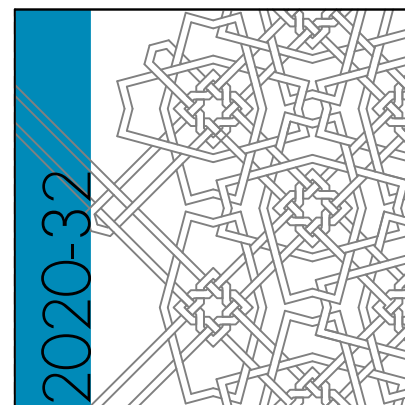




progettista:

Ing. Luca STUCCHI
via Ai Quadri, 18
20884 Sulbiate (MB)
Ord. Ing. Monza Brianza n. A. 1970

committente

PARCO REGIONALE DELLA
VALLE DEL LAMBRO
via Veneto 19 - Triuggio (MB)

firma _____

progetto

PROGETTO DEFINITIVO
Area di esondazione controllata
del Rio Brovada - LOTTO 1
Area di monte in Comune di
Besana in Brianza (MB)

oggetto

RELAZIONE
IDROLOGICO - IDRAULICA

scala

-

data

giugno 2023

A 02₀₂

Sommario

PREMESSA ALLA REV 02	1
PREMESSA	1
1. INQUADRAMENTO GENERALE DEL TORRENTE BROVADA	2
1.1. PLANIMETRIA GENERALE	2
1.2. DESCRIZIONE FOTOGRAFICA PER TRATTI	3
2. INQUADRAMENTO NORMATIVO	9
3. IDROLOGIA	10
3.1. INQUADRAMENTO IDROMORFOLOGICO	10
3.1.1. DATI A DISPOSIZIONE	11
3.1.2. DEFINIZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO	11
3.1.3. TEMPO DI CORRIVAZIONE	13
3.2. ANALISI PLUVIOMETRICA	13
3.2.1. LSPP	13
3.2.2. IETOGRAMMI DI PROGETTO	15
3.3. MODELLAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI: IL SOFTWARE HEC - HMS	16
3.3.1. BASIN MODEL	16
3.3.1.1. Perdite idrologiche	18
3.3.1.2. Idrogramma unitario istantaneo	22
3.3.1.3. Portata di base	25
3.3.1.4. Deflusso a pelo libero	25
3.3.2. METEOREOLOGIC MODEL E TIMES SERIES DATA	26
3.3.3. CONTROL SPECIFICATIONS	26
3.4. RISULTATI	27
4. IDRAULICA	28
4.1. DOMINIO DI INDAGINE	28
4.1.1. DEFINIZIONE DEL DOMINIO DI INDAGINE	28
4.1.1. DESCRIZIONE DEL DOMINIO DI INDAGINE	29
4.2. OROGRAFIA DELL'AREA DI INDAGINE	30
4.3. MODELLAZIONE NUMERICA IDRAULICA	33
4.3.1. CONFIGURAZIONE DI STATO DI FATTO	34
4.3.1.1. Geometria e proprietà idrauliche del modello	34
4.3.1.2. Condizioni al contorno e condizioni iniziali	44
4.3.1.3. Durata della simulazione e passo temporale	45
4.4. CONFIGURAZIONE DI PROGETTO	46
4.4.1.1. Opera di regolazione in progetto	46
4.4.1.2. Geometria e proprietà idrauliche del modello	49
4.5. RISULTATI OTTENUTI	51
4.5.1.1. Definizione dell'evento critico	51
4.5.1.2. Area a monte di Via della Valle (tratto A)	53

4.5.1.3. Area del cimitero di Calò (tratto B) _____	55
4.5.1.4. Area interlocutoria (tratto C) _____	60
4.5.1.5. Area di Ponte Albiate (tratto D) _____	63
4.5.2. ANALISI DELLO STATO DI PROGETTO AL VARIARE DELLA CONFIGURAZIONE DELLA BOCCA TARATA DI FONDO DELLO SBARRAMENTO (REV 02) _____	77
4.6. ANALISI IDRAULICA DELL'IPOTETICO COLLASSO DELL'OPERA (DAM-BREAK) _____	78
4.6.1. DOMINIO DI INDAGINE _____	79
4.6.2. DEFINIZIONE DELLA BRECCIA _____	79
4.6.3. RISULTATI OTTENUTI _____	82
5. CONCLUSIONI _____	94
<u>ALLEGATO A – IDROGRAMMI DI PIENA RISULTANTI DALLA MODELLAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI DELL'EVENTO CRITICO PER VARI TEMPI DI RITORNO _____</u>	<u>96</u>
<u>ALLEGATO B - DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO DI MOTO VARIO DI HEC-RAS _____</u>	<u>100</u>
CASO MONODIMENSIONALE _____	100
CASO BIDIMENSIONALE _____	102
SINTESI DEI PASSI DELLA PROCEDURA DI CALCOLO _____	104

Premessa alla REV 02

Come già estensivamente illustrato nella corrispondente premessa introduttiva alla relazione generale, le modifiche apportate al presente elaborato con la presente revisione, realizzate in risposta alle richieste di integrazioni pervenute nel corso della procedura di PAUR a cui è stato sottoposto il progetto, sono state riportate in corsivo generalmente all'inizio o in calce ai singoli capitoli e sotto capitoli, sempre con sufficiente chiarezza da poterle distinguere dai contenuti originali. Riguardando unicamente la condizione di progetto, le modifiche riguardano solo parti dei sotto capitoli 4.4, 4.5, 4.6 e 5.

Premessa

Il presente progetto, denominato *Area di esondazione controllata del Rio Brovada – Lotto 1: area di monte in Comune di Besana in Brianza (MB)* e consistente nella realizzazione di un'area di esondazione controllata in linea lungo il Torrente Brovada, nei pressi del cimitero della frazione Calò in Comune di Besana in Brianza, nasce da un'esigenza di protezione idraulica del territorio, legata nello specifico alle frequenti esondazioni del tratto terminale del torrente, a monte della sua immissione all'interno del fiume Lambro, con relativi allagamenti della frazione urbanizzata di Ponte Albiate, in Comune di Triuggio.

Il progetto di fattibilità tecnica ed economica di questo intervento (PFTE, marzo 2017) prevede la realizzazione di due aree di laminazione in linea lungo l'asta del torrente, al fine di garantire la sufficienza idraulica del tratto di valle nei confronti dell'evento di riferimento (tempo di ritorno, T, 100 anni). Per la progettazione definitiva, l'intervento è stato suddiviso in due lotti:

- il lotto 1, relativo all'area di laminazione di monte, consistente nel presente progetto;
- il lotto 2, relativo all'area di laminazione di valle, ad oggi in attesa di finanziamento.

Con la realizzazione del primo lotto di progettazione, come verrà mostrato nei risultati ottenuti, si apporterà un significativo miglioramento rispetto alle condizioni di stato di fatto, anche se per la completa messa in sicurezza dell'abitato di Ponte Albiate rispetto all'evento di progetto (T100) sarà necessaria la realizzazione di entrambi i lotti.

Questa relazione ha lo scopo di illustrare in dettaglio gli aspetti di natura idrologica e idraulica legati al dimensionamento dell'area di esondazione controllata, ed è pertanto suddivisa nei seguenti capitoli:

- inquadramento generale del Torrente Brovada: descrizione dell'assetto geomorfologico del corso d'acqua;
- inquadramento normativo: approfondimento sul quadro legislativo che attualmente regola la costruzione e l'esercizio delle opere di regolazione fluviale, con particolare riferimento alla LR 8/98 *Norme in materia di costruzione, esercizio e vigilanza degli sbarramenti di ritenuta e dei bacini di accumulo di competenza regionale*, e delle relative direttive applicative contenute all'interno della Deliberazione di Giunta Regionale 7/3699;
- studio idrologico: definizione del bacino idrografico del Torrente Brovada e relativa suddivisione dello stesso in sottobacini oggetto di modellazione afflussi-deflussi di dettaglio al fine di ottenere gli idrogrammi di piena in ingresso al modello idraulico per l'evento di riferimento,
- studio idraulico: modellazione numerica combinata 1D/2D del tratto terminale dell'asta del torrente (circa 2.8 km), in condizioni di stato di fatto e di progetto;
 - analisi di dam-break: estensione della modellazione idraulica alla verifica degli effetti di valle in caso di collasso dell'opera di regolazione.

1.2. Descrizione fotografica per tratti

Il corso d'acqua si configura, sul piano idrologico, come un macro-impluvio, in quanto solitamente privo di una portata di magra, se non per il tratto maggiormente a monte: questo aspetto peculiare di alcuni tratti tombinati del torrente nei pressi del centro sportivo di Besana in Brianza, accennato nel Progetto di Fattibilità tecnica ed Economica (PFTE) e ulteriormente indagato da una specifica videoispezione ad esso successiva, si ipotizza essere dovuto all'elevata permeabilità del fondo alveo, quanto meno per lo strato più superficiale, composto principalmente da sabbie/ghiaie miste a clasti e ciottoli di dimensione significativa (diversi cm).

Procedendo da monte verso valle, il tratto iniziale del torrente è caratterizzato da un'alternanza di tratti artificiali (canalette in calcestruzzo e tombinamenti) e tratti naturali (*Figura 2*), fino a valle del centro sportivo di Besana in Brianza dove, dopo aver ricevuto le acque di un ramo secondario in destra idraulica, proveniente dalla frazione Mighinzano, il corso d'acqua attraversa un'ampia area agricola, trovandosi infossato tra ampie fasce perfluviali caratterizzate da vegetazione spondale scarsa o del tutto assente.



Figura 2: canalizzazione del Rio Brovada nei pressi del centro sportivo di Besana in Brianza (sx) e tratto interamente naturale che attraversa i campi a valle

Il torrente supera dunque gli attraversamenti di Via Borromeo (mediante una tubazione in calcestruzzo avente diametro pari a 200 cm, *Figura 3*, sx) e, successivamente, di Via della Valle (a sezione rettangolare, sempre in calcestruzzo, *Figura 3*, dx), recuperando la piena naturalità nei pressi del cimitero della frazione Calò dove, subito a valle di un impluvio affluente in destra idraulica, si trova una briglia di consolidamento in calcestruzzo che genera un salto a valle di circa 2 metri (*Figura 4*), la cui platea di dissipazione tra briglia e controbriglia risulta soggetta a significativa erosione. La briglia assume importanza limitata allo stato di fatto in quanto situata in un'area priva di particolari elementi esposti, ma diventerà, allo stato di progetto, la sede dell'opera di regolazione.



Figura 3: vista da valle dell'attraversamento di Via Borromeo (sx) e vista da monte dell'attraversamento di Via della Valle (dx)



Figura 4: briglia di consolidamento esistente all'altezza del cimitero della frazione Calò, Comune di Besana in Brianza

Nel tratto compreso tra Via della Valle e la briglia (330 metri circa), l'alveo inciso è caratterizzato da un progressivo affondamento e allargamento (*Figura 5*, in alto), mentre due fasce boscate lungo i cigli di sponda lo separano dalle relative ampie aree perfluviali, in parte a uso agricolo e in parte tenute a prato (*Figura 5*, in basso). Tale zona, come dettagliato nel seguito, costituirà il bacino di invaso dell'opera di regolazione.



Figura 5: alveo del Torrente Brovada a monte della briglia di consolidamento (alto); area perfluviale dx del corso d'acqua vista da Via della Valle (basso)

A valle della briglia e fino ai pressi dell'attraversamento ferroviario, il corso d'acqua attraversa un contesto fortemente naturalizzato, mantenendo caratteristiche geometriche e idrauliche relativamente costanti: significativo approfondimento dell'alveo inciso (4-5 metri), frequenti affioramenti di ceppo brianzolo in destra idraulica, fasce boscate lungo entrambe le sponde, letto composto in prevalenza da clasti e ciottolame di natura alluvionale (*Figura 6*, alto). Lungo tale tratto diversi impluvi confluiscono nel torrente, principalmente in sinistra idraulica, e, sempre in sinistra idraulica, si incontra una curva destrorsa nei pressi della località Cascina Siberia (Comune di Triuggio), caratterizzata da discreta erosione (*Figura 6*, basso).



Figura 6: sezione tipica del Torrente Brovada nel tratto a valle della briglia di consolidamento (alto); vista da valle della curva destrorsa del torrente in località Cascina Siberia, Comune di Triuggio (basso)

A valle dell'attraversamento ferroviario (linea Lecco-Molteno-Monza-Milano) l'alveo si allarga significativamente, superando a tratti i 20 metri di larghezza (*Figura 7, alto*), principalmente a causa di una divagazione che il torrente ha progressivamente scavato attorno a un'altra briglia esistente. Al termine di questa divagazione il corso d'acqua si incanala poi rapidamente in un tratto ancora naturale ma stretto e inciso, indicato nel progetto di fattibilità tecnica ed economica come il punto di realizzazione della seconda opera di regolazione in progetto (*Figura 7, basso*), rendendo di conseguenza l'area di monte il potenziale secondo invaso.



Figura 7: alveo del Rio Brovada a valle del ponte della ferrovia, visibile sullo sfondo (alto); vista da valle del punto indicato nel PFTE come sede della futura opera di regolazione di valle lungo il torrente (basso)

Proseguendo verso valle, segue un tratto di circa 300 metri caratterizzato da diversi salti naturali che, dopo un'ultima briglia in gabbioni e muratura di circa 3 metri di altezza (*Figura 8, alto*), conduce al tratto terminale, antecedente alla confluenza del Torrente Brovada nel Fiume Lambro, situato all'interno della frazione di Ponte Albiate e caratterizzato da un'artificializzazione e restringimento dell'alveo, con un'ultima parte (150 metri circa, *Figura 8, basso*) a sezione rettangolare in calcestruzzo e in parte in muratura, avente larghezza media pari a circa 4 metri (restringendosi progressivamente verso valle, fino all'attraversamento di Piazzale Boretti).



Figura 8: briglia di consolidamento in gabbioni (alto) a monte del tratto terminale dell'alveo, artificializzato in cls e muratura (basso) all'interno della frazione di ponte Albiate

2. Inquadramento normativo

La Legge 183/1989, *Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo*, successivamente modificata dalla Legge 584/1994, attribuisce alle regioni la competenza in termini di disciplina delle attività di costruzione, esercizio e vigilanza delle opere di sbarramento (argini, dighe, traverse), che non superino i 15 metri d'altezza o che determinino un volume di invaso non superiore a un milione di metri cubi.

Per la Regione Lombardia, la normativa di riferimento è costituita dalla LR 8/98, *Norme in materia di costruzione, esercizio e vigilanza degli sbarramenti di ritenuta e dei bacini di accumulo di competenza regionale*, e delle relative direttive applicative contenute all'interno della Deliberazione di Giunta Regionale 7/3699 del 5 marzo 2001.

Il presente progetto ricade all'interno della categoria A delle opere così come classificate all'art. 2 della LR 8/98 ("sbarramenti con altezza superiore a 5 metri e fino a 15 metri e/o che determinano un volume di invaso superiore a 5'000 metri cubi e fino a 1'000'000 di metri cubi, risultando pertanto da assoggettarsi alle norme della suddetta legge, come ulteriormente confermato mediante comunicazione alla Stazione Appaltante (Parco Regionale della Valle del Lambro) da parte dell'UTR Montagna di Regione Lombardia con apposita comunicazione a valle della consegna del progetto di fattibilità tecnica ed economica. L'UTR Montagna verrà chiamata a esprimere parere come parte dell'istanza di Procedimento Autorizzativo Unico Regionale (P.A.U.R.) a cui verrà sottoposto il presente progetto, presentato in fase definitiva e già inclusivo dei contenuti elencati all'articolo 4 della LR, in modo da poter eventualmente utilizzare la fase di progettazione esecutiva delle opere per il recepimento delle eventuali osservazioni o richieste di modifiche/approfondimenti da parte del succitato ufficio.

Nell'ambito dell'elenco degli elaborati riportato all'articolo 4 della LR 8/98, illustrati con maggiore dettaglio al punto 7.1 delle direttive ad essa riferite, la presente relazione contiene al suo interno lo studio idrologico (punto "i") e la relazione idraulica (punto "m"), che vengono presentati nei capitoli successivi.

Entrando nel merito dei contenuti della presente relazione, dal momento che l'opera di sbarramento prevista in progetto fatica, per tipologia, collocazione geografica e caratteristiche del corso d'acqua, ad essere inquadrata all'interno di una classificazione rigida riguardante le opere di regolazione, si è ritenuto opportuno procedere alla progettazione applicando l'approccio "caso per caso" citato in premessa alla Deliberazione 7/3699, fermo restando la necessità di fornire all'autorità competente tutti gli elementi necessari per una esaustiva valutazione del progetto e del suo impatto sulle dinamiche idrauliche dell'asta fluviale interessata.

3. Idrologia

Lo studio idrologico del bacino imbrifero del Torrente Brovada ha lo scopo primario di caratterizzarne con adeguata precisione la risposta alla precipitazione di progetto, in termini di idrogrammi di piena attesi alle varie sezioni del corso d'acqua.

La scelta del tipo di modellazione da effettuare è dipesa, come solitamente accade, dalla tipologia di dati a disposizione per il bacino idrico considerato: l'assenza di idrometri lungo l'asta del torrente precludeva a priori, infatti, l'utilizzo di metodi diretti di elaborazione statistica degli eventi estremi registrati (es. Annual Flood Series [AFS] or Partial Duration Series [PDS]), o anche solo la taratura diretta di un modello afflussi-deflussi.

In concordanza con quanto già proposto durante il PFTE, si è pertanto deciso di realizzare un modello idrologico "semi-distribuito" del bacino del Rio Brovada, suddividendolo in una serie di sottobacini a loro volta trattati in maniera concettuale, attraverso un modello afflussi-deflussi i cui parametri sono stati stimati mediante relazioni empiriche tarate su bacini di caratteristiche idromorfologiche comparabili a quelle in esame. Tale modello è stato dunque implementato attraverso il software Hec-HMS, sviluppato dall'USACE (US Army Corps of Engineers), al fine di fornire gli idrogrammi di piena da inserire in input in varie sezioni dell'asta fluviale durante la successiva modellazione idraulica del corso d'acqua. L'analisi idrologica è consistita dunque in un aggiornamento e parziale revisione del lavoro effettuato in occasione del PFTE, a cui poi è stata aggiunta la modellazione idraulica illustrata nel capitolo successivo.

Avendo a disposizione alcune fotografie della condizione del tratto di terminale del corso d'acqua durante un evento di precipitazione del giugno 2014 – evento già oggetto di studio in passato da parte del Dipartimento di Riqualficazione Fluviale della Stazione Appaltante – in fase di modellazione idraulica si è comunque effettuato un processo di validazione di massima della consistenza del modello costruito, andando a verificare che le precipitazioni sintetiche di progetto aventi tempo di ritorno comparabili con l'evento succitato generassero condizioni di allagamento simili nella frazione di Ponte Albiate, area maggiormente critica dell'intera asta.

Il processo di modellazione idrologica è stato quindi suddiviso nei seguenti passaggi, debitamente illustrati nei successivi paragrafi:

- inquadramento idromorfologico;
- analisi pluviometrica;
- modellazione afflussi-deflussi;
- risultati ottenuti: idrogrammi di piena in ingresso al modello idraulico;

3.1. Inquadramento idromorfologico

Dal momento che, come verrà illustrato successivamente, l'analisi idrologica si è basata sulla costruzione di un modello afflussi-deflussi di tipo deterministico a parametri concentrati, la prima fase del lavoro è consistita nella delimitazione del bacino dell'intero Torrente Brovada, avente come sezione di chiusura la confluenza nel Fiume Lambro, e alla successiva definizione delle sue caratteristiche geometriche, idrologiche e morfologiche necessarie alla quantificazione di tali parametri. Successivamente, si è proceduto alla suddivisione dell'intero bacino in sottobacini corrispondenti ai singoli impluvi afferenti al corso d'acqua, che sono stati modellati separatamente (come illustrato in dettaglio in seguito) al fine di ottimizzare l'accuratezza nella modellazione della risposta delle varie zone del bacino alle sollecitazioni metereologiche di progetto.

3.1.1. Dati a disposizione

I dati di partenza per lo sviluppo del modello idrologico sono stati i seguenti:

- modello digitale del terreno (DTM), a risoluzione 5 m e precisione metrica, proveniente dal database cartografico di Regione Lombardia;
- shapefiles del reticolo idrico minore (RIM), del reticolo idrico principale (RIP) e della carta di uso del suolo (DUSAF 6.0), sempre ottenuti dal database cartografico di Regione Lombardia;
- schemi planimetrici delle reti fognarie miste e meteoriche relative ai Comuni di Besana in Brianza e Triuggio, fornite dal gestore del servizio idrico integrate (BrianzAcque srl);
- elaborati del PFTE, in particolare la Relazione idrologica-idraulica (R02) e la Relazione Geologica (R03).

3.1.2. Definizione del bacino idrografico

La delimitazione del bacino del Rio Brovada è stata effettuata in ambiente GIS, a partire dal DTM e passando attraverso una serie di funzioni che sommariamente prevedono:

- la correzione del DTM in un DTM "idrologico", in cui vengono riempite le buche al fine di garantire un deflusso superficiale univoco verso la sezione di chiusura, privo della presenza di punti localizzati di drenaggio;
- la costruzione delle mappe di direzione e di accumulo del deflusso superficiale, che indicano rispettivamente, per ciascuna cella, la successiva cella in cui verrà indirizzato il flusso idrico e la quantità di celle drenate a monte;
- l'identificazione del reticolo idrico superficiale, basato su una quantità minima di celle drenate (utile strumento di taratura sulla base della cartografia già in possesso);
- la determinazione del bacino drenante alla sezione di chiusura sulla base delle precedenti mappe (e di altre di minore importanza concettuale);
- la valutazione del bacino effettivamente drenante, sulla base della rete fognaria e infrastrutturale presente. A tale proposito si rende nota l'aggiunta di due piccoli bacini urbani (nei comuni di Tregasio e Villa Raverio) i quali, sebbene compresi in altri bacini imbriferi, presentano sfioratori della rete fognaria di drenaggio sfocianti nel corpo idrico in esame. Per una migliore comprensione si rimanda alla *Figura 9*: in giallo il bacino ottenuto dall'elaborazione del DTM, in rosso il bacino comprensivo delle porzioni urbanizzate sopramenzionate.

Il sistema di riferimento adottato per lo svolgimento delle analisi, il calcolo delle grandezze e la restituzione dei risultati è il sistema proiettato in coordinate metriche (E-N) UTM WGS84, zona 32 N. Qualsiasi dato in input originariamente rappresentato secondo un sistema differente (o in coordinate geografiche) è stato riportato al sistema di cui sopra mediante un'adeguata trasformazione di coordinate o un processo di georeferenziazione.

In *Tabella 1* sono riassunte le caratteristiche generali del bacino.

Sigla	Parametro	Valore	U.d.M.
A_{bac}	superficie del bacino	6.9	km ²
L_{AP}	lunghezza dell'asta principale	6.2	km
$Z_{min AP}$	quota dell'asta principale alla sezione di chiusura	196	m s.l.m.
$Z_{max AP}$	quota massima dell'asta principale	345	m s.l.m.
$S_{avg AP}$	pendenza media dell'asta principale	0.024	m/m

Tabella 1: caratteristiche geomorfologiche del bacino e dell'asta

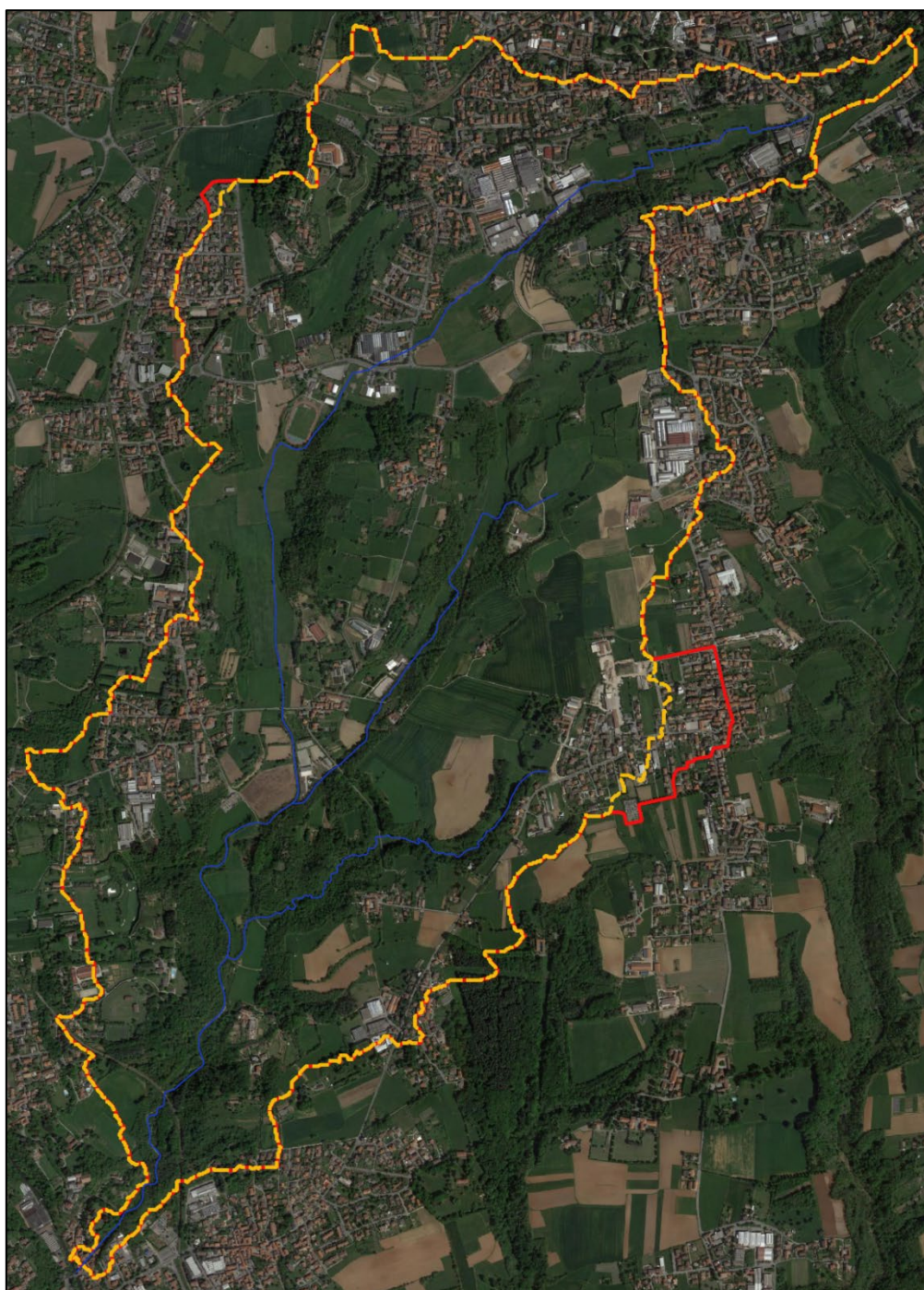


Figura 9: definizione del bacino imbrifero del Rio Brovada: in giallo il bacino ottenuto da elaborazione DTM, in rosso il bacino corretto con porzioni di territorio urbanizzate con sfioratori di rete fognaria afferenti al corpo idrico

3.1.3. Tempo di corrivazione

Il calcolo del tempo di corrivazione, definito come il tempo necessario alla goccia di pioggia caduta nel punto idrologicamente più lontano del bacino a raggiungere la sezione di chiusura, rappresenta un parametro importante nella definizione del bacino. Inoltre, nell'ambito della presente analisi serve preliminarmente a fornire un'indicazione di massima dell'ordine di grandezza di una durata critica dello ietogramma di progetto.

Per la stima del tempo di corrivazione sono presenti in letteratura una grande varietà di formule, basate sulle caratteristiche idromorfologiche dei bacini, messe a punto nell'arco degli ultimi cento anni circa a seguito di lunghi processi di taratura in aree aventi diverse caratteristiche morfologiche, climatiche, idrauliche. È pertanto importante selezionare, tra le numerose formule disponibili, quelle tarate su bacini il più possibile simili al bacino in esame. Nel caso specifico, sono state utilizzate le seguenti formule, validi per bacini di piccole/medie dimensioni:

$$t_{PEZZOLI} = 0.055 \frac{L_{AP}}{\sqrt{S_{AVG AP}}} = 2.2 \text{ ore}$$

$$t_{VENTURA} = 0.1272 \left(\frac{A_{BAC}}{S_{AVG AP}} \right)^{0.5} = 2.2 \text{ ore}$$

$$t_{PASINI} = 0.108 \frac{(A_{BAC} L_{AP})^{1/3}}{0.8 \sqrt{S_{AVG AP}}} = 2.44 \text{ ore}$$

dove i vari parametri fanno riferimento alle grandezze elencate in *Tabella 1*.

I valori così ottenuti sono abbastanza consistenti tra loro e forniscono un valore medio intorno a 2.3 ore, arrotondato a 2 ore e 20 minuti nella definizione del tempo di corrivazione di riferimento.

3.2. Analisi pluviometrica

3.2.1. LSPP

Le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP), note anche come curve di possibilità pluviometrica o climatica, sono uno strumento applicativo finalizzato alla previsione e alla determinazione di eventi di precipitazione intensa utili all'identificazione delle maggiori sollecitazioni sul sistema idraulico considerato, in funzione del luogo e del tempo di ritorno.

Per il territorio in esame, sito in regione Lombardia, è possibile utilizzare i dati forniti da ARPA Lombardia. ARPA Lombardia, nell'ambito del progetto STRADA, sulla base delle osservazioni delle piogge massime annue di fissata durata di 1, 2, 3, 6, 12 e 24 ore per 105 stazioni meccaniche del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, ha svolto un'attività di caratterizzazione statistica del territorio regionale mediante un modello scala-invariante secondo la distribuzione probabilistica GEV (Generalized Extreme Value), che ha prodotto la parametrizzazione delle LSPP su 69 punti strumentati e da questi su tutto il territorio regionale tramite tecniche di estrapolazione geostatistica; questo servizio, in continuo aggiornamento, è attualmente operativo e accessibile su piattaforma web-gis sul sito web istituzionale di ARPA (<http://idro.arpalombardia.it>).

La quantità di precipitazione (espressa in termini di altezza) che va a sollecitare il sistema, molto variabile nel tempo e nello spazio, non può che essere considerata come una variabile casuale che, quindi, deve essere stimata in relazione ad un livello di probabilità "P" che essa ha di non essere superata, o meglio in relazione ad un periodo di tempo (tempo di ritorno, T) che intercorre mediamente tra due eventi nei quali il valore di tale altezza di pioggia, di assegnata durata, è superato:

$$T = \frac{1}{1 - P}$$

Le LSPP, ognuna delle quali è ottenuta in corrispondenza di un preordinato tempo di ritorno, descrivono la variabile casuale "massima altezza annuale di precipitazione di assegnata durata" e vengono in genere approssimate con espressioni del tipo:

$$h = a_1 \cdot w_T \cdot D^n$$

$$w_T = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]^k \right\}$$

dove h rappresenta l'altezza di una pioggia, D è la durata, a_1 è il coefficiente pluviometrico orario, w_T è il fattore di crescita in frequenza, distribuito secondo la funzione GEV e funzione del tempo di ritorno dell'evento, n è l'esponente della curva (parametro di scala), α , ε e k sono i parametri delle leggi probabilistiche GEV adottate.

La delimitazione del bacino di interesse permette di individuare i parametri sopracitati, indicati nella tabella seguente (Tabella 2).

Il valore del fattore di crescita in frequenza è riportato per vari tempi di ritorno: l'evento centennale è quelli considerato come evento di riferimento per l'opera. La validità dei parametri forniti è limitata per eventi di durata compresa tra 1 e 24 ore, comprendente quindi la durata critica individuata da una preliminare stima del tempo di corrivazione; ad ogni modo sono stati studiati eventi con diverse durate e per vari tempi di ritorno, dai 10 ai 100 anni, allo scopo di:

- individuare l'evento critico per il bacino sia configurazione di stato di fatto che in configurazione di progetto rispetto all'evento di riferimento (T = 100 anni);
- analizzare la risposta idraulica del bacino, in entrambe le configurazioni, per eventi più frequenti ma meno intensi dell'evento di riferimento (T = 10, 20, 50 anni).

Sigla	Parametro	Valore	U.d.M.
a_1	coefficiente pluviometrico orario	31.71	mm
n	parametro di scala	0.310	/
α	parametri distribuzione GEV	0.295	/
ε		0.827	/
k		-0.010	/
w_{T10}	fattore di crescita in frequenza per T = 10 anni	1.50	/
w_{T50}	fattore di crescita in frequenza per T = 20 anni	1.72	/
w_{T50}	fattore di crescita in frequenza per T = 50 anni	2.00	/
w_{T100}	fattore di crescita in frequenza per T = 100 anni	2.22	/

Tabella 2: Parametri delle curve LSPP

Nell'immagine seguente (*Figura 10*) si riportano le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica rappresentanti i valori delle precipitazioni previste al variare delle durate (da 1 a 24 ore) per i diversi tempi di ritorno.

