

Comune di Brembate di Sopra (BG)



Mappatura pericolosità idraulica del reticolo idrografico principale del territorio comunale a supporto della redazione del documento semplificato del rischio idraulico

<i>Elaborato</i>		<i>Oggetto</i>		
Y.01		Relazione idraulica		
		<i>Data</i>		
		Maggio 2023		
REVISIONE	DATA REV.	OGGETTO		
committente	commessa	tipologia elaborato	verifica	approvazione
008	1064	3	LB	EA



Dott. Ing. Elena Arlati

via Montale, 11/15 - 24126 Bergamo
Tel. 035.312200 - Fax 035.5095751
www.ydros.it - E-mail ydros@ydros.it

Collaborazione

Dott. Ing. Lorenzo Brignoli

INDICE

1	Premessa	2
2	Inquadramento	3
2.1	Bacini idrografici	3
2.1.1	Torrente Lesina	3
2.1.2	Torrente Bregogna	3
2.1.3	Torrente Rino	3
2.2	Studi e analisi antecedenti	6
2.3	Vigente perimetrazione pericolosità idraulica	7
3	Analisi idrologica	10
3.1	Scelta dei tempi di ritorno di riferimento	10
3.2	Torrenti Lesina e Bregogna	11
3.3	Torrente Rino	13
3.3.1	Evento meteorico	13
3.3.2	Caratterizzazione del bacino	14
3.3.3	Modello idrologico	16
3.3.4	Risultati	18
4	Modellazione idraulica	20
4.1	Software di calcolo	20
4.1.1	Modello digitale del terreno (DTM)	20
4.1.2	Mesh (griglia) di calcolo	21
4.1.3	Scabrezza del terreno	22
4.1.4	Manufatti di attraversamento	22
4.1.5	Condizioni al contorno	23
4.1.6	Rappresentazione risultati	23

1 Premessa

La presente relazione descrive le attività di modellazione idrologica ed idraulica utilizzate al fine di aggiornare la mappatura della pericolosità idraulica all'interno del territorio comunale di Brembate di Sopra (BG), seguendo le direttive del Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA).

All'interno del territorio comunale di Brembate di Sopra sono presenti quattro corsi d'acqua di rilievo: il Fiume Brembo, il Torrente Bregogna (o Borgogna), il Torrente Lesina (o La Lesina) e il Torrente Rino.

Tra questi, la pericolosità idraulica del Fiume Brembo è stata oggetto di diversi studi di dettaglio, anche in quanto corso d'acqua fasciato, oggetto del Piano Assetto Idrogeologico del Fiume Po (PAI). Dunque, la mappatura della pericolosità idraulica causata dalle alluvioni del Fiume Brembo non verrà mutata da questo aggiornamento.

Mentre, la pericolosità delle alluvioni causate dal Lesina e i suoi affluenti (Rino e Bregogna) non è stata mappata seguendo le risultanze di studi idraulici di bacino o di dettaglio, ma come da Tavola dei Vincoli dello Studio Geologico Comunale, redatta secondo la legenda di dissesto Idrogeologico del P.A.I., coincidenti, di fatto, con le fasce di rispetto del reticolo idrico principale. Naturalmente questo criterio, essendo puramente "geometrico", non rappresenta un'accurata rappresentazione della pericolosità idraulica, ma meramente la prossimità ad un corso d'acqua.

Il Comune di Brembate di Sopra sta sviluppando la progettazione esecutiva del progetto denominato *"Interventi di mitigazione delle problematiche di pericolosità idraulica del Torrente Lesina: bacino di laminazione a monte abitato"*, che consiste nella realizzazione di una vasca di laminazione in linea al fine di ridurre le portate di piena del torrente Lesina all'interno dell'abitato. Dunque, la realizzazione della vasca comporterà un cambiamento delle aree allagabili da parte del Lesina. Di conseguenza, la cartografia della pericolosità idraulica viene presentata sia per lo stato attuale e per lo stato "futuro", ovvero, rispettivamente: prima e dopo la realizzazione della vasca volano sopracitata. Naturalmente la mappatura per lo scenario "futuro" si potrà ritenere valida solo dopo la realizzazione ed avvenuto collaudo della vasca stessa.

I risultati del presente studio idraulico verranno recepiti anche nel "DOCUMENTO SEMPLIFICATO DEL RISCHIO IDRAULICO AI SENSI DEL REGOLAMENTO REGIONALE n. 8 del 19.04.2019" recante "Disposizioni sull'applicazione dei principi di invarianza idraulica e idrologica - modifiche al Regolamento Regionale n. 7 del 23/11/2017", in corso di redazione, nell'ambito della stesura della variante al PGT.

2 Inquadramento

2.1 Bacini idrografici

2.1.1 Torrente Lesina

Il Torrente Lesina è un corso d'acqua classificato come reticolo idrico principale (BG010) di competenza della Regione Lombardia, per il tratto compreso tra l'attraversamento della strada SP175 (al confine tra Barzana e Almenno San Bartolomeo) fino alla foce nel fiume Brembo. Dunque, l'intero tratto d'interesse in comune di Brembate di Sopra è parte del reticolo idrico principale.

Il Torrente Lesina nasce nel territorio di Almenno San Bartolomeo nei pressi della località Carosso, alla quota di 349 m s.l.m.; scorre inizialmente in direzione nord/ovest - sud/est, al confine fra i Comuni di Almenno San Bartolomeo e Barzana. All'ingresso nel Comune di Brembate di Sopra il Torrente cambia direzione di scorrimento, assumendo un andamento all'incirca nord – sud, che mantiene inalterato fino alla confluenza con il Torrente Bregogna o Borgogna, che avviene in sponda destra.

Dopo la confluenza, il Torrente Lesina attraversa i Comuni di Ponte San Pietro, Presezzo, Bonate Sopra e Bonate Sotto, con andamento meandriforme. Sfocia nel Fiume Brembo dopo aver percorso circa 15 km e drenato un'area di 24.5 km².

2.1.2 Torrente Bregogna

Il Torrente Bregogna o Borgogna è un corso d'acqua classificato come reticolo idrico principale (BG011) di competenza della Regione Lombardia, dalla cava Italcementi in comune di Palazzago fino alla foce nel Torrente Lesina. Dunque, l'intero tratto d'interesse in Comune di Brembate di Sopra è parte del reticolo idrico principale.

Le sorgenti del Bregogna si trovano sul versante meridionale del monte Linzone, all'interno del comune di Palazzago. Il torrente scorre verso sud/est, ricevendo numerosi affluenti parte del reticolo idrico minore (RIM), più a valle attraversa il Comune di Barzana e quindi Brembate di Sopra, dove sfocia nel Lesina ad una quota di circa 255 m s.l.m..

La lunghezza totale del Torrente, fino alla foce, è di circa 10.5 km, a questa sezione di chiusura il bacino idrografico si estende per circa 11 km².

2.1.3 Torrente Rino

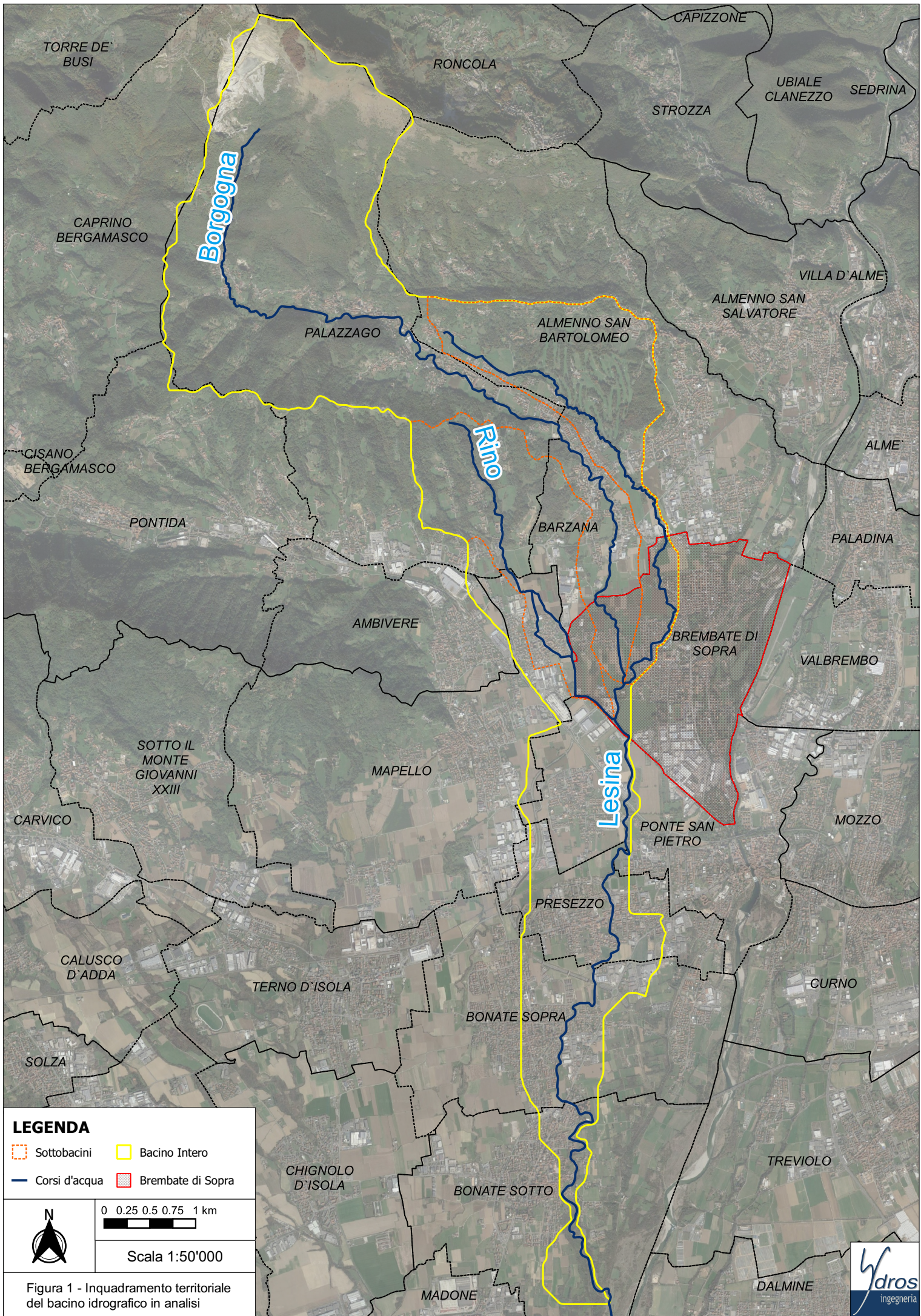
Il Torrente Rino è classificato come Reticolo Idrico Minore nello Studio Idraulico di individuazione del RIM dal Comune di Brembate di Sopra: dalle sorgenti, in Comune di Palazzago, fino alla foce nel Lesina.

Il bacino idrografico del Torrente Rino è situato a cavallo tra i comuni di Palazzago, Barzana e Mapello, con una piccola porzione all'interno del Comune di Brembate di Sopra, nei pressi della località Prezzate, al confine con Mapello.

