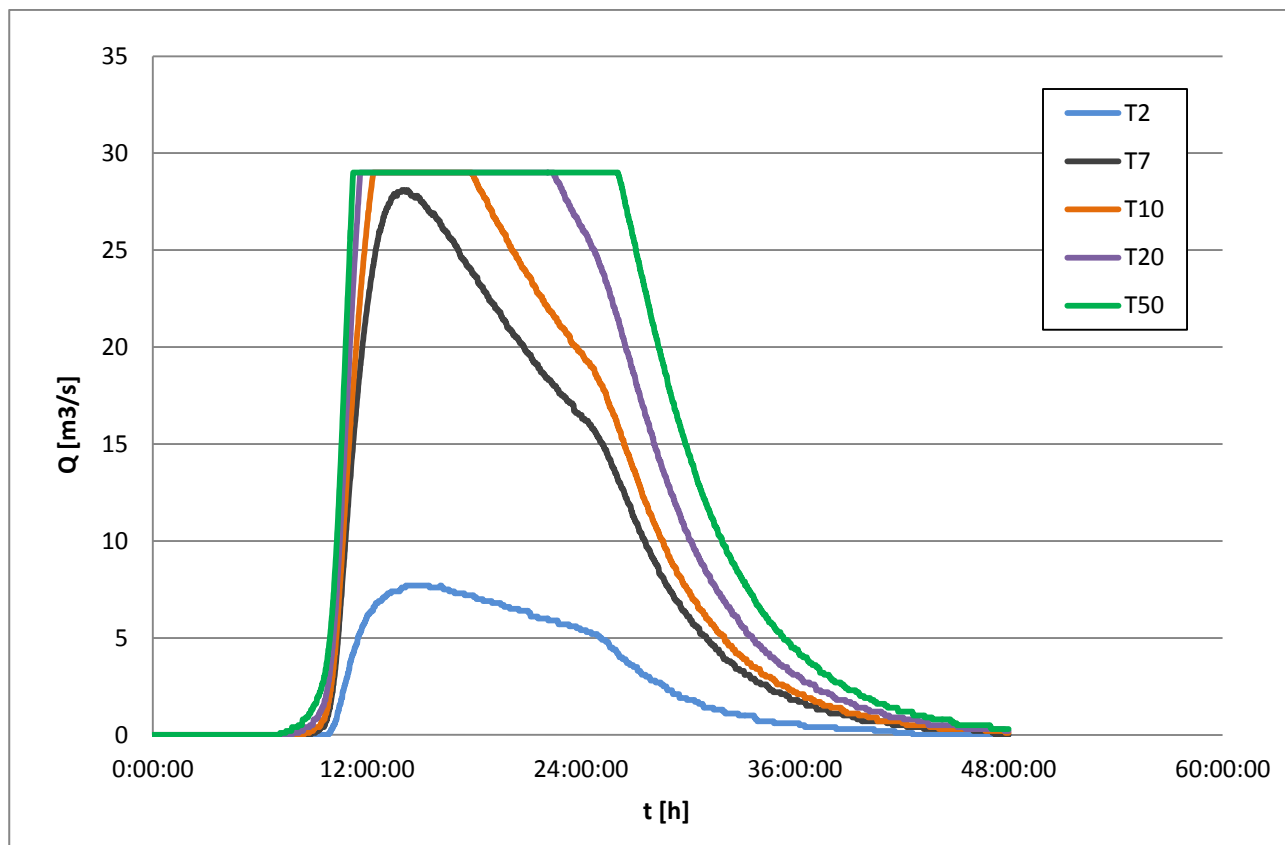


Grafico 10: idrogrammi della Bevera di Molteni a valle della confluenza in configurazione di progetto ai vari T