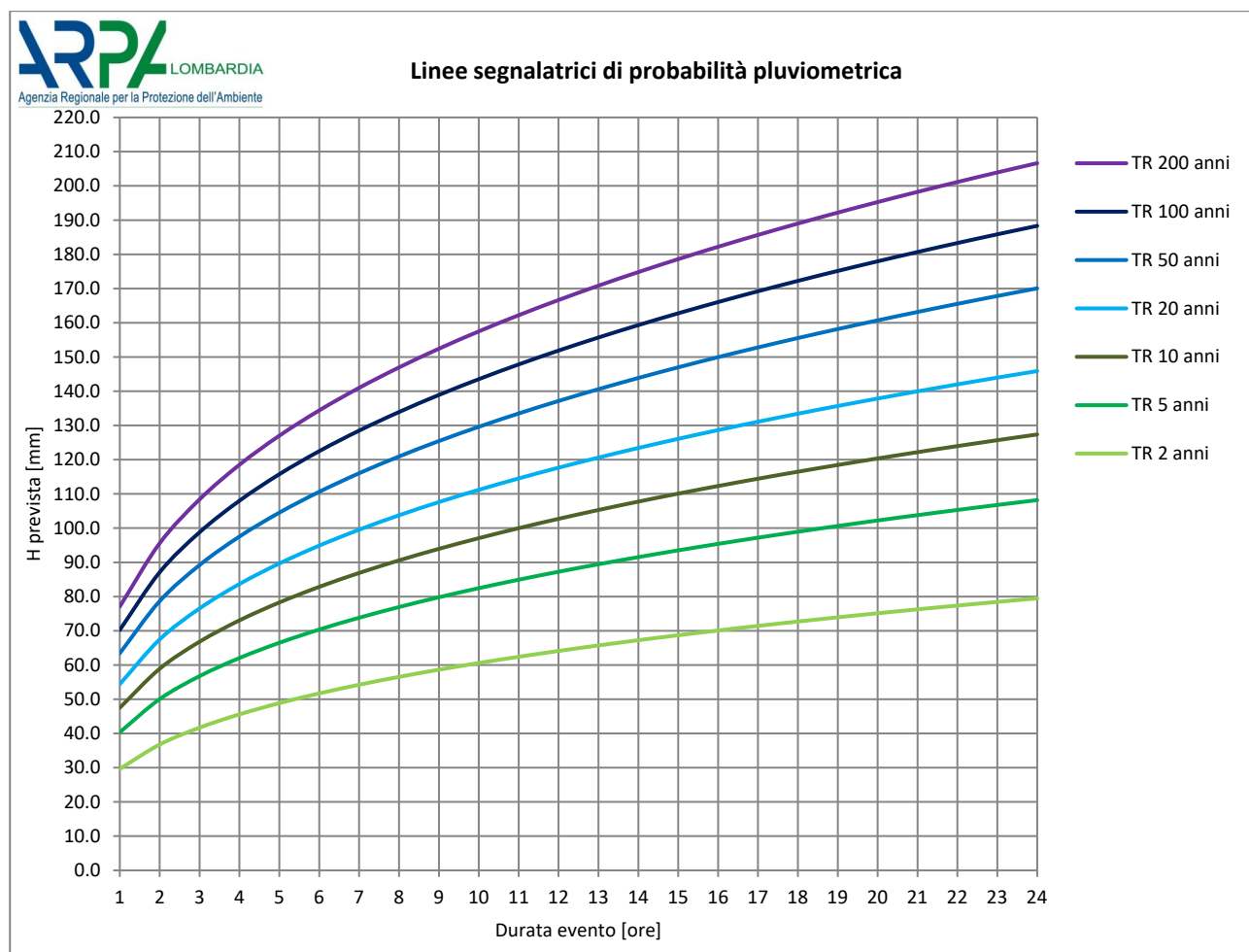


Figura 10: Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica per il bacino del Rio Brovada

3.2.2. Ietogrammi di progetto

Una volta definite le LSPP, è il momento di definire la precipitazione di progetto che descriva, per assegnato tempo di ritorno, la variabilità di quantità di pioggia nel tempo. A questo proposito, considerata la tipologia di opera e la necessità di considerare eventi che massimizzino i volumi degli idrogrammi in transito lungo il bacino, si è deciso di prendere in considerazione ietogrammi di tipo costante e triangolare (dove il picco di intensità è pari al doppio del tasso di pioggia dello ietogramma costante, $i_{max}=i(t_r)=2*a*\Theta^{n-1}$, a parità di volume e durata, e si verifica all'istante $t_p = k*\Theta$, con Θ pari alla durata dell'evento e k assunto pari a 0.4).

A partire da un valore di durata minima pari al tempo di corrvazione (2.3 ore) sono stati calcolati diversi ietogrammi corrispondenti a diverse durate e per diversi tempi di ritorno, poi inseriti in input al modello afflussi-deflussi illustrato all'interno del paragrafo successivo. A scopo rappresentativo, lo ietogramma corrispondente al tempo di ritorno di progetto (50 anni) e durata dell'evento pari a 2.3 ore è riportato in *Figura 11*.

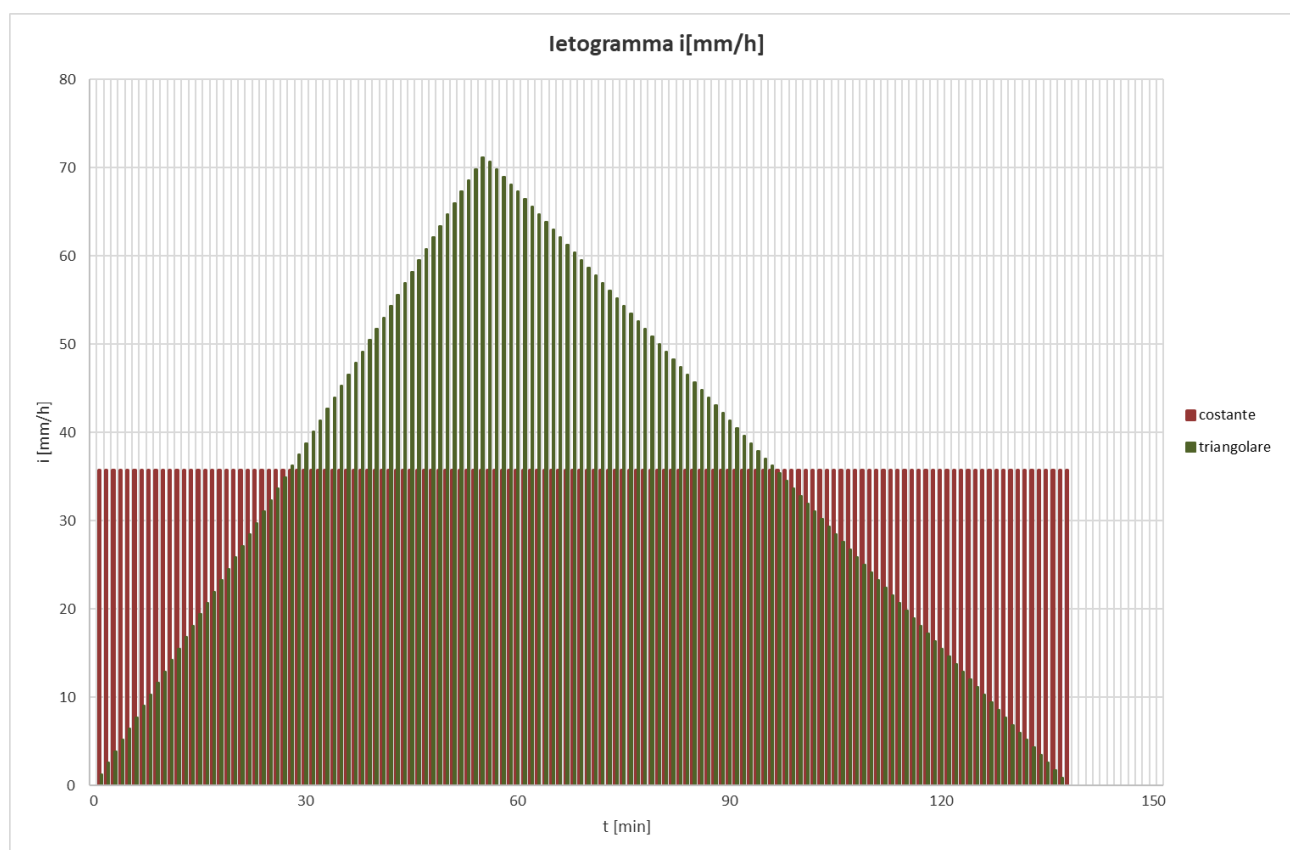


Figura 11: esempio di ietogrammi sintetici considerati (Durata 2,3 ore, TR=50 anni)

3.3. Modellazione afflussi-deflussi: il software Hec - HMS

Nota la precipitazione in ingresso ai vari sottobacini dal sottocapitolo precedente, attraverso la definizione di un modello afflussi-deflussi deterministico e a parametri concentrati, si ottiene il corrispondente idrogramma in uscita alla sezione di chiusura finale (la confluenza con il fiume Lambro), nonché a quelle intermedie (le varie immissioni lungo l'asta fluviale, di maggiore importanza ai fini della successiva modellazione idraulica della stessa).

Tale modello è stato realizzato utilizzando il software Hec -HMS, sviluppato dall'USACE (US Army Corps of Engineers), un programma che permette la risoluzione numerica di modelli afflussi-deflussi concentrati una volta note la meteorologia, la geometria e le caratteristiche idrologiche del problema.

La costruzione di un modello afflussi-deflussi mediante Hec-HMS prevede una serie di passaggi standardizzati di seguito elencati e volti alla definizione dei vari processi coinvolti nella trasformazione afflussi-deflussi e che, una volta completati, consentono di effettuare la simulazione dell'evento di piena di riferimento, ottenendo in output il relativo idrogramma.

3.3.1. Basin Model

All'interno di questa sezione si definiscono tutti gli aspetti relativi alle caratteristiche fisiche (geometriche, morfologiche, idrologiche) del sistema idrologico da analizzare.

In particolare, permette di specificare:

- Elementi idrologici: sottobacini, invasi, confluenze, ecc.
- Metodi di calcolo delle perdite di bacino;

- Metodi di calcolo della trasformazione afflussi-deflussi;
- Metodo di calcolo del deflusso a pelo libero nei corsi d'acqua.

Per il caso in esame, il bacino del Torrente Brovada è stato sintetizzato con 9 elementi di tipo "sottobacino" (Figura 13), le cui caratteristiche geometriche (area, lunghezza dell'asta drenante, quote minime e massime dell'asta, pendenza media dell'asta) sono elencate nella tabella seguente (Tabella 3).

Sottobacino	Area [km ²]	L _A [km]	Z _{max} A [m s.l.m.]	Z _{min} A [m s.l.m.]	S _{AVG} [%]
1	2.211	2.589	344.7	263.2	3.15
2_m	0.456	0.834	263.2	251.5	1.40
2_v	0.304	0.496	251.5	242.4	1.83
3	1.127	1.694	295.5	242.4	3.13
4_princ	0.193	0.915	271.95	235.6	3.97
4_affl	0.406	0.479	242.4	235.6	1.42
5	0.058	0.334	235.6	230.5	1.53
6	1.300	1.775	275.4	229.7	2.57
7	0.855	1.474	230	195.4	2.35

Tabella 3: caratteristiche geometriche dei sottobacini

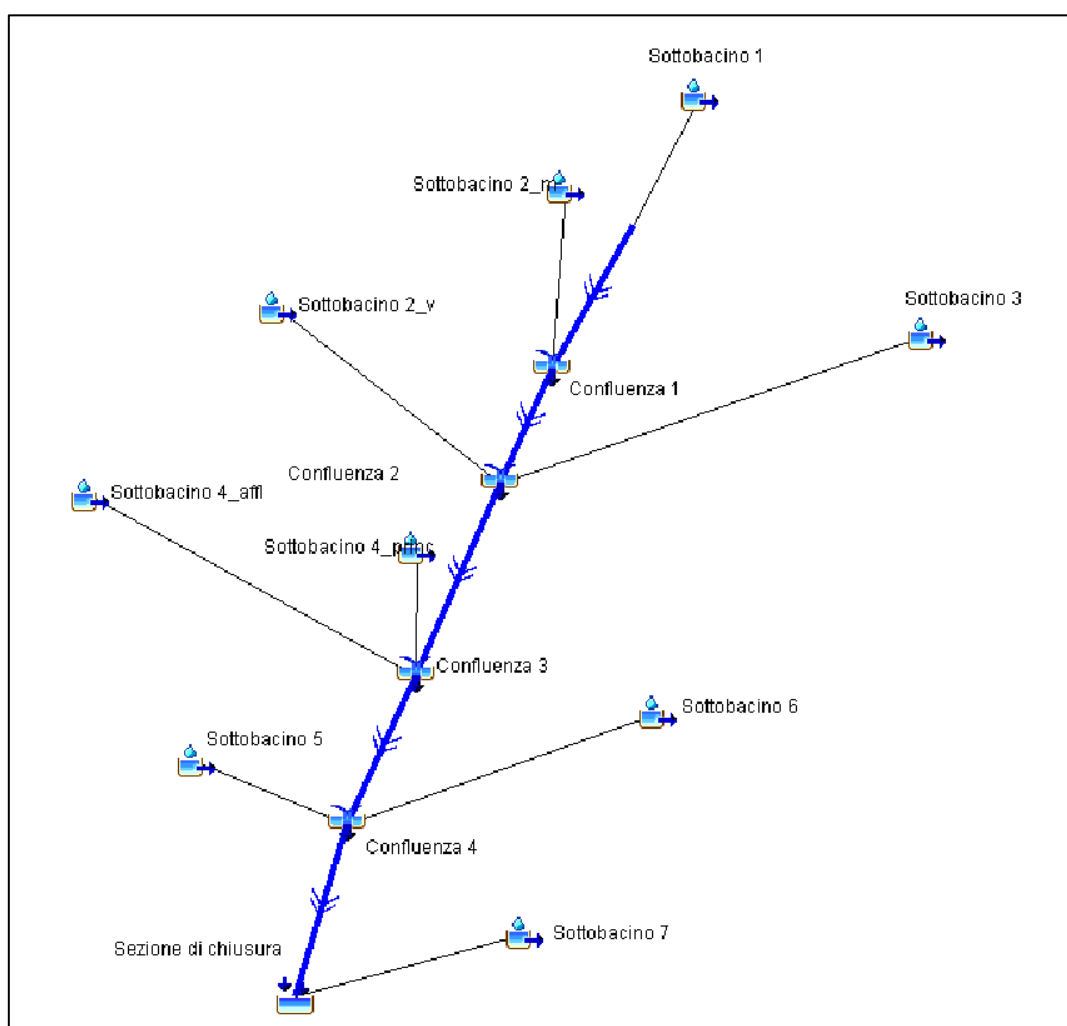


Figura 12: modellizzazione del bacino del Rio Brovada in HEC-HMS

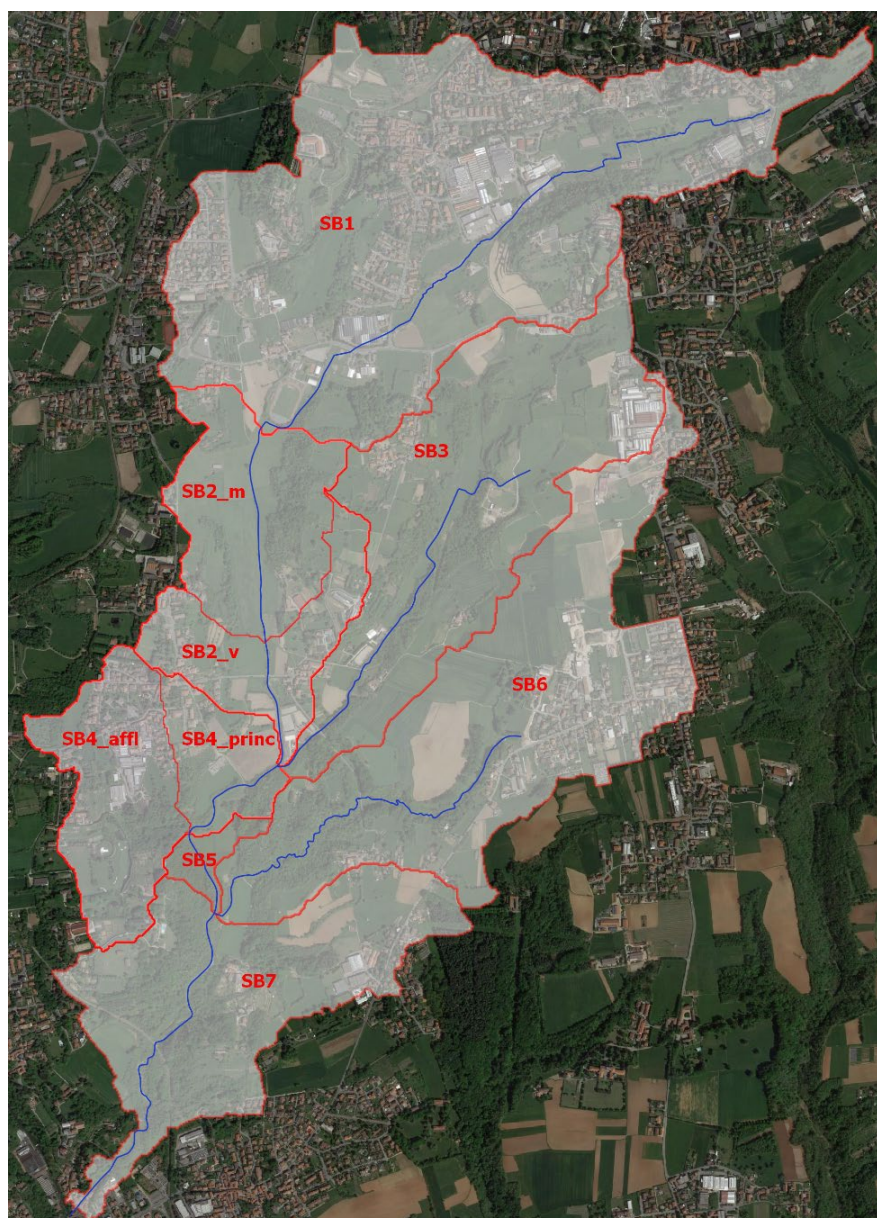


Figura 13: suddivisione in sottobacini del bacino imbrifero del Rio Brovada

Per ciascun elemento di questo tipo devono essere definiti: il modello di perdite idrologiche, la forma dell'idrogramma unitario istantaneo (IUH) e la portata di base del corso d'acqua.

3.3.1.1. Perdite idrologiche

Il modello di perdite idrologiche definisce la quota parte della precipitazione in ingresso che si trasforma in deflusso superficiale, andando a contribuire direttamente all'idrogramma di piena. Per il problema in esame è stato impiegato uno dei metodi più popolari nella letteratura idrologica, per la sua semplicità applicativa unita ad un maggiore livello di dettaglio rispetto alla semplice applicazione di un coefficiente di afflusso, ossia 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 prevalentemente 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 impermeabilità del terreno nei confronti della pioggia in ingresso. È compreso tra 1, infiltrazione massima, e 100, deflusso massimo (*Tabella 4*).

Tabella 4: valori standard del Curve Number

Tipo idrologico di suolo	Descrizione
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarssissimo 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 colloid, 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

Interpolando quindi le informazioni derivanti dalla cartografica relativa alla classificazione idrologica tessiturale di suolo per il bacino della Brovada, contenuta nello studio geologico-geotecnico del progetto di fattibilità tecnico-economica dell'intervento in oggetto (*Figura 14*), e la carta di uso del suolo DUSAF 6.0

fornita da Regione Lombardia (*Figura 15*), considerando sempre una condizione di imbibimento media (CN_{II}), è stato possibile ottenere i diversi valori di CN associati ad ogni area omogenea. La media pesata di tutti questi valori ha permesso di ottenere i parametri CN, relativi ad ogni singolo sottobacino, da inserire nel modello.

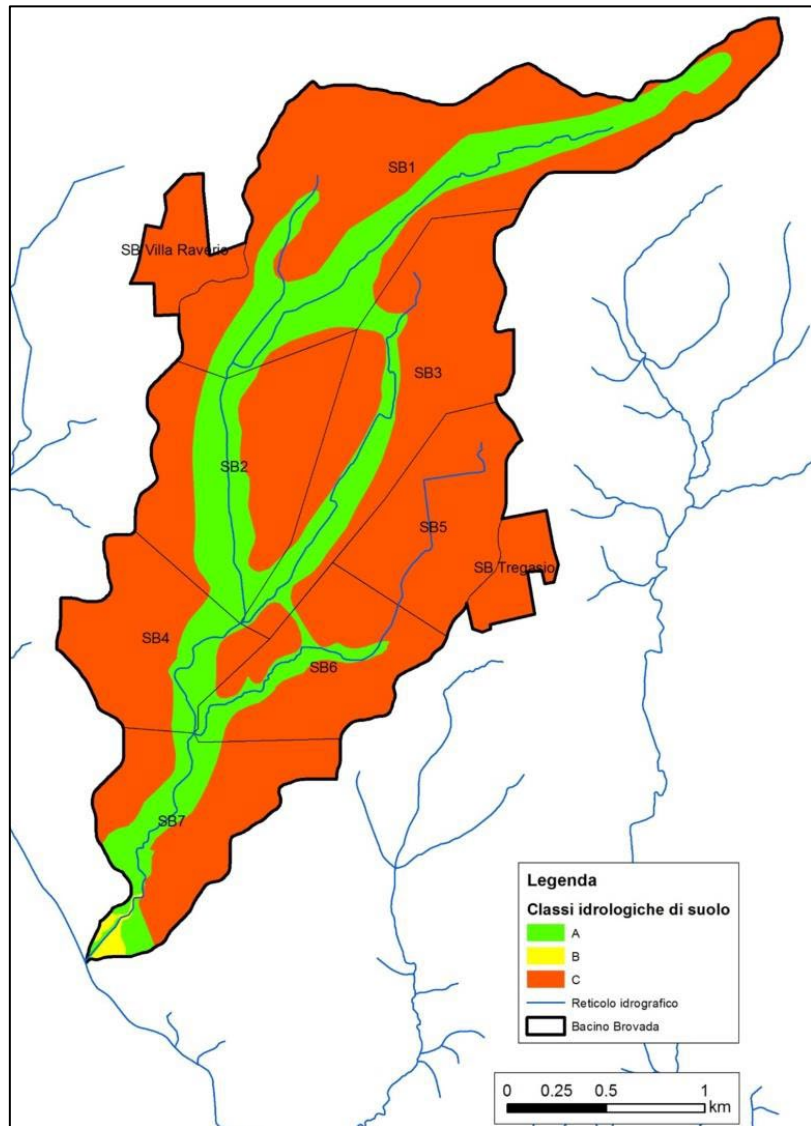


Figura 14: stima delle classi idrologiche di suolo per il bacino del Rio Brovada contenuta nella relazione geologica del PFTE

Si precisa che i parametri in ingresso richiesti dal programma per descrivere le perdite sono due: il CN e la percentuale di superficie urbanizzata. I valori di CN inseriti nel modello e riportati nella seguente tabella risultano essere comprensivi delle aree urbanizzate, non è stato quindi necessario indicare la percentuale di superficie impermeabile.

I valori di CN ottenuti dalla media pesata sull'area dei singoli sottobacini sono riassunti in *Tabella 6*. I risultati ottenuti sono ridotti di circa il 10% rispetto ai corrispondenti valori di CN ottenuti per i medesimi (o lievemente differenti) sottobacini in fase di PFTE, avendo giudicato questi ultimi eccessivamente severi a valle di un processo di tipo trial-and-error coinvolgente anche la modellazione idraulica dell'asta fluviale, illustrata al capitolo successivo.

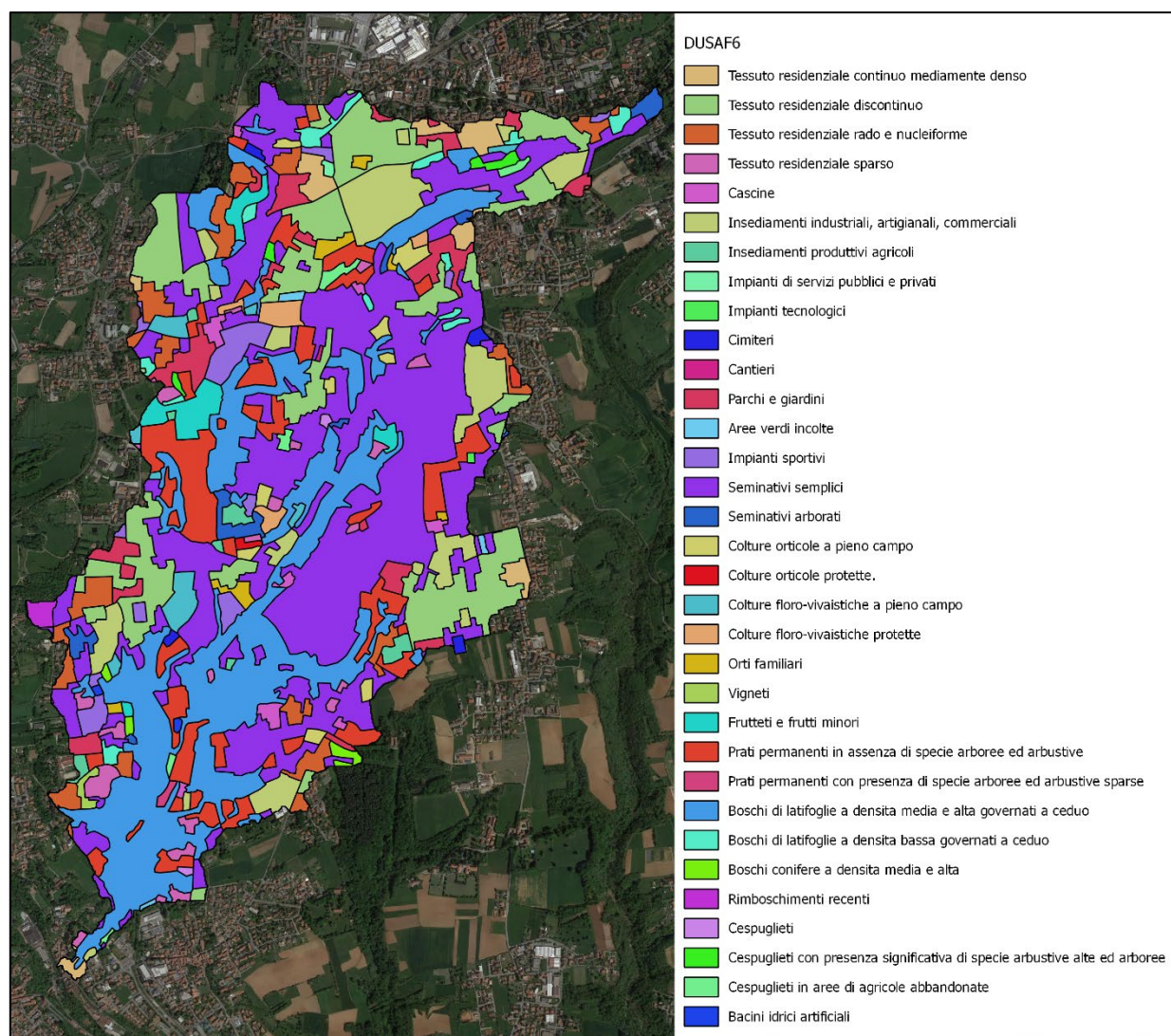


Figura 15: mappatura di uso del suolo (fonte: DUSAF 6.0)

Sottobacino	CN
1	74.7
2_m	58.3
2_v	74.5
3	71.8
4_princ	64.7
4_affl	79.1
5	43.2
6	73.2
7	65.5

Tabella 6: valori di CN dei singoli sottobacini

3.3.1.2. Idrogramma unitario istantaneo

Una volta definito il modello di perdite idrologiche da applicare ai sottobacini, bisogna stabilire la tipologia di risposta degli stessi alla sollecitazione meteorologica. Tale risposta è sintetizzata nell'IUH, acronimo inglese

per idrogramma unitario istantaneo, ovvero la forma che l'idrogramma di piena assumerebbe a seguito di una precipitazione impulsiva di volume unitario. Definita la forma dell'IUH, l'idrogramma di progetto si ottiene risolvendo – solitamente per via numerica – il seguente integrale di convoluzione:

$$Q(t) = \int_0^t u(t-\tau)p(\tau)d\tau$$

dove $u(t-\tau)$ è l'IUH e $p(\tau)$ è la precipitazione netta all'istante τ . Nota la pioggia netta dalla combinazione dello ietogramma di progetto e del modello di perdite idrologiche, entrambi illustrati in precedenza, rimane da definire l'idrogramma unitario istantaneo.

I modelli di IUH largamente più utilizzati nella modellazione afflussi-deflussi sono quelli di tipo lineare, in cui la relazione ingresso-uscita è descritta da un'equazione differenziale lineare a coefficienti costanti. Tra essi, i due modelli più semplici e popolari si basano su due differenti interpretazioni del bacino idrografico, esaltandone ciascuno una caratteristica:

- modello cinematico o della corrivazione: schematizza il bacino come un insieme di canali lineari caratterizzati da tempi di percorrenza invarianti, per cui la forma dell'IUH consiste in una curva area-tempi che descrive ad ogni istante temporale la porzione di bacino che contribuisce attivamente alla formazione di deflusso presso la sezione di chiusura, ed è funzione del solo tempo di corrivazione del bacino nell'ipotesi di linearità della curva:

$$u(t) = \frac{1}{A_{BAC}} \cdot \frac{dA}{dt} = \frac{1}{t_c} \text{ (hp curva } A-t \text{ lineare)}$$

dove t_c è il tempo di corrivazione del bacino e rappresenta anche la durata critica dell'evento meteorologico, che causa la massima portata di piena presso la sezione di chiusura;

- modello dell'invaso lineare: il secondo modello rappresenta invece la capacità di accumulo temporaneo dei volumi di piena del bacino, in cui l'IUH assume la forma di una curva di esaurimento di un serbatoio lineare, regolata dalla costante k :

$$u(t) = \frac{1}{k} e^{-t/k}$$

Per il presente progetto, si è scelto un idrogramma unitario istantaneo in grado di sintetizzare entrambe le proprietà precedentemente descritte, ovvero l'idrogramma di Clark: questo modello prevede infatti il calcolo dell'idrogramma di progetto come output di un serbatoio lineare, la cui portata in ingresso è costituita dall'idrogramma prodotto da un processo di corrivazione lineare della precipitazione, avente la seguente curva area – tempi (*HEC-HMS Technical Reference Manual*, 2000):

$$\frac{A(t)}{A_{BAC}} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{T_c}\right)^{1.5} & t \leq \frac{T_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(\frac{t}{T_c}\right)^{1.5} & t > \frac{T_c}{2} \end{cases}$$

dove T_c [h] è il primo dei due parametri necessari in ingresso all'idrogramma di Clark, e rappresenta il tempo di concentrazione del bacino. Tale grandezza, nell'ambito di questo modello, è leggermente differente dal tempo di corrivazione come precedentemente definito, in quanto consiste nella differenza temporale tra il termine delle piogge efficaci e il punto di inflessione della curva di esaurimento dell'idrogramma (Usai, *Manuale di idrologia per la progettazione*, HOEPLI ed., 2012). Poiché il punto di inflessione della curva di

esaurimento rappresenta il momento in cui il flusso di versante in direzione dei vari rami del reticolo termina, T_C , per il modello di Clark, rappresenta il tempo necessario alla goccia idrologicamente più lontana del bacino a raggiungere la rete di drenaggio. È dunque prevedibile che T_C assumerà un valore inferiore rispetto al tempo di corrivazione ottenuto al paragrafo 3.1.3.

Il serbatoio lineare, idealmente posto nei pressi della sezione di chiusura (a valle della rete di drenaggio), è rappresentato matematicamente dall'equazione di continuità, unitamente alla legge di efflusso del serbatoio:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t)$$

$$V(t) = RQ_{OUT}(t)$$

dove, per il generico istante t , V rappresenta il volume accumulato nel serbatoio, Q_{IN} la portata in ingresso, fornita ad ogni istante dalla risoluzione del processo corrivativo descritto precedentemente, Q_{OUT} la portata in uscita, ossia l'idrogramma di progetto; R il coefficiente di immagazzinamento del serbatoio, che costituisce il secondo parametro da definire all'interno del modello di Clark, rappresenta la capacità di trattenuta dei volumi di piena da parte dell'invaso (dimensionalmente è un tempo, anche se il significato fisico del parametro ha valore solo a livello qualitativo).

La stima dei parametri richiesti, T_C e R , è stata effettuata adottando formule empiriche tarate su bacini aventi caratteristiche idromorfologiche (area, lunghezza e pendenza dell'asta principale, % di impermeabilizzazione) simili al bacino della roggia in esame, ovvero le formule di Straub, Melching e Kocher (2000), validate per piccoli bacini rurali dell'Illinois. È importante notare che, poiché tali formule sono state tarate su bacini statunitensi, le grandezze riportate sono espresse secondo il sistema imperiale (miglia, pollici, etc.). In particolare:

- per T_C [h], vale la seguente espressione:

$$T_C = 1.54L_{AP}^{0.875}S^{-0.181}$$

dove:

- L_{AP} [mi] è la lunghezza dell'asta principale;
- S [ft/mi] è la pendenza media dell'asta principale;
- per R [h], vale la seguente espressione:

$$R = 16.4L_{AP}^{0.342}S^{-0.790}$$

Applicando le due formule precedenti utilizzando i dati riportati in *Tabella 3* opportunamente convertiti secondo le unità di misura statunitensi, si ottengono i seguenti valori di T_C e R (*Tabella 7*):

Sottobacino	T_c	R
1	0.93	0.34
2_m	0.40	0.44
2_v	0.24	0.30
3	0.64	0.29
4_princ	0.36	0.20
4_affl	0.24	0.36
5	0.18	0.30
6	0.69	0.35
7	0.60	0.35

Tabella 7: Parametri del modello di Clark

Noti i valori di entrambi i parametri del modello di Clark, la risoluzione numerica (alle differenze finite) e ricorsiva dell'equazione di continuità, illustrata in dettaglio all'interno del *HEC-HMS Technical Reference Manual* e naturalmente implementata nel programma, fornisce come risultato l'idrogramma di piena alle diverse sezioni di chiusura dei sottobacini.

3.3.1.3. Portata di base

Il valore di portata di base del corso d'acqua va a sommarsi all'idrogramma in uscita dal modello di Clark per ottenere l'output finale. Tuttavia, dal momento che il corso d'acqua in oggetto ha carattere torrentizio e risulta completamente secco in assenza di precipitazioni, ai fini della modellazione si considera la portata di base del modello pari a zero.

3.3.1.4. Deflusso a pelo libero

Per la simulazione del deflusso lungo la rete idrografica è stato scelto il metodo di Muskingum: esso si basa sul semplice approccio di conservazione della massa per la propagazione dell'onda lungo il corso d'acqua, 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 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).