Di particolare rilievo è la presenza di un manufatto partitore in Comune di Mapello, a monte dell'abitato, in cui il Rino viene diviso in due rami (Figura 2 e Fotografia 1, Fotografia 2, Fotografia 3 e Fotografia 4).

Il ramo principale, "ovest" (ossia quello che raccoglie le portate di magra) scorre in direzione sud/ovest attraverso l'abitato della località Prezzate, all'interno della quale viene tombinato per un tratto di circa 400 m. Il ramo secondario ("est"), scorre verso Brembate di Sopra dove raccoglie l'unico affluente di rilievo, in sponda sinistra, proveniente da Barzana. Dopo un breve tratto tombinato (120 m) il ramo est si ricongiunge con il ramo ovest a valle dell'abitato della località Prezzate, al confine tra Mapello e Brembate di Sopra.

Da qui il Rino scorre in direzione sud e poi ovest fino alla foce nel Lesina, avendo coperto una lunghezza totale di circa 4.4 km, drenando un bacino di circa 3.24 km².



LEGENDA

- Sottobacini
- Bacino Intero
- Corsi d'acqua
- Brembate di Sopra



0 0.25 0.5 0.75 1 km

Scala 1:50'000

Figura 1 - Inquadramento territoriale del bacino idrografico in analisi

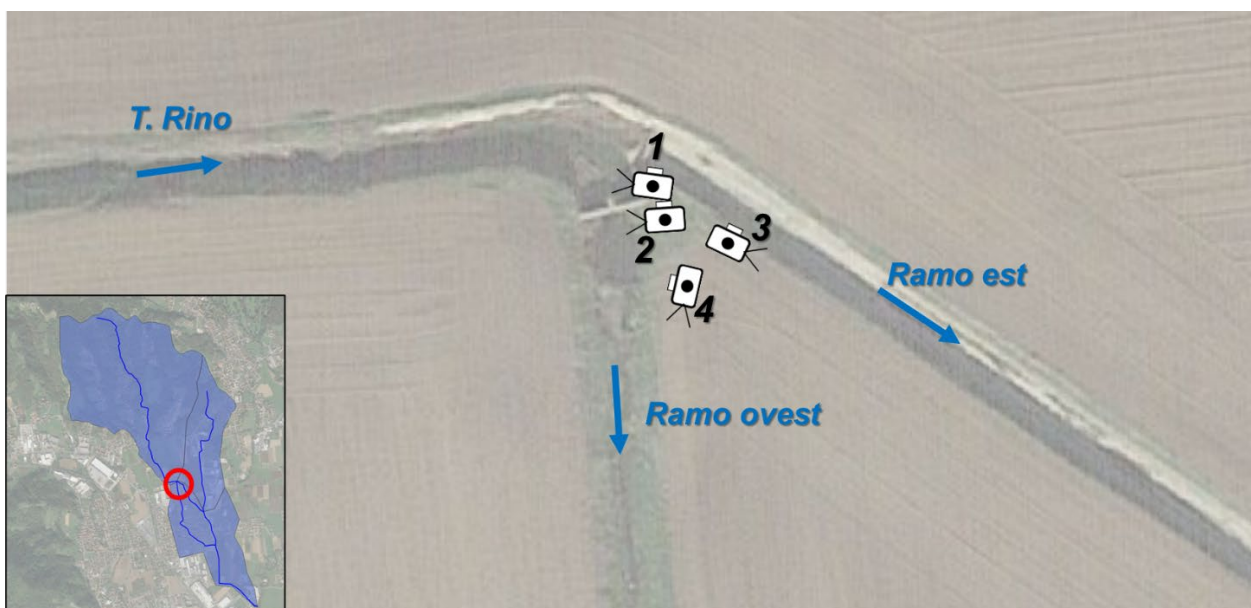


Figura 2: Vista su ortofoto del partitore sul Torrente Rino in comune di Mapello



Fotografia 1: Ingresso al partitore visto verso monte



Fotografia 2: Particolare partitore su ramo ovest



Fotografia 3: Ramo est visto dal partitore verso valle



Fotografia 4: Ramo ovest dal partitore verso valle

2.2 Studi e analisi antecedenti

La frequenza e l'intensità degli eventi di piena del Lesina e del Bregogna ha indotto la Regione Lombardia e gli altri enti territorialmente competenti, a commissionare uno "Studio idrogeologico e progettazione preliminare a scala di sottobacino idrografico dei Torrenti Lesina e Bregogna e affluenti", redatto nel settembre 2010 dallo Studio Taccolini Ingegneri Associati di Bergamo, dallo Studio Majone & Partners Engineering di Milano, del dott. ing. Pier Giuseppe Fenaroli di Bergamo e dott. geol. Carlo Pedrali di Bergamo (anno 2010), di seguito Piano di Bacino.

A seguito di tale studio, sono stati individuati una serie di interventi di sistemazione e mitigazione della pericolosità idraulica del Lesina / Bregogna, tra cui una vasca volano di circa 250'000 mc, posizionata fuori linea lungo l'asta del torrente Lesina / Bregogna, a valle della loro confluenza, immediatamente a sud del territorio di Brembate di Sopra, principalmente a difesa dell'abitato di Ponte San Pietro. Ad oggi, è stato realizzato un primo lotto di tale vasca, per circa 82'000 mc, demandando ad un intervento successivo l'estensione della stessa.

In tale studio sono state evidenziate delle criticità idrauliche anche a monte dell'area di realizzazione della vasca volano, nello stesso abitato di Brembate di Sopra, nel tratto urbano del Lesina, corrispondente a via IV Novembre (se pur più a valle del tratto, giudicato critico nel presente studio), e nel tratto a valle del centro storico, corrispondente al ponte di via San Zenone.

Dato che lo Studio di Bacino del 2010 (redatto a scala di bacino e con altre finalità) non poté spingersi al livello di dettaglio dell'interpretazione dei fenomeni interessanti il singolo territorio comunale, il Comune di Brembate di Sopra ha incaricato gli scriventi della redazione dello studio di fattibilità "Caratterizzazione dei fenomeni alluvionali del Torrente Lesina interessanti il centro abitato di Brembate di Sopra e definizione preliminare di interventi atti alla loro mitigazione", consegnato ad aprile 2016.

A seguito di tale studio, in cui si è proceduto alla ricostruzione della consistenza del Torrente Lesina nei tratti urbani di Brembate di Sopra individuati come critici (mediante rilievo strumentale dei tratti ed implementazione di modello idraulico di simulazione del passaggio della piena), corrispondenti a via IV Novembre e a via San Zenone, e allo studio generale del bacino del Torrente Lesina (mediante implementazione di un modello idrologico di maggior dettaglio, con ricostruzione di tutti gli apporti, sia naturali che antropici), così come riportato nei capitoli di seguito. In questo studio, in particolare, è stato possibile escludere la fattibilità di possibili soluzioni locali e puntuali alle criticità rilevate (sia per estensione delle stesse che per mancata fattibilità tecnico-operativa), individuando la necessità di una misura estensiva di più ampio impatto sul territorio.

Da tale studio di fattibilità nel novembre 2017 è stato derivato uno stralcio, individuando un primo lotto funzionale, denominato "Mitigazione delle problematiche di pericolosità idraulica del Torrente Lesina nell'abitato", oggetto del presente progetto definitivo.

Tale primo lotto consiste nella realizzazione di una vasca di laminazione in linea, intesa come area di allagamento controllato di un'area del territorio extraurbana, posta a monte dell'abitato di Brembate di Sopra, giudicata particolarmente idonea per conformazione, morfometria e attuale destinazione.

2.3 Vigente perimetrazione pericolosità idraulica

Dal punto di vista vincolistico, l'abitato di Brembate di Sopra non risulta interessata da vincoli specifici relativi agli eventi alluvionali del Torrente Lesina, se non quelli relativi alle fasce di dissesto Idrogeologico secondo legenda uniformata al P.A.I., riportati nella Tavola dei Vincoli dello Studio Geologico Comunale, coincidenti di fatto con le fasce di rispetto del reticolo idrico principale (Figura 4).

Il P.G.R.A. tramite la "Direttiva alluvioni 2007/60/CE - Revisione 2020" riporta, nel tratto in oggetto, le medesime estensioni delle fasce di pericolosità, come visibile in Figura 3. Tale perimetrazione è confermata nella vigente Carta dei Vincoli del PGT del Comune di Brembate di Sopra (Figura 4), dove, per il tratto del Torrente Lesina in attraversamento all'abitato di Brembate di Sopra, all'alveo viene fatta coincidere l'area Ee e alla fascia di rispetto l'area Em.

Le uniche perimetrazioni delle aree di allagamento del Torrente Lesina sono state quindi riportate nel citato Studio di Bacino del 2010, che come detto risulta però uno studio a scala di bacino di più ampia scala rispetto all'area oggetto della presente indagine (Figura 5).

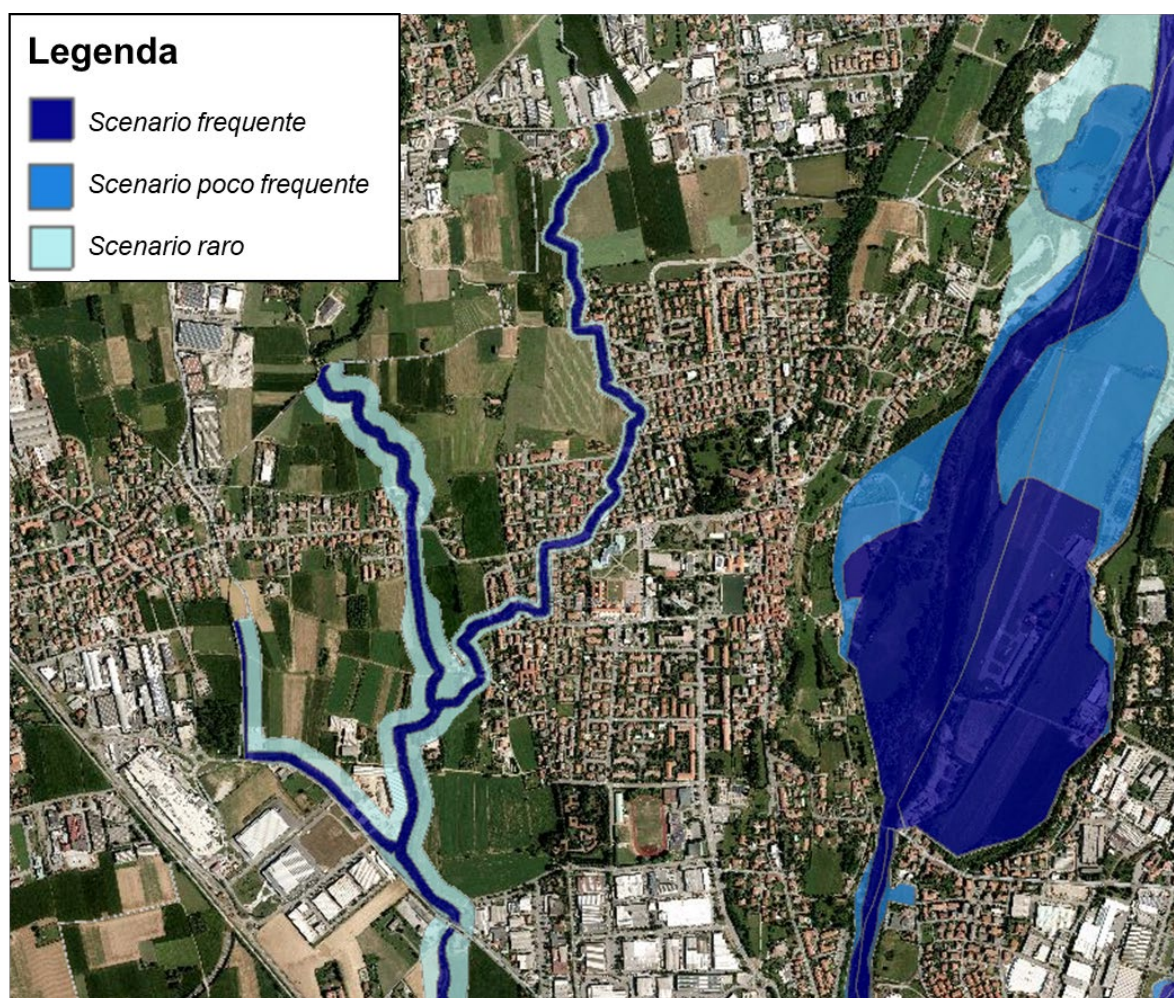











Figura 3: P.G.R.A - Stralcio carta Direttiva alluvioni 2007/60/CE – Revisione 2015.