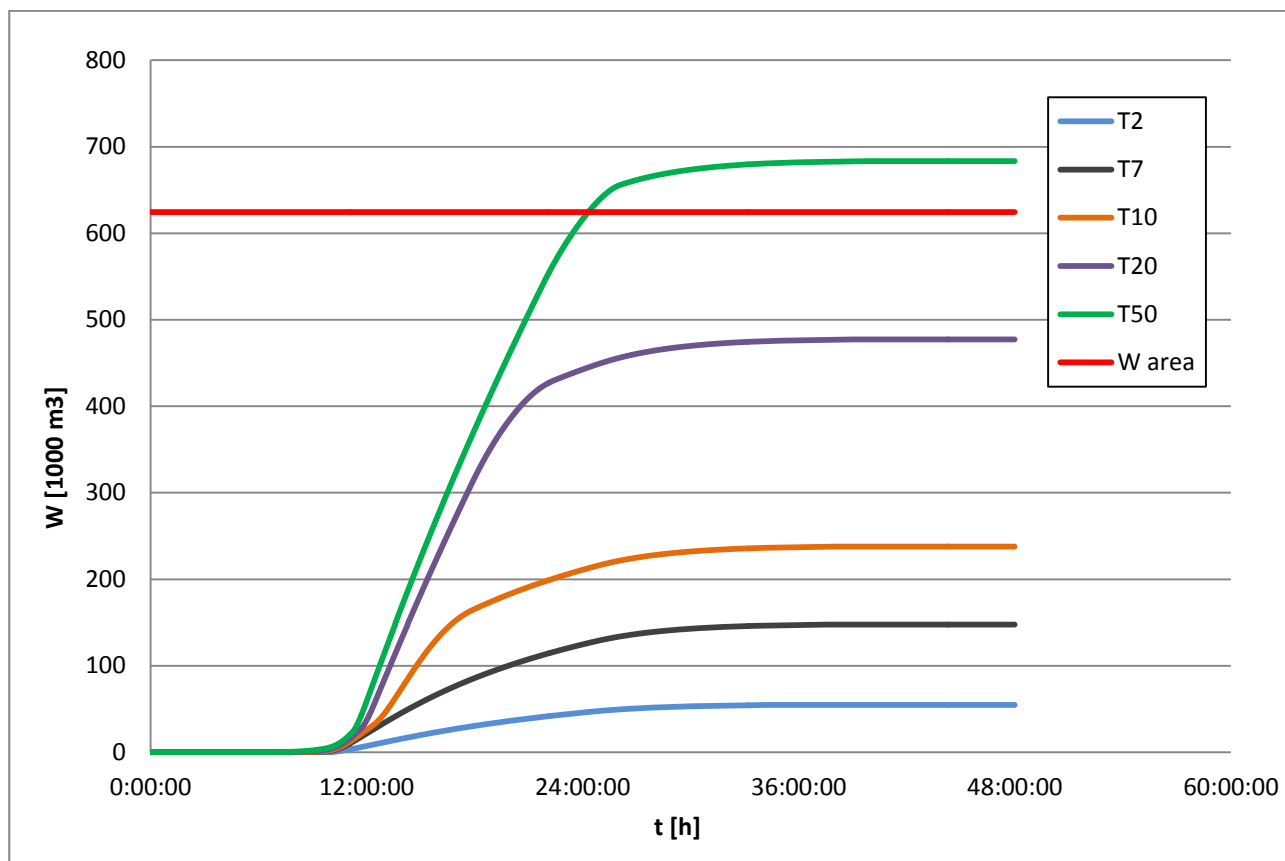


Grafico 11: progressivo riempimento dell'area di laminazione in configurazione di progetto ai vari T

Osservando i grafici, si può notare come la derivazione dal Gandaloglio diventi necessaria, in funzione del rispetto della condizione al contorno di valle, per tempi di ritorno superiori ai 10 anni. Si nota inoltre che, per $T = 50$ anni, il volume da invasare eccede infatti il massimo riempimento di circa 60.000 mc, come anticipato in precedenza.

Entrambi questi aspetti devono essere considerati in maniera adeguata rispetto al grado di approssimazione del modello di calcolo adottato per il dimensionamento, consoni a una progettazione preliminare. Infatti, da un lato un taglio "scalato" degli idrogrammi sul Gandaloglio appare realizzabile, in tempo reale, solo in via teorica, comportando una movimentazione delle paratoie sul corso d'acqua continuativa durante l'evento, certamente più complessa rispetto all'assunzione di una configurazione costante, risultante in un taglio orizzontale dell'onda di piena, che scaricherebbe quantità maggiori di acqua all'interno della Poncia, andando a ridurre ulteriormente il massimo tempo di ritorno contenibile dall'area di laminazione (abbassando anche però i livelli d'acqua in arrivo al tratto intubato del Gandaloglio al di sotto di Molteni, particolarmente auspicabile nel caso si decida di realizzare il bypass per convogliare in esso parte dei flussi provenienti dalla Bevera a monte). Dall'altro però, anche prevedere un efflusso nullo dall'area di laminazione per l'intera durata dell'evento è un'ipotesi decisamente conservativa in quanto, come si osserva nel Grafico 10, già durante le code degli eventi è possibile scaricare parte del volume



invasato senza eccedere i 29 m³/s imposti da valle, compatibilmente con la massima portata convogliabile dall'ultimo tratto del Fosso dei Pascoli in relazione ai livelli presenti in Bevera.

Si può dunque affermare che con una configurazione progettuale di questo tipo l'area di laminazione, in linea di massima, è in grado di contenere i volumi idrici derivanti da un evento poco meno che cinquantennale, assicurando ad un tempo la sufficienza idraulica del tratto di Bevera a valle della confluenza dei tre corsi d'acqua. Si demanda dunque alla progettazione definitiva la precisa quantificazione delle volumetrie effettive con riferimento ai rispettivi tempi di ritorno, mediante opportuno modello idraulico dell'area, nonché delle effettive potenzialità di efflusso dell'area durante l'evento.

L'allegato "A" alla presente relazione mostra la perimetrazione delle superfici inondabili all'interno dell'area di laminazione per i vari tempi di ritorno.

È stato infine valutato il tempo di svuotamento dell'intera area di laminazione secondo l'ipotesi effettuata, ossia di efflusso indisturbato al termine dell'evento di piena, attraverso la consueta legge a battente:

$$Q = \mu ab \sqrt{2gh}$$

dove μ è il coefficiente di efflusso, posto pari a 0.61, a l'altezza e b la larghezza della luce, in metri, g l'accelerazione di gravità, in m/s², h il tirante netto tra monte e valle dell'opera di regolazione, in metri.