Per ottimizzare la stabilità delle simulazioni è stato scelto un valore di $X = 0$; ad ogni modo, dai risultati ottenuti, si è visto che la differenza, in termini di valore massimo di portata transitante dalla sezione di chiusura risulta trascurabile. Inoltre, va sottolineato che dalla simulazione idrologica, ai fini della successiva modellazione idraulica, verranno considerati e utilizzati, ad eccezione dell'idrogramma uscente dalla confluenza n.1 (che rappresenterà l'idrogramma di monte nel modello idraulico), solamente gli idrogrammi uscenti dai singoli sottobacini, ignorando quindi i successivi tratti di traslazione e propagazione dell'onda che verranno simulati nel modello idraulico sviluppato attraverso il software Hec-RAS.

Si riportano in *Tabella 8* i parametri in ingresso per il metodo di Muskingum dei 5 rami di connessione fra i sottobacini:

Ramo	K	X
1	0.23	0
2	0.07	0
3	0.07	0
4	0.05	0
5	0.20	0

Tabella 8: Parametri del modello di Muskingum

3.3.2. Meteorologic model e times series data

Insieme, forniscono il modello di precipitazione lorda adottato in ingresso a ciascun sottobacino della schematizzazione. Come anticipato in precedenza, sono stati valutati ietogrammi di tipo costante e triangolare, per varie durate e relativi ai diversi tempi di ritorno.

A scopo rappresentativo si riportano di seguito (Tabella 9) i dati relativi all'idrogramma misurato alla sezione di chiusura del bacino (valore di portata al picco e volume dell'onda) considerando ietogrammi relativi ad un tempo di ritorno di 10 anni e durate variabili tra 1,25 ore e 7,5 ore.

Durata evento [ore]	Forma ietogramma	Q_{max} [m ³ /s]	V_{max} [m ³]
1.25	costante	10.6	51.4
	triangolare	10.6	51.4
2.5	costante	15.3	90
	triangolare	15.6	90.4
3.75	costante	15.9	120.5
	triangolare	16.8	121.6
5	costante	15.2	148.3
	triangolare	16.6	148.3
6.25	costante	14.2	168
	triangolare	15.8	168.1
7	costante	13.7	184.8
	triangolare	15.6	184.9
7.5	costante	13.4	192.8
	triangolare	15.3	193.1

Tabella 9: Valori di portata al colmo e volume degli igrogrammi transitanti alla sezione di chiusura del bacino sollecitato da eventi meteorici caratterizzati da diverse durate e forme dello ietogramma costante o triangolare

Si può subito notare come l'utilizzo di uno ietogramma triangolare comporti valori di portata al picco e volume dell'onda maggiori rispetto a quelli ottenuti attraverso la sollecitazione di uno ietogramma costante. Inoltre, si identifica preliminarmente la durata di 3.75 ore come la durata critica per il bacino in esame in termini di portata al colmo. Il processo ricerca dell'evento critico non può infatti prescindere, in questo caso, dalla modellazione idraulica dell'asta fluviale, e verrà dunque trattato in maggiore dettaglio nel capitolo successivo.

3.3.3. Control specifications

Componente che gestisce la durata della simulazione, da calibrare in relazione alla durata dell'evento meteorologico considerato. Per il caso in esame, le simulazioni effettuate sono sempre terminate entro le 12

ore dall'inizio della precipitazione, tempo sufficiente a far esaurire anche gli eventi di piena più lunghi presi in considerazione.

3.4. Risultati

Una volta definiti la pluviometria, il modello di perdite idrologiche e tutti i parametri della modellazione afflussi-deflussi, è stato possibile simulare i vari eventi ipotizzati. Come anticipato al paragrafo precedente, gli idrogrammi rappresentati costituiranno le condizioni al contorno successivamente inserite nel modello idraulico.

A scopo esemplificativo, si riportano a seguire (in *Figura 16*) gli idrogrammi di piena risultanti alla confluenza dei sottobacini SB1 ed SB2, corrispondenti con la sezione iniziale del modello idraulico (sez. 206), per la durata critica (3.75 ore), relativi agli eventi analizzati in fase di modellazione idraulica (10, 20 50 e 100 anni di tempo di ritorno). Gli idrogrammi relativi a tutti gli altri sottobacini sono riportati in allegato A.

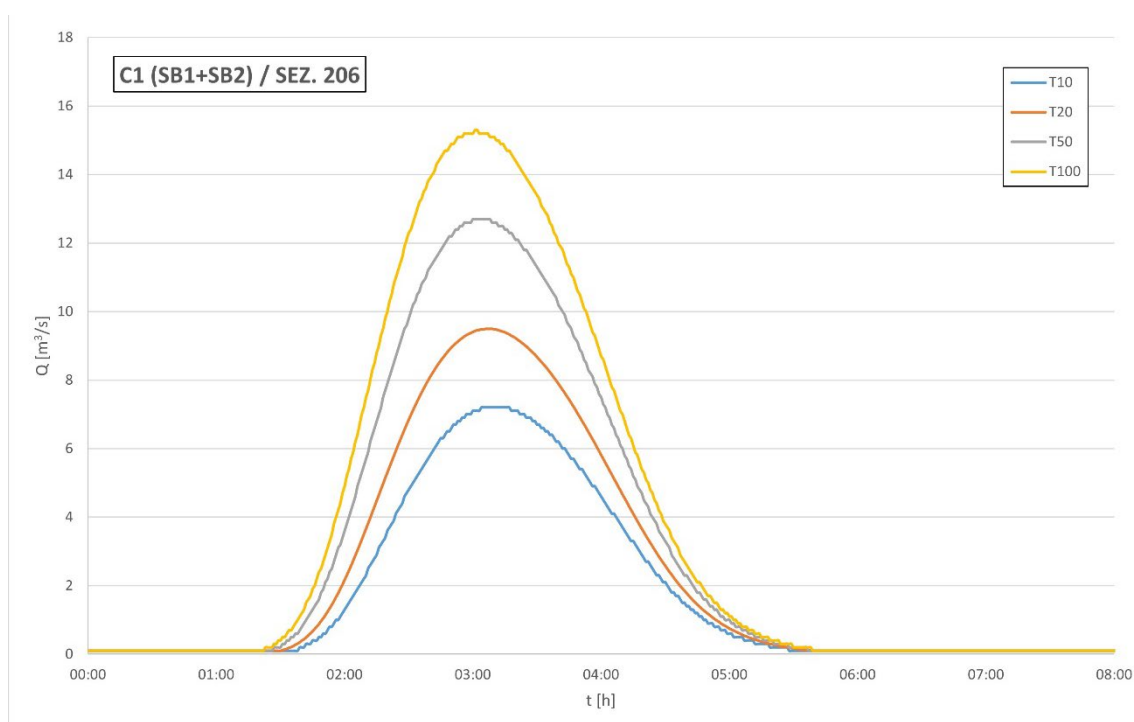


Figura 16: idrogrammi di piena per vari tempi di ritorno prodotti dal modello afflussi-deflussi implementato Hec-HMS in corrispondenza della confluenza dei sottobacini SB1 ed SB2

4. Idraulica

Come anticipato in premessa, lo studio idraulico del presente progetto costituisce l'elemento fondamentale con cui valutare quantitativamente la condizione di criticità nei confronti degli eventi alluvionali del tratto terminale del Torrente Brovada, nonché l'effetto di mitigazione delle opere previste nei confronti di tale condizione.

Trattandosi di un'analisi in cui è di fondamentale importanza valutare l'estensione delle aree esondabili nelle due zone maggiormente critiche (il bacino di invaso a monte dell'opera di regolazione in progetto e la frazione di Ponte Albiate in corrispondenza della confluenza del Rio Brovada con il Fiume Lambro), nonché i relativi valori di tiranti idrici e velocità della corrente, si è optato per la realizzazione di un modello numerico misto mono e bi-dimensionale, implementato attraverso il software Hec-Ras, che verrà dettagliatamente illustrato nei paragrafi successivi.

Si elencano di seguito i paragrafi in cui verrà presentata l'analisi idraulica effettuata, inclusiva dei necessari passaggi preliminari propedeutici allo sviluppo della stessa:

- Dominio di indagine;
- Orografia dell'area di indagine;
- Modellazione numerica idraulica;
- Configurazione di stato di fatto;
- Configurazione di stato di progetto;
- Risultati ottenuti.
- Analisi di dam-break

4.1. Dominio di indagine

4.1.1. Definizione del dominio di indagine

La definizione del dominio di indagine, in un problema di modellazione idraulica, deve ricercare il punto di incontro ottimale tra le opposte necessità di essere sufficientemente esteso da includere la totalità delle aree di interesse, senza che le condizioni al contorno imposte ne influenzino indebitamente il comportamento, e allo stesso tempo di dimensioni accettabili dal punto di vista computazionale, specie in casi come quello in esame che richiedono approfondimenti di grande dettaglio in alcune aree.

Per il presente intervento, si è deciso di analizzare il comportamento del torrente Brovada a partire da monte dell'attraversamento di Via Borromeo, fino alla confluenza con il fiume Lambro, per una lunghezza complessiva di circa 2840 metri. È stato modellato anche un breve tratto del fiume Lambro (circa 200 metri) nei pressi della confluenza, al fine massimizzare l'aderenza del modello alla realtà.

La scelta di modellare un tratto così lungo in proporzione alle dimensioni dell'opera nasce dal fatto che l'opera di regolazione in progetto e l'area maggiormente critica dal punto di vista degli elementi esposti nei confronti di un possibile evento alluvionale, ovvero il tratto terminale (150 m), in contesto urbanizzato, del torrente Brovada, sono situati a significativa distanza tra loro. Pur essendo il tratto intermedio – come verrà dettagliato nel seguito – di interesse marginale ai fini modellistici di un evento alluvionale, garantire la continuità del modello, rispetto, ad esempio, al realizzare due modelli idraulici separati e circoscritti, è parsa la soluzione migliore per assicurare quanto più possibile la qualità dei risultati ottenuti e la loro rispondenza alla realtà, pur al prezzo di una geometria maggiormente complessa e tempi computazionali inevitabilmente superiori.

Si riporta in *Figura 17* un'immagine planimetrica a base ortofoto del dominio di interesse.

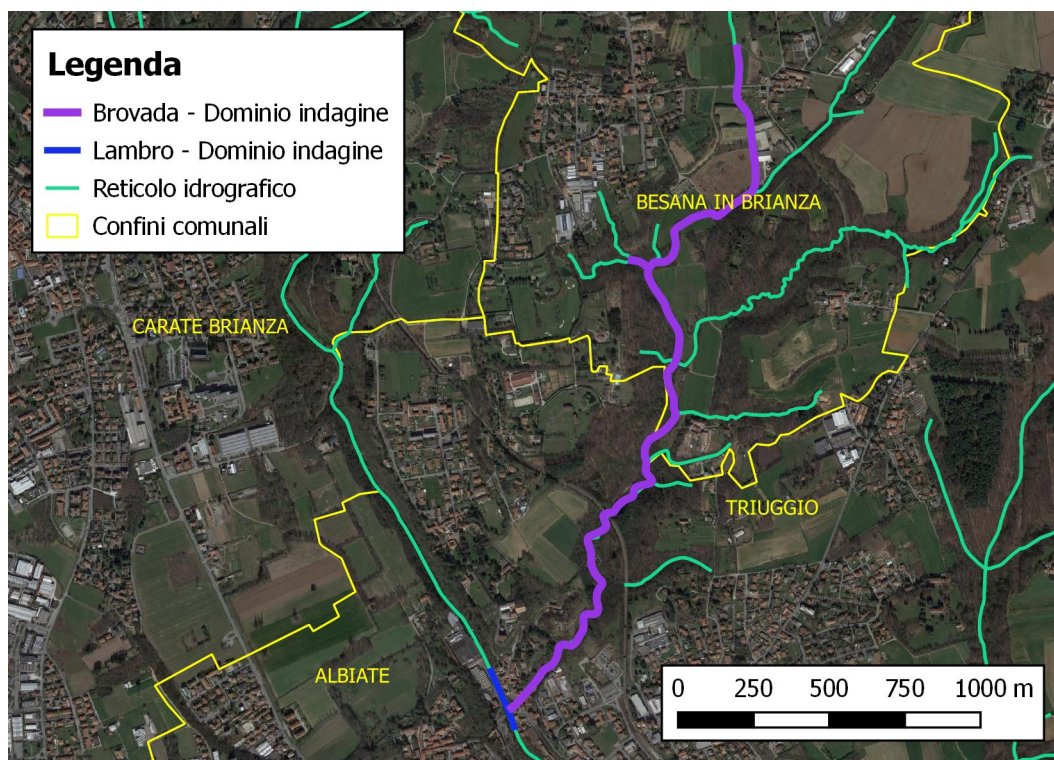


Figura 17: dominio di indagine, base ortofoto (Google Satellite)

4.1.1. Descrizione del dominio di indagine

Il tratto di asta del torrente Brovada indagato può essere sommariamente suddiviso nei seguenti sotto-tratti (*Figura 18*):

- tratto A: dall'inizio del tratto indagato a monte di Via Borromeo fino a monte dell'attraversamento di Via della Valle (520 metri circa). In questo tratto l'alveo del corso d'acqua attraversa un paesaggio pianeggiante di tipo agricolo, con le sponde che si raccordano a campi coltivati o lasciati a prato, separati dal torrente da una sottile e discontinua striscia di vegetazione arborea/arbustiva. A livello idraulico, questo tratto non risulta di particolare rilevanza, se non nella sua parte terminale, dal momento che l'attraversamento di Via della Valle costituisce di fatto il limite di monte dell'area di esondazione controllata, nonché un significativo vincolo idraulico di per sé;
- tratto B: dall'attraversamento di Via della Valle a valle della briglia di consolidamento (560 metri circa). Tratto in cui il torrente continua ad attraversare un'area campestre, andandosi tuttavia ad approfondire e ad allargare, con la presenza di fasce perfluviali vegetate molto più estese. A livello idraulico, è un'area destinata a diventare di massima rilevanza in condizione di progetto, in quanto costituirà – proprio per la significativa volumetria aggiuntiva generata dal corso d'acqua – il bacino di invaso dell'opera di regolazione, che verrà realizzata immediatamente a valle dell'attuale briglia;
- tratto C: da valle dell'attuale briglia di consolidamento/futura opera di regolazione fino alla briglia a monte della canalizzazione (1.6 km circa). Tratto in cui il corso d'acqua attraversa un paesaggio naturalizzato di carattere prevalentemente boschivo, privo di significativi elementi esposti dal punto di vista alluvionale e pertanto marginalmente rilevante dal punto di vista idraulico ai fini del presente progetto, se non per la parte iniziale, immediatamente a valle (in condizioni di progetto) dell'opera di regolazione, con particolare riferimento all'analisi di dam-break presentata nel seguito;

- tratto D: dalla briglia a monte della canalizzazione alla confluenza con il fiume Lambro (200 metri circa). Tratto maggiormente critico nei confronti di possibili fenomeni di esondazione, sia dal punto di vista degli elementi esposti che della pericolosità, in quanto il torrente è stato costretto in un canale artificiale in calcestruzzo, a sezione pseudo-rettangolare, per l'attraversamento della località Ponte Albiate (*Figura 8*) prima dello sbocco nel fiume Lambro. Tale canale si è infatti rivelato insufficiente a contenere eventi di piena con tempi di ritorno superiori a circa 10 anni, causando problemi al traffico veicolare e soprattutto danni alle abitazioni del centro urbanizzato.

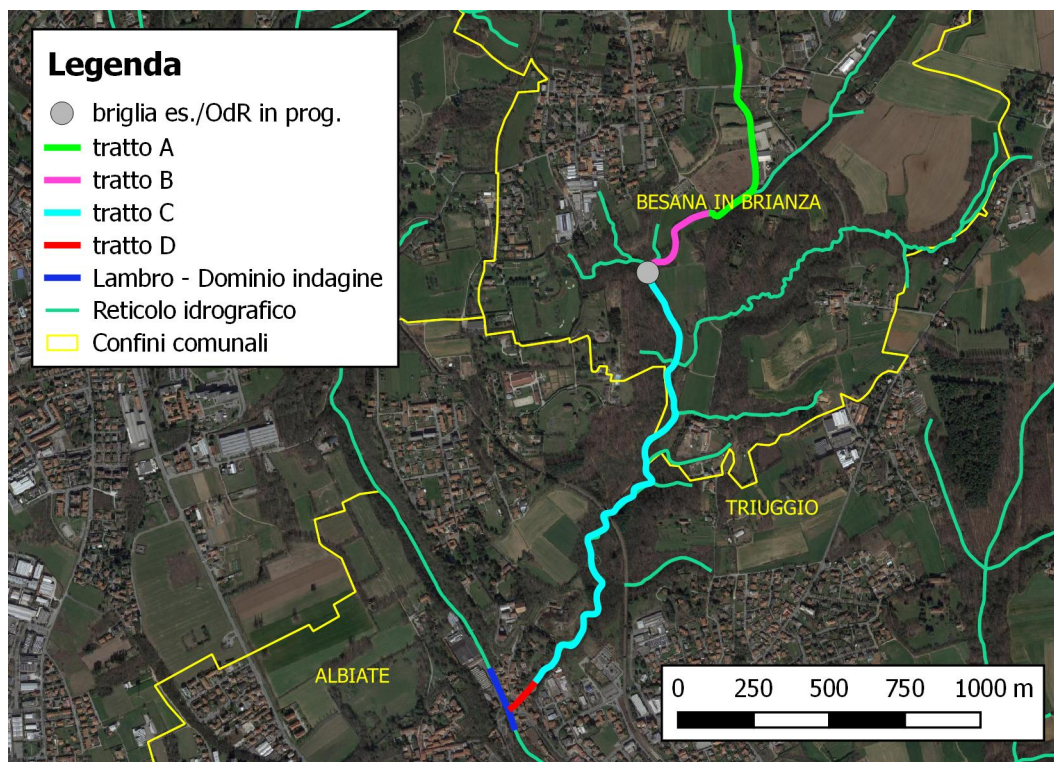


Figura 18: descrizione per tratti di interesse della frazione di asta fluviale indagata, base ortofoto (Google satellite)

4.2. Orografia dell'area di indagine

Definito il dominio di indagine, il primo, fondamentale aspetto da affrontare, per poter correttamente impostare la modellazione idraulica, è la costruzione di un modello piano-altimetrico adeguatamente accurato alle esigenze di modellazione per l'intera superficie indagata.

Nel caso specifico, si è partiti raccogliendo i dati immediatamente a disposizione e individuando le aree di maggior interesse alla modellazione, per poter incrociare queste due informazioni e verificare se l'accuratezza dei dati disponibili fosse sufficientemente adeguata da poter essere utilizzata come base per la costruzione della geometria del modello lungo la totalità del tratto indagato.

Per il dominio di indagine considerato, si avevano immediatamente a disposizione i seguenti dati piano-altimetrici:

- modello digitale del terreno (DTM) a risoluzione 5 metri (accuratezza metrica) di Regione Lombardia (2015), per la totalità del dominio;
- DTM a risoluzione 1 metro (accuratezza verticale 15-30 cm) sviluppato da rilievo LIDAR effettuato dal Ministero dell'Ambiente (2009-2010), disponibile solo per il tratto indagato di valle (ultimi 720 metri circa).

La combinazione dei due modelli digitali del terreno, utilizzando il dato LIDAR dove presente e il dato a risoluzione 5 metri altrove, si considera accettabile per la maggior parte del dominio indagato, in particolare nei tratti "interlocutori" (il tratto "A" e il tratto "C"), dove l'assenza di elementi esposti di particolare rilevanza rende accettabile una stima approssimata dell'effettivo profilo di corrente in piena, che ne colga le principali caratteristiche qualitative. Tuttavia, per i tratti "B" (briglia a valle del cimitero di Calò/opera di regolazione in progetto e relativo bacino di invaso) e "D" (tratto artificializzato in località Ponte Albiate a valle dell'ultima briglia di consolidamento) l'elevata importanza delle strutture e degli elementi esposti presenti (in stato di fatto e/o in stato di progetto) rendeva insufficienti i dati plano-altimetrici a disposizione, specie dove presente solo il DTM a risoluzione 5 metri. Si è dunque proceduto all'affinamento del modello digitale del terreno mediante i seguenti passaggi:

- realizzazione di un rilievo topografico a terra nell'area del cimitero della frazione Calò, concentrandosi in particolare nella zona della briglia esistente dove sorgerà l'opera di regolazione;
- estensione del rilievo al resto dell'asta fluviale indagata, dove fisicamente possibile, battendo un numero limitato di punti utili a verificare la validità del dato DTM a disposizione;
- ricostruzione accurata della geometria del tratto terminale del torrente, in frazione Ponte Albiate, a partire dalle quote dei pozzetti della linea fognaria (fornite dal gestore del servizio idrico integrato) che attraversa l'alveo del corso d'acqua, accoppiata a misurazioni speditive locali tramite stadia;
- rilievo speditivo delle caratteristiche geometriche dei manufatti presenti lungo il tratto di asta indagato, da inserire successivamente all'interno del modello Hec-RAS;
- ricostruzione, direttamente dallo strumento Mapper di Hec-Ras, di un nuovo modello digitale del terreno che integrasse i dati così ottenuti all'interno della base esistente.

Si riportano di seguito:

- la planimetria generale dell'asta fluviale indagata avente come base i DTM originali (si nota il modello da rilievo LIDAR nel tratto terminale) e l'indicazione dei punti rilevati a terra (*Figura 19*);
- il modello digitale del terreno "ricostruito" (*Figura 20*, dettagli in *Figura 21* e *Figura 22*) e inclusivo:
 - delle modifiche alla geometria dell'alveo dedotte dai rilievi effettuati;
 - degli edifici presenti nella frazione di Ponte Albiate potenzialmente interessati da una esondazione del Rio Brovada;
 - del profilo arginale che verrà realizzato in condizione di progetto in sinistra idraulica con il duplice scopo di delimitatore del bacino di invaso e di pista di accesso all'opera di regolazione (quest'ultimo, in teoria, esisterà solo in stato di progetto, ma la sua presenza è del tutto irrilevante sul piano idraulico in condizioni di stato di fatto);

Il DTM così ricostruito ha risoluzione 0.1 metri, necessaria per cogliere il dettaglio della geometria dell'alveo del Rio Brovada nel suo tratto terminale e di maggiore importanza.

Così come per lo studio idrologico, il modello digitale del terreno e tutte le successive mappe prodotte durante la modellazione idraulica sono georeferenziati in coordinate metriche (E-N) secondo il sistema di riferimento proiettato UTMWGS84, zona 32N.

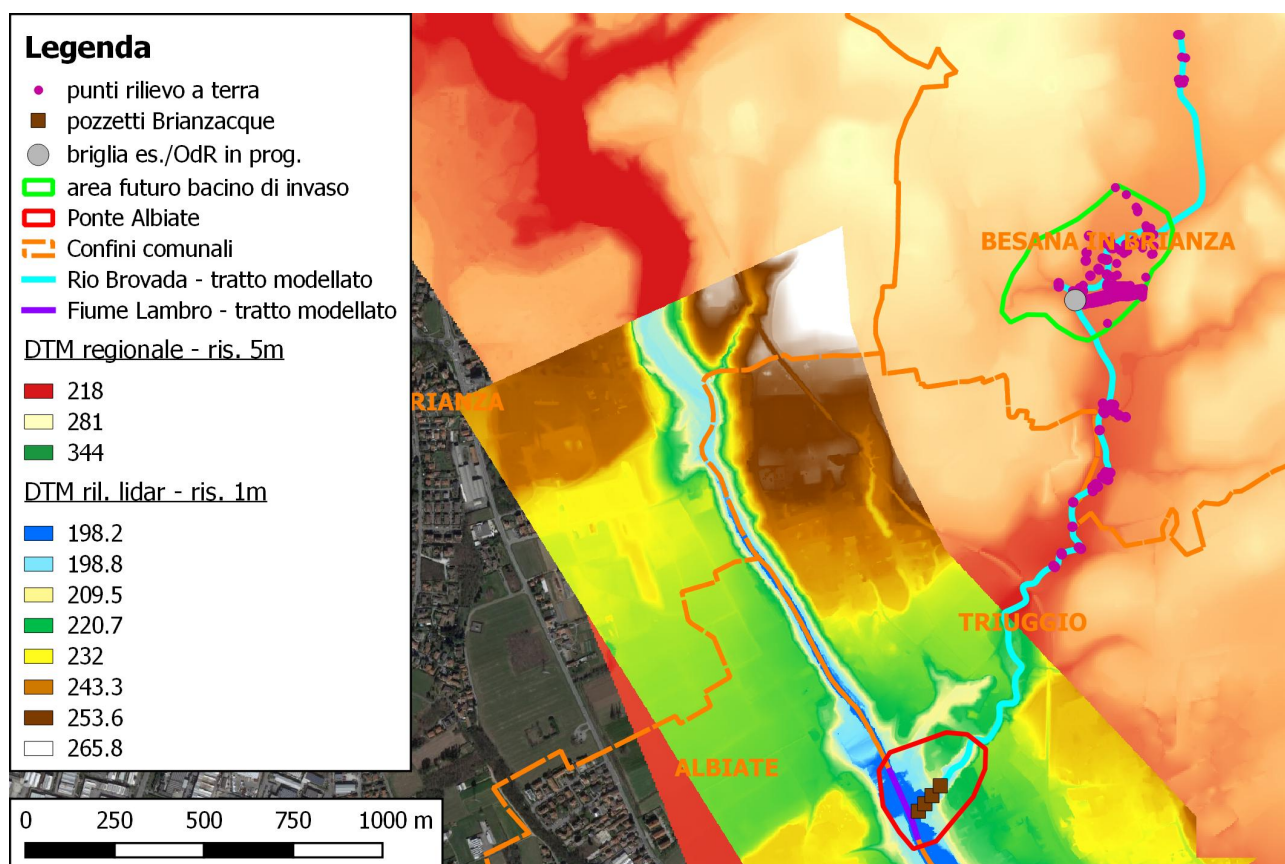


Figura 19: dati plano-altimetrici a disposizione per la realizzazione del modello idraulico

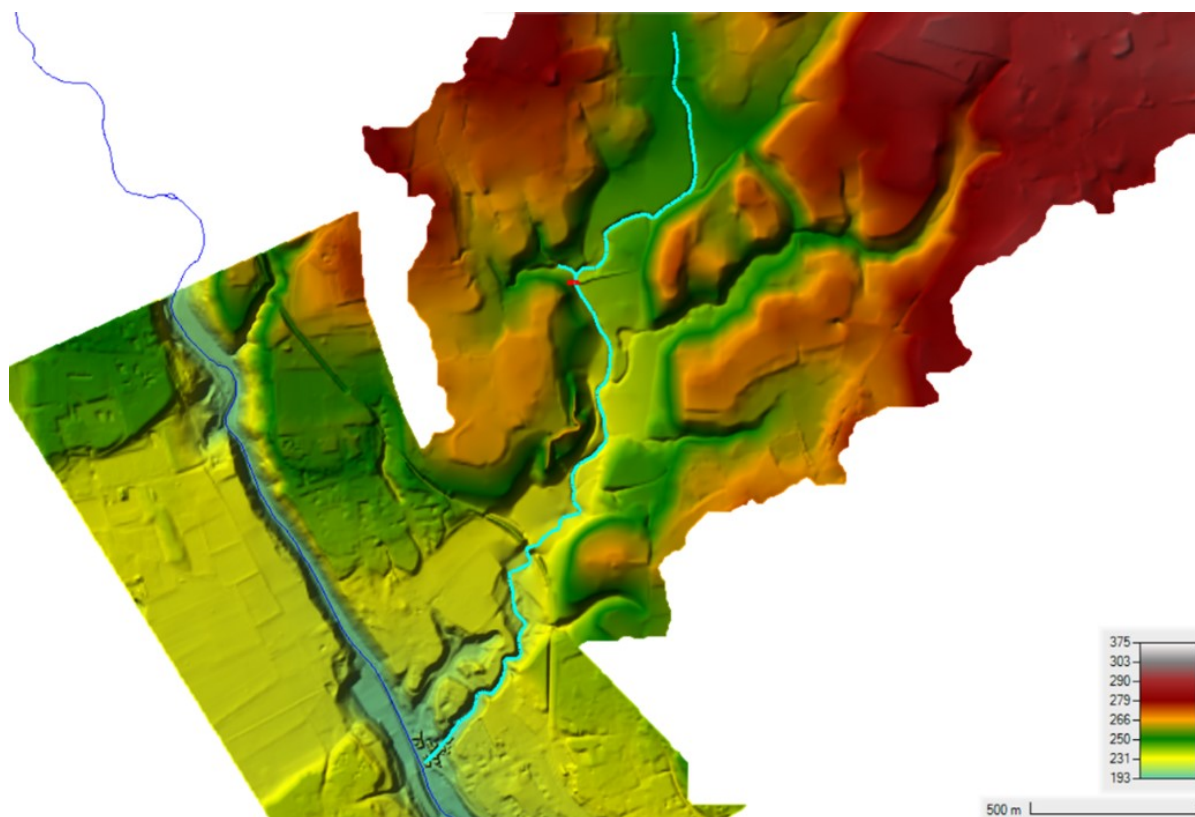


Figura 20: vista d'insieme del DTM "ricostruito" per il tratto di Torrente Brovada indagato (indicato in azzurro, mentre il Fiume Lambro è indicato in blu e la posizione dell'opera di regolazione in rosso)

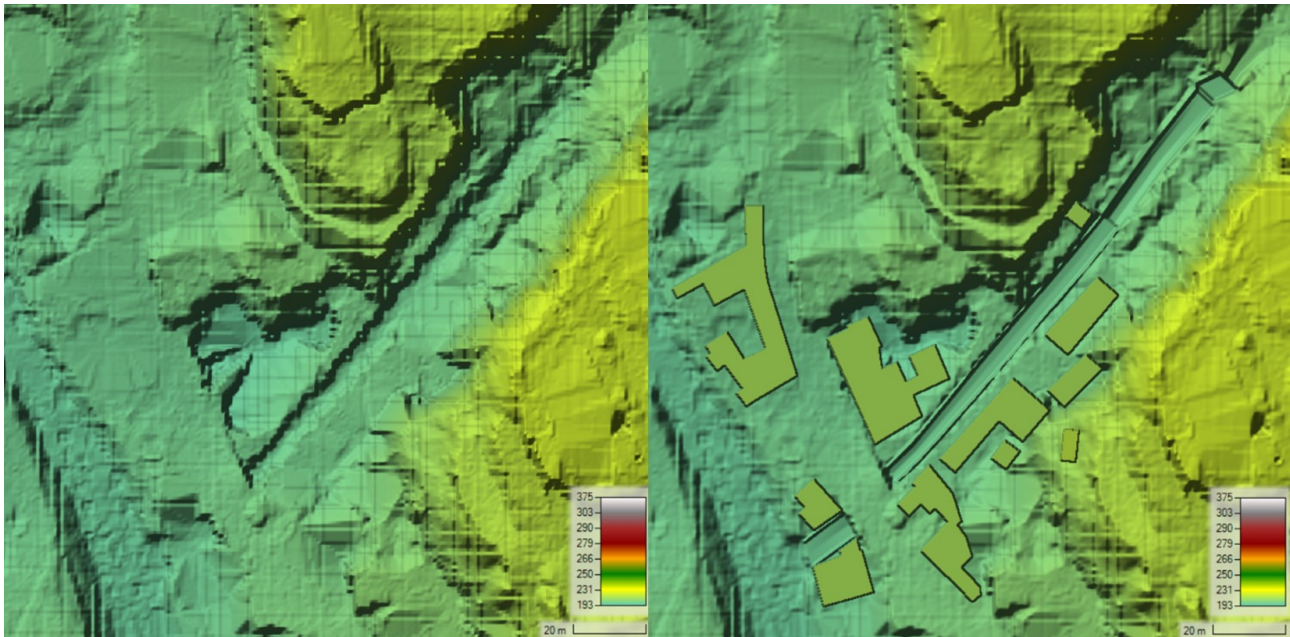


Figura 21: confronto tra DTM originale (lidar, sx) e ricostruito per la modellazione (dx) nei pressi della confluenza con il Fiume Lambro. Nel secondo il Rio Brovada è stato ritracciato con sezioni più accurate e sono stati aggiunti gli edifici della frazione Ponte Albiate

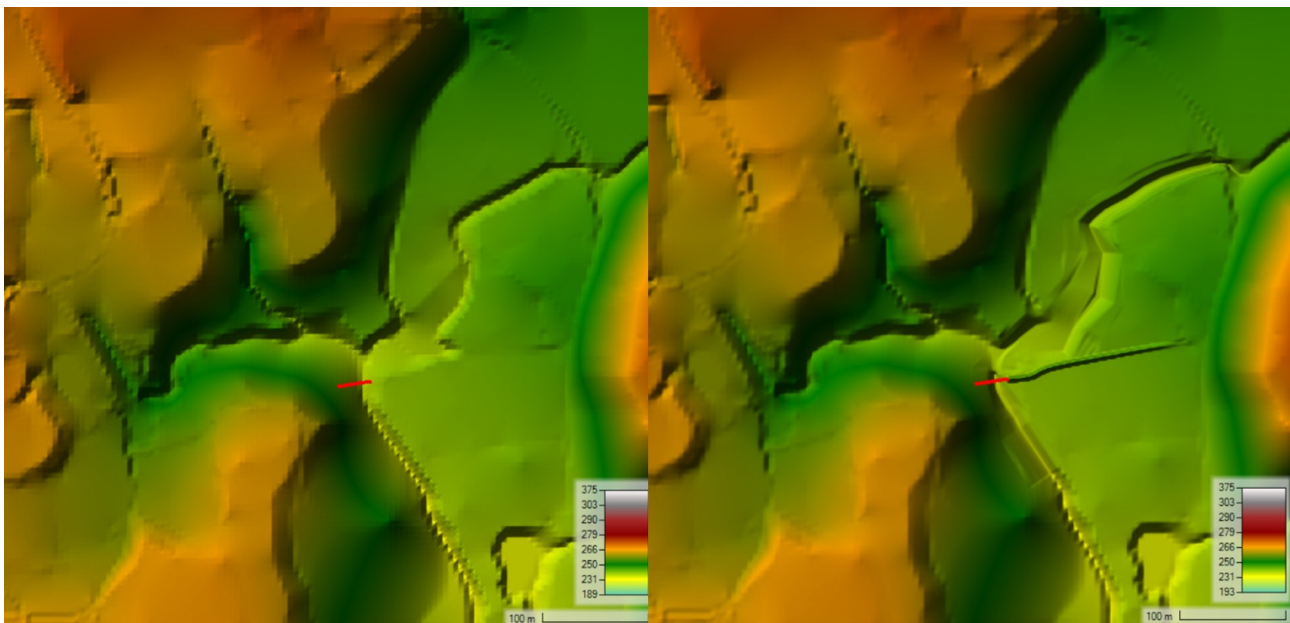


Figura 22: confronto tra DTM originale (regionale, sx) e ricostruito per la modellazione (dx) nei pressi dell'opera di regolazione in progetto, indicata in rosso. Si nota la riprofilatura dell'alveo e la presenza dell'argine di progetto in sinistra idraulica

4.3. Modellazione numerica idraulica

Definiti il dominio di indagine e il relativo modello digitale del terreno, si può ora procedere con la realizzazione del modello idraulico per l'analisi del comportamento del Torrente Brovada nei confronti dell'evento di riferimento (T100 anni ai sensi della LR 8/98) in condizioni di stato di fatto, di progetto e di ipotetico collasso (dam break). Dovendo analizzare un fenomeno dinamico ed evolutivo, quale la propagazione di un'onda di piena, è necessaria un'analisi di moto vario. Come già anticipato in premessa al capitolo, in questo caso si è optato per una modellazione mista 1D/2D, utilizzando il monodimensionale per i tratti "A" e "C" del dominio di indagine, meno significativi in termini di elementi esposti/strutture presenti e

lungo i quali la corrente idrica rimane sempre all'interno dell'alveo inciso, mentre per i tratti "B" e "D" la necessità di studiare con attenzione la propagazione dell'onda di piena esondata al di fuori dell'alveo del corso d'acqua rende maggiormente indicato un approccio bidimensionale.