CARTA DEI VINCOLI

LIMITE DI RISPETTO DELLE RISORSE IDRICHE

-  Pozzo e relativa fascia di tutela assoluta di 10m da pozzo per uso idropotabile. D.lgs.152/2006 art.94; D.G.R. n°6/15137/1996 e D.G.R. n°7/12693-2003
-  Limite dell'isocrona di 60GG da pozzo per uso idropotabile. D.lgs.152/2006 art.94; D.G.R. n°6/15137/1996 e D.G.R. n°7/12693-2003
-  Alvei fluviali vincolati (fonte SIBA)
-  Aree di rispetto (150m) di fiumi, torrenti, corsi d'acqua pubblici e relative sponde (fonte SIBA)
-  Fascia di rispetto del Reticolo Idrico

FASCE PAI

-  Limite fascia A-B del PAI (modificata art.27 c.3 N.d.A. del P.A.I.) L.183/1989; D.P.C.M. 24/05/2001
-  Limite fascia B-C del PAI (modificata art.27 c.3 N.d.A. del P.A.I.) L.183/1989; D.P.C.M. 24/05/2001
-  Carta del dissesto con legenda uniformata PAI - tipo Em: pericolosità media o moderata di esondazione
-  Carta del dissesto con legenda uniformata PAI - tipo Ee: pericolosità molto elevata

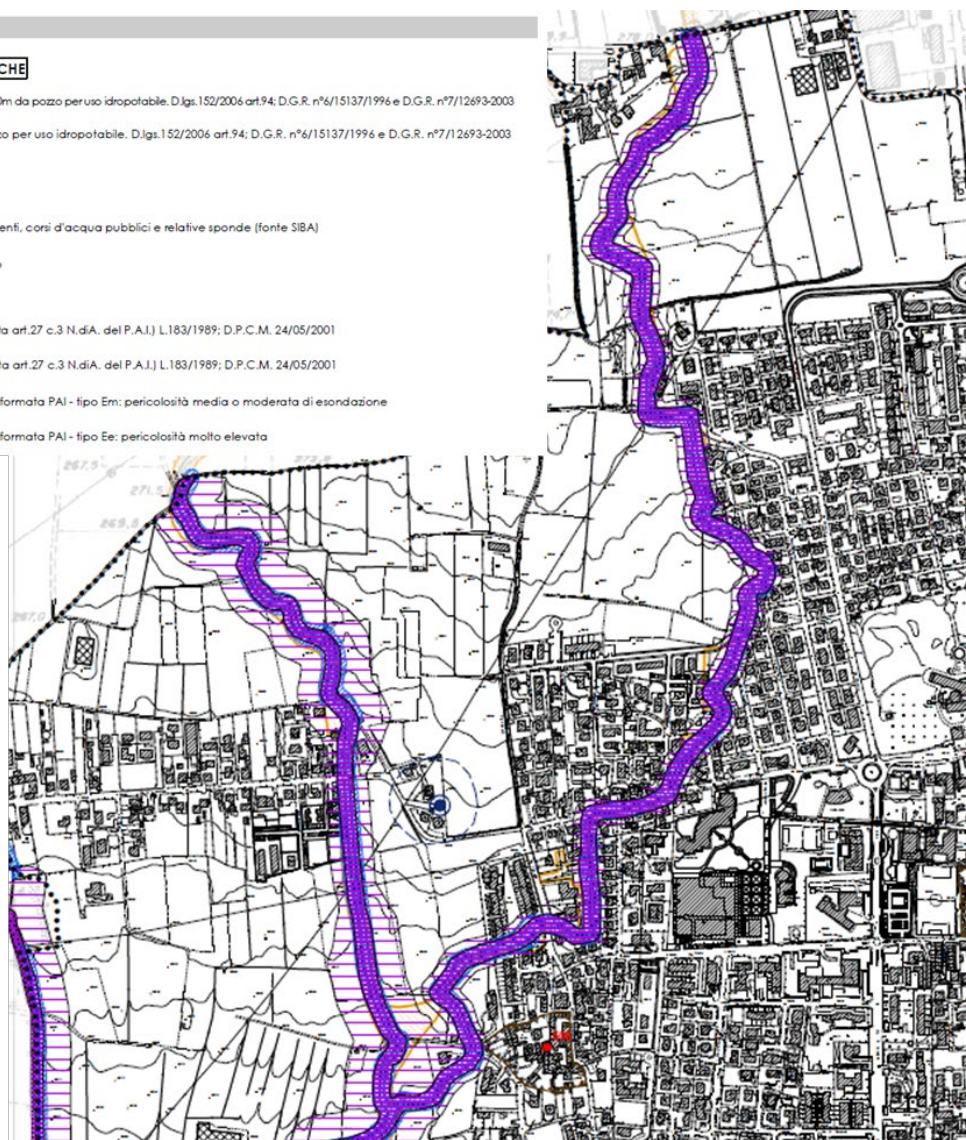


Figura 4: P.G.T. del Comune di Brembate di Sopra – Documento di Piano: Carta dei Vincoli – stralcio della Tavola A8. Individuazione delle aree di dissesto idrogeologico PAI tipo Ee ed Em.

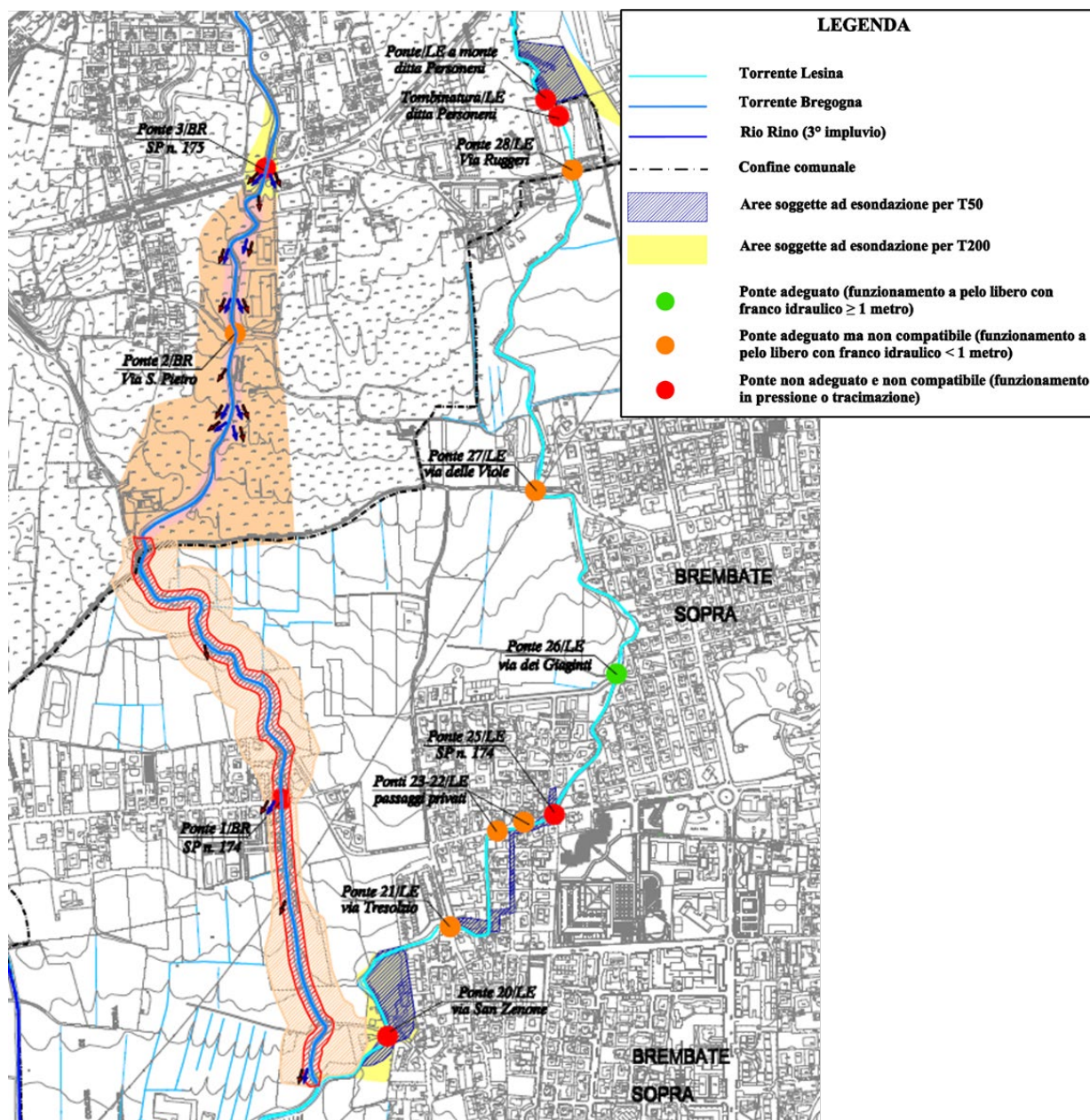


Figura 5: Estratto Tavola 4/b – Planimetria delle aree di esondazione per T 50 anni e T 200 anni Studio Idrogeologico e progettazione preliminare a scala di sottobacino idrografico dei Torrenti Lesina, Bregogna e affluenti – settembre 2010.

3 Analisi idrologica

3.1 Scelta dei tempi di ritorno di riferimento

La scelta delle portate da utilizzare per la modellazione idraulica è stata fatta in base al Progetto di Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni, articolo 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010 – capitolo II A. Mappatura della pericolosità e valutazione del rischio.