Nell'ipotesi di avere all'uscita una luce rettangolare in corrispondenza del Fosso dei Pascoli nel punto indicato in Figura 9, la cui geometria ricalca le indicazioni fornite in merito dalla versione originale del progetto esecutivo del 1° lotto (che comprendeva le arginature): larghezza 2 metri, compatibile con la sezione trasversale del corso d'acqua, e altezza regolabile fino a una quota massima di 1 metro. In merito alla seconda l'attuale calcolo è stato impostato ipotizzando una luce verticale di 0.5 metri, il che fornisce portate massime in uscita di circa 3.2 m³/s, considerando questo come un valore limite per il deflusso in sicurezza attraverso l'ultimo tratto del Fosso dei Pascoli prima del suo ricongiungimento con la Bevera di Molteni, inclusivo dell'attraversamento di Via dell'Industria. In tali condizioni, come mostrato nel Grafico 12, l'area di laminazione svuota la sua capacità di 600'000 m³ in circa 86 ore (3.6 giorni). Si può ipotizzare che i 25'000 m³ rimanenti vengano smaltiti in parte mediante regolare deflusso a pelo libero dal Fosso dei Pascoli, in parte tramite infiltrazione nelle aree più depresse poste al di sotto della quota di fondo della sezione di efflusso (una minima parte è destinata a rimanere e alimentare le aree umide perenni presenti). Naturalmente, lo svuotamento dell'area per eventi di intensità inferiore alla cinquantennale richiederà tempi via via inferiori ed indicati in Tabella 7.

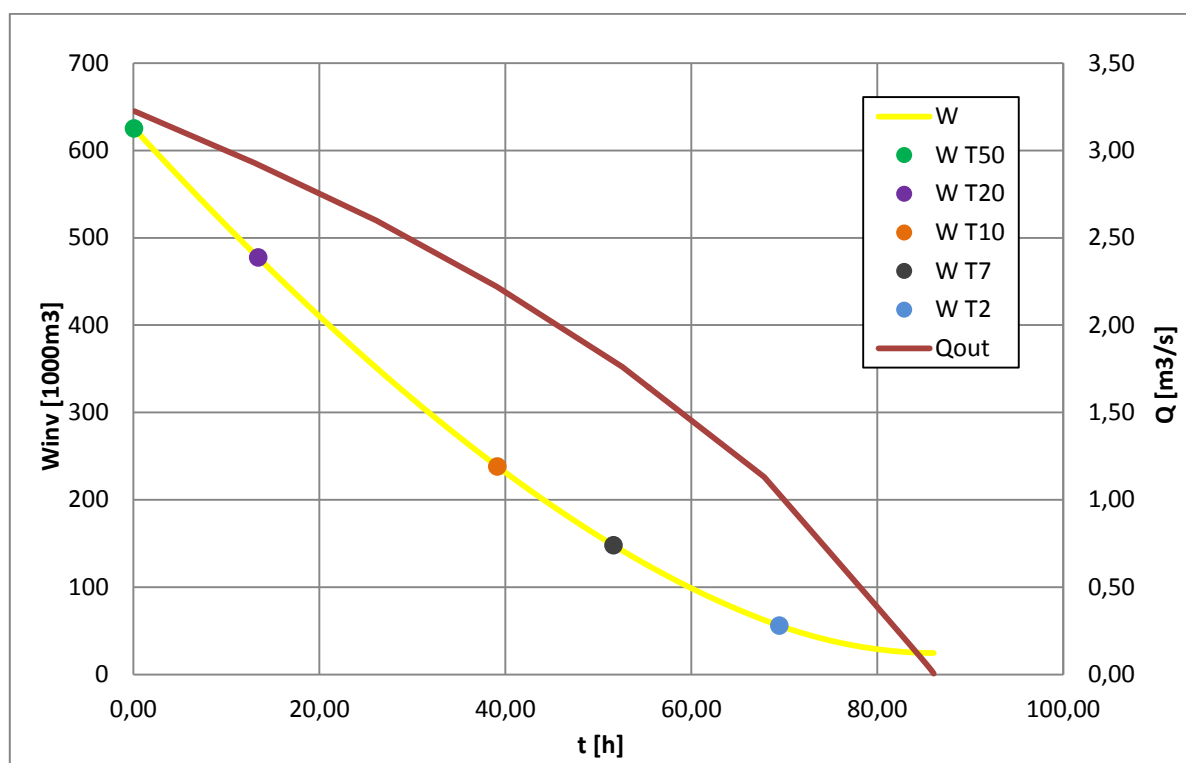


Grafico 12: progressivo svuotamento della vasca in configurazione di progetto

	Svuotamento dell'area di laminazione				
T [y]	2	7	10	20	50
t _{sv} [h]	16	35	47	73	86

Tabella 7: tempi indicativi di svuotamento dell'area di laminazione ai vari T

Il progettista
Ing. Daniele Giuffrè

Triuggio, maggio 2016