Un modello di questo tipo ha una risoluzione necessariamente numerica, si è dunque scelto di implementarlo utilizzando il software Hec-Ras, sviluppato dall'US Army Corp of Engineers (USACE). Note geometria (e mesh per le analisi 2D), caratteristiche idrauliche, condizioni iniziali e condizioni al contorno del sistema, nonché durata e passo temporale della simulazione, il programma risolve le equazioni di De Saint Venant del moto vario utilizzando i metodi delle differenze (per le analisi 1D) e dei volumi finiti (per le analisi 2D) e fornendo – per ciascuna sezione e/o cella – i valori delle principali variabili di stato (tiranti idrici e velocità della corrente) per ogni istante di tempo simulato. Una descrizione sintetica delle equazioni che governano il moto vario in condizioni mono e bidimensionale, nonché della metodologia risolutiva delle stesse adottata dal programma, viene fornita all'interno dell'allegato B alla presente relazione e, ancora più in dettaglio, all'interno del *Hydraulic Reference Manual* (Ver. 5.0) di Hec-Ras.

Si illustreranno di seguito, per le condizioni di stato di fatto e di progetto, i seguenti aspetti:

- geometria e proprietà idrauliche del modello;
- condizioni iniziali e condizioni al contorno;
- durata e passo di simulazione;

Seguiranno poi la presentazione dei risultati e, infine, verrà presentata l'analisi a collasso dell'opera.

4.3.1. Configurazione di stato di fatto

4.3.1.1. Geometria e proprietà idrauliche del modello

Tratto A

Il primo tratto studiato, da monte di Via Borromeo fino a monte di Via della Valle (*Figura 23*), è stato modellato come un'asta monodimensionale di lunghezza pari a circa 520 metri e pendenza media pari a 1.2%, con le seguenti caratteristiche:

- 86 sezioni trasversali (di cui 33 estratte direttamente dal DTM e 53 interpolate), a una distanza media di circa 6 metri tra di loro;
- per tutte le sopracitate sezioni si è assegnato un valore di scabrezza di Manning (n , [s/m^{1/3}], *Figura 23*, dx) pari a 0.035 per l'alveo inciso e 0.06 per le fasce perifluviali, in linea con i valori della letteratura tecnica e giudicati adeguati alle caratteristiche del corso d'acqua;
- 1 struttura di tipo "culvert", compresa tra le sezioni 198 e 197 (sez. 197.5), per modellare l'attraversamento di Via Borromeo, le cui caratteristiche geometriche e idrauliche sono sintetizzate in *Figura 24*.

Oss. si introduce in questo caso l'utilizzo delle *ineffective flow areas* (IFA, linee verdi), lo strumento che Hec-Ras mette a disposizione per definire le aree, solitamente golenali, di una sezione trasversale che vengono immerse dall'onda di piena ma non partecipano attivamente al flusso, come ad esempio i tratti immediatamente a monte e a valle delle spalle di un attraversamento.

Il collegamento al tratto successivo, modellato come area 2D, avviene con un allacciamento di quest'ultima alla sezione finale del tratto A (sez. 174), in modo da garantirne la continuità spaziale in termini di caratteristiche geometriche e idrauliche, secondo quanto indicato dal programma.

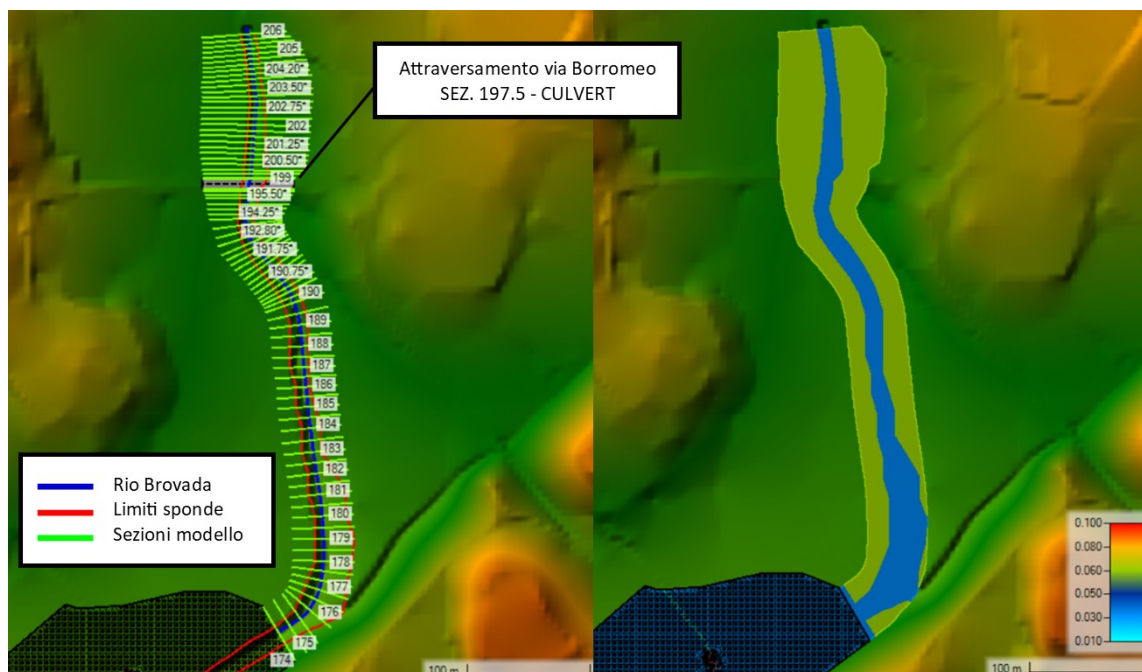


Figura 23: planimetria del modello geometrico del tratto A (sx) e relativi valori del coefficiente di Manning (dx)

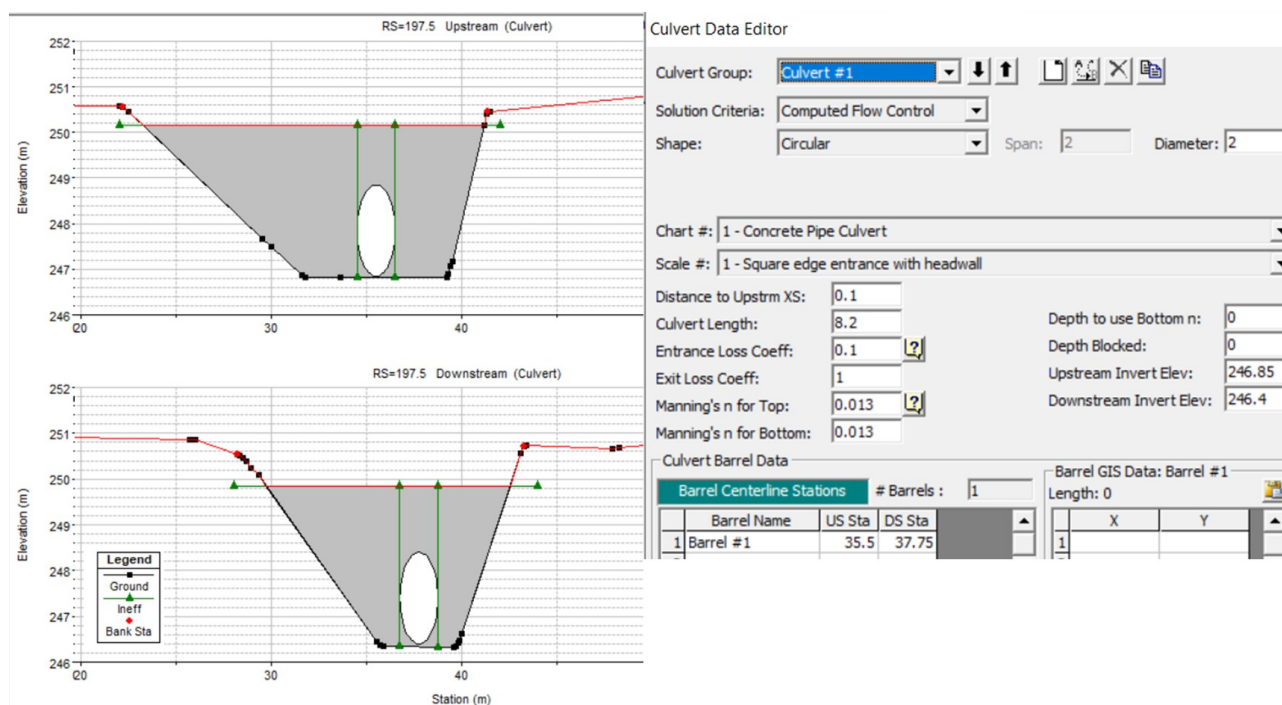


Figura 24: vista da monte e da valle e sintesi dei parametri dell'elemento di tipo culvert che rappresenta l'attraversamento di Via Borromeo

Tratto B

Tratto del Rio Brovada che va da monte dell'attraversamento di Via della Valle (sez. 174 del tratto A) a valle della briglia del cimitero di Calò (sez. 103 del tratto C), di lunghezza pari a 560 metri e pendenza media pari a 1.8%. In condizioni di stato di fatto, non è un'area di particolare rilevanza nei confronti dello studio di possibili fenomeni di esondazione, vista l'assenza di strutture di interesse, ad eccezione dell'attraversamento di Via della Valle, le cui dimensioni ristrette fanno ipotizzare il verificarsi di rigurgito idraulico a monte durante eventi meteorologici pari o prossimi all'evento di progetto (T100), con conseguente allagamento

della strada (trattasi in ogni caso di una strada locale a frequentazione moderata). In questo caso si sarebbe certamente dunque potuto modellare l'intero tratto come un'asta monodimensionale, tuttavia, dal momento che in stato di progetto la realizzazione dell'opera di regolazione va a generare un bacino di invaso nella quasi totalità del tratto, si è deciso, al fine di una maggiore corrispondenza e comparabilità delle due analisi, di modellare già in questa fase il tratto B come un'area bidimensionale (*Figura 25*), con le seguenti caratteristiche:

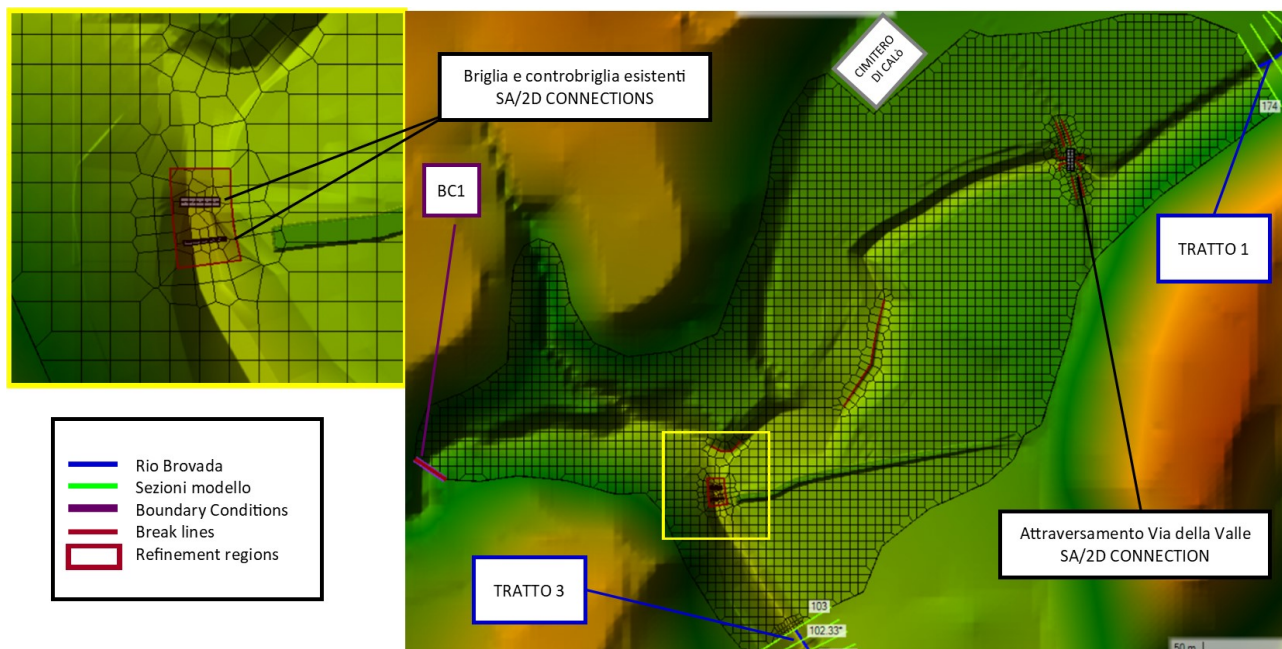


Figura 25: planimetria del modello geometrico del tratto B

- elemento di tipo "2D flow area", costituito da una mesh non strutturata di 3786 elementi, aventi di base forma quadrata di lato 5 m, ridotta progressivamente fino a 2 m in corrispondenza delle break lines (11) e delle refinement regions (1) aggiunte, tracciate per meglio adattare la mesh all'orografia del terreno, facilitando così la fase computazionale. All'area è stato assegnato un coefficiente di scabrezza di manning pari a $0.035 \text{ m/s}^{1/3}$, con la sola eccezione del manto di Via della Valle, a cui è stato assegnato il valore di $0.013 \text{ m/s}^{1/3}$;
- 3 strutture interne alla mesh, rappresentate con elementi di tipo "1D/2D connections", che modellano:
 - l'attraversamento di Via della Valle, modellato come elemento di tipo "culvert" dotato di stramazzo alla quota della strada, le cui proprietà geometriche e idrauliche vengono riportate in *Figura 26*;
 - briglia e controbriglia "del cimitero di Calò", modellate come semplici soglie a stramazzo, le cui caratteristiche sono riportate rispettivamente in *Figura 27* e *Figura 28*;

Oss. in realtà, soltanto lo stramazzo di Via della Valle è stato trattato, in fase computazionale, con una soglia di sfioro vera e propria. Hec-RAS fornisce infatti la possibilità di scegliere, per questa tipologia di elementi, se modellare gli sfioro mediante le equazioni classiche degli stramazzi oppure con le equazioni di moto vario 2D, come il resto della mesh, come fossero parte del DTM. La questione è principalmente computazionale, in quanto l'utilizzo di uno stramazzo in condizioni di tiranti elevati a valle può generare instabilità nel modello. Solitamente, come in questo caso, la decisione finale si prende a valle di un processo di tipo trial-and-error.

- condizione al contorno: ne è presente una, "BC1", a simulare la portata in ingresso dal versante ovest, che verrà illustrata in dettaglio nel relativo paragrafo.

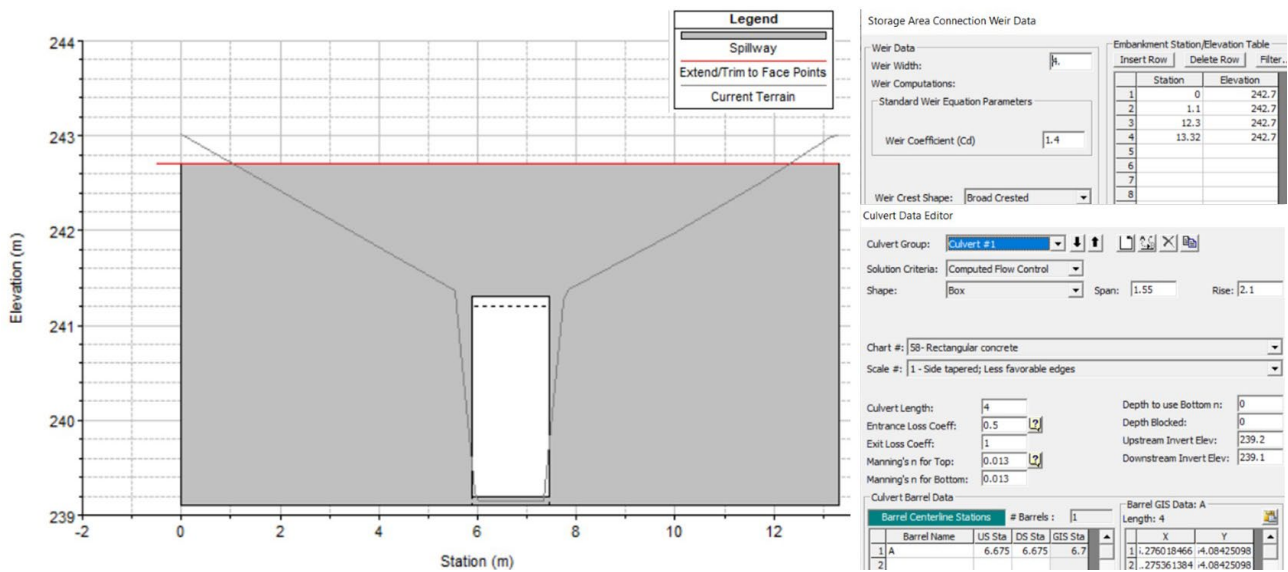


Figura 26: vista da monte e sintesi dei parametri dell'elemento di tipo 1d/2d conn. che rappresenta l'attraversamento di Via della Valle

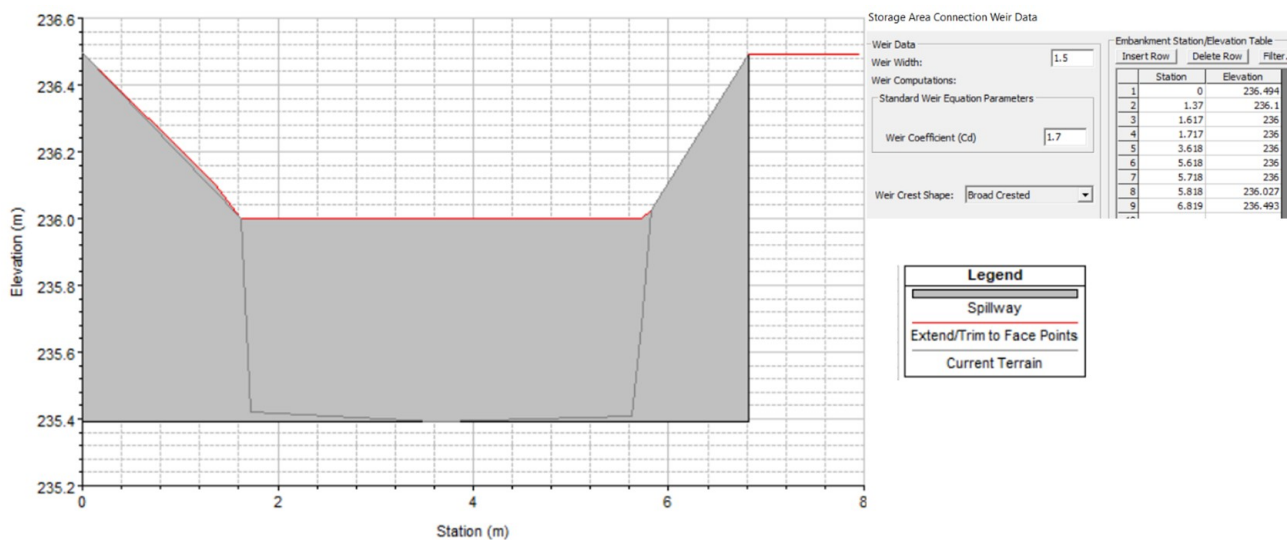


Figura 27: vista da monte e sintesi dei parametri dell'elemento di tipo 1d/2d conn. che rappresenta la briglia del cimitero di Calò

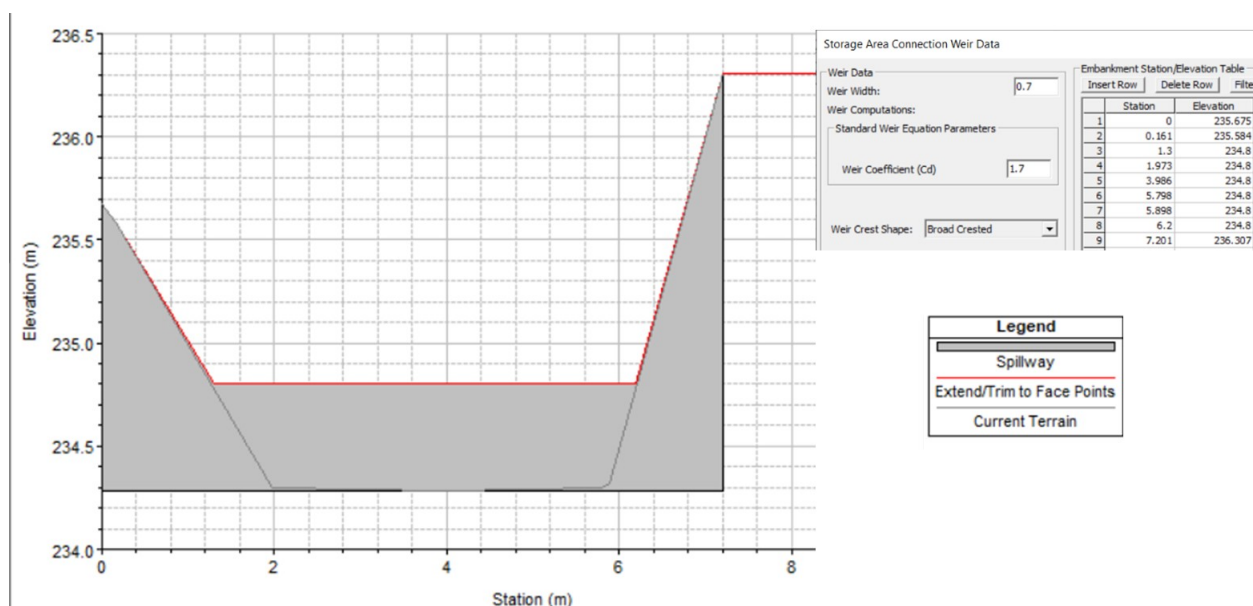


Figura 28: vista da monte e sintesi dei parametri dell'elemento di tipo 1d/2d conn. che rappresenta la controbriglia del cimitero di Calò

Tratto C

Il terzo tratto del corso d'acqua va dal termine dell'area 2D contenente il tratto B, in corrispondenza della sezione 103, fino a valle dell'ultima briglia (e della relativa controbriglia), sezione 26, per una lunghezza complessiva di circa 1600 metri e una pendenza media del 2.1%. Al pari del tratto A, questo spezzone dell'asta fluviale del Rio Brovada, pur essendo sensibilmente il più lungo tra quelli analizzati, può essere considerato di importanza secondaria nell'ambito dell'analisi vista l'assenza di elementi esposti di particolare rilievo al suo interno. La sua funzione nel modello è principalmente, come già anticipato in precedenza, quella di garantire la continuità idraulica nella traslazione dell'onda di piena dall'area del cimitero di Calò (successivamente sede dell'opera di regolazione) al tratto terminale (D) che attraversa la frazione di Ponte Albiate. Per questo motivo lungo questo tratto la geometria approssimata del corso d'acqua fornita dai modelli digitali del terreno originariamente a disposizione (DTM5 fino al ponte della ferrovia e DTM lidar a valle), dopo essere stata validata tramite alcuni punti battuti in alveo, viene considerata sufficientemente precisa per lo scopo sopraindicato.

Nello specifico, il tratto C è costituito da (Figura 29):

- 253 sezioni trasversali (di cui 78 estratte direttamente dal DTM e 175 interpolate), a una distanza media di circa 6 metri tra di loro;
- per tutte le sopracitate sezioni, come per il tratto A, si è assegnato un valore di scabrezza di Manning (n , [s/m^{1/3}]) pari a 0.035 per l'alveo inciso e 0.06 per le fasce perfluviali;
- 2 elementi di tipo "inline structure", corrispondenti all'ultima briglia di consolidamento in gabbioni (sezione 28.5), caratterizzata da un salto di quasi 3 metri, e alla relativa controbriglia in calcestruzzo (sezione 26.5). Entrambe le strutture sono state modellate come stramazze e le relative caratteristiche vengono riassunte rispettivamente in Figura 30 e Figura 31.

Oss. lungo il ciglio della sponda destra di si osserva per la prima volta la presenza di un nuovo elemento – levee, o argine – utilizzato più volte nel modello ogniqualvolta fosse presente (solitamente tra alveo e sponda) uno spartiacque, in modo da impedire il riempimento dell'area perfluviale prima dello sfioro oltre il punto di massimo orografico.

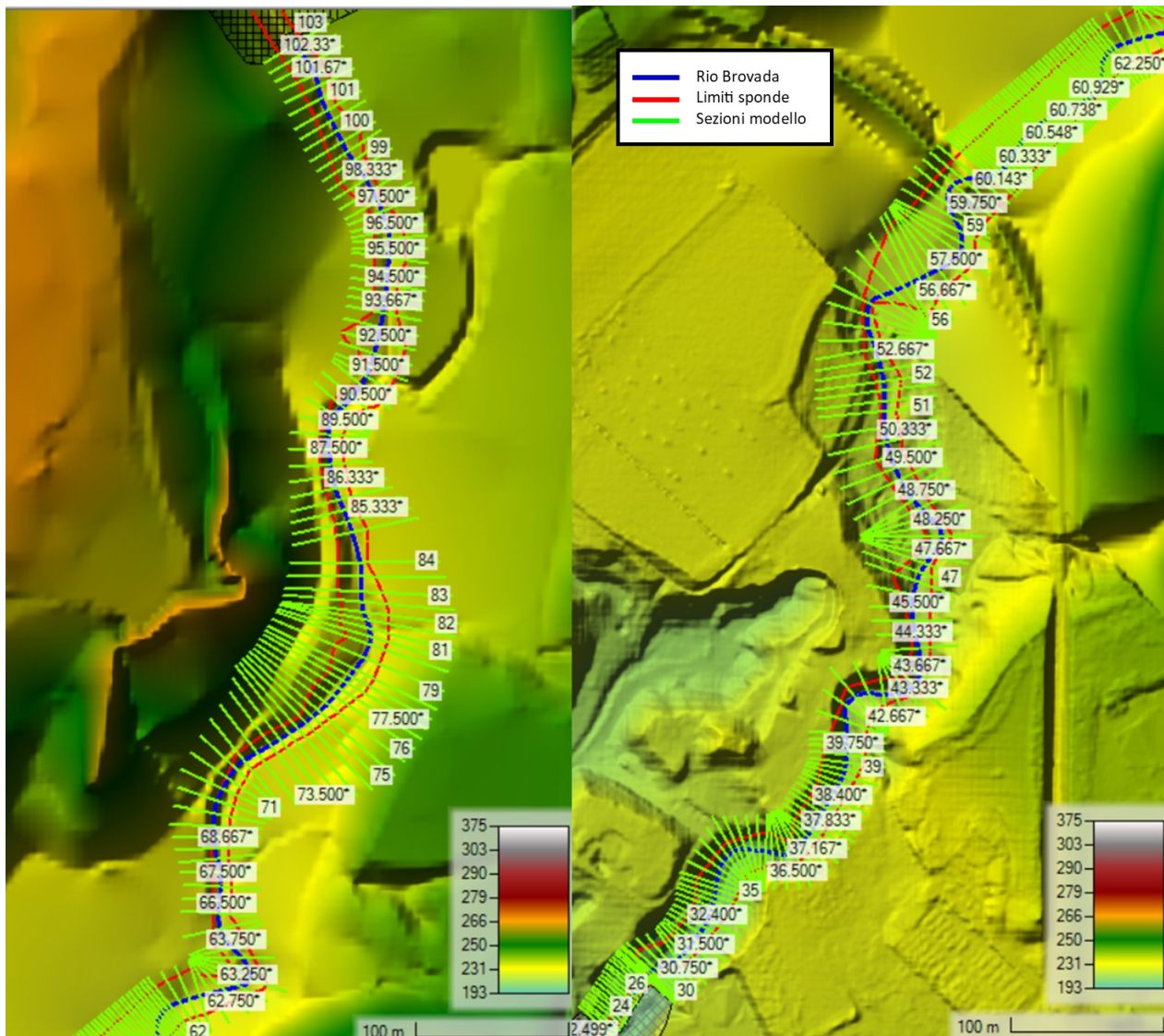


Figura 29: planimetria del modello geometrico del tratto C (spezzone di monte a sx, spezzone di valle a dx). Si nota distintamente il passaggio dal DTM5 al DTM1 all'altezza della sezione 52

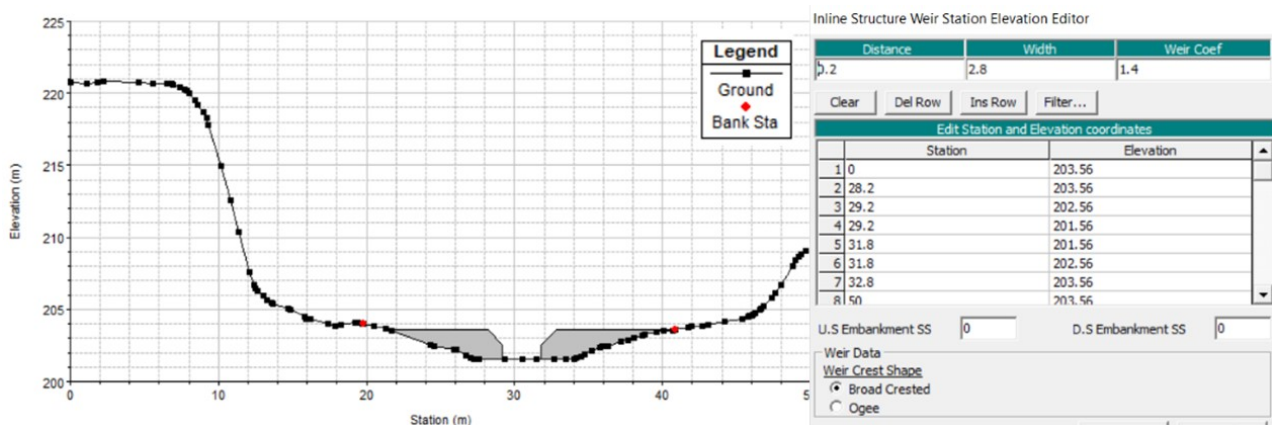


Figura 30: vista di monte e parametri dell'elemento tipo "inline structure" che rappresenta la briglia alla sezione 28.5

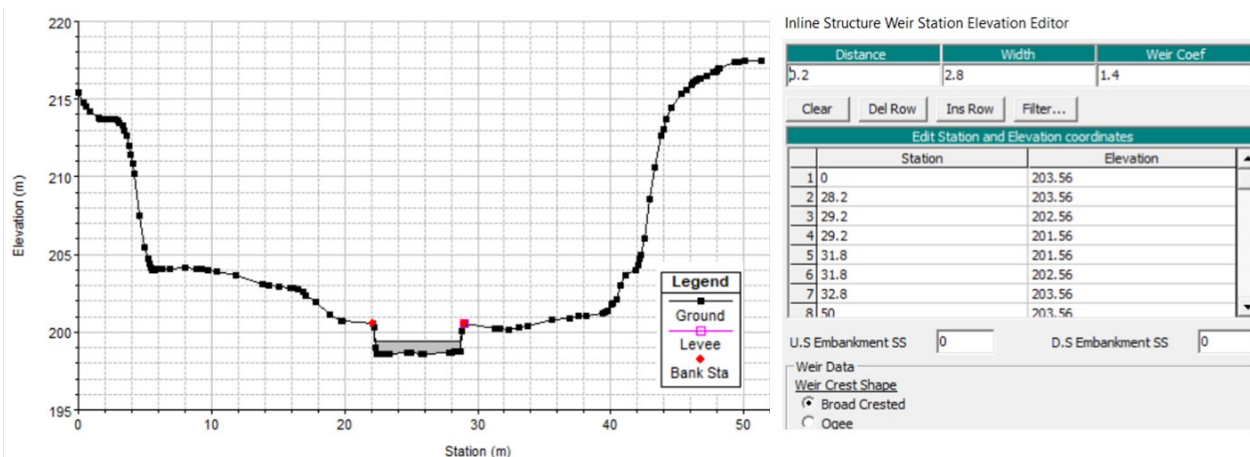


Figura 31: vista di monte e parametri dell'elemento tipo "inline structure" che rappresenta la controbriglia alla sezione 26.5

Tratto D

L'ultimo tratto indagato, costituito dal tratto terminale del corso d'acqua prima della sua confluenza nel fiume Lambro, all'interno della frazione di Ponte Albiate, in Comune di Triuggio, è il tratto di maggiore interesse ai fini della modellazione idraulica del presente lavoro. Esso, infatti, nonostante le dimensioni contenute (circa 160 metri all'1.2% di pendenza dell'alveo), attraversando un centro urbanizzato:

- contiene diversi elementi (abitazioni, esercizi commerciali, strade) esposti e vulnerabili nei confronti di un possibile fenomeno di esondazione;
- è stato forzato all'interno di un canale artificiale per gli ultimi 120 metri circa, struttura che si è già più volte dimostrato idraulicamente insufficiente a contenere eventi meteorologici sopra i dieci anni di tempi di ritorno.