Nello specifico, la tabella a pagina 10 del documento sopracitato mostra gli scenari di inondazione da utilizzare (Figura 6).

Essendo i tre corsi d'acqua parte del Reticolo Secondario Collinare Montano (RSCM), non sono specificati tempi di ritorno specifici, dunque, tenendo conto di quelli specificati della Direttiva alluvioni (vedasi seconda colonna della tabella) si è quindi scelto l'evento ventennale per lo scenario H (high), l'evento centenario per lo scenario M (medium) ed infine l'evento cinquecentenario per lo scenario L (low).

Direttiva Alluvioni		Pericolosità	Tempo di ritorno individuato per ciascun ambito territoriale (anni)				
Scenario	TR (anni)		RP	RSCM (legenda PAI)	RSP	ACL	ACM
Elevata probabilità di alluvioni (H = high)	20-50 (frequente)	P3 elevata	10-20	Ee, Ca RME per conoide ed esondazione	Fino a 50 anni	15 anni	10 anni
Media probabilità di alluvioni (M = medium)	100-200 (poco frequente)	P2 media	100-200	Eb, Cp	50-200 anni	100 anni	100 anni
Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi (L = low)	Maggiore di 500 anni, o massimo storico registrato (raro)	P1 bassa	500	Em, Cn		Massimo storico registrato	>> 100 anni

Figura 6: Estratto direttiva 2007/60/CE con indicazione tempi di ritorno in base alla pericolosità e agli scenari di alluvione.

3.2 Torrenti Lesina e Bregogna

Le portate sono state determinate dallo Studio di Fattibilità dell'aprile 2016 "Caratterizzazione dei fenomeni alluvionali del Torrente Lesina interessanti il centro abitato di Brembate di Sopra e definizione preliminare di interventi atti alla loro mitigazione" - successivamente aggiornati nello sviluppo del progetto definitivo del progetto "Interventi di mitigazione delle problematiche di pericolosità idraulica del torrente Lesina: bacino di laminazione a monte abitato", così come da elaborato tecnico C – Relazione Idrologica.

Gli idrogrammi sono stati ottenuti mediante un modello idrologico descritto nel dettaglio nell'elaborato menzionato in precedenza. La durata dell'evento meteorico di riferimento è stata posta, sia il torrente Lesina che il Bregogna, pari a 6 ore. Le simulazioni svolte per lo studio di fattibilità sopracitato contenevano eventi con tempi di ritorno variabili tra 2 e 100 anni, per cui è stato necessario aggiungere un'ulteriore simulazione con l'evento cinquecentenario, utilizzando i parametri idrologici descritti in sezione 3.3.1.

Per le simulazioni idrauliche (di cui alla sezione 4) sono stati scelti gli idrogrammi riferiti a due sezioni di controllo poste a monte del territorio di Brembate di Sopra, ossia l'attraversamento di via Ruggeri per il torrente Lesina, e l'attraversamento della SP175 (al confine con Barzana) per il Bregogna (Figura 10).

Come indicato nello Studio di Fattibilità, il restringimento di Via Ruggeri comporta una limitazione alla portata transitabile a valle, stimabile in $13.78 \text{ m}^3/\text{s}$. Questo è evidente dall'idrogramma relativo all'evento centenario, che nelle simulazioni della vasca volano sul Lesina è stato limitato a quel valore di portata (Figura 7). Naturalmente con questo viene ipotizzato implicitamente che una parte del volume idrologico di piena (ossia la porzione dell'idrogramma "teorico" con valori superiori a $13.78 \text{ m}^3/\text{s}$), pari a circa $19'100 \text{ m}^3$, venga invasata a monte di via Ruggeri (Figura 8).

Per l'evento cinquecentenario, che ha un volume idrologico notevolmente superiore a quello centenario, è stato ritenuto poco realistico limitare la portata al medesimo valore di $13.78 \text{ m}^3/\text{s}$, in quanto avrebbe significato che l'invaso a monte di via Ruggeri sarebbe stato di oltre $44'000 \text{ m}^3$ (Figura 9). Difatti, in uno scenario di questo tipo è probabile che parte della portata "rientri" nell'alveo a valle di via Ruggeri, mediante deflusso superficiale sulla piana alluvionale, o con un deflusso "in pressione" all'interno della tombinatura stessa. Al fine di simulare questo effetto, è stato sottratto all'idrogramma di piena il medesimo volume dell'idrogramma centenario. In questo modo, la portata è comunque limitata dalla tombinatura, ma non in modo eccessivo.

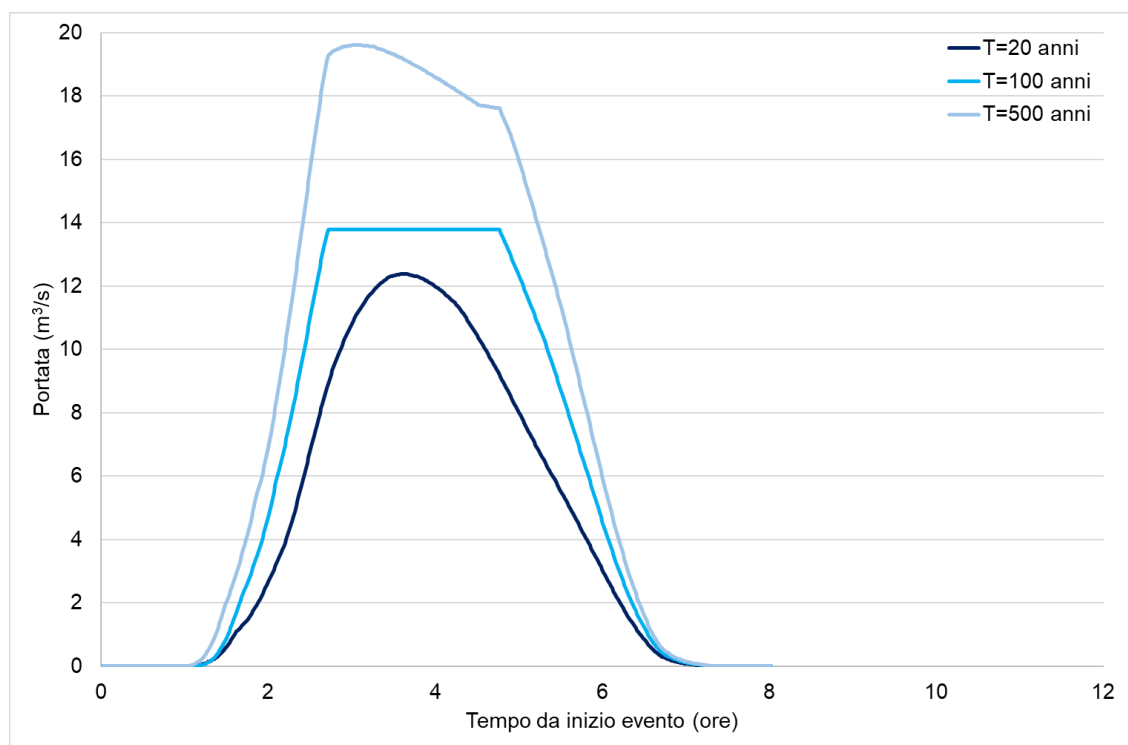


Figura 7: Idrogrammi per il Torrente Lesina all'attraversamento di Via Ruggeri.

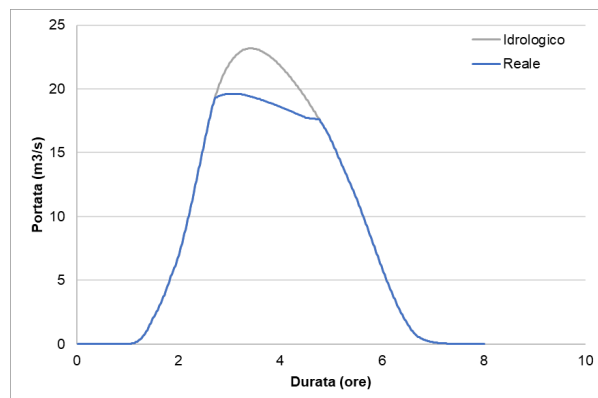
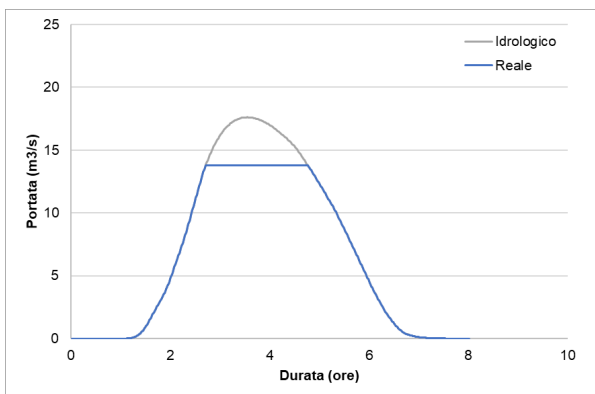


Figura 8: Idrogramma $T=100$ anni ("Reale" e idrologico).

Figura 9: Idrogramma $T=500$ anni ("Reale" e idrologico).

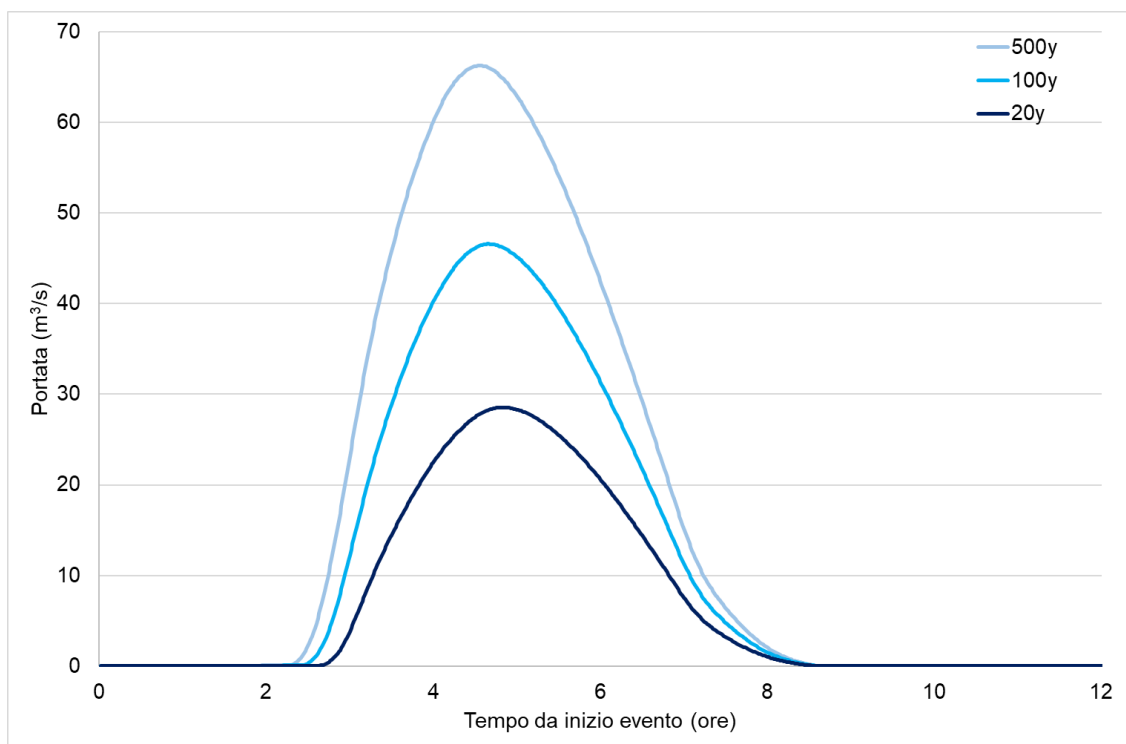


Figura 10: Idrogrammi per il Torrente Bregogna all'ingresso nel territorio comunale di Brembate di Sopra.

3.3 Torrente Rino

Il Torrente Rino non è stato oggetto dei precedenti studi di bacino, che hanno riguardato il Lesina e il Bregogna e pertanto è stato necessario predisporre un modello idrologico ad hoc, descritto di seguito.

3.3.1 Evento meteorico

L'altezza di precipitazione, ragguagliata all'intero bacino, per un evento di durata T_p , funzione dell'espressione della curva di possibilità pluviometrica specifica dell'evento meteorico di riferimento adottato, ovvero del tempo di ritorno considerato T_R , (**20, 100 e 500 anni**). Nel caso specifico, per l'intensità di pioggia corrispondente ad una pioggia di durata d , è stata assunta la seguente espressione:

$$i(A, d) = \frac{h(A, d, T)}{d} = r(A, d) \cdot a'(d, T) \cdot T^{n'(d, T)} \quad (1)$$

dove:

- h rappresenta l'altezza di pioggia,
- a ed n sono parametri derivati dalle espressioni delle curve di possibilità pluviometriche ottenute per il bacino dal sito dell'agenzia regionale per la protezione dell'ambiente (ARPA) della Lombardia
- a' ed n' sono i medesimi parametri, ragguagliati utilizzando le espressioni di Colombo, valide per superfici del bacino A superiori a 100 ha e dove la stessa A deve essere espressa in ettari.

$$a'(d, T) = a(d, T) \left[1 - 0.006 \left(\frac{A}{100} \right)^{0.4} \right] \quad (2)$$

$$n'(d, T) = n(d, T) \left[1 + 0.003 \left(\frac{A}{100} \right)^{0.6} \right] \quad (3)$$

Tabella 1: Parametri LSPP

Tempo di ritorno	a	a'	n (d>1h)	n' (d>1h)	n (d<1h)	n' (d<1h)
20 anni	53.1	52.7	0.302	0.307	0.5	0.5
100 anni	68.6	68.1	0.302	0.307	0.5	0.5
500 anni	84.1	83.5	0.302	0.307	0.5	0.5

Il calcolo dello ietogramma in ingresso al bacino idrografico è stato effettuato utilizzando un evento meteorico simulato del tipo "Chicago". Come durata dell'evento si è scelta una durata di 6 ore (come quella di Bregogna e Lesina) con un fattore di picco r pari a 0.3. Gli ietogrammi sono mostrati in Figura 11.

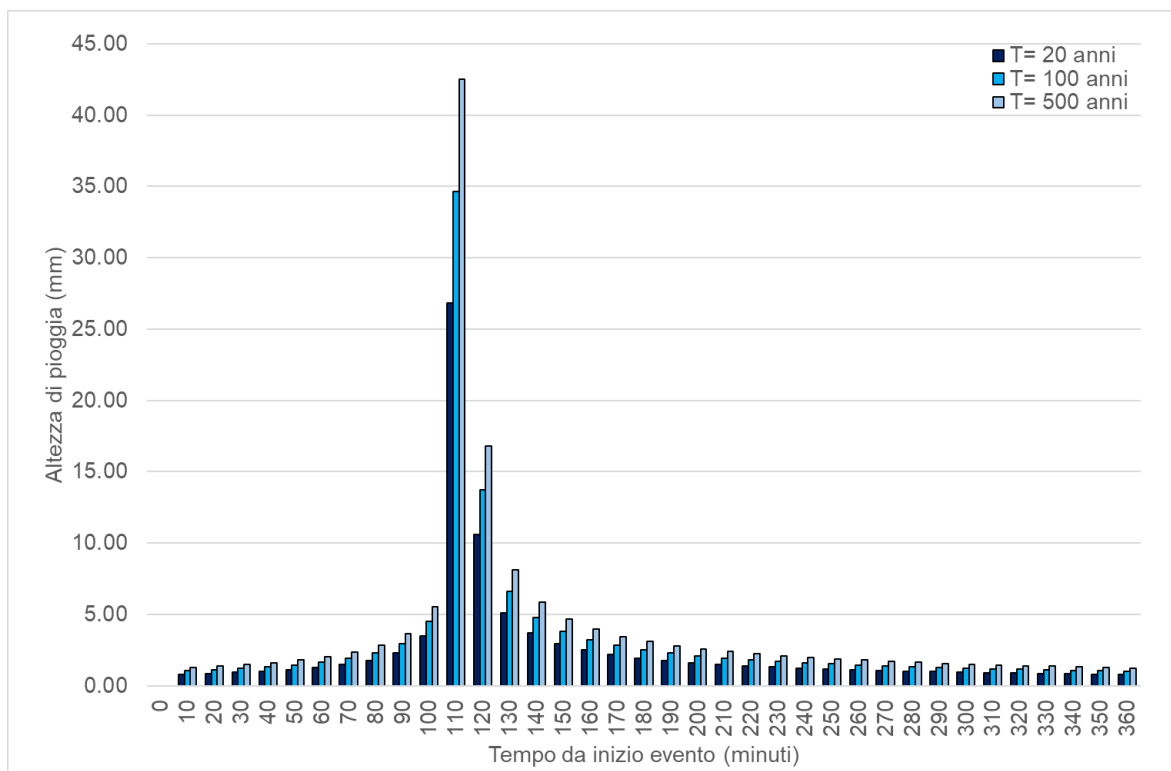


Figura 11: Ietogrammi corrispondenti agli eventi considerati per una durata di 6 ore.

3.3.2 Caratterizzazione del bacino

La caratterizzazione topografica del territorio è stata fatta usando un modello tridimensionale delle quote (Digital Elevation Model, DEM) fornito dalla Regione Lombardia. Il modello topografico del bacino idrografico ottenuto per l'analisi si estende per uno sviluppo dell'asta idrica di circa 2.39 km, corrispondente ad una pendenza media del 7.3%.

L'estensione totale del bacino idrografico, alla sezione di chiusura rappresentata dalla confluenza nel Torrente Lesina, è di 1.99 km². In Tabella 2 si riporta una sintesi dell'uso del suolo che, è per circa metà urbanizzato.

Tabella 2: Uso del suolo nel bacino del Torrente Rino.

Uso del suolo	Area (ha)	% sul totale
Aree urbanizzate	176.24	54.6%
Aree agricole	80.47	25.0%
Prati	42.72	13.2%
Boschi	23.06	7.2%

Per la determinazione dell'onda di piena del Torrente, è stato utilizzato un modello matematico di trasformazione afflussi-deflussi, basato sulla depurazione delle perdite idrologiche (infiltrazione, ritenzione superficiale, ecc...) secondo il metodo CN del Soil Conservation Service (U.S.A.) e sulla formazione dell'onda di piena risultante dalla precipitazione netta sul bacino.

Il parametro CN può essere dedotto dalle specifiche tabelle disponibili in letteratura, assumendo valori compresi tra circa 25 (superficie permeabili con un elevato livello di infiltrazione nel terreno o di immagazzinamento, ovvero scarsamente contribuente al deflusso superficiale) a 98 (superficie perfettamente impermeabile). In particolare, sono stati assunti, per le singole destinazioni d'uso del suolo individuate, i valori del parametro CN descritti in Tabella 3.

Tabella 3: Valori del parametro CN utilizzati.

TAVOLA DEI COEFFICIENTI CN							
Usò del suolo	Tipo suolo idrologico						
	A	AB	B	BC	C	CD	D
Coltivazioni, suolo conservato	62	67	71	75	78	80	81
Coltivazioni, suolo non conservato	72	77	81	85	88	90	91
Pascoli, cattive condizioni	68	74	79	83	86	88	89
Pascoli, buone condizioni	39	50	61	68	74	77	80
Boschi, radi	45	56	66	72	77	80	83
Boschi densi	25	40	55	63	70	74	77
Spazi aperti (min 3/4 erba)	39	50	61	68	74	77	80
Spazi aperti (min 1/2 erba)	49	59	69	74	79	82	84
Spazi aperti (max 1/4 erba)	68	74	79	83	86	88	89
Aree impermeabili	98	98	98	98	98	98	98
Zone industriali	89	91	92	93	94	95	95
Tessuto residenziale denso (centri storici)	89	91	92	93	94	95	95
Tessuto residenziale continuo	76	81	85	87	89	90	91
Tessuto residenziale discontinuo	77	81	85	88	90	91	92
Tessuto residenziale rado e nucleiforme	57	65	72	77	81	84	86
Tessuto residenziale sparso	54	62	70	75	80	83	85

Il coefficiente di afflussi deflussi è stato calcolato utilizzando tabelle disponibili in letteratura, adattate all'uso del suolo e alle caratteristiche idrologiche del terreno che sono risultate divise in modo eterogeneo tra i vari gruppi idrologici.

Tabella 4: Gruppi idrologici del suolo nel bacino.

Gruppo idrologico suolo	Area (ha)	% sul totale
A	50.84	15.7%
AB	0.00	0.0%
B	91.44	28.2%
BC	29.85	9.2%
C	66.86	20.6%
CD	6.26	1.9%
D	78.79	24.3%

Il tempo di corrivazione del bacino naturale, T_c , è stato calcolato secondo la nota espressione di M. Giandotti modificata da Bacchi et al. (1999):

$$T_c = \frac{3.3 \cdot \sqrt{A_{TOT}} + 3.2 \cdot L}{\sqrt{H_{med} - H_{sezchiusura}}} \quad (4)$$

dove:

- T_c tempo di corrivazione del bacino idrografico (ore);
- A_{TOT} estensione superficiale del bacino idrografico (km²);
- L percorso idraulicamente più lungo del bacino idrografico (km);
- H_{med} altitudine media del bacino idrografico (m s.l.m.);
- H_{sez} chiusura altitudine della sezione di chiusura (m s.l.m.).

Per quanto riguarda i sottobacini implementati nel modello idrologico descritto in precedenza, le relative caratteristiche sono mostrate in Tabella 5. Si tratta di tre sottobacini: l'affluente del torrente Rino proveniente da Barzana e lo stesso Rino a monte e a valle della confluenza.

Tabella 5: Caratteristiche dei sottobacini.