Per questa ragione, si è posta particolare attenzione alla modellazione del tratto terminale del corso d'acqua, optando per un sistema ibrido mono e bidimensionale, al fine di riuscire a cogliere al meglio i vari aspetti da indagare durante il passaggio dell'onda di piena di progetto. In particolare:

- l'alveo del Rio Brovada è stato modellato come un'asta monodimensionale, composta da:
 - 54 sezioni (di cui 19 da DTM e 35 interpolate), a una distanza media di circa 3 metri tra di loro, dalla sezione 26 alla sezione 8 (le ultime due sono già interne al Fiume Lambro). Il coefficiente di scabrezza di Manning mantiene gli stessi valori adottati per l'intero corso d'acqua per alveo e sponde (rispettivamente 0.035 e $0.06 \text{ s/m}^{1/3}$) fino alla sezione 22, dove inizia l'alveo artificializzato, a cui è stato assegnato un valore di scabrezza, a valle di un adeguato processo di taratura, pari a $0.02 \text{ m/s}^{1/3}$;
 - 3 elementi tipo "lateral structure" (sfioratori laterali):
 - l'elemento "25.99", situato in sinistra idraulica tra le sezioni 26 e 22 (41.3 metri di sviluppo complessivo), gestisce lo scambio di acqua tra l'alveo e la corrispondente area perfluviale, prima dell'artificializzazione del corso d'acqua. Tale area è privata e mantenuta a prato, separata dal Rio Brovada tramite un arginello di terra posto al di sopra in un basamento in muratura, di altezza attorno ai 2 metri. L'elemento modellato segue il profilo dello spartiacque e le sue caratteristiche sono sintetizzate in Figura 32,

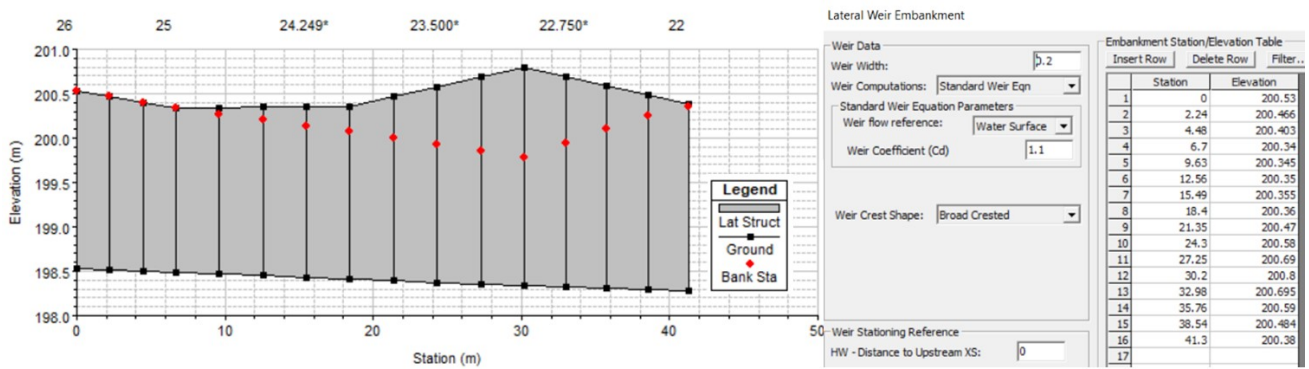


Figura 32: vista di monte e caratteristiche dell'elemento tipo "lateral structure" 25.99

- l'elemento 20.99, situato ancora in sinistra idraulica tra le sezioni 21 e 13 (90.4 metri di sviluppo longitudinale, altezza variabile 1.2-2 metri), in questo caso rappresenta il muretto di sponda in calcestruzzo che separa l'alveo artificializzato da Via Brovada e dai relativi edifici, a monte dell'attraversamento di Piazzale Boretti. Profilo e proprietà sono visibili in Figura 33;

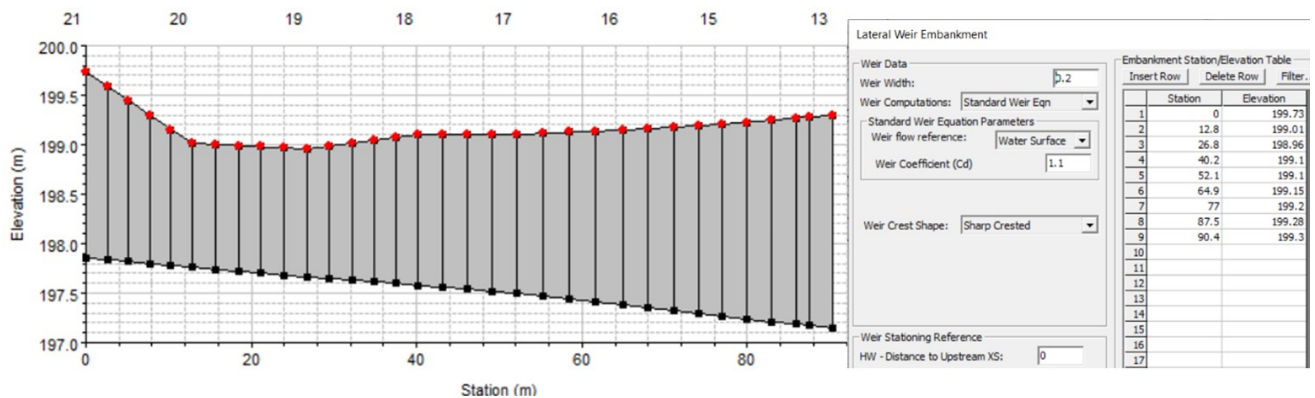


Figura 33: vista di monte e caratteristiche dell'elemento tipo "lateral structure" 20.99

- l'elemento 20.98, situato in destra idraulica parallelamente al precedente (90.4 metri di sviluppo longitudinale, altezza variabile 1.8-2.3 metri), rappresenta il muro di sponda in muratura e calcestruzzo che separa l'alveo artificializzato dal cortile/area box esterna di un edificio residenziale adiacente al corso d'acqua. Profilo e proprietà sono visibili in Figura 34;

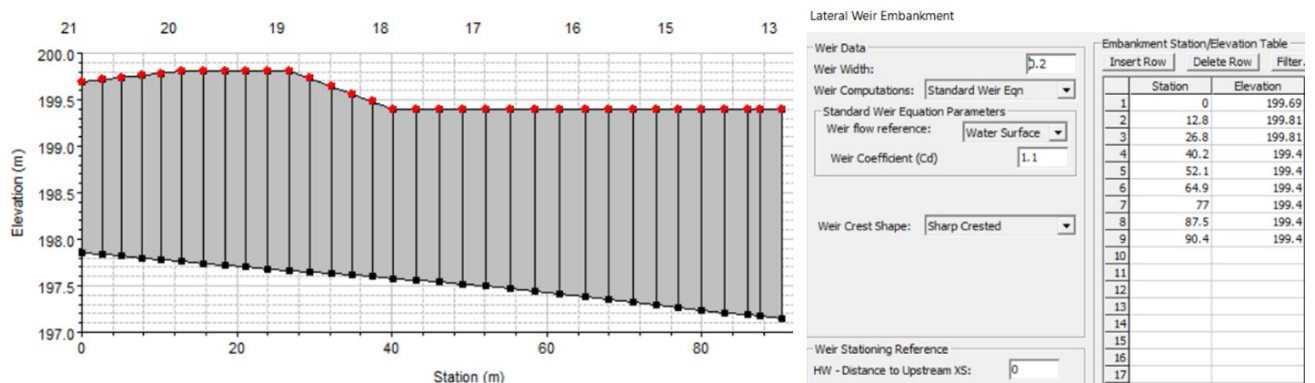


Figura 34: vista di monte e caratteristiche dell'elemento tipo "lateral structure" 20.98

Oss: anche per gli sfioratori laterali, Hec-Ras fornisce la possibilità di scegliere se trattarli come stramazzi o se adottare anche per essi le equazioni di moto vario. Anche in questo caso, si è optato per la seconda opzione per tutte e tre le strutture, giudicandola la migliore dal punto di vista della rappresentazione fisica della realtà e della stabilità del modello, a valle di alcune simulazioni di tentativo.

- 2 elementi di tipo "inline structures" (briglie):
 - l'elemento "21.5", consistente in un piccolo salto (50 cm) in massi cementati, tra le sezioni 22 e 21, che segna il termine dell'alveo (semi)naturale e l'inizio del tratto artificializzato. Sezione e principali caratteristiche della briglia sono riassunte in *Figura 35*;
 - Oss: l'utilizzo di una UFA in corrispondenza del ciglio di sponda destro è servito a considerare il muro (di fatto il prolungamento dell'elemento "20.98") che interrompe trasversalmente la sponda destra.

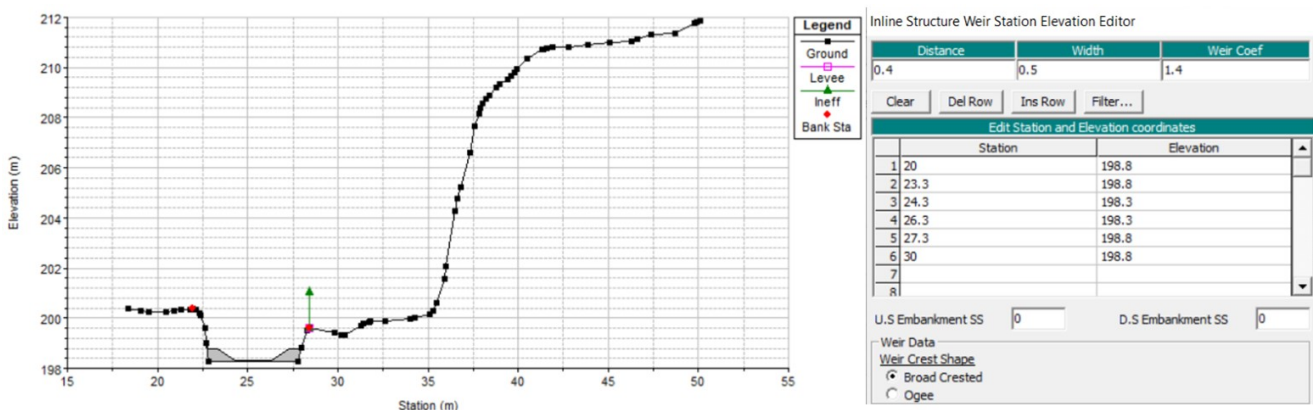


Figura 35: vista di monte e caratteristiche dell'elemento tipo "inline structure" 21.5

- l'elemento "9.5", che rappresenta il salto (di circa 1.7 metri) che la Brovada compie in ingresso al Fiume Lambro. La scelta di modellare il corso d'acqua fino all'interno della sua confluenza con il Lambro è frutto di processo di ricerca della configurazione migliore per tentativi, considerando che l'asta 1D della Brovada comunica con la circostante area bidimensionale descritta di seguito. Sezione e caratteristiche della briglia sono riassunte in *Figura 36*;

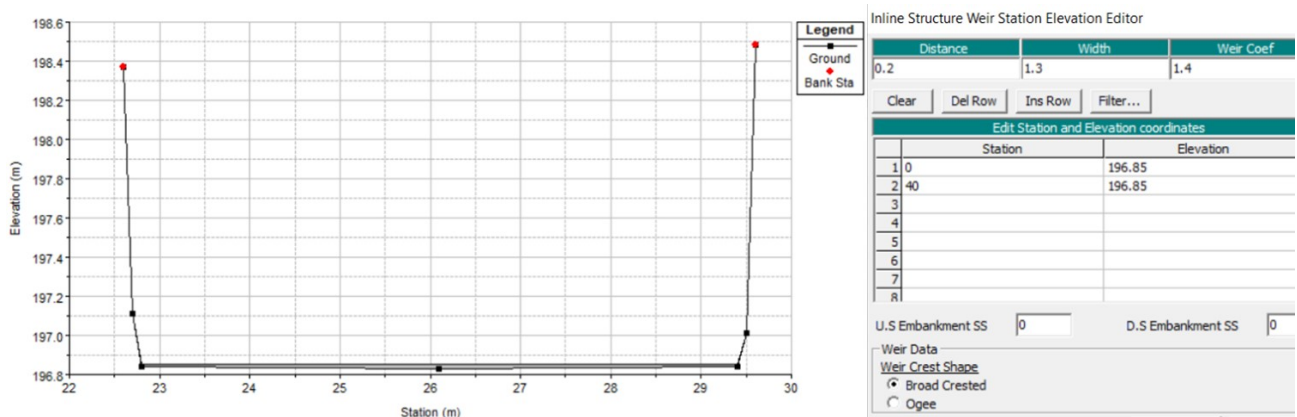


Figura 36: vista di monte e caratteristiche dell'elemento tipo "inline structure" 9.5

- 1 elemento di tipo "bridge", a rappresentare l'attraversamento carrabile che da Via Vittorio Veneto conduce in Piazza Boretti, situato tra le sezioni 13 e 12 dell'asta fluviale (elemento. "12.5"). Si tratta di un ponte in calcestruzzo a sezione rettangolare, di lunghezza pari a 16.5 metri, larghezza e altezza crescenti verso valle (rispettivamente, da 4.3 a 6.7 metri e da 1.6 a 1.7 metri). Le sezioni di monte e di valle, unitamente alle principali caratteristiche dell'elemento, sono riportate in *Figura 37*;

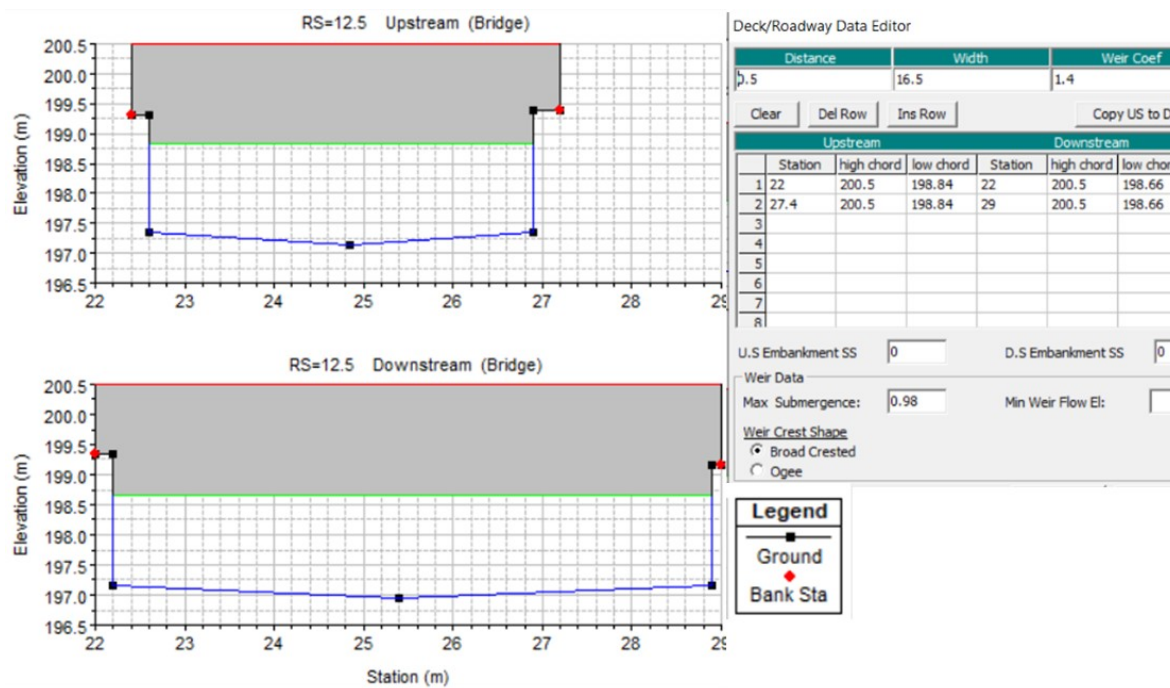


Figura 37: viste di monte e di valle e caratteristiche dell'elemento tipo "bridge" 12.5

- la località Ponte Albiate, nella sua parte maggiormente prossima al corso d'acqua (Via Brovada, Via Vittorio Veneto, Piazza Boretti), è stata modellata come un'area 2D (*Figura 38*) con le seguenti caratteristiche:
 - elemento di tipo "2D flow area", costituito da una mesh non strutturata di 1632 elementi, aventi di base forma quadrata di lato 5 m, ridotta progressivamente fino a 2 m in corrispondenza delle break lines (5) e delle refinement regions (12) aggiunte, tracciate per meglio adattare la mesh all'orografia del terreno, facilitando così la fase computazionale. All'area è stato assegnato un coefficiente di scabrezza di manning pari a $0.025 \text{ m/s}^{1/3}$, con le eccezioni delle aree vegetate ($0.06 \text{ m/s}^{1/3}$) e dell'alveo del Fiume Lambro ($0.035 \text{ m/s}^{1/3}$);
 - l'area comprende anche il tratto di Fiume Lambro indagato, per un totale di circa 200 metri a cavallo della confluenza. Due condizioni al contorno di monte e di valle, descritte in dettaglio nel relativo paragrafo, ne regolano il profilo di base al netto dell'apporto del Rio Brovada.

Costruendo il modello in tal modo, l'asta monodimensionale del Torrente Brovada interagisce con l'area 2D mediante gli sfioratori laterali e lo sbocco nel Fiume Lambro alla sezione 8, garantendo un'adeguata corrispondenza alla realtà nella simulazione del processo di esondazione e consentendo allo stesso tempo di valutare con grande dettaglio alcuni aspetti (profilo di moto all'interno dell'alveo, portata esondata attraverso gli scolmatori, etc.) che sarebbe stato difficile quantificare accuratamente utilizzando un modello solamente bidimensionale per l'intero tratto.

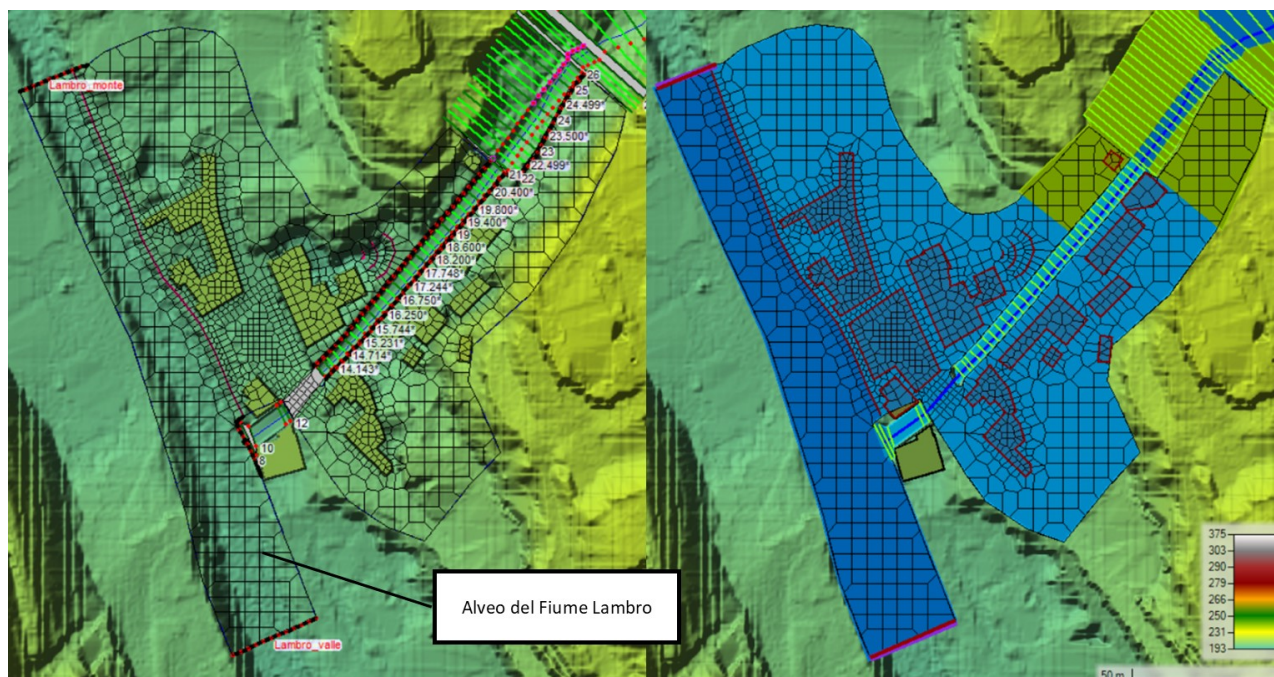


Figura 38: planimetria del tratto D a base DTM (sx) e valori di scabrezza di Manning (dx)

4.3.1.2. Condizioni al contorno e condizioni iniziali

Condizioni al contorno e condizioni iniziali sono elementi indispensabili nella modellazione numerica di un problema di moto vario, in quanto consentono di inizializzare le variabili incognite ai limiti del dominio spaziale (le condizioni al contorno) e temporale (le condizioni iniziali) di un problema altrimenti indeterminato.

Le condizioni al contorno utilizzate presenti nel modello implementato sono le seguenti:

- idrogrammi di piena "concentrati": idrogrammi ricavati dall'analisi afflussi-deflussi descritta nello studio idrologico per i vari sottobacini del Rio Brovada, e riportati in allegato A. Vengono introdotti nel modello idraulico in sezioni specifiche (206, 176, 90), oppure come condizione al contorno di un'area 2D (condizione "BC1" per l'area 2D del cimitero di Calò), in corrispondenza delle confluenze dei vari impluvi affluenti al torrente;
- idrogrammi di piena "distribuiti": anch'essi ricavati dall'analisi afflussi-deflussi e riportati in allegato A, sono le portate generate dai sottobacini afferenti direttamente all'asta del Torrente Brovada, pertanto, si è reputato più corretto inserirli nel modello in maniera uniformemente distribuita su più sezioni del medesimo sottobacino (sez. 205 – 177, 175 – 174.5, 102 – 91, 89 – 13) anziché concentrata in un'unica sezione come nel caso precedente;
- Fiume Lambro: come anticipato al paragrafo precedente, il tratto di Fiume Lambro considerato è stato modellato come una parte dell'area bidimensionale di valle, inclusiva del letto del corso d'acqua. Il flusso all'interno del fiume, al netto dell'apporto del Torrente Brovada alla rispettiva confluenza, è governato da una coppia di condizioni al contorno imposte direttamente lungo il perimetro dell'area 2D:
 - condizione di monte ("Lambro monte"): condizione di tipo "flow hydrograph", fornisce l'idrogramma in ingresso al corso d'acqua, consistente nello specifico in un idrogramma costante pari a $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Tale valore di portata, considerabile come un valore di portata leggermente superiore al valore di magra per il Fiume Lambro settentrionale, è stato

appositamente scelto in modo da garantire che il livello idrico all'interno del Lambro non andasse a influenzare l'esondazione indotta dal Rio Brovada nella frazione di Ponte Albiate mediante il verificarsi di rigurgito in quest'ultimo. Tale scelta è giustificata dalle seguenti considerazioni:

- i due corsi d'acqua hanno caratteristiche idrologiche e idrauliche molto differenti: se il Rio Brovada possiede, come illustrato nello studio idrologico, un tempo di corrivazione di circa 2 ore, il Fiume Lambro – all'altezza di Triuggio – collette un bacino molto più ampio, possedendo delle dinamiche corrivative molto più lente (circa un ordine di grandezza), risente poco degli eventi – brevi e intensi – che risultano critici per il Torrente Brovada, per cui è lecito attendersi livelli del primo relativamente bassi quando il secondo risulta invece in piena;
- l'aumento del tirante idrico nel Fiume Lambro, fino a una potenziale esondazione di Piazza Boretti da parte di quest'ultimo, sarebbe essenzialmente indipendente dalla realizzazione dell'opera in progetto, pertanto, l'analisi dello stato di fatto e di progetto in condizioni di Lambro "alto" non permetterebbe di rilevare differenze apprezzabili, e dunque di giudicare adeguatamente l'effetto della realizzazione dell'opera di regolazione;
- condizione di valle ("Lambro valle"): condizione di tipo "normal depth", che assegna al limite inferiore del corso d'acqua una situazione di moto uniforme, del tutto accettabile nel presente caso per il Fiume Lambro.

Relativamente alle condizioni iniziali, invece, le uniche inizializzazioni richieste dal programma riguardano i valori di monte dei due tratti del Rio Brovada modellati come asta monodimensionali:

- il tratto A, alla sezione 206;
- il tratto C, alla sezione 103.

In entrambi casi si è assegnato il valore corrispondente alla portata di base generata dagli idrogrammi inseriti come condizione al contorno lungo le varie sezioni del corso d'acqua, ovvero rispettivamente 0.1 e 0.5 m³/s (a tutti gli idrogrammi in ingresso è stata assegnata una portata di base minima pari a 0.1 m³/s, trascurabile a livello idraulico ma necessaria in quanto il programma non prevede una situazione completamente asciutta per i tratti di aste monodimensionali),

4.3.1.3. Durata della simulazione e passo temporale

La durata della simulazione deve essere sufficientemente grande da garantire il decorso del fenomeno analizzato (in questo caso il passaggio dell'onda di piena), fino al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio. Come spesso accade, anche in questo caso si è proceduto per tentativi tenendo in considerazione i valori dei tempi di formazione della breccia, e giungendo a una durata della simulazione di 8 ore.

Il passo temporale (Δt [s]), nelle analisi di moto vario, si determina solitamente mediante la regola di Courant:

$$C_r = \frac{v_w \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$
$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_w}$$

dove Δx [m] è la distanza media tra sezione (1D) o la dimensione lineare media delle celle (2D), C_r è il valore del numero di Courant e v_w [m/s] è la celerità di propagazione dell'onda, stimabile in prima approssimazione

per gli alvei naturali (limite superiore) come 1.5 volte la massima velocità media della corrente in una data sezione/cella.

Il valore del numero del numero di Courant deve essere inferiore a 1 per le simulazioni che prevedono la risoluzione delle equazioni di moto vario in forma completa (come nel presente caso), al fine di garantire la stabilità del modello.

Considerando un Δx mediamente pari a 3 metri e un valore massimo della velocità media intorno a 3 m/s si ottiene un valore di Δt inferiore a 0.67 secondi. Stabilito il limite superiore del passo temporale, si è proceduto per tentativi alla ricerca del valore ottimale che minimizzasse gli errori computazionali, imponendo uno scarto massimo di 2 cm, garantendo dei tempi di simulazione accettabili. Si è dunque optato per un passo temporale variabile, pari a 0.5 secondi nelle fasi di crescita e di coda degli idrogrammi (tra 0 e 1.5 ore, e tra 4.5 e 8 ore), mentre nella fase centrale (tra 1.5 e 4.5 ore), in corrispondenza del picco di piena, si è adottato un passo pari 0.1 secondi.

4.4. Configurazione di progetto

Rispetto alla configurazione di stato di fatto, la configurazione di progetto risulta identica in ogni elemento di modellazione, eccezion fatta per il tratto B, in cui viene inserita l'opera di regolazione immediatamente a valle della briglia esistente. In questa parte ci si limiterà dunque alla descrizione della nuova configurazione del tratto B, a valle di una breve presentazione delle caratteristiche dell'opera.

4.4.1.1. Opera di regolazione in progetto

L'opera di regolazione, osservabile in dettaglio nelle tavole di progetto di cui si riporta uno stralcio della sezione longitudinale in Figura 39, presenterà le seguenti caratteristiche:

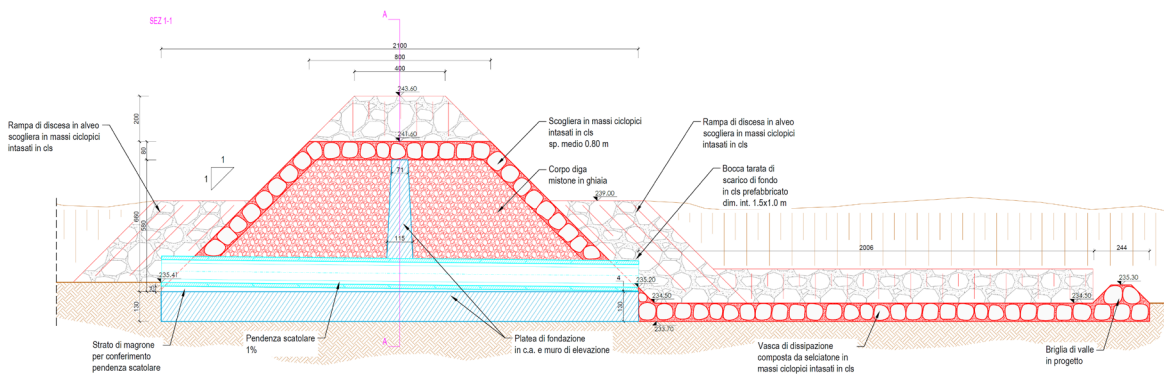


Figura 39: sezione longitudinale dell'opera di regolazione in progetto

- struttura mista, avente una fondazione e un setto centrale in calcestruzzo armato, corpo in terra (mistone di ghiaia), paramenti e coronamento corazzati in massi ciclopici intasati in calcestruzzo. Lunghezza al fondo 21 metri, al coronamento 4 metri.
- sezione longitudinale trapezoidale, pendenza delle spalle 1:1;
- luce unica di fondo realizzata mediante uno scatolare in calcestruzzo armato di larghezza 1.5 metri, altezza 1 metro, lunghezza al fondo 21 metri, quota di fondo di monte 235.41 m s.l.m., pendenza del fondo 1%.
- sfiatore di superficie a sezione trapezoidale avente le seguenti caratteristiche: quota di massima regolazione 241.6 m s.l.m., quota di coronamento 243.6 m s.l.m., larghezza di base 6.5 metri,

pendenza dei raccordi 2:3, larghezza al coronamento 12.5 metri; lunghezza del coronamento pari a 4 metri;

- bacino di dissipazione in massi cementati a valle dell'opera, per una lunghezza di 20 metri, chiuso da una controbriglia in massi cementati con le seguenti caratteristiche: sponde 1:1, quota di coronamento 235.2 m s.l.m., larghezza del coronamento 0.5 m;
- argine di raccordo in sinistra idraulica tra l'opera di regolazione e Via della Valle in terra rinforzata, altezza progressivamente decrescente da circa 4.5 metri (al ciglio di sponda) fino a raccordarsi al terreno esistente nei pressi della strada.

Le dimensioni della luce di fondo e dello sfioratore superficiale sono state definite per tentativi, dovendo rispondere a diverse esigenze:

- garantire una dimensione della luce di fondo sufficientemente grande da scongiurare il pericolo di potenziali intasamenti, ma non eccessivamente grande in modo da poter avere un impatto significativo anche su eventi di tempo di ritorno inferiore rispetto a quello di progetto;
- avere un'altezza di massimo invaso (che risulterà essere pari a 242.25 m s.l.m.) inferiore alla quota minima di Via della Valle, che si trova in corrispondenza dell'attraversamento del corso d'acqua e risulta pari a 242.7 m s.l.m. La scelta di tale vincolo è stata fatta reputandola un giusto compromesso tra l'ottimizzazione del volume di invaso della vasca e il danno procurato agli elementi esposti nei dintorni (comunque contenuto);
- garantire almeno 1 metro di franco di sicurezza rispetto alla quota di coronamento, secondo quanto previsto dalla LR 8/98 per questa categoria di opere.

L'opera di regolazione, alla quota di massimo invaso, genera un volume invasato pari a circa 50'000 m³, come riportato dalla curva altezza-volume dell'area di monte (compresa tra Via della Valle e l'opera) riportata Figura 40.

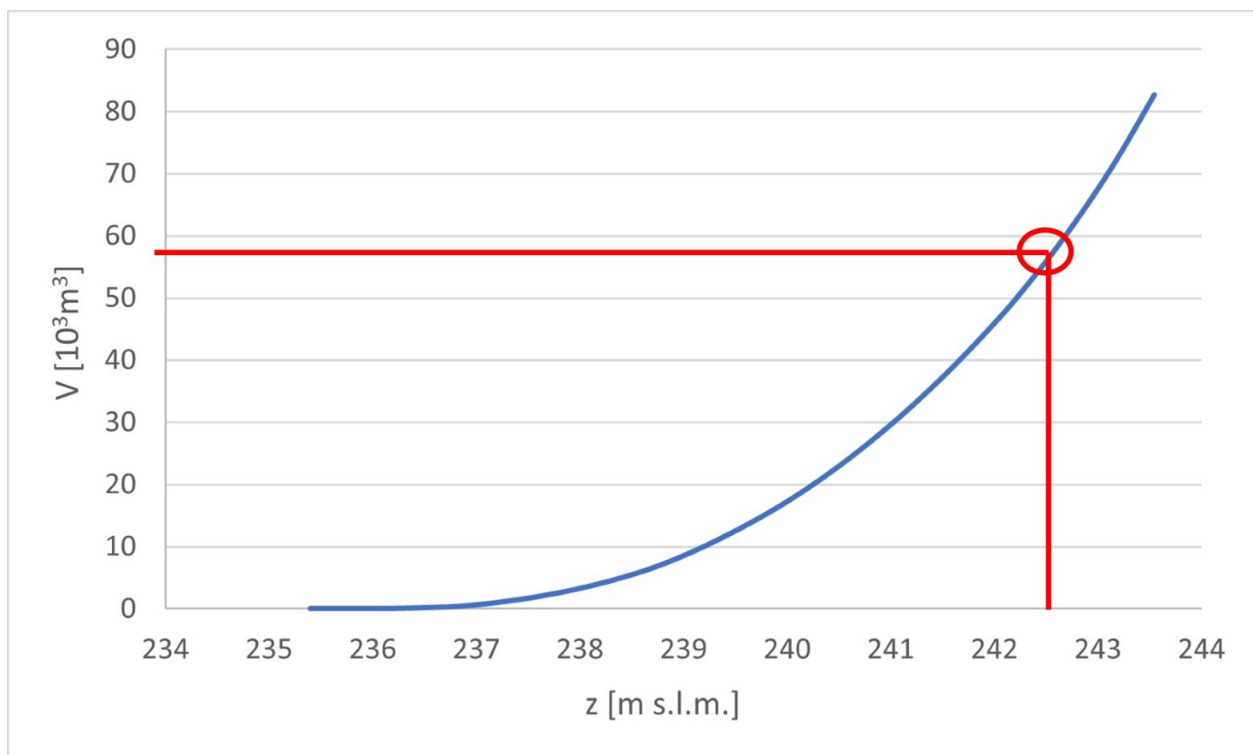


Figura 40: curva di invaso dell'area di laminazione a monte dell'opera di regolazione

Con la REV 02 di progetto (giugno 2023) sono state apportate modifiche significative alla configurazione originaria dell'opera di regolazione, a valle del recepimento delle richieste di integrazioni formulate dalla commissione VIA chiamata a valutare il progetto definitivo dell'intervento dell'ambito del Procedimento Autorizzatorio Unico Regionale (PAUR) a cui è stato sottoposto, e in particolare riferimento al seguente punto:

- "dovrà essere valutata, in alternativa all'attuale soluzione che prevede la realizzazione di una tombinatura con sezione $1 \times 1,50$ per uno sviluppo lineare superiore a 20 metri, un'altra modalità progettuale che riduca la lunghezza di tale tombinatura in relazione alla criticità di accesso e pulizia in caso di ostruzione, mantenendo il più possibile a cielo aperto tale alveo artificiale"

A questo proposito, la soluzione individuata è stata quella di sostituire la tombinatura con un canale a cielo aperto di larghezza 2.5 metri e sviluppo lineare analogo (21 metri), inserendo una luce di fondo con sezione 1.5×2 metri (B x H) in corrispondenza del setto in c.a. che costituisce il nucleo dello sbarramento. Tale luce di fondo è stata dotata di paratoia regolabile manualmente e solo in condizioni di magra: non è stata infatti concepita come strumento di regolazione dell'invaso ma con funzione di taratura della bocca di scarico a valle degli eventi di piena. Adottando la soluzione appena descritta (di cui si riporta uno stralcio di sezione longitudinale in Immagine 1):

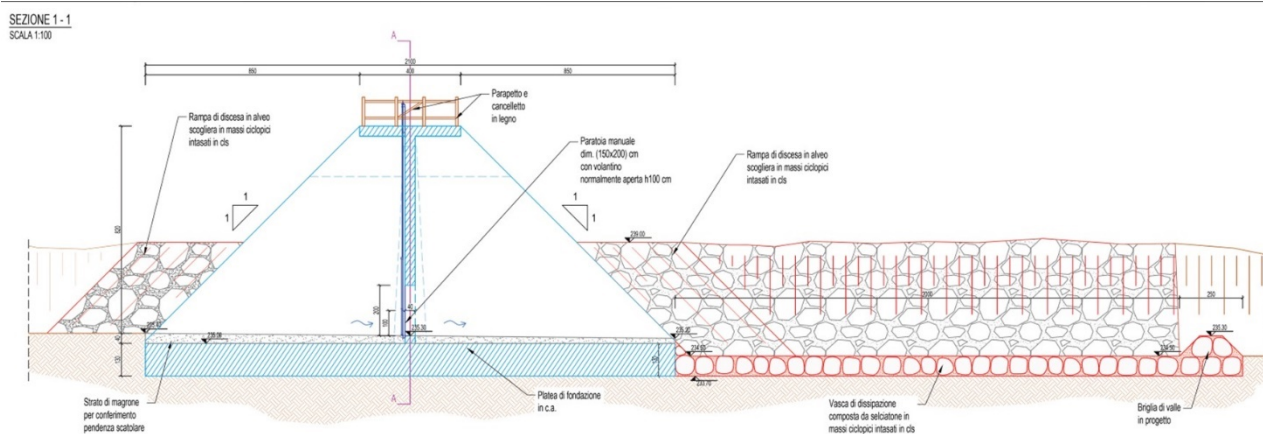


Immagine 1: sezione longitudinale dell'opera di regolazione in progetto (REV 02)

- si è riusciti ad adempiere alla richiesta formulata dalla commissione VIA, ottenendo un canale di scarico interamente a cielo aperto e di larghezza adeguata a consentirne la manutenzione;
- le modifiche strutturali e geometriche al progetto vengono minimizzate, mantenendo sia il nucleo in c.a. che il corazzamento in massi, con lo sbarramento che rimane essenzialmente invariato a livello planimetrico e volumetrico;
- è stata spostata la posizione dello stramazzo di troppo pieno vista la presenza della paratoia, ora situata in sinistra idraulica all'altezza della sponda (interamente protetta a valle da scogliera in massi ciclopici). La larghezza di base dello stramazzo è stata inoltre ridotta da 6.5 a 4 metri, al fine di garantire lo scarico di quest'ultimo comunque all'interno dell'alveo inciso, mentre le altre caratteristiche sono state mantenute invariate;
- configurando l'apertura dello scarico di fondo, almeno inizialmente, uguale alle dimensioni previste della tombinatura originaria (1.5×1 m [B x L]), la risposta idraulica dell'asta fluviale in condizioni di progetto rimane invariata. Tuttavia, come illustrato in dettaglio nei paragrafi successivi, si è deciso almeno inizialmente, di imporre l'apertura della luce di fondo a 1.5×1.5 m. Questo incremento, in

termini di altezza di massimo invaso, controbilancia la riduzione dello stramazzo, portando a un risultato molto simile alla condizione originaria.

Naturalmente, l'incremento delle dimensioni della luce di fondo comporta – come dettagliato nel seguito – una (lieve) riduzione dell'altezza di massimo invaso, passando da 242.55 m s.l.m. a 242.25 m s.l.m., con corrispondente riduzione del volume di invaso da 57'000 m³ a 50'000 m³.

4.4.1.2. Geometria e proprietà idrauliche del modello

Tratto B

Anche per la configurazione di progetto l'intera area compresa tra il termine del tratto A (sez. 174) e l'inizio del tratto C (sez. 103) viene modellata in 2D, con la differenza che questa volta si sono utilizzati due elementi tipo "2D area" distinti, separati dall'opera di regolazione, inserita immediatamente a valle della briglia esistente.

Il tratto B si compone dunque dei seguenti elementi:

- area 2D a monte dell'opera di regolazione, che rappresenta il bacino di invaso. Elemento di tipo "2D flow area", costituito da una mesh non strutturata di 3321 elementi, aventi di base forma quadrata di lato 5 m, ridotta progressivamente fino a 1 m in corrispondenza delle break lines (11) e delle refinement regions (1) aggiunte, tracciate per meglio adattare la mesh all'orografia del terreno, facilitando così la fase computazionale. All'area è stato assegnato un coefficiente di scabrezza di manning pari a $0.035 \text{ m/s}^{1/3}$, con la sola eccezione del manto di Via della Valle, a cui è stato assegnato il valore di $0.013 \text{ m/s}^{1/3}$;
- area 2D a valle dell'opera di regolazione. Elemento di tipo "2D flow area", costituito da una mesh non strutturata di 3321 elementi, aventi di base forma quadrata di lato 5 m, ridotta progressivamente fino a 2 m in corrispondenza delle break lines (1) e delle refinement regions (1) aggiunte, tracciate per meglio adattare la mesh all'orografia del terreno, facilitando così la fase computazionale. All'area è stato assegnato un coefficiente di scabrezza di manning pari a $0.035 \text{ m/s}^{1/3}$, con la sola eccezione del bacino di dissipazione, a cui è stato assegnato il valore di $0.1 \text{ m/s}^{1/3}$ in considerazione delle macroscabrezze aggiuntive fornite dai massi.
- 1 elemento di tipo "SA/2D area connection", posto in connessione tra le due aree bidimensionali, che rappresenta l'opera di regolazione. La luce di fondo è stata modellata come un elemento di tipo "Culvert", mentre lo sfioratore superficiale funziona come uno stramazzo a larga soglia. La vista di monte e le principali caratteristiche dell'opera sono riportate in *Figura 41*;

Con la REV 02 si mantiene l'elemento "SA/2D area connection" in rappresentazione dello sbarramento, con le seguenti modifiche:

- *l'elemento di tipo "culvert", in rappresentanza della tombinatura, è stato sostituito da un elemento di tipo "gate", dove sono sintetizzate le caratteristiche della luce a battente di fondo:*
 - *quota di fondo: 235.3 m s.l.m.;*
 - *sezione rettangolare, $1.5 \times 2 \text{ m}$ [$B \times H$];*
 - *coefficiente a flusso libero 0.6, a flusso rigurgitato 0.8;*
- *lo sfioratore di superficie viene spostato in posizione asimmetrica (sx) rispetto alla luce di fondo, e ristretto di 2.5 metri ($b = 4 \text{ m}$, $B = 10 \text{ m}$).*

Il confronto tra la versione originaria (REV01) e quella attuale (REV02) dell'opera è illustrato in figura

- 1 elemento di tipo "SA/2D area connection", posto 20 metri a valle dell'opera di regolazione, all'interno dell'area 2D a valle della stessa, a rappresentare la controbriglia che chiude il bacino di dissipazione dell'opera. Vista di monte e proprietà sono riportate in *Figura 42*.

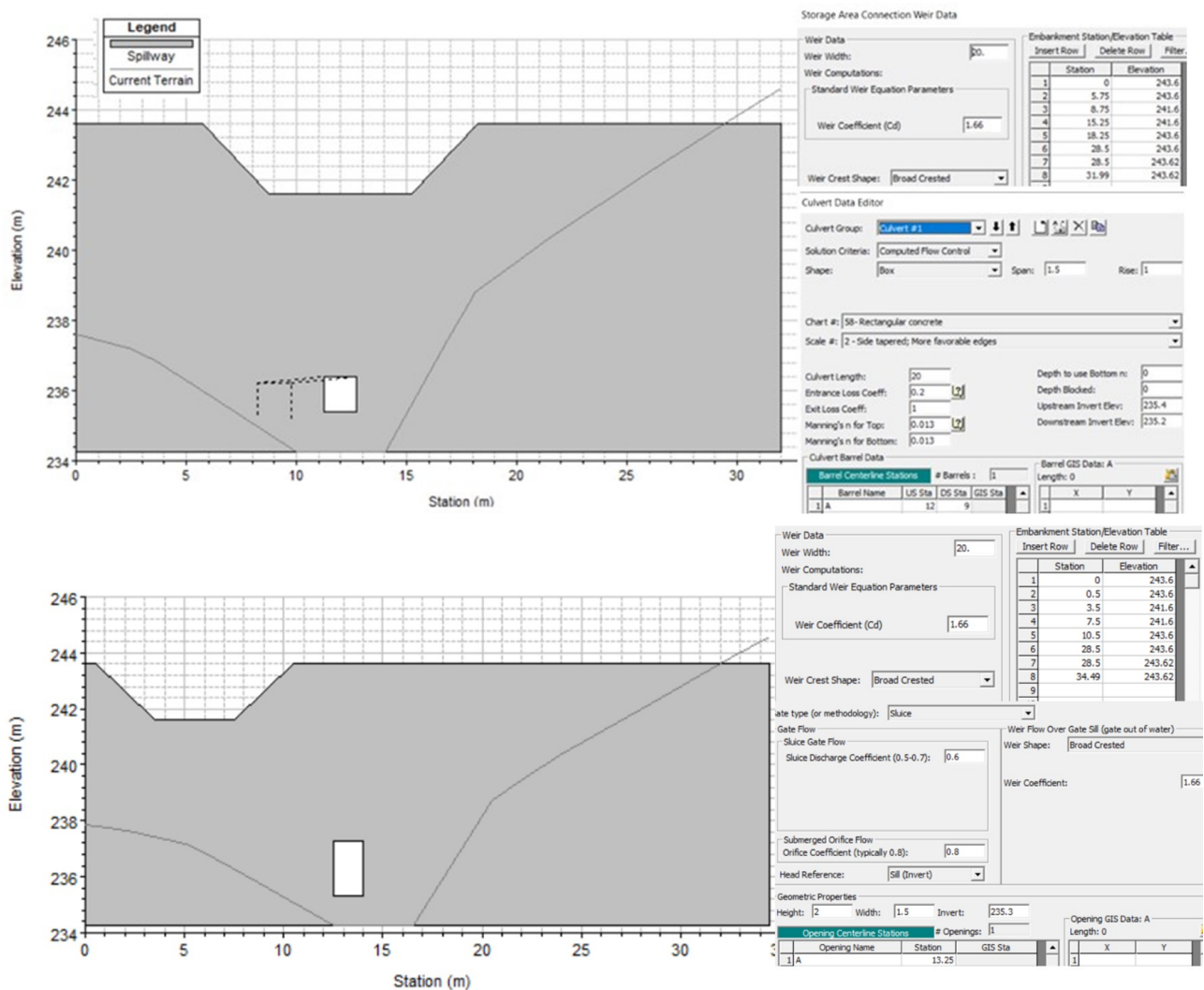


Figura 41: vista di monte e proprietà opera di regolazione in progetto originaria (REV01, in alto) e attuale (REV02, in basso)

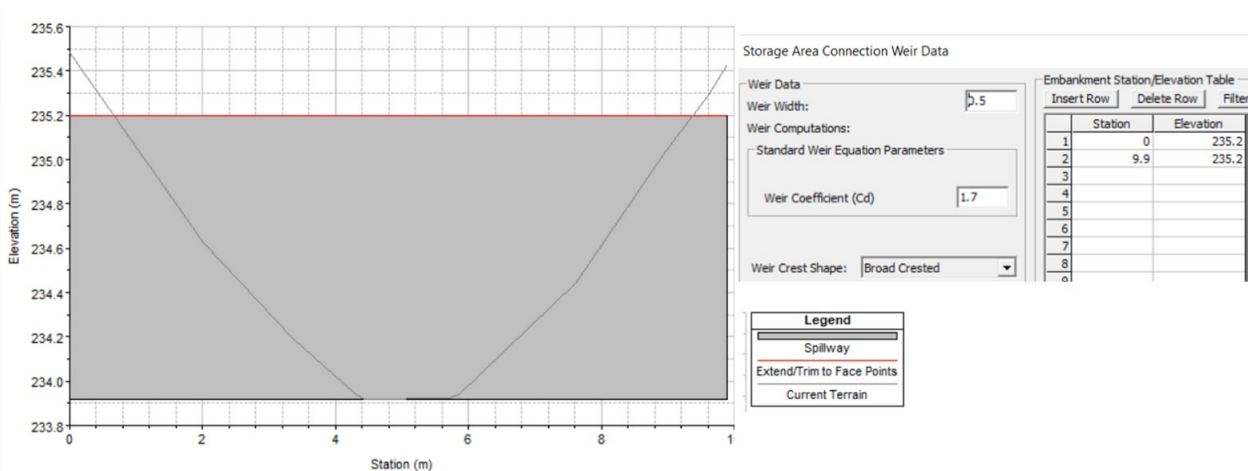


Figura 42: vista di monte e proprietà della controbriglia a valle del bacino di dissipazione in progetto

4.5. Risultati ottenuti

Premessa importante alla REV02: le modifiche introdotte alla geometria dello sbarramento (variazione della luce di fondo e dello stramazzo) hanno portato cambiamenti (positivi) nei risultati ottenuti che, pur limitati in termini assoluti, sono sufficientemente significativi, a parere dello scrivente, da necessitare la revisione di quanto presentato con la REV01.

Considerata tuttavia la mole e la tipologia di risultati illustrati, mostrare integralmente il confronto tra la versione originaria e il presente aggiornamento renderebbe la presentazione troppo pesante e confusionaria. Si è dunque deciso di illustrare solamente i risultati riferiti allo stato aggiornato dello sbarramento (REV02), limitandosi a sottolineare le differenze con la versione precedente ogniqualevolta ritenuto necessario. Un sotto capitolo conclusivo (4.5.2) è stato in ultimo dedicato all'analisi dello stato di progetto al variare dell'apertura della paratoia posta a monte della luce di fondo, al fine di giustificare la scelta della configurazione definitiva descritta in precedenza.

Terminata la descrizione degli scenari di stato di fatto e di progetto, e di come essi sono stati implementati all'interno di Hec-Ras, si passa alla presentazione dei risultati ottenuti, seguenti i punti successivi:

- definizione dell'evento critico;
- area del cimitero di Calò;
- area di Ponte Albiate.

Oss. vista l'estensione del modello e il numero delle simulazioni effettuate, la quantità di output prodotta dal programma è troppo elevata per poter essere riportata per intero all'interno della presente relazione, tanto più considerando che, come già scritto in precedenza, buona parte dei tratti ricompresi nel modello assumono importanza secondaria ai fini della presente analisi, essendo stati modellati solo per esigenze di accuratezza computazionale. Nei paragrafi successivi si riporteranno dunque esclusivamente gli output delle simulazioni ritenuti fondamentali a comprendere il comportamento e le conseguenze dell'evento di piena analizzato, pur rimanendo a completa disposizione nell'eventualità di una richiesta di approfondimento di alcuni temi specifici da parte degli enti e dei soggetti preposti alla verifica e all'approvazione del presente progetto.

4.5.1.1. Definizione dell'evento critico

Le direttive applicative della LR 8/98 (capitolo 7.1) prevedono per il caso in esame (opere fino a 10 metri che diano origine a un volume di invaso inferiore a 100'000 m³) l'utilizzo di un tempo di ritorno di 100 anni nella ricerca dell'evento critico. Relativamente al problema in esame, ci si è posti il problema di identificare quale fosse l'evento maggiormente gravoso da prendere come riferimento, in funzione delle variabili considerate maggiormente rilevanti, ovvero:

- per lo stato di fatto, la portata e il volume massimi esondati dal corso d'acqua nella frazione di Ponte Albiate, unitamente al massimo tirante di allagamento, misurato in Piazza Boretti;
- per lo stato di progetto, oltre alle variabili precedenti, il tirante massimo raggiunto a monte dell'opera di regolazione (altezza di massimo invaso).

Al termine del capitolo tre si è identificata la durata critica "idrologica", derivante dall'analisi afflussi-deflussi, pari a 3.75 ore per uno ietogramma triangolare, evento che ha generato il massimo valore di portata alla sezione di chiusura.

Partendo da questo dato, si è verificato il modello idraulico, in condizioni di stato di fatto e di progetto, per eventi di diversa durata (2.5, 3.75, 5 ore), andando a ricavare in ciascun caso i valori delle grandezze sopraindicate, al fine di poter effettuare un confronto e determinare così l'evento considerabile come critico per il corso d'acqua. Le grandezze di riferimento sono sintetizzate in *Tabella 10* e *Tabella 11*.

Stato di Fatto										
d [h]	Q _{max} sez 26 [m³/s]	Q _{max} sez 13 [m³/s]	Q _{max} 25.99 [m³/s]	W _{out} 25.99 [10³m³]	Q _{max} 20.99 [m³/s]	W _{out} 20.99 [10³m³]	W _{out} sx [10³m³]	Q _{max} 20.98 [m³/s]	W _{out} 20.98 [10³m³]	h _{MAX} pz. Bor. [m]
2.5	38.96	31.47	5.37	13.56	0.77	-12.9	0.66	7.63	15.46	0.78
3.75	38.16	31.42	5.02	16.99	0.74	-16.21	0.78	6.91	18.34	0.76
5	35.75	31.23	3.98	16.08	0.69	-15.33	0.75	4.7	14	0.67

Tabella 10: valori delle variabili di riferimento per la ricerca dell'evento critico in condizioni di stato di fatto

Stato di progetto											
d [h]	h _{max} ODR [m]	Q _{max} sez 26 [m³/s]	Q _{max} sez 13 [m³/s]	Q _{max} 25.99 [m³/s]	W _{out} 25.99 [10³m³]	Q _{max} 20.99 [m³/s]	W _{out} 20.99 [10³m³]	W _{out} sx [10³m³]	Q _{max} 20.98 [m³/s]	W _{out} 20.98 [10³m³]	h _{MAX} via Brov. [m]
2.5	241.99	25.99	26.33	0.3	0.47	0.54	-0.27	0.2	0	0	1.19
3.75	242.25	27.93	28.15	0.87	2	0.47	-1.81	0.19	0	0	1.3
5	242.26	28.29	28.53	1	2.58	0.42	-2.4	0.18	0	0	1.33

Tabella 11: valori delle variabili di riferimento per la ricerca dell'evento critico in condizioni di stato di progetto (REV 02)

Dai valori riportati in tabella si può dedurre che:

- eventi di durata inferiore all'evento critico "idrologico", prossimi alla durata del tempo di corrivazione (2.5 ore), rispetto a quest'ultimo:
 - in condizioni di stato di fatto, generano portate nel tratto terminale del Rio Brovada e portate esondate al di fuori del corso d'acqua leggermente superiori (10% di differenza), a fronte di volumi esondati inferiori (15-20%). Il tirante idrico misurato è lievemente superiore;
 - in condizioni di stato di progetto, tutti i parametri analizzati assumono valori moderatamente o sensibilmente inferiori;
- eventi di durata superiore all'evento critico idrologico, pari a circa il doppio rispetto al tempo di corrivazione (5 ore), rispetto a quest'ultimo:
 - in condizioni di stato di fatto, tutti i parametri analizzati assumono valori moderatamente o sensibilmente inferiori;
 - in condizioni di progetto, i parametri analizzati risultano analoghi o al più molto lievemente superiori;

Alla luce delle considerazioni sopra riportate, si conferma l'evento critico "idrologico" anche per l'analisi idraulica, sia per lo stato di fatto che per lo stato di progetto. Tale evento, infatti, è quello che genera la massima altezza di invaso dell'opera di regolazione e le condizioni di allagamento peggiori o prossime alle peggiori nella frazione di Ponte Albiate, tanto per lo stato di fatto quanto per lo stato di progetto.

Con l'incremento dell'altezza della luce di fondo in REV02, la durata critica della precipitazione si è spostata leggermente in avanti, in condizione di progetto, verso la durata di 5 ore. Tuttavia, i due eventi (3.75 e 5 ore) forniscono risultati con differenze trascurabili, anche a livello quantitativo, sia in prossimità dell'opera di regolazione che nella frazione di Ponte Albiate. Per continuità con quanto considerato sinora e con la

condizione di stato di fatto, si è ritenuto di mantenere l'evento critico originariamente anche nel presente aggiornamento.

La precipitazione critica assume dunque durata pari a 3.75 ore.

L'evento critico è stato dunque analizzato – in entrambe le condizioni – anche per tempi di ritorno inferiori all'evento di progetto, e i risultati ottenuti sono riportati nei paragrafi successivi.

4.5.1.2. Area a monte di Via della Valle (tratto A)

Il primo tratto, che va dalla sezione iniziale del modello (sez. 206) all'inizio dell'area 2D utilizzata per rappresentare il tratto B (sez. 174.5), circa 135 metri a monte dell'attraversamento di Via della Valle, non ha diretta rilevanza nel merito degli elementi trattati nel presente progetto, trovandosi a monte dell'opera di regolazione e a una distanza sufficiente da quest'ultima da non risentire del rigurgito da essa indotto in fase di invaso. Tuttavia, è stato originariamente introdotto per garantire un'adeguata inizializzazione al modello e pertanto, per completezza, se ne riporta (*Figura 43*) il profilo longitudinale delle massime altezze di pelo libero (sia di stato di fatto che di progetto, essendo identici) per gli eventi critici dei tempi di ritorno indagati (10, 20, 50 e 100 anni).

Il corso d'acqua si mantiene pressoché ovunque all'interno dell'alveo inciso, quasi sempre in corrente lenta (non si riporta l'altezza critica per evitare di appesantire ulteriormente l'immagine), non presentando situazioni particolarmente critiche, ad eccezione del prevedibile rigurgito dell'attraversamento di Via Borromeo, che genera il sormonto di quest'ultima (con tiranti limitati, non superiori a 20 cm) per eventi superiori a 50 anni di tempo di ritorno.

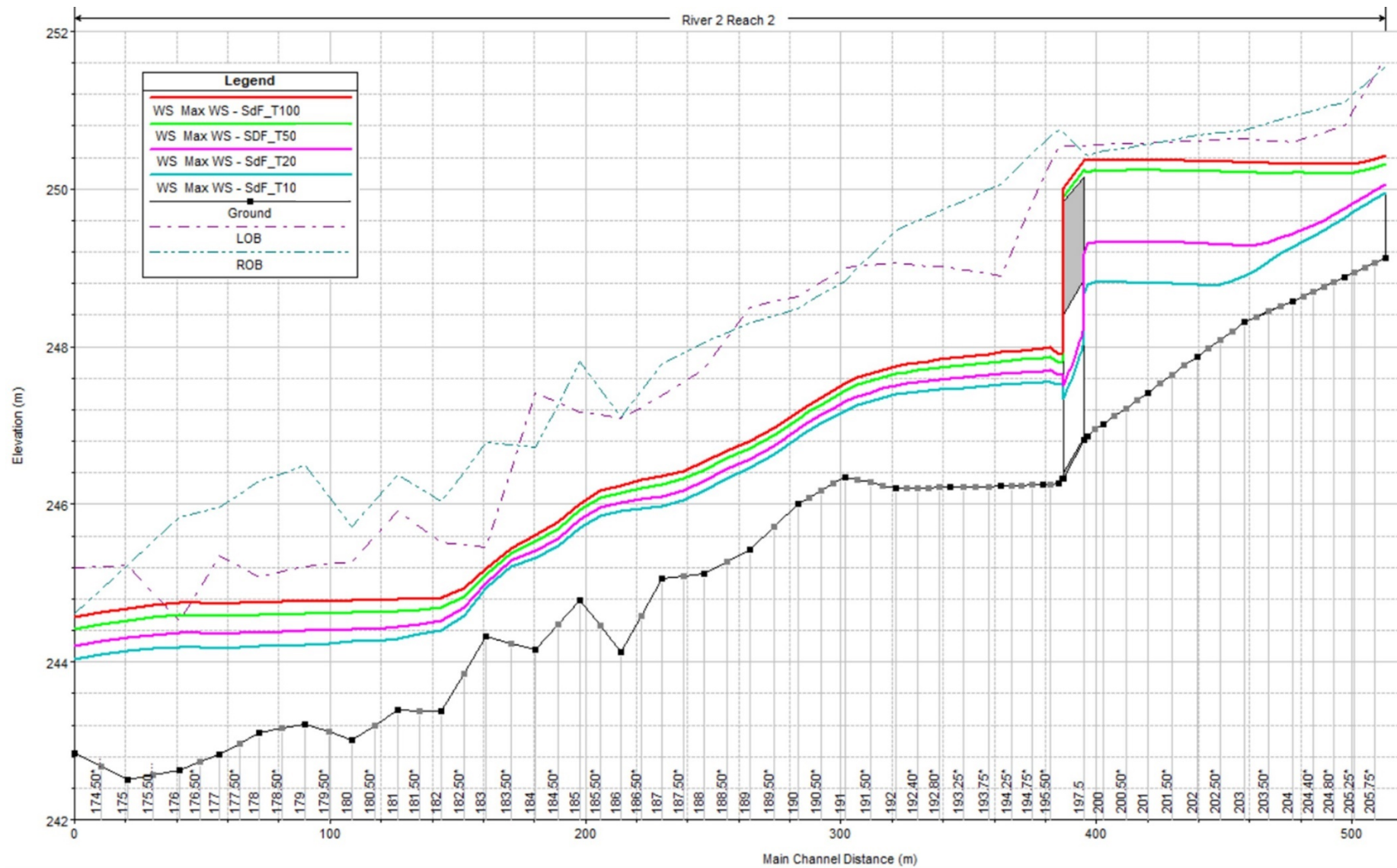


Figura 43: profili massimi del pelo libero di corrente per il tratto A, in condizioni di stato di fatto, per gli eventi critici a diverso tempo di ritorno

4.5.1.3. Area del cimitero di Calò (tratto B)

Dopo aver attraversato il tratto A senza generare criticità rilevanti, l'onda di piena entra nel tratto "B", futura sede dell'opera di regolazione.

In condizioni di stato di fatto, questo tratto non è particolarmente significativo di per sé, in quanto anche l'evento di progetto (T100) non genera esondazioni al di fuori dell'alveo inciso del corso d'acqua, se non per l'attraversamento di Via della Valle, come riportato nella planimetria di allagamento in *Figura 44*.

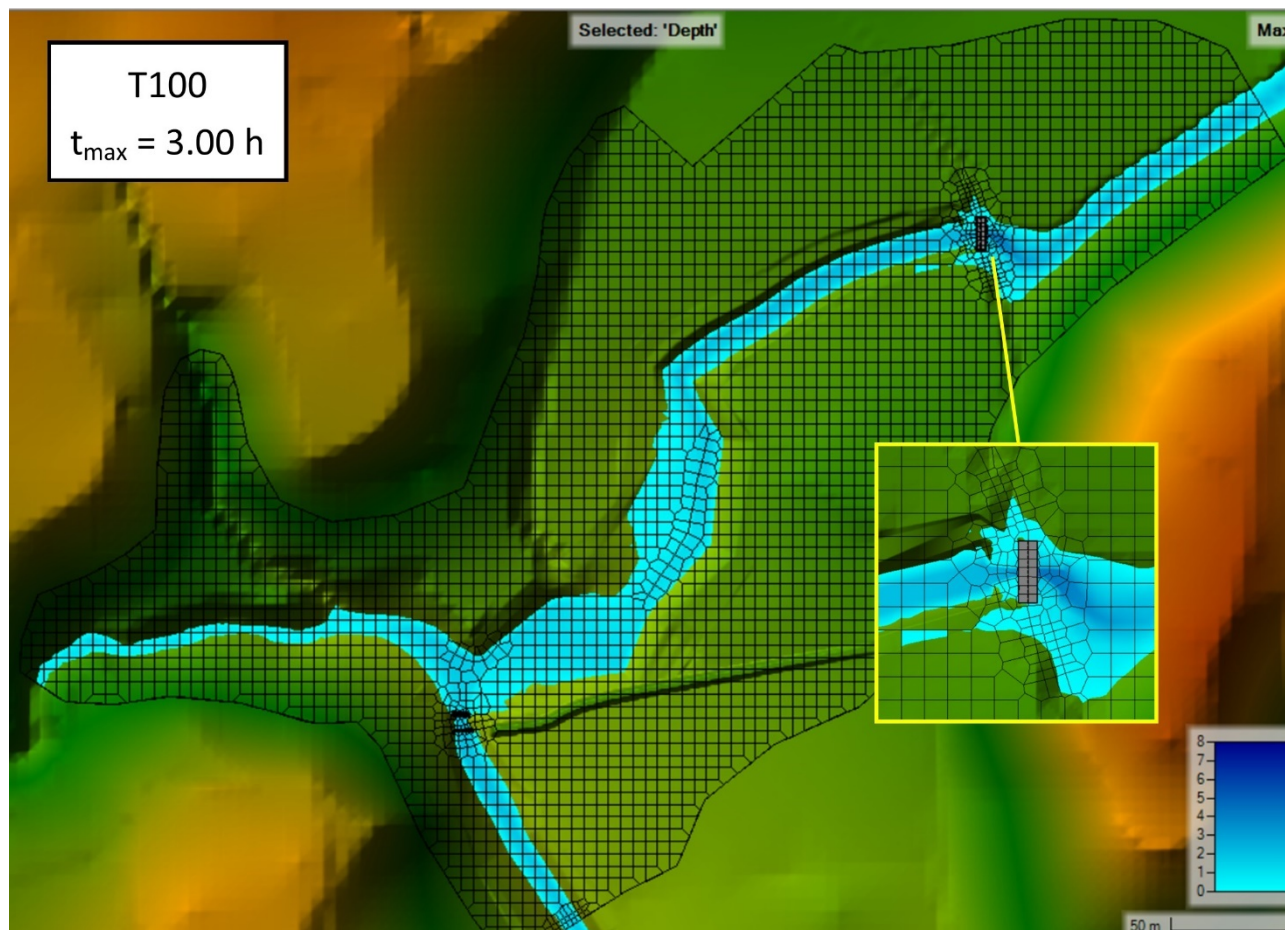


Figura 44: planimetria di massimo allagamento del tratto B, con particolare dell'attraversamento di Via della Valle, in condizioni di stato di fatto, per l'evento di progetto

Come si può osservare dalla planimetria, il corso d'acqua mantiene tiranti idrici relativamente bassi (superiori a 2 metri di fatto solo a monte dell'attraversamento di Via della Valle, a causa del rigurgito generato da quest'ultimo. Qui i tiranti idrici massimi superano i 4 metri dal fondo alveo, portando al sormonto del piano stradale, che si comporta come uno stramazzo al colmo della piena, con un'altezza d'acqua massima rispetto al piano stradale di circa 65 cm.

La condizione di progetto è invece ben più significativa da analizzare, in quanto la planimetria di massimo allagamento rappresenta di fatto la situazione di massimo invaso della nuova area di laminazione, indotta dalla presenza dell'opera di regolazione. Le planimetrie di allagamento della condizione di progetto per gli eventi critici di tempo di ritorno pari a 10, 20, 50 e 100 anni sono riportate in *Figura 45*.