Ramo	A (ha)	CN	Tc (min)	L _{asta} (m)
Affluente Rino	58.4	84.8	102	1521
Rino Monte	198.9	71.3	112	2393
Rino Valle	66.8	78.4	181	1975

3.3.3 Modello idrologico

I calcoli per la determinazione dell'onda di piena del bacino complessivo e dei sottobacini naturali indagati del Torrente Rino, sono stati effettuati mediante il programma di calcolo **HEC-HMS 4.5** (Hydrological Modelling System), messo a punto dall'Hydrological Engineering Center degli Stati Uniti d'America.

Nel modello HEC-HMS è stato implementato con le seguenti caratteristiche:

- il metodo *SCS Curve Number* per la caratterizzazione del bacino come descritto nel paragrafo 3.3.2
- gli idrogrammi di piena Chicago descritti in precedenza
- il modello *Lag* per la convoluzione dell'idrogramma di piena. Il trasferimento dell'onda di piena generato dall'asta idrica asservita è stato individuato semplicemente associando, al singolo ramo idrico, un tempo di traslazione dell'onda di piena, dato dalla relativa lunghezza e da una prefissata velocità di deflusso.

Nella Figura 12 si riporta uno schema planimetrico del modello implementato. Il nodo finale rappresenta la foce nel Torrente Lesina.

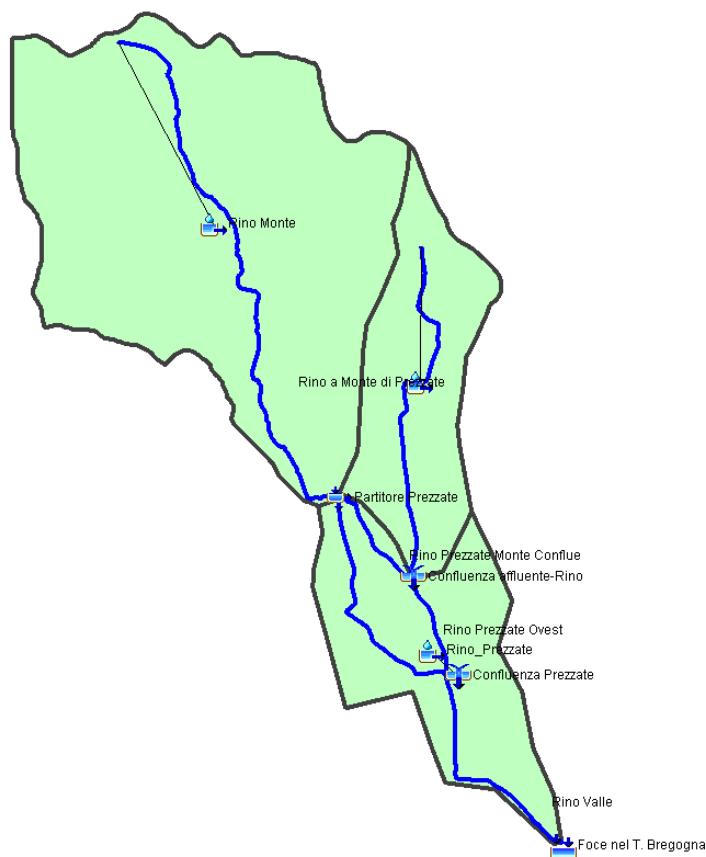


Figura 12: Schema del bacino implementato su HEC HMS.

3.3.3.1 Schematizzazione manufatti presenti

Al fine di caratterizzare la funzionalità idraulica del partitore, citato nella sezione 2.1.3, è stata sviluppata la scala delle portate a partire dalla geometria dei manufatti riportata nelle figure seguenti ().

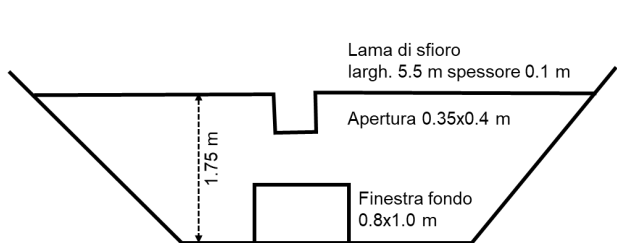


Figura 13: Geometria del partitore sul ramo ovest (la quota del fondo alveo è 265.23 m slm).

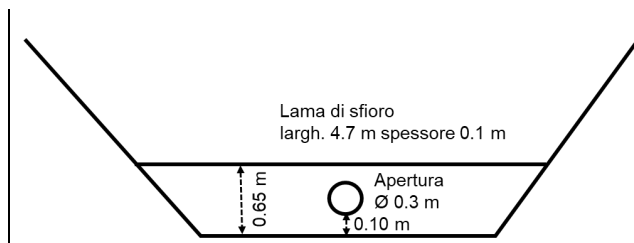


Figura 14: Geometria del partitore sul ramo est (la quota del fondo alveo è 265.23 m slm).

La scala delle portate è stata determinata con l'equazione per il deflusso sotto battente:

$$Q = \frac{2}{3} AC_d \sqrt{2gH} \quad (5)$$

Dove A è l'area della bocca di passaggio nella direzione del deflusso, Cd è il coefficiente di contrazione (0.6) e H è il carico gravante sulla soglia. Dunque, variando la quota della corrente a monte del partitore, si determina il carico H, l'area del passaggio e dunque la portata per ciascuno dei due rami (Figura 15).

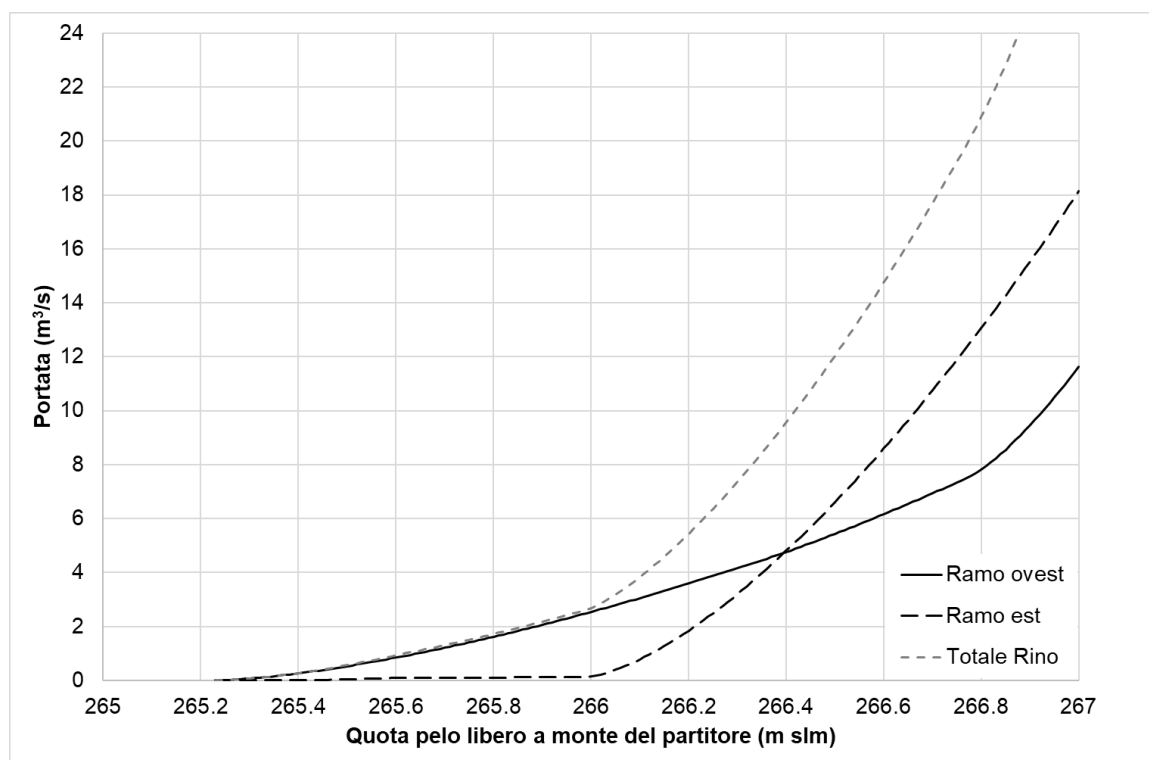


Figura 15: Scala delle portate del partitore sul Torrente Rino in territorio di Mapello.

A partire dalla scala delle portate, prima ricostruita, è possibile ricostruire la relazione tra le portate in ingresso e quelle in uscita, in modo da poter simulare il partitore in HEC-HMS con la funzione "Diversion" (ossia deviatore di portata - Figura 16).

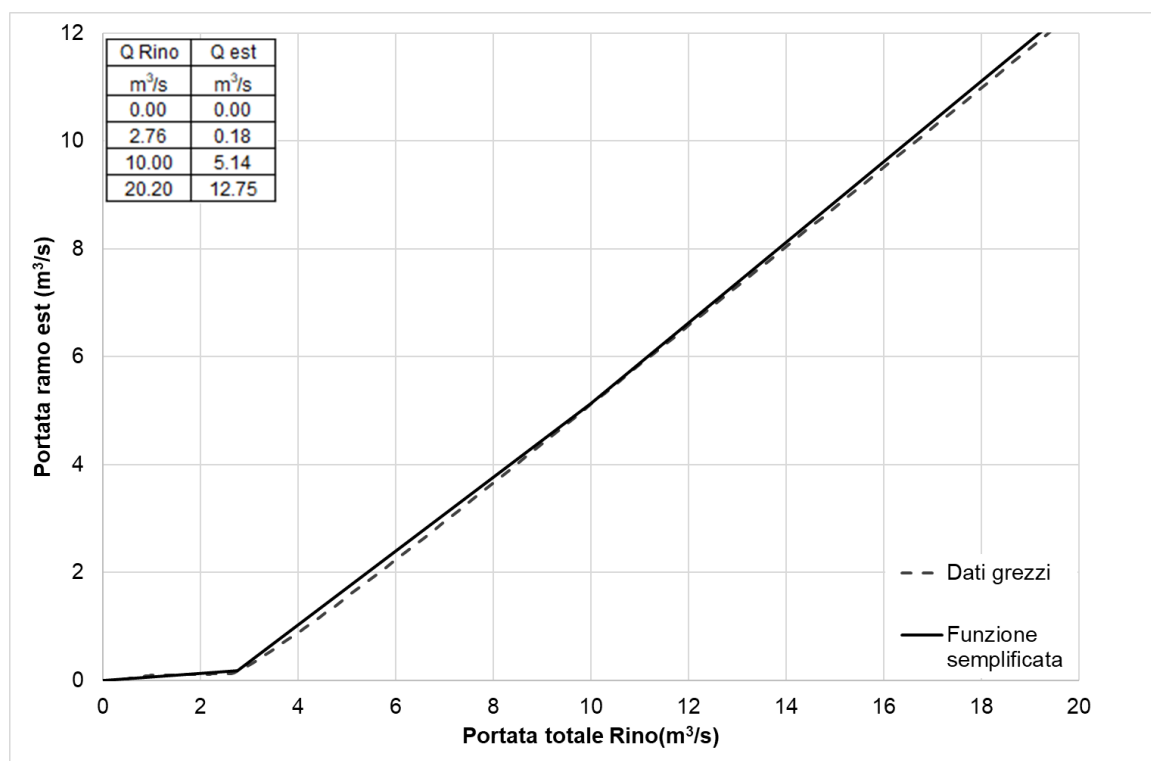


Figura 16: Relazione tra portate in ingresso e portate deviate sul ramo est (funzione semplificata nella tabella in alto a sinistra).