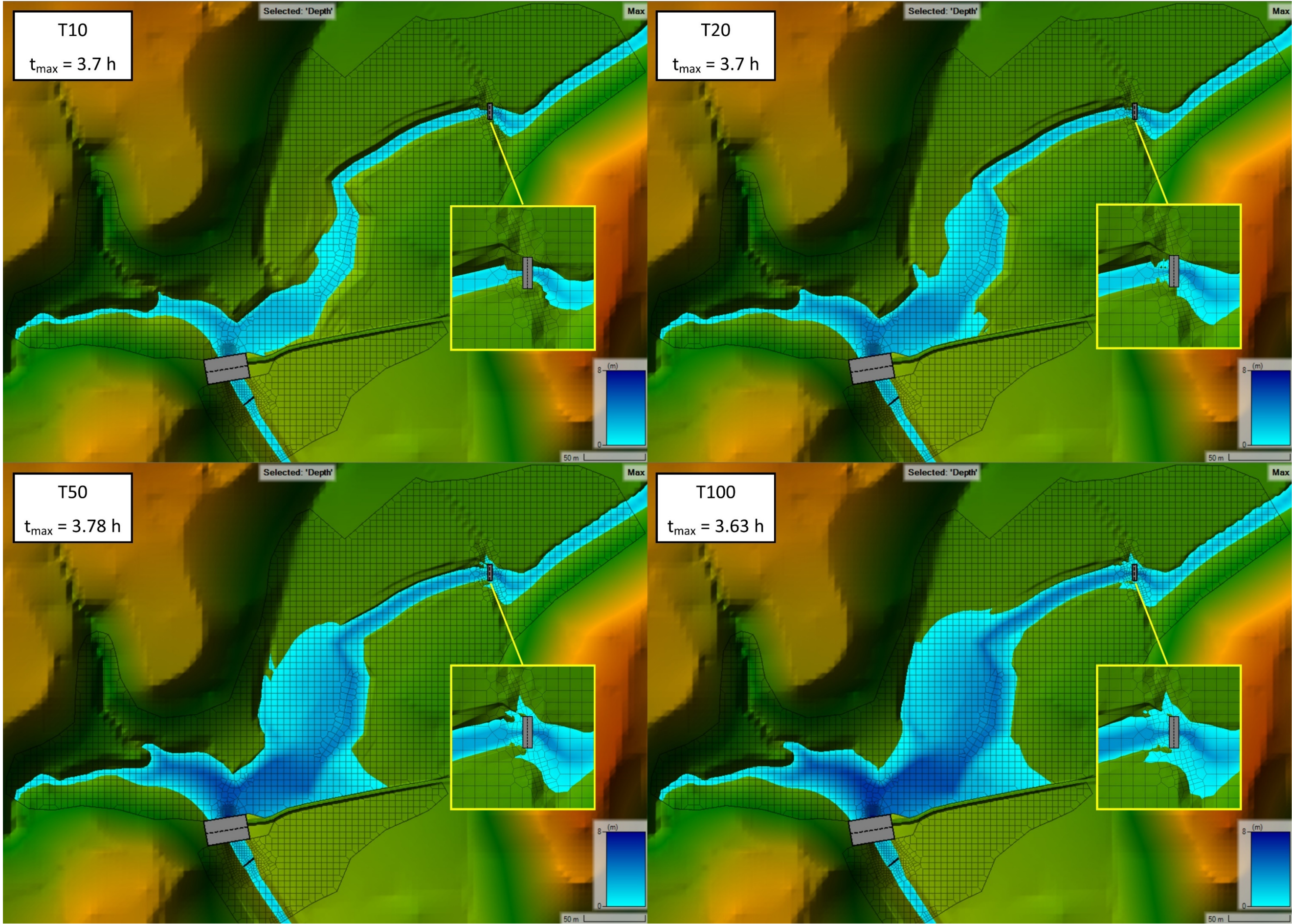


Figura 45: planimetrie di massimo allagamento del tratto B, con particolari dell'attraversamento di Via della Valle, in condizioni di stato di fatto, per vari tempi di ritorno tra cui quello di progetto (T100, REV02)

Dall'osservazione delle planimetrie, si fanno le seguenti annotazioni:

- naturalmente, estensione dell'area allagata e tiranti massimi raggiunti a monte dell'opera di regolazione aumentano al crescere del tempo di ritorno dell'evento. Il tirante massimo raggiunto, per T100, è pari a 6.85 metri rispetto al fondo dell'opera (242.25 metri l'altezza di massimo invaso contro 235.4 metri s.l.m. della quota di fondo della luce di scarico dell'opera);
- anche per il tempo di ritorno di progetto, tuttavia, non vengono coinvolti elementi esposti significativi (quali il cimitero di Calò), ad eccezione di Via della Valle in corrispondenza del relativo attraversamento;
- il rigurgito innescato dall'attraversamento di Via della Valle genera il sormonto della strada essenzialmente a partire da eventi di 10 anni di tempo di ritorno in su (Figura 46). La condizione di progetto in questo punto è lievemente peggiorativa rispetto allo stato di fatto, come osservabile dal confronto degli eventi di progetto in Figura 47, naturalmente a causa dell'invaso dell'area di valle che forza ulteriormente lo sviluppo del rigurgito a monte dell'attraversamento. Tuttavia, trattandosi di una differenza di pochi cm in termini di tirante rispetto al piano stradale, i benefici generati a valle (tratto D) giustificano decisamente il molto limitato peggioramento della condizione di monte.

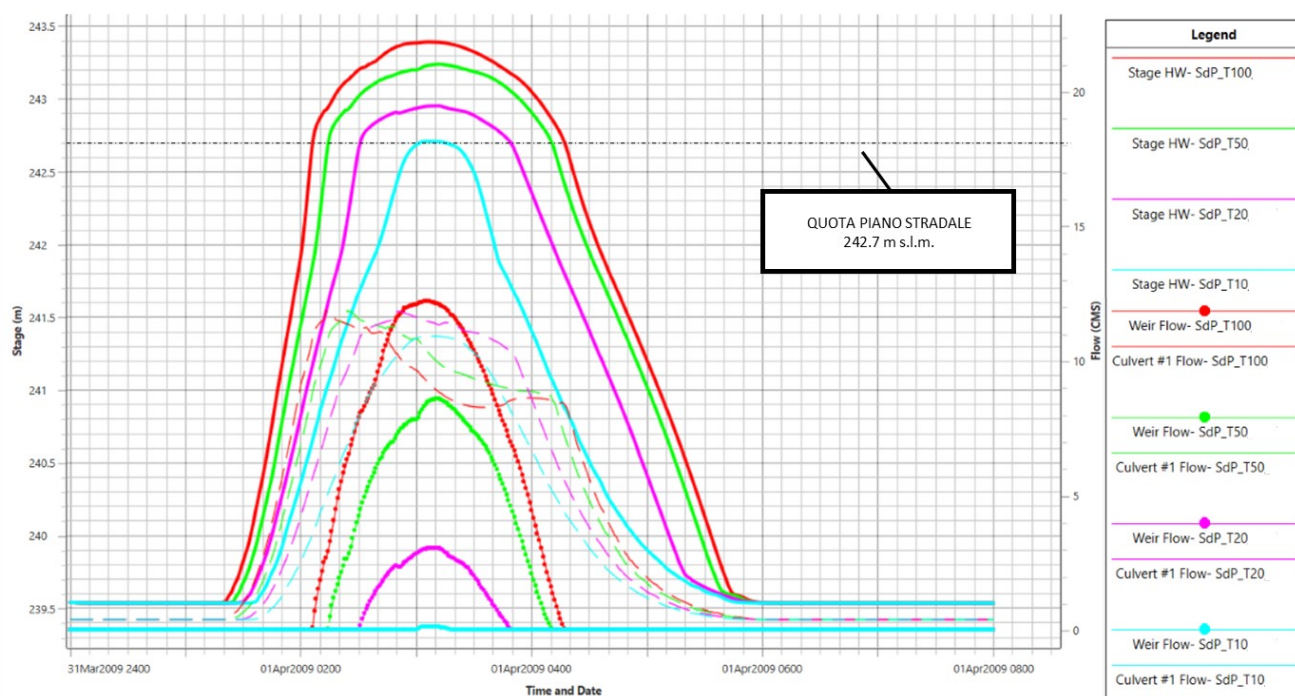


Figura 46: valori di tiranti idrici (linee spesse e continue) e flussi (luce di fondo: linee tratteggiate; stramazzo sul piano stradale: linee continue a punti) a monte dell'attraversamento di Via della Valle, in condizione di progetto, per diversi tempi di ritorno.

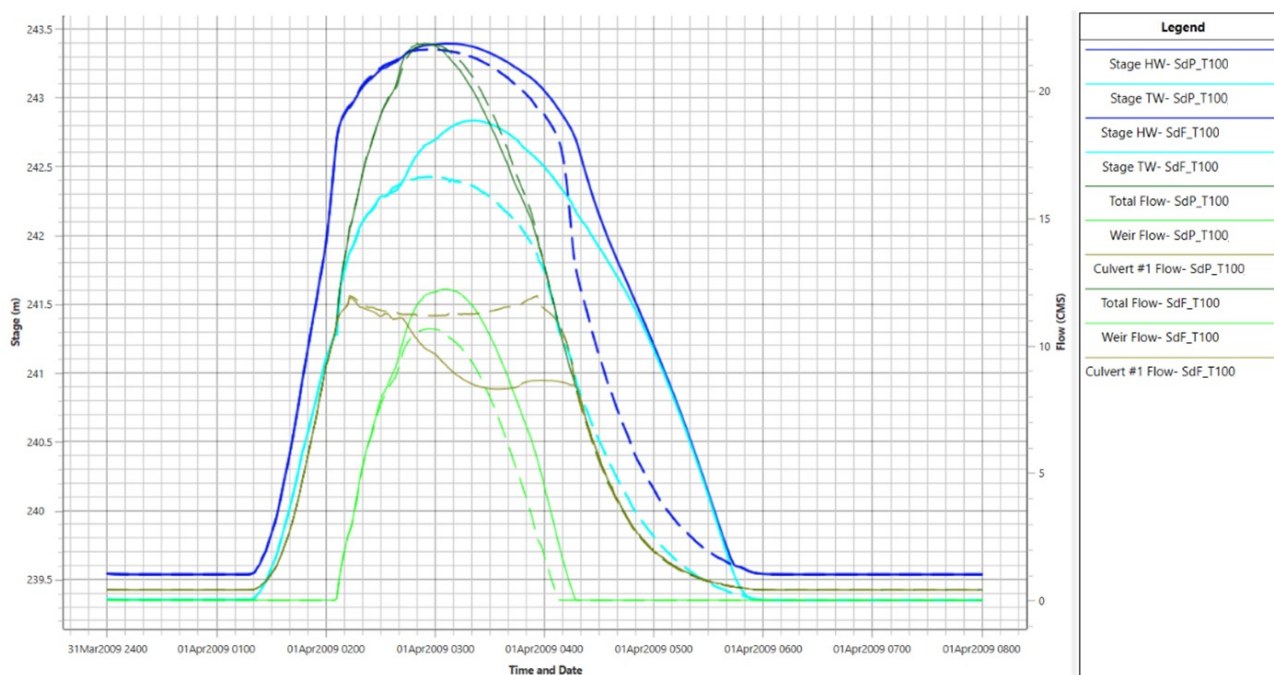


Figura 47: confronto tra stato di fatto (linee tratteggiate) e stato di progetto (linee continue), in termini di tiranti idrici e flussi, in corrispondenza dell'attraversamento di Via della Valle per l'evento T100

Le osservazioni sulla condizione di progetto si completano riportando il grafico dell'andamento nel tempo dei tiranti idrici a monte dell'opera di regolazione per i vari tempi di ritorno (Figura 48).

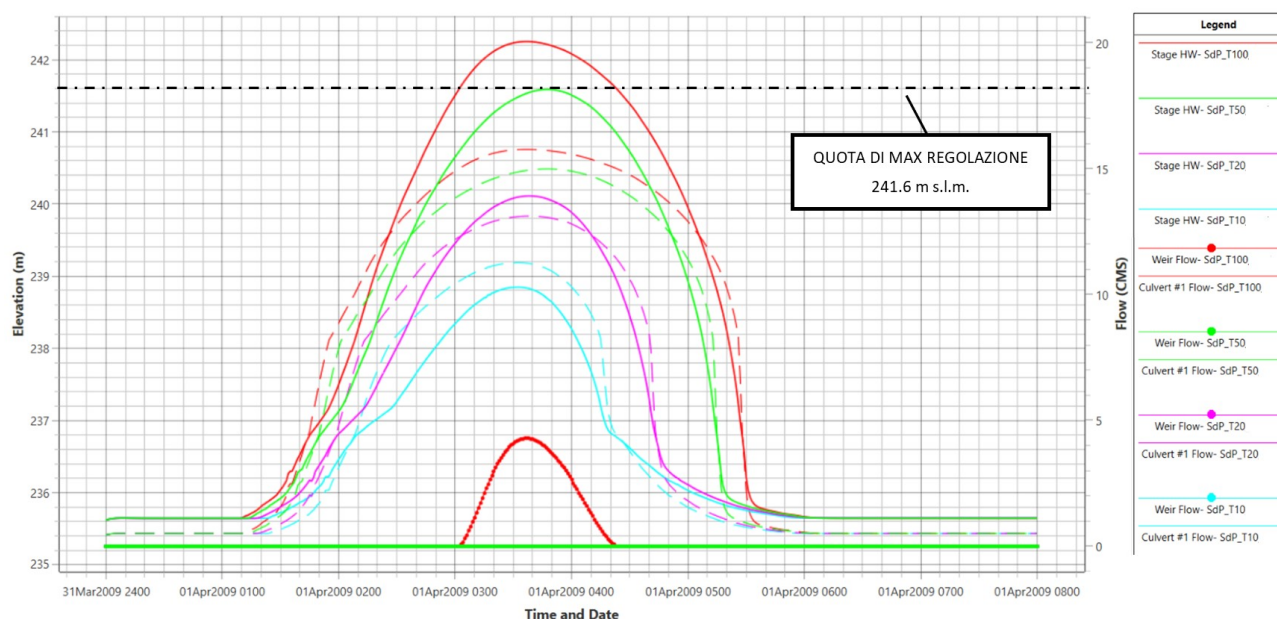


Figura 48: tiranti idrici di monte (linee spesse e continue) e portate in uscita dall'opera di regolazione (luce di fondo: linee tratteggiate; scarico di superficie: linee continue a punti), in condizione di progetto, per diversi tempi di ritorno (REV 02)

Questo grafico è di primaria importanza in quanto è stato, insieme ai risultati del tratto D, il principale elemento di taratura delle dimensioni degli scarichi (luce di fondo e superficiale) dell'opera di regolazione. Come già anticipato, infatti, si può osservare che non si prevede l'innescio dello scarico di superficie per eventi pari o inferiori a cinquant'anni di tempo di ritorno. Questa scelta, in termini pratici, rappresenta un ragionevole compromesso tra la messa in sicurezza delle aree di valle nei confronti delle aree di valle per

eventi di intensità limitata (10-20 anni di tempo ritorno) e la minimizzazione del rischio idraulico rispetto al tempo di ritorno di progetto ($T = 100$ anni), come meglio dettagliato nei paragrafi a seguire.

Infine, non si ritiene necessario alcun particolare approfondimento in merito alle velocità assunte dalla corrente idrica lungo il tratto in esame, in quanto:

- in condizioni di stato di fatto, il corso d'acqua si comporta consistentemente con il resto dell'asta fluviale e in generale dei torrenti pedemontani caratterizzati da pendenza media non trascurabile ($>1\%$): alternanza di tratti in corrente lenta e veloce con velocità massime della corrente in piena in linea con i valori riscontrabili in letteratura (3-4 m/s);
- in condizioni di progetto, una volta innescatosi il processo di invaso dell'area di laminazione, le velocità della corrente a monte dell'opera di regolazione diventano rapidamente prossime allo zero, mentre a valle del bacino di dissipazione si ristabiliscono rapidamente su valori simili alla condizione di stato di fatto.

L'unico aspetto, in questi termini, che è parso necessario indagare, riguarda i valori di velocità della corrente all'altezza dell'attraversamento di Via della Valle: il sormonto dell'opera da parte della corrente in piena, in entrambe le condizioni, genera infatti una lama d'acqua di altezza non trascurabile (65 cm circa). Come si può osservare dalle planimetrie a base ortofoto in *Figura 49*, si può però notare che le velocità sul piano stradale rimangono in realtà contenute (sotto a 1 m/s), aumentando invece comprensibilmente all'interno dell'alveo immediatamente a valle dell'attraversamento (la presenza di valori più elevati lungo il ciglio della strada è dovuta all'imprecisione del modello digitale del terreno, che in quella zona ha risoluzione 5 metri).

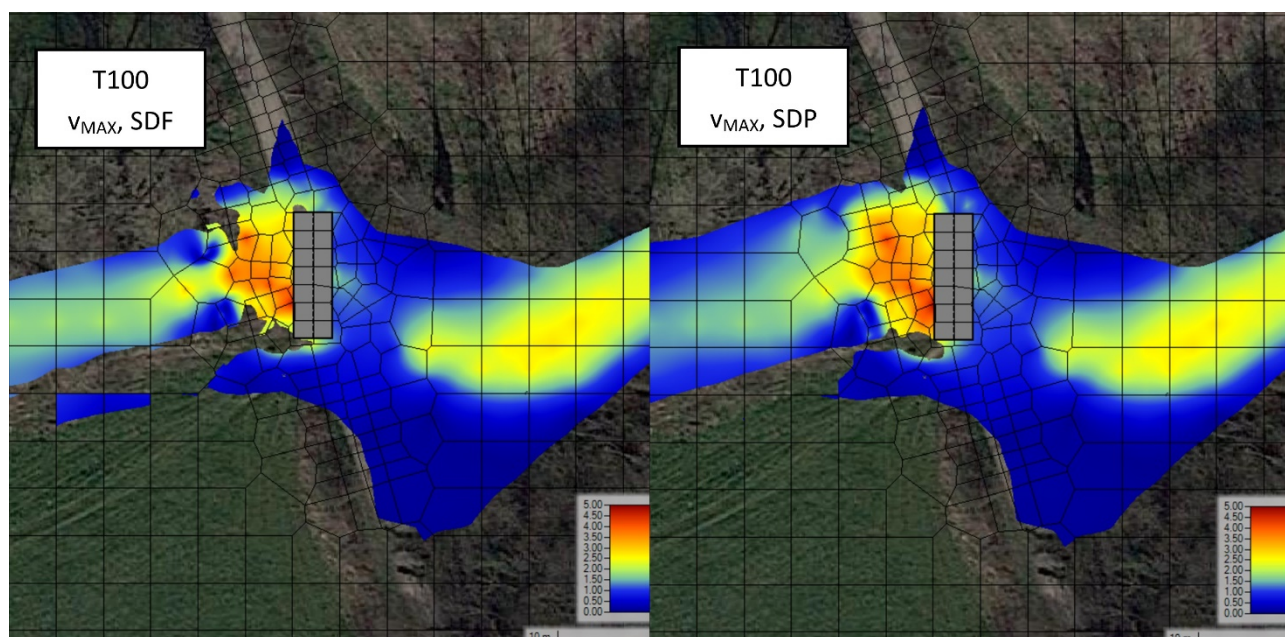


Figura 49: distribuzione delle massime velocità della corrente, per l'evento di progetto, nei pressi dell'attraversamento di Via della Valle

In ogni caso, indipendentemente dalle considerazioni sopraesposte, la chiusura di (almeno) questo tratto di Via della Valle al traffico veicolare e pedonale in previsione e/o all'occorrenza di eventi di precipitazione di straordinaria intensità, dovrà essere debitamente predisposta nel piano di protezione civile comunale.

In sintesi, le modifiche introdotte dalla REV02 hanno prodotto, per il tratto in esame, un abbassamento della quota di massimo invaso di 30 cm (da 242.55 a 242.25 m s.l.m. per T100), e un'attivazione dello stramazzo di

superficie solo per eventi superiori a T50. Le differenze nei pressi dell'attraversamento di via della Valle risultano trascurabili.

4.5.1.4. Area interlocutoria (tratto C)

Come anticipato dal titolo del paragrafo, il tratto C, sebbene risulti abbondantemente il più lungo nella suddivisione fatta nella definizione del dominio di indagine (1.6 km), al pari del tratto A risulta di importanza secondaria rispetto al presente studio. Tanto in condizione di stato di fatto che di progetto, infatti, l'onda di piena attraversa il tratto traslando quasi rigidamente dal suo inizio (sezione 103) alla sua fine (sezione 26), con minime divagazioni al di fuori dell'alveo inciso e assenza di aspetti idraulicamente rilevanti, se non per la successione di scivoli e salti di fondo nel tratto terminale, che generano tratti in corrente veloce.

Come per il tratto A, anche in questo caso, per completezza, si riporta in Figura 50 e Figura 51 il profilo longitudinale delle massime altezze di pelo libero raggiunte alle varie sezioni condizioni di stato di fatto e di progetto, per i tempi di ritorno minimo (10 anni) e massimo (100 anni) oggetto di indagine.

Con l'aggiornamento REV02, il passaggio dalla condizione di stato di fatto a quella di progetto fornisce a livello qualitativo la medesima risposta – riduzione dei tiranti massimi lungo l'intero tratto – impattando però in maniera più significativa l'evento centennale (20-25 cm) rispetto a quello decennale (circa 10 cm).

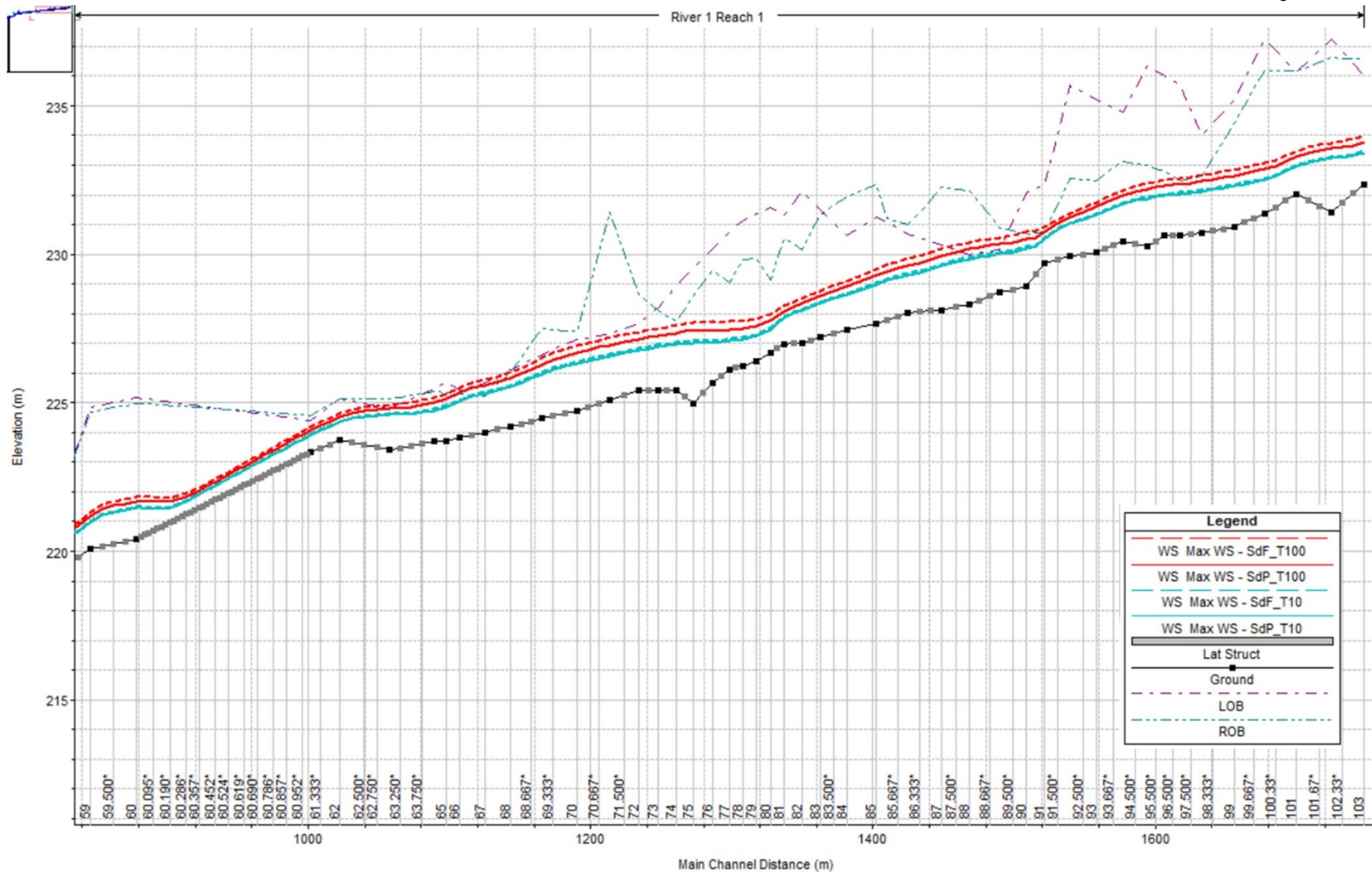


Figura 50: profili massimi del pelo libero di corrente per il tratto C/monte, in condizioni di stato di fatto (tratteggiata) e di progetto (continua), per gli eventi critici a diverso tempo di ritorno (REV 02)

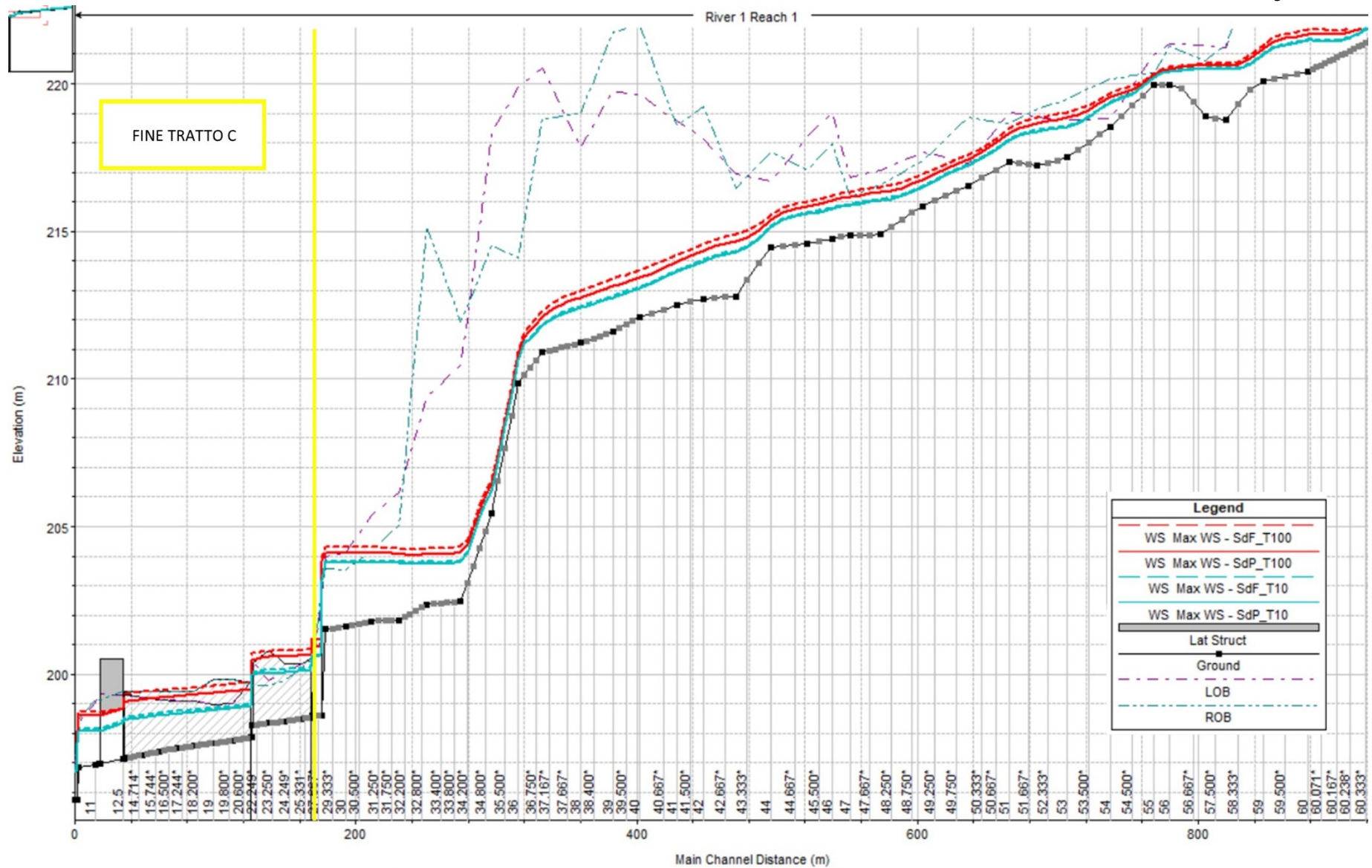


Figura 51: profili massimi del pelo libero di corrente per il tratto C/valle, in condizioni di stato di fatto (tratteggiata) e di progetto (continua), per gli eventi critici a diverso tempo di ritorno (REV 02)

4.5.1.5. Area di Ponte Albiate (tratto D)

Si passa ora a valutare le conseguenze del passaggio dell'evento critico, per il tempo di ritorno di riferimento (T100) e per valori inferiori (T50, T20, T10), lungo il tratto D – ovvero all'interno della frazione di Ponte Albiate, prima dell'immissione nel Fiume Lambro – confrontando gli stati di fatto e di progetto.

Profili longitudinali – analisi idraulica

In linea con la cronologia temporale del processo fisico studiato (esondazione del corso d'acqua -> allagamento delle aree circostanti), i primi output riportati sono i massimi profili longitudinali di corrente all'interno del tratto terminale del Rio Brovada, per entrambe le condizioni (Figura 52).

Dall'analisi di Figura 52 è possibile fare le seguenti osservazioni:

- in condizioni di stato di fatto, il corso d'acqua inizia esondare in sinistra idraulica per eventi di tempo di ritorno compreso tra 10 e 20 anni, e in sponda destra tra 20 e 50 anni;
- in condizioni di stato di progetto, il corso d'acqua inizia a esondare in sinistra idraulica per eventi di tempo di ritorno superiore a 20 anni, senza avere esondazione in sponda destra;
- confrontando le due condizioni, si possono essenzialmente paragonare i profili (e dunque le portate massime esondate) ventennale dello stato di fatto con quello cinquantennale stato di progetto, fornendo un primo parametro indicativo del beneficio netto apportato dalla realizzazione dell'opera di regolazione;
- in termini di differenza di tirante massimo raggiunto all'interno del canale (facendo la media tra i valori ottenuti all'inizio e alla fine dello stesso, che si mantengono piuttosto simili) tra stato di fatto e stato di progetto, i valori ottenuti sono riportati in *Tabella 12* (tra parentesi i valori ottenuti nella configurazione originaria – REV01);

T [anni]	$\Delta h_{\max \text{ SDP-SDF (REV 01)}}$ [cm]
10	8 (22)
20	20 (36)
50	40 (38)
100	27 (10)

Tabella 12: differenza in termini di tiranti idrici tra i massimi profili di corrente in SDP e SDF all'interno del tratto artificializzato (REV 02)

Confrontando i valori ottenuti nei due casi, si osserva una minore efficienza della nuova condizione dei progetti nei confronti di eventi di tempo di ritorno più contenuto (10-20 anni), a fronte di un significativo miglioramento nei confronti dell'evento di riferimento (T100).

- in entrambe le condizioni, diversamente da quanto la configurazione geometrica del tratto finale dell'alveo potrebbe portare a pensare, l'allagamento non avviene per rigurgito indotto dalla presenza dell'attraversamento (il ponte di Piazza Boretti entra in pressione solo per l'evento cinquantennale in stato di fatto e centennale in stato di progetto), ma per mera insufficienza della sezione idraulica dell'alveo artificializzato, particolarmente nelle sezioni iniziali (21-18) per la sponda sinistra e quelle finali (18-14) per la sponda destra.

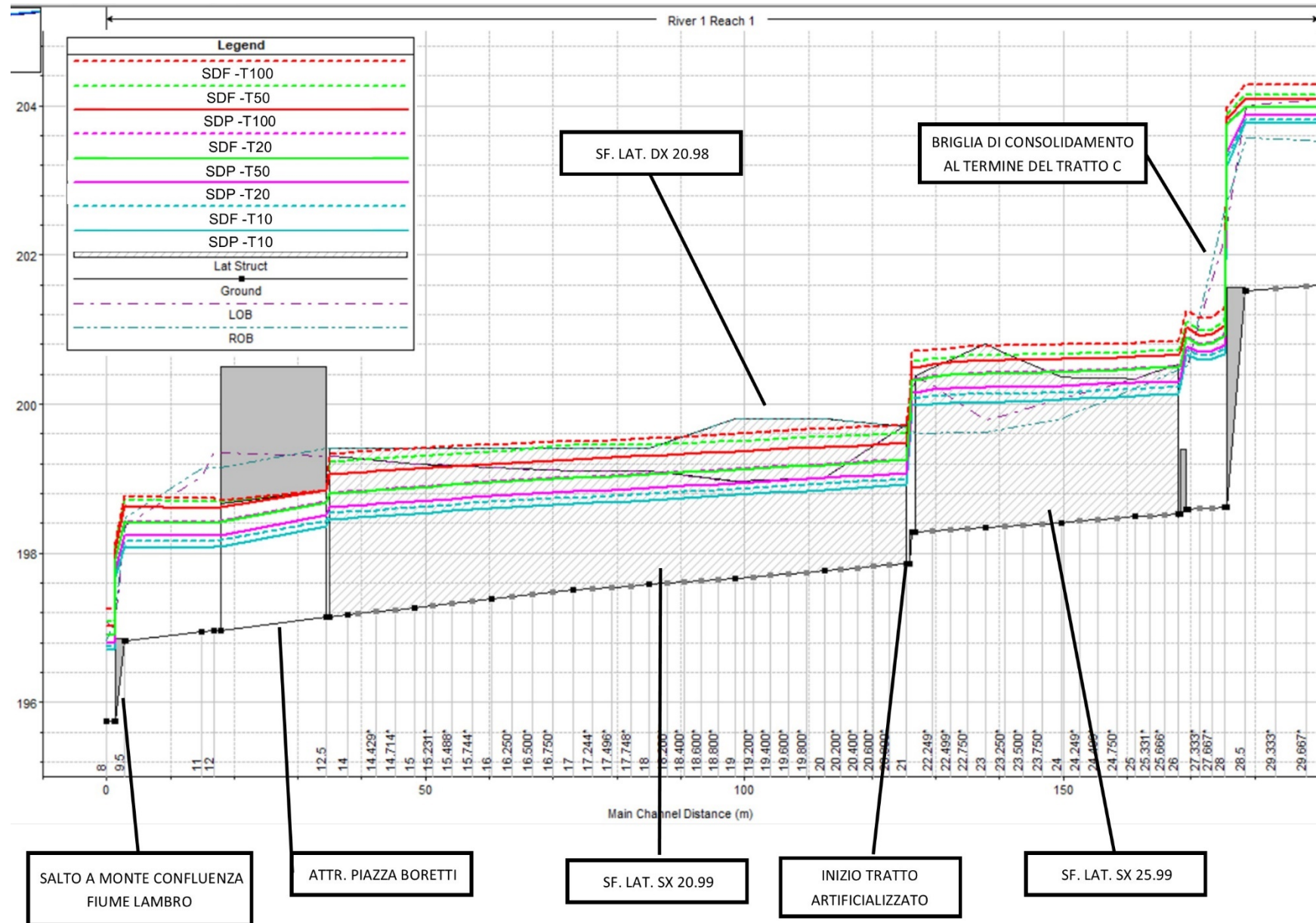


Figura 52: profili massimi del pelo libero di corrente in condizioni di stato di fatto (linee tratteggiate) e di progetto (linee continue), per gli eventi critici a diverso tempo di ritorno (REV 02)

Profili longitudinali – validazione di massima del modello

Il profilo longitudinale di stato di fatto è stato utilizzato, in fase di costruzione del modello, come strumento di verifica della bontà di quest'ultimo, sulla base di alcune foto (*Figura 53*) a disposizione ritraenti il tratto artificializzato dell'alveo del Rio Brovada durante la piena del giugno 2014.