3.3.4 Risultati

Gli idrogrammi di piena restituiti dal modello HEC-HMS per una durata di 6 ore (scelta in quanto durata critica per il Lesina e il Bregogna), sono mostrati in Figura 17 e Figura 18.

Entrambi rappresentano condizioni al contorno del modello idraulico bidimensionale descritto in sezione 4.

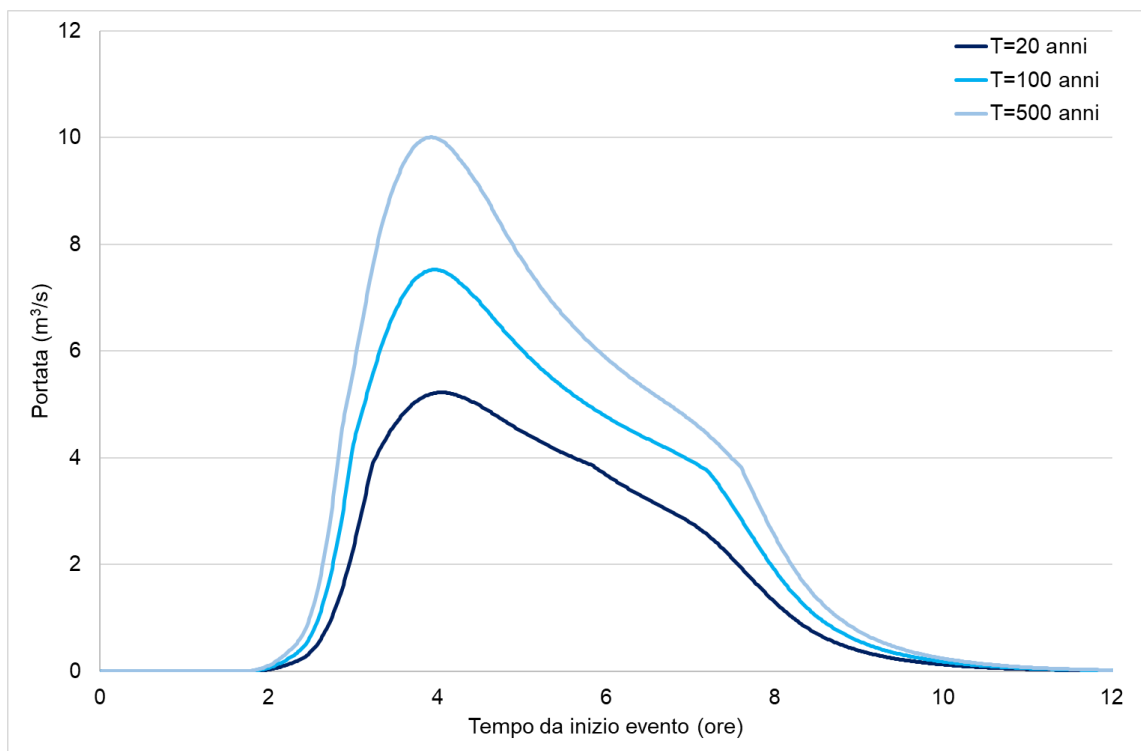


Figura 17: Risultati modellazione del ramo ovest del Torrente Rino, a monte della confluenza con il ramo est.

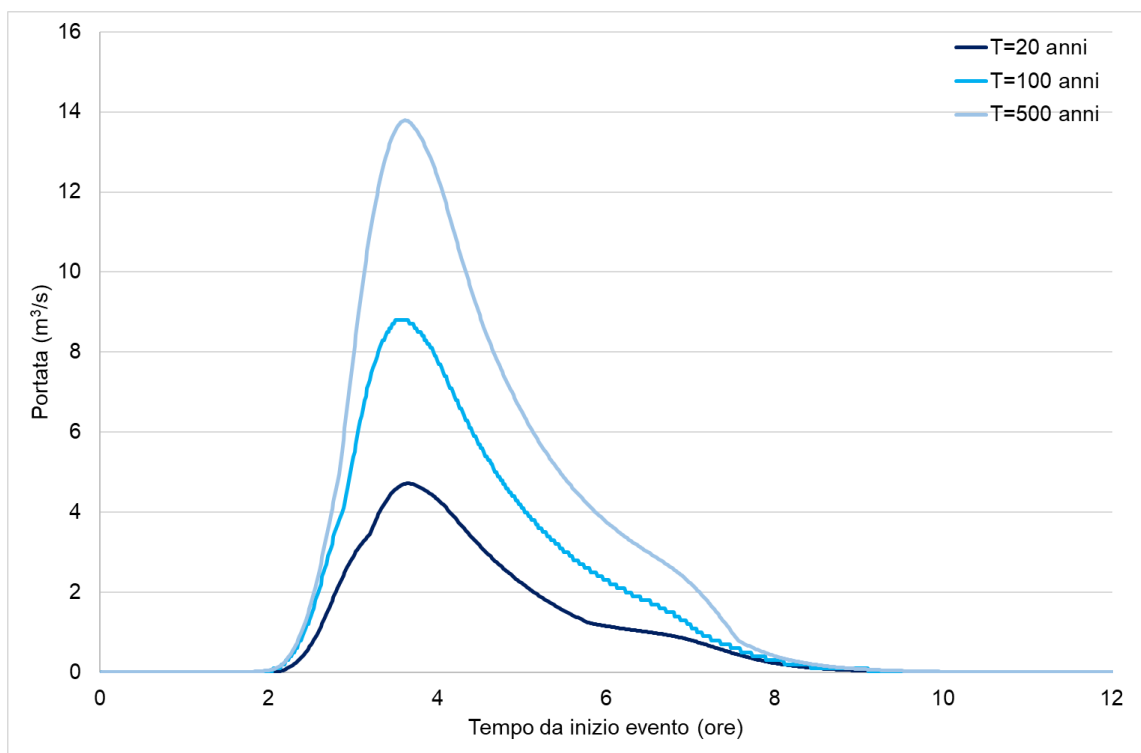


Figura 18: Risultati modellazione del ramo est del Torrente Rino, a monte della confluenza con il ramo ovest.

4 Modellazione idraulica

4.1 Software di calcolo

La ricostruzione del comportamento idraulico del Torrente Lesina e dei suoi affluenti principali in piena è stata effettuata con il software **HEC-RAS 6.2** ed è stato ritenuto necessario svolgere la modellazione in modo bidimensionale. Difatti questa risulta particolarmente adatta a situazioni di tracimazione, in cui il moto è meglio descritto in due dimensioni.

Per risolvere la simulazione, il software utilizza le equazioni della conservazione della quantità di moto e di conservazione della massa. I parametri in ingresso al modello sono i seguenti:

- Modello digitale del terreno (DTM)
- Mesh (griglia) di calcolo
- Scabrezza del terreno/alveo
- Dimensioni dei manufatti di attraversamento
- Condizioni al contorno (generalmente un'idrogramma in ingresso a monte e una condizione a valle dipendente dalle caratteristiche geomorfologiche del luogo)

4.1.1 Modello digitale del terreno (DTM)

Il DTM è stato creato in base ai dati dei rilievi effettuati dagli scriventi per altri progetti in Comune di Brembate di Sopra, con una dimensione di ciascuna cella di 0.025 m² (0.15x0.15 m).

In particolare, per l'area relativa alla vasca di laminazione è stato utilizzato un rilievo effettuato con un drone, mentre le altre tratte d'interesse relative specialmente agli attraversamenti (via delle Viole, via Foscolo, via IV Novembre, via Tresolzio e via San Zenone) sono state utilizzate rilievi strumentali effettuati con stazione totale e GPS.

Nelle tratte dove non erano disponibili informazioni sufficienti il modello è stato integrato con informazioni prese dallo studio di bacino del 2010 e dalla carta tecnica comunale (CTC) di Brembate di Sopra.

Infine, per il modello relativo allo stato di progetto, il modello digitale del terreno dell'area della vasca è stata creata con il software AutoCAD Civil3D.

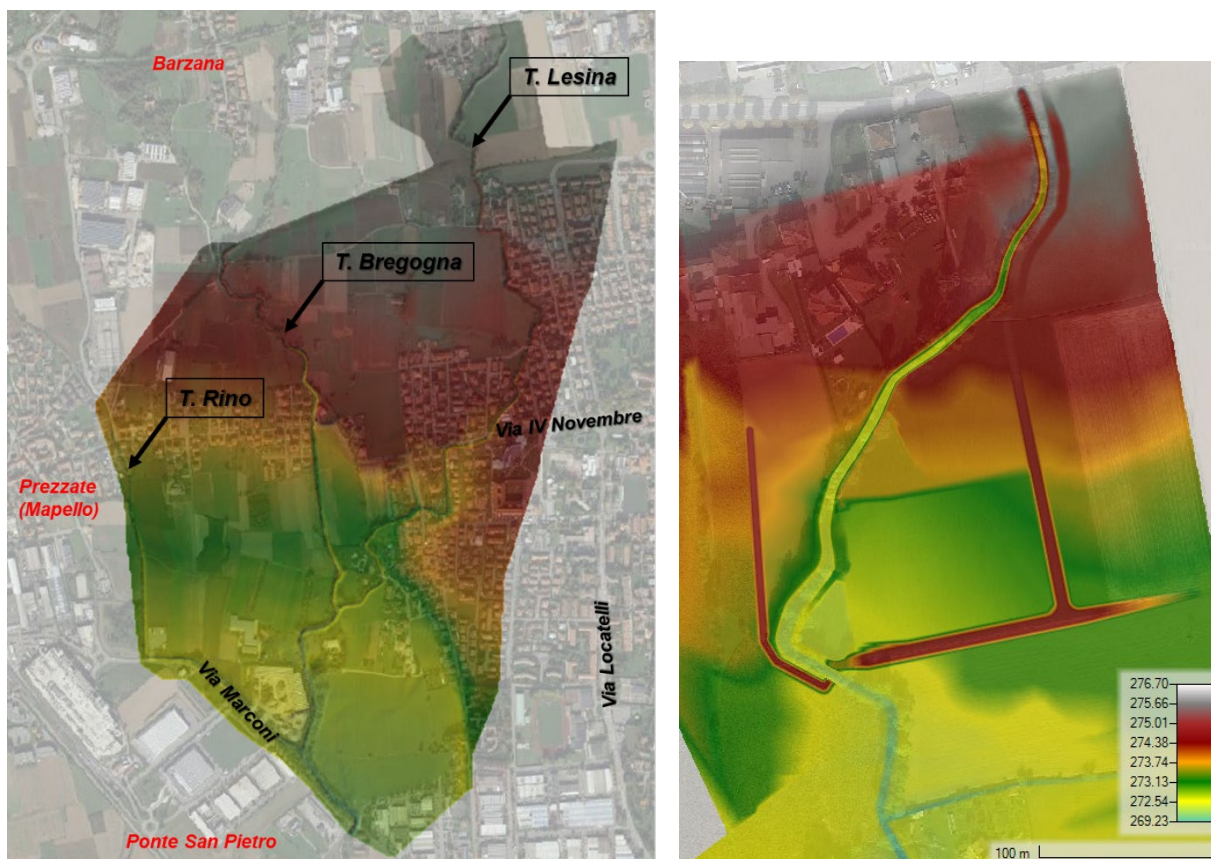


Figura 19: DTM utilizzato per la modellazione (sinistra) e dettaglio della vasca di laminazione (sinistra).

4.1.2 Mesh (griglia) di calcolo

La griglia di calcolo è stata impostata su una base di rettangoli 2 m x 2 m, che è stata infittita in corrispondenza di discontinuità verticali (sponde, argini, muri, attraversamenti ecc.) e rilevati stradali, fino ad ottenere una maglia di oltre 385'000 celle.



Figura 20: Estratto della mesh di calcolo in via IV Novembre (le barre grigie rappresentano i ponti).

4.1.3 Scabrezza del terreno

Il coefficiente di scabrezza adottato nel modello è stato specificato nella notazione di Manning, come richiesto dal modello, trattandosi di aree particolarmente estese, è stata prima effettuata una classificazione in base al DUSAF.

In seguito, sono stati assegnati valori ritenuti plausibili per aree residenziali e agricole, escludendo gli edifici. Per quest'ultimi è stato posto un valore pari a $20 \text{ s/m}^{1/3}$ per gli edifici, delineati per mezzo della CTC. Tale valore, palesemente fuori misura (basti considerare che i valori massimi reperibili nei manuali, relativi ad aree forestate, sono tipicamente 100-200 volte più bassi, ossia tra $0.1- 0.2 \text{ s/m}^{1/3}$) consente di "deviare" il deflusso delle acque attorno agli edifici, qualora aree edificate vengano interessate da allagamenti, restituendo risultati più realistici.

Gli altri valori adottati come coefficiente di scabrezza sono i seguenti.

- 0.012 per le porzioni di alveo in calcestruzzo
- 0.015 per strade e marciapiedi
- 0.02 per le aree classificate come "impianti" o "insediamenti produttivi agricoli"
- 0.035 per l'alveo dei torrenti Lesina, Bregogna e Rino, costituiti principalmente da ghiaia e ciottoli
- 0.04 per aree classificate "tessuto residenziale discontinuo", o "industriali" edifici esclusi
- 0.05 per aree classificate come "formazioni ripariali", "prati permanenti" e "seminativi semplici"
- 0.05 per aree classificate come "tessuto residenziale sparso" e "tessuto residenziale rado e nucleiforme", edifici esclusi
- 0.08 per le aree boscate

4.1.4 Manufatti di attraversamento

I manufatti di attraversamento sono stati inseriti come una "SA/2D Area connection" e modellati come "Bridge" (Ponte) e sono i seguenti (Figura 21):

- n.8 sul Torrente Lesina a monte della confluenza con il Bregogna (Via delle Viole, Via Foscolo, Quattro su Via IV Novembre, Via Tresolzio e Via San Zenone)
- n. 1 sul Torrente Bregogna a monte della confluenza con il Lesina (Via IV Novembre)
- n. 1 sul Torrente Lesina a monte della confluenza con il Rino (Via Cascinetto)
- n. 4 sul Torrente Rino a monte della confluenza con il Lesina (Attraversamenti a servizio di aree agricole o produttive)
- n. 1 sul Torrente Lesina a valle della confluenza con il Rino (Via Marconi)

Per ciascuno di essi sono state definite quattro sezioni trasversali (ossia perpendicolari al corso d'acqua, due a monte e due a valle dell'attraversamento), che dettagliassero le dimensioni dell'attraversamento (in base ai rilievi strumentali sopracitati).

Infine, il manufatto di regolazione della vasca volano di progetto, prevista lungo il Lesina a monte dell'abitato, è stato inserito come un "Gate" associata ad un "Weir", ossia una paratoia all'interno di un manufatto di sfioro, in quanto ritenuta una rappresentazione più realistica del fenomeno di deflusso rispetto ad un ponte.

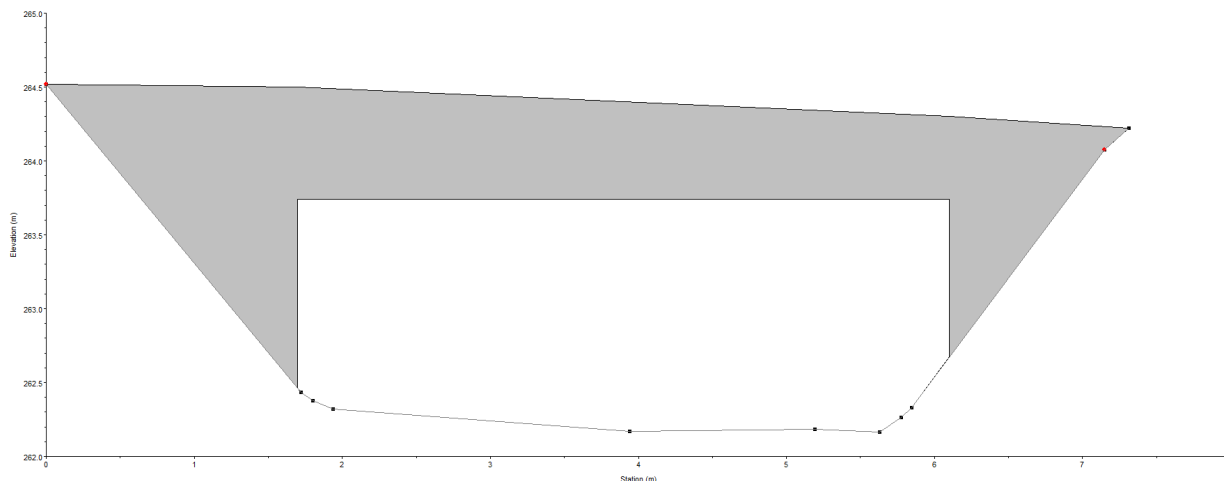


Figura 21: Esempio schema di manufatto di attraversamento.

4.1.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno all'ingresso sono costituite dai quattro idrogrammi di piena descritti nella sezione 3:

- Torrente Lesina a valle dell'attraversamento di Via Ruggeri
- Torrente Bregogna a valle della SP175 (confine tra Barzana e Brembate di Sopra)
- Torrente Rino – ramo est, a valle della tombinatura di Via IV Novembre
- Torrente Rino – ramo ovest, a valle della tombinatura in comune di Mapello

La condizione al contorno di valle è stata posta pari all'altezza di moto uniforme, in mancanza di altre informazioni, utilizzando una pendenza pari all'1%.

Per la condizione di progetto, come richiesto dal modello è stato inoltre necessario creare una serie temporale relativa all'apertura della paratoia. Tale serie è stata creata ipotizzando una parziale occlusione derivante dal trasporto solido, (pari al 20%, 27% e 33% della luce per l'evento con T=20, 100 e 500 anni rispettivamente) che avviene in corrispondenza del picco della piena.

4.1.6 Rappresentazione risultati

Insieme alla presente relazione, sono stati preparati quattro fascicoli rappresentanti i risultati delle modellazioni idrauliche e la loro sintesi ai fini della mappatura della pericolosità idraulica. In ciascuno dei fascicoli, il territorio di Brembate di Sopra oggetto dell'analisi è stato suddiviso su 6 tavole, a scala 1:2000, che coprono la medesima area per ciascun fascicolo. I fascicoli sono i seguenti:

- Y.02: Risultati delle simulazioni con modellazione 2D (stato di fatto)
- Y.03: Risultati delle simulazioni con modellazione 2D (stato di progetto)
- Y.04: Mappatura pericolosità idraulica PGRA (stato di fatto)
- Y.05: Mappatura pericolosità idraulica PGRA (stato di progetto)

Gli elaborati Y.02 e Y.03 rappresentano, come suggerisce il nome, i risultati grezzi delle simulazioni, per lo stato di fatto e lo stato di progetto, rispettivamente. Le aree mostrate con diverse sfumature di blu rappresentano la massima estensione planimetrica degli allagamenti (indicata in legenda come "involuppo della piena") per i tre scenari di riferimento relativi ai corsi d'acqua indagati, e non si riferisce ad un istante temporale specifico, dato che il massimo idrometrico nelle sezioni di monte (es. confine con Barzana) avviene ben prima che nelle sezioni di valle (confine con Ponte San Pietro).

I risultati grezzi di cui sopra, forniscono diverse aree isolate, con contorni irregolari derivanti da piccole imperfezioni del DTM o variazioni locali del coefficiente di scabrezza. Per rimuovere tali incertezze le aree allagabili restituite dalla

modellazione sono dunque stati rifinite, generalmente a favore di sicurezza, per ottenere le mappe della pericolosità idraulica (PGRA) per i tre scenari (Frequente, Poco Frequente e Raro) rappresentate negli elaborati Y.04 e Y.05.

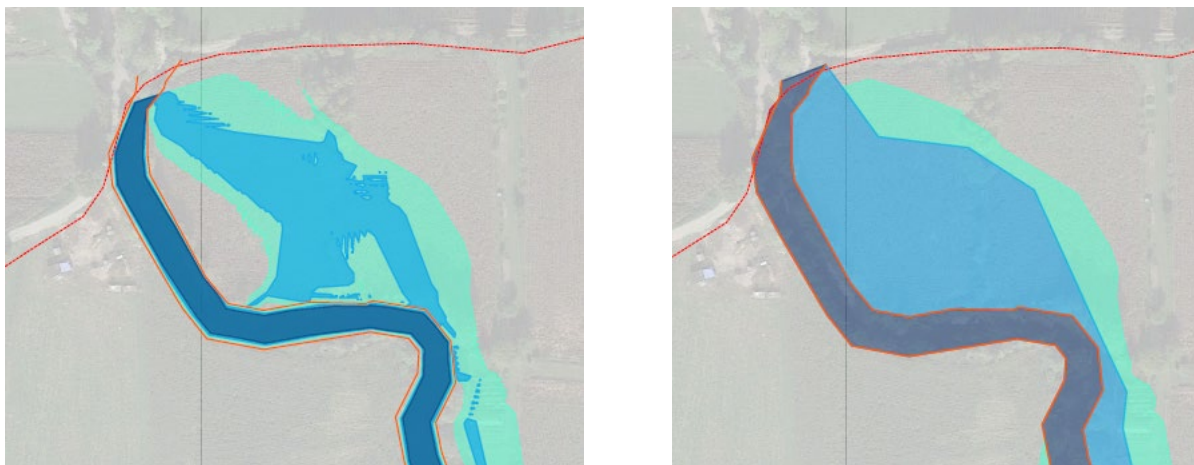


Figura 22: Risultati grezzi del modello (sinistra) e mappatura PGRA ottenuta rifinando i risultati (destra).

Bergamo, maggio 2023

Dott. Ing. Elena Arlati



Ha collaborato

Dott. Ing. Lorenzo Brignoli