Figura 53: tratto artificializzato del Rio Brovada a monte (sx) e valle (dx) del ponte di Piazza Boretti, piena di giugno 2014

Dalla foto mostrata a sinistra si può dedurre, inequivocabilmente, come tale evento abbia causato l'allagamento di Via Brovada, mentre dalla foto di destra si può intuire che l'esondazione non può essere stata causata dal rigurgito del ponte di Piazza Boretti, che non è andata in pressione in tale circostanza (la quota del pelo libero in corrispondenza dello scarico in Lambro (sezione 10 del modello), quantificabile indicativamente dal livello raggiunto nei pressi della finestra ad arco (alta 190 cm), si aggira intorno al metro, decisamente inferiore rispetto all'intradosso del ponte situato pochi metri a monte (1.7 m).

Purtroppo, il bacino del Rio Brovada non possiede un pluviometro pubblico interno al suo bacino, ma utilizzando i dati di pioggia misurati presso la stazione di Carate Brianza, poco distante, e confrontandoli con le LSPP di ARPA Lombardia per l'area in esame, si ricava che all'evento, per durate prossime alla durata critica del bacino (2-3 ore) si può assegnare un tempo di ritorno compreso tra i 10 e i 20 anni (*Figura 54*). Tale valore risulta in linea con l'evento di frequenza minima risultante dal modello che possa innescare l'esondazione del corso d'acqua a Ponte Albiate (in stato di fatto, il canale artificializzato è risultato sufficiente per l'evento decennale e insufficiente per l'evento ventennale).

Preme sottolineare, tuttavia, come questo confronto sia stato considerato solo come una validazione di massima, a livello qualitativo, della bontà del modello, tenendo debitamente in conto la quantità e la tipologia di incertezze (momento di scatto delle fotografie, condizioni di imbibimento iniziali del bacino, grado di corrispondenza dello ietogramma misurato fuori dal bacino rispetto a quello effettivo, etc.) che un confronto di natura indiretta inevitabilmente si porta dietro.

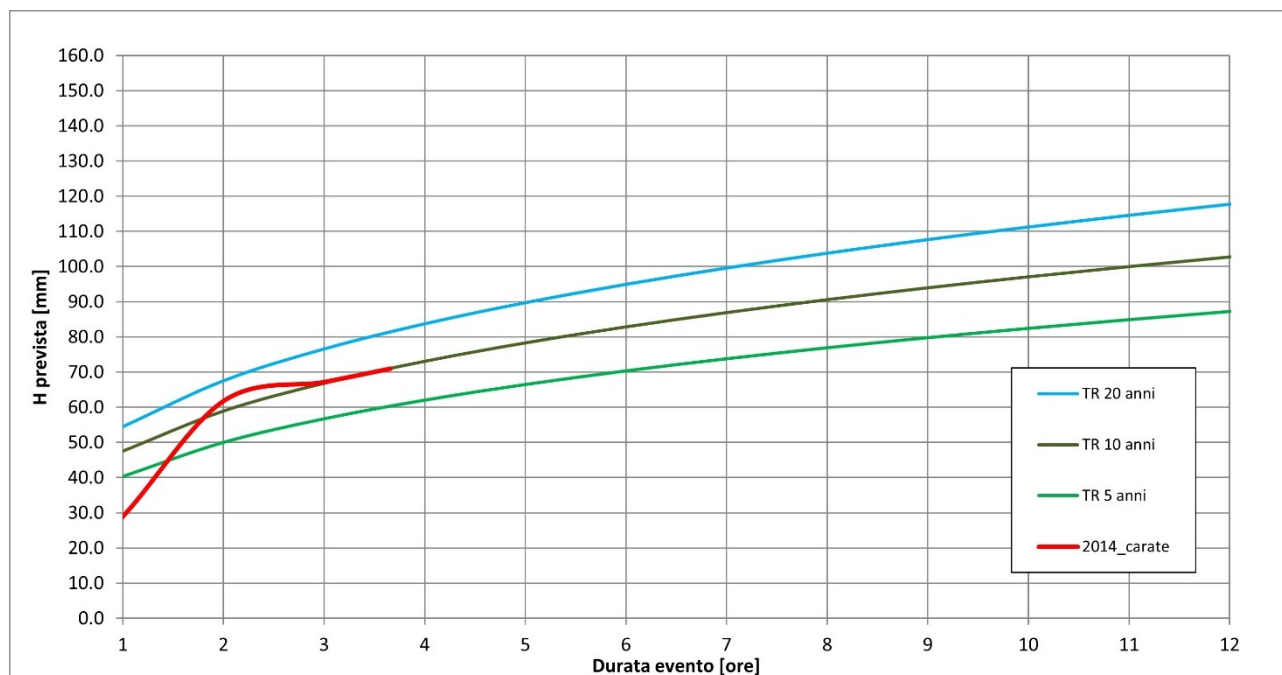


Figura 54: LSP di Arpa Lombardia per l'area in esame e ietogramma cumulato misurato alla stazione di Carate Brianza durante l'evento di giugno 2014

Sfioratori laterali

L'analisi delle portate sfiorate dagli elementi modellati come sfioratori laterali (l'arginello in sponda sinistra a monte del tratto artificializzato, elem. 25.99, ed entrambi i muri di sponda del canale, elem. 20.99 e 20.98), riportate in Figura 55, Figura 56 e Figura 57, consente di effettuare altre considerazioni significative in merito alla dinamica del processo di esondazione del Rio Brovada:

- innanzitutto, in termini di tempi di ritorno "critici", si conferma quanto già indicato nell'analisi dei profili longitudinali di corrente:
 - in condizioni di stato di fatto, la sponda sinistra (Via Brovada) inizia a esondare per eventi di tempo di ritorno prossimi a 20 anni, la sponda destra per eventi di tempo di ritorno prossimi a 50 anni;
 - in condizioni di progetto, la medesima condizione sulla sponda sinistra si presenta per il tempo di ritorno di 50 anni, mentre la sponda destra non subisce esondazione nemmeno in corrispondenza dell'evento centennale;
- rispetto all'analisi dei profili longitudinali, è ancora più in evidenza il parallelismo $T_{20_{SDF}} - T_{50_{SDP}}$, sia in termini di portate di picco che di volumi complessivamente esondati, eccezion fatta per un "ritardo" degli idrogrammi di progetto di circa 30 minuti rispetto a quelli di stato di fatto, inerzia naturalmente generata dalla fase di invaso dell'opera di regolazione presente nel tratto B;
- osservando le portate transitanti attraverso gli elementi 25.99 e 20.99, situati consecutivamente in sponda sinistra, si può cogliere il probabile meccanismo di piena di Via Brovada, con una quota parte di portata del corso d'acqua che esonda dallo sfioratore di monte, si espande in sponda sinistra (come osservabile in seguito nelle mappe di allagamento) e rientra nel corso d'acqua dal punto di minimo dello sfioratore di valle, il quale infatti produce portate in uscita (positive) solo per un breve periodo, prima di subire un'inversione di flusso e raccogliere le acque provenienti da Via Brovada, esondate a monte.

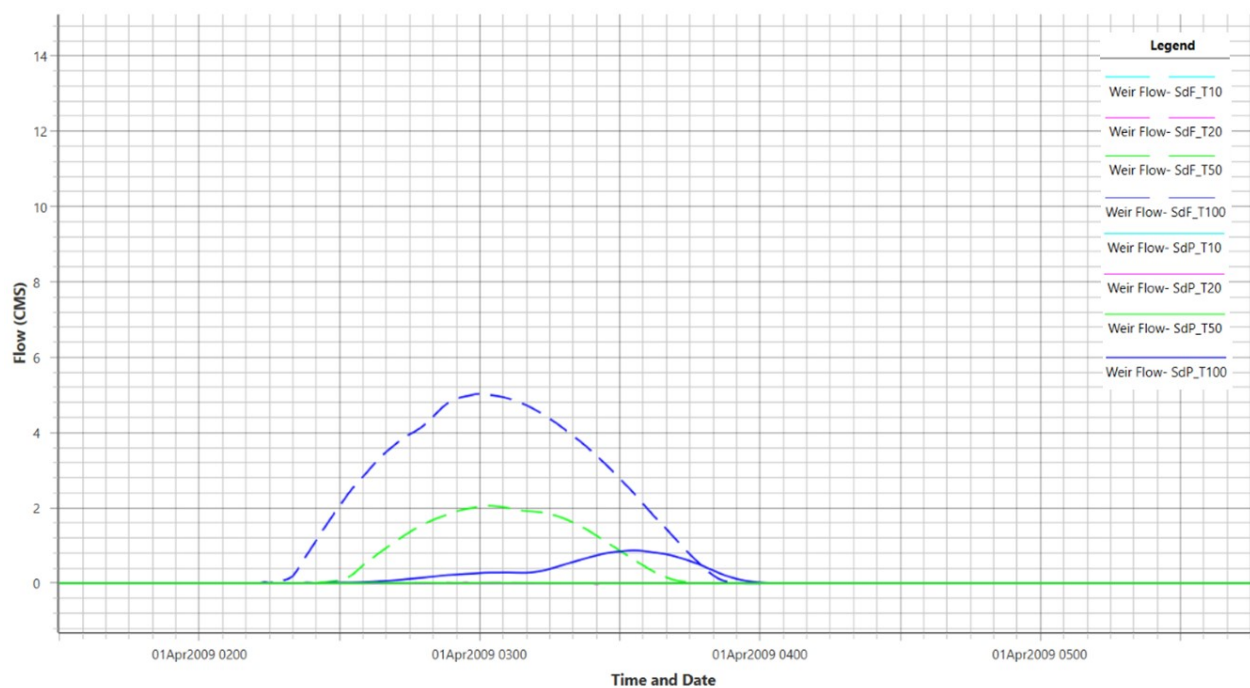


Figura 55: portate sfioranti l'elemento 25.99, in condizioni di stato di fatto (linee tratteggiate) e di progetto (linee continue), per gli eventi critici a diverso tempo di ritorno

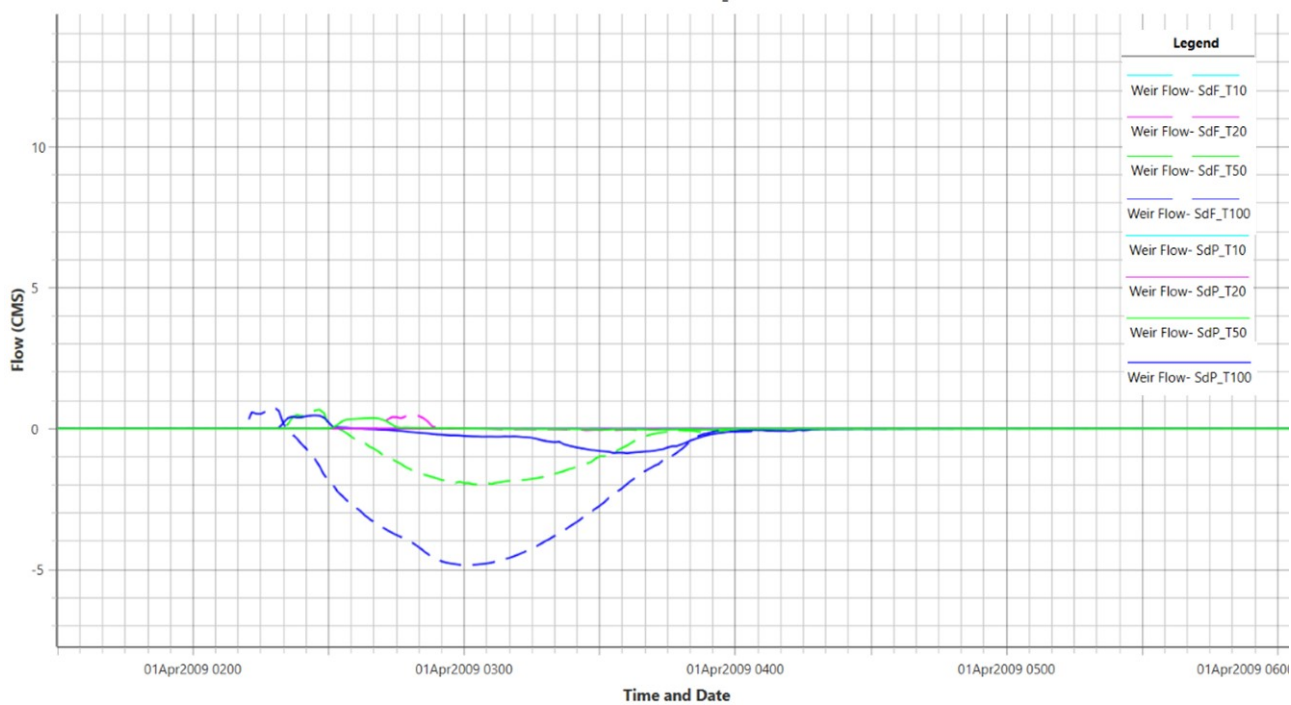


Figura 56: portate sfioranti l'elemento 20.99, in condizioni di stato di fatto (linee tratteggiate) e di progetto (linee continue), per gli eventi critici a diverso tempo di ritorno

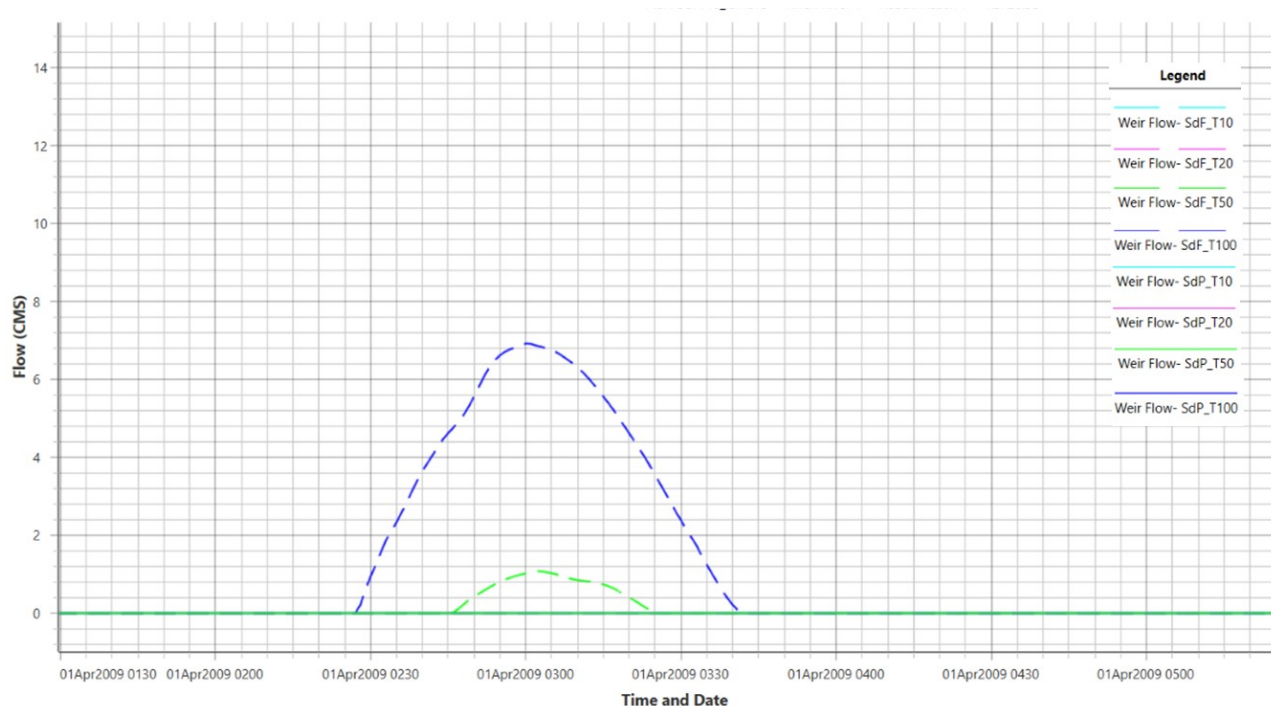


Figura 57: portate sfioranti l'elemento 20.98, in condizioni di stato di fatto (linee tratteggiate) e di progetto (linee continue), per gli eventi critici a diverso tempo di ritorno

Mappe di allagamento

Dopo aver analizzato il passaggio dell'onda di piena all'interno del tratto terminale del Torrente Brovada, si passa a illustrarne le conseguenze sulla frazione di Ponte Albiate, presentando nelle immagini successive le seguenti mappe a base ortofoto:

- confronto tra stato di fatto e stato di progetto dei massimi tiranti idrici raggiunti in vari punti della frazione di Ponte Albiate a seguito dell'esondazione, per eventi di tempo di ritorno pari a 10, 20 (Figura 58), 50 e 100 anni (Figura 59);
- evoluzione temporale dell'esondazione, nella frazione di Ponte Albiate, in condizioni di stato di fatto (Figura 60) e di progetto (Figura 61), per l'evento di riferimento (T100);
- confronto tra stato di fatto e stato di progetto delle distribuzioni di velocità della corrente nel momento di maggiore criticità (Figura 62), per l'evento di riferimento (T100).

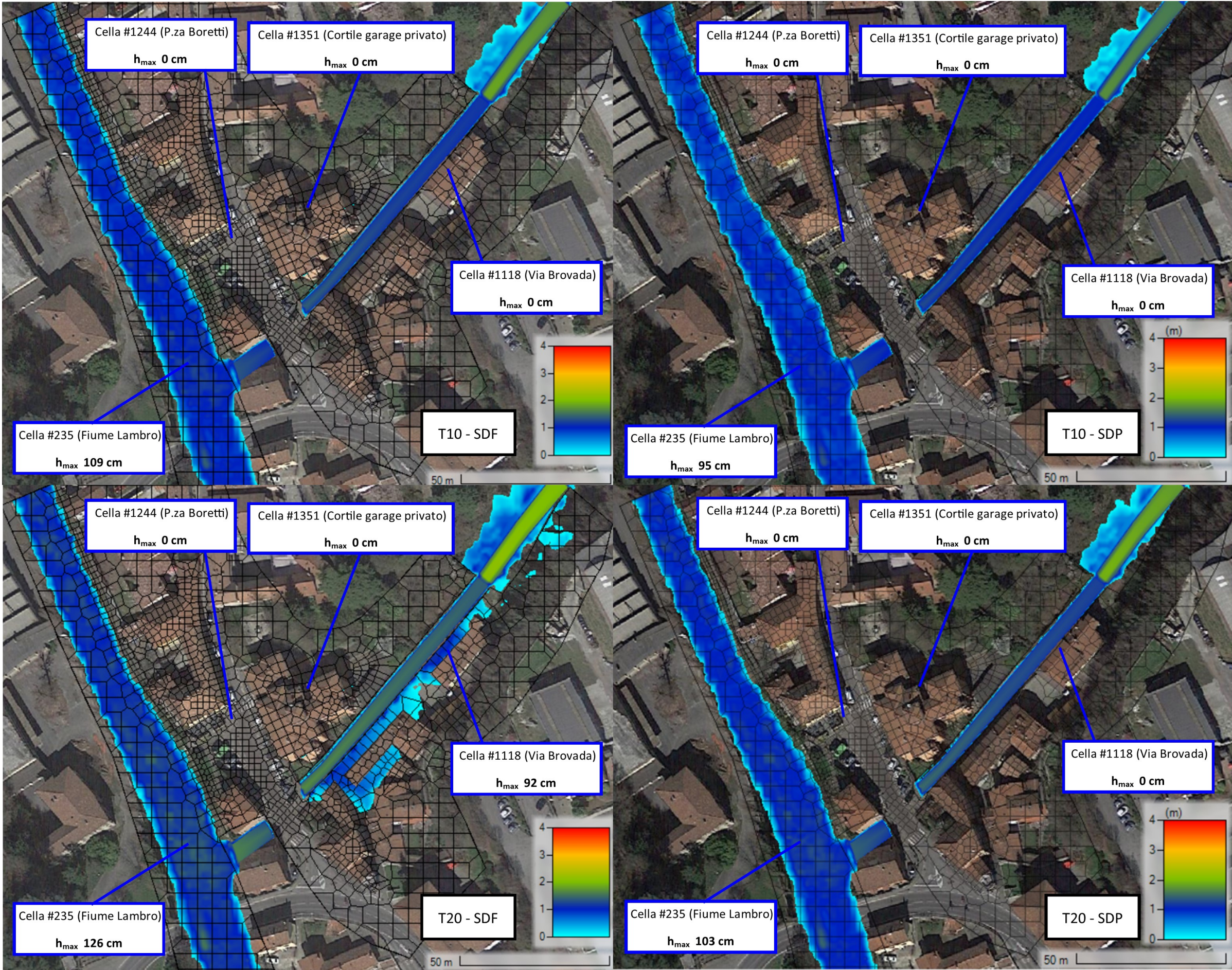


Figura 58: confronto tra i tiranti massimi di allagamento, per le condizioni di stato di fatto e di stato di progetto, generati dalle onde di piena degli eventi T10 e T20 all'interno della frazione di Ponte Albiate (REV 02)

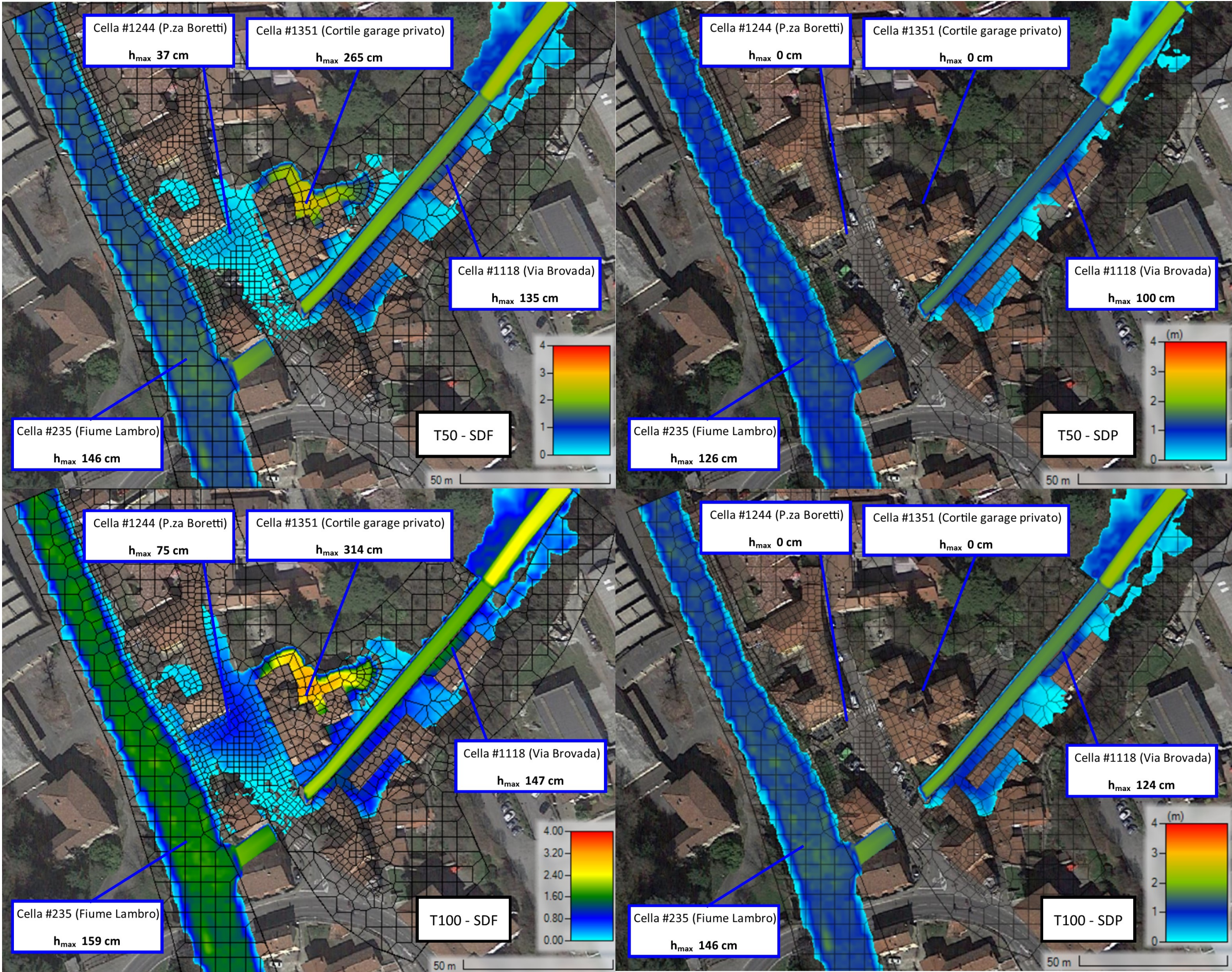


Figura 59: confronto tra i tiranti massimi di allagamento, per le condizioni di stato di fatto e di stato di progetto, generati dalle onde di piena degli eventi T50 e T100 all'interno della frazione di Ponte Albiate (REV 02)

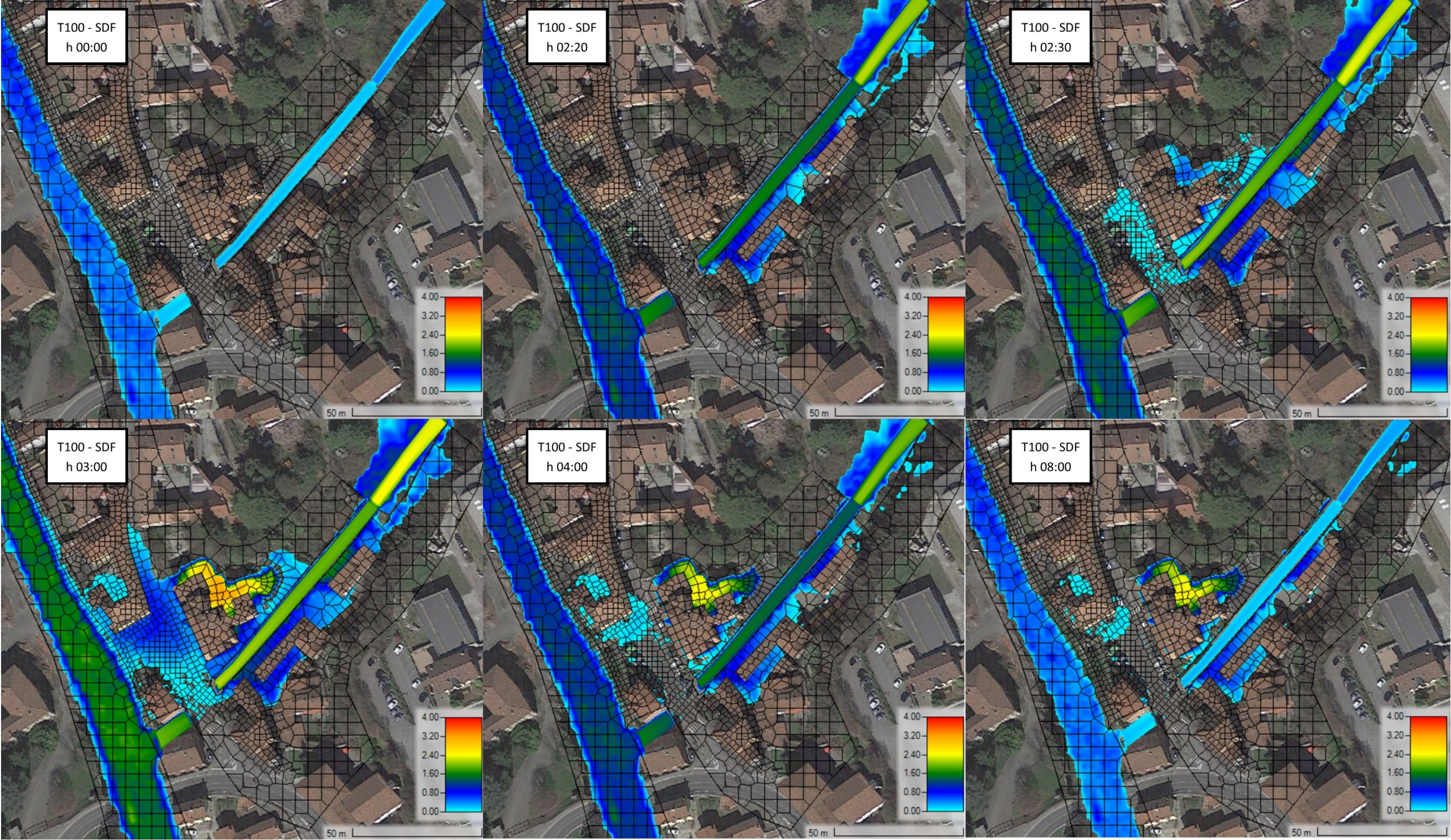


Figura 60: sviluppo nel tempo dell'esondazione all'interno della frazione di Ponte Albiate al passaggio dell'onda di piena, in condizioni di stato di fatto, per l'evento di riferimento (T100)

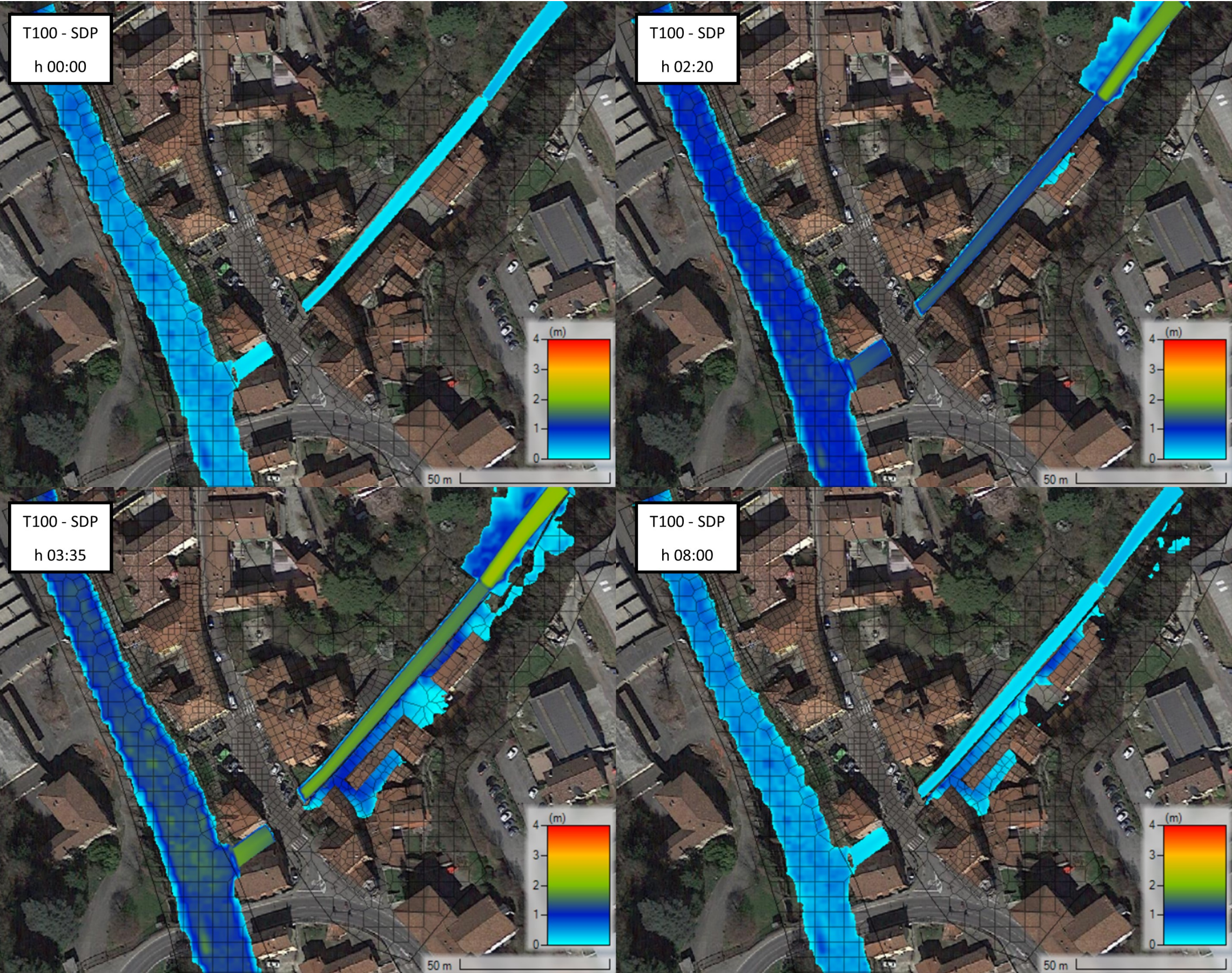


Figura 61: sviluppo nel tempo dell'esondazione all'interno della frazione di Ponte Albiate al passaggio dell'onda di piena, in condizioni di stato di progetto, per l'evento di riferimento (T100) (REV 02)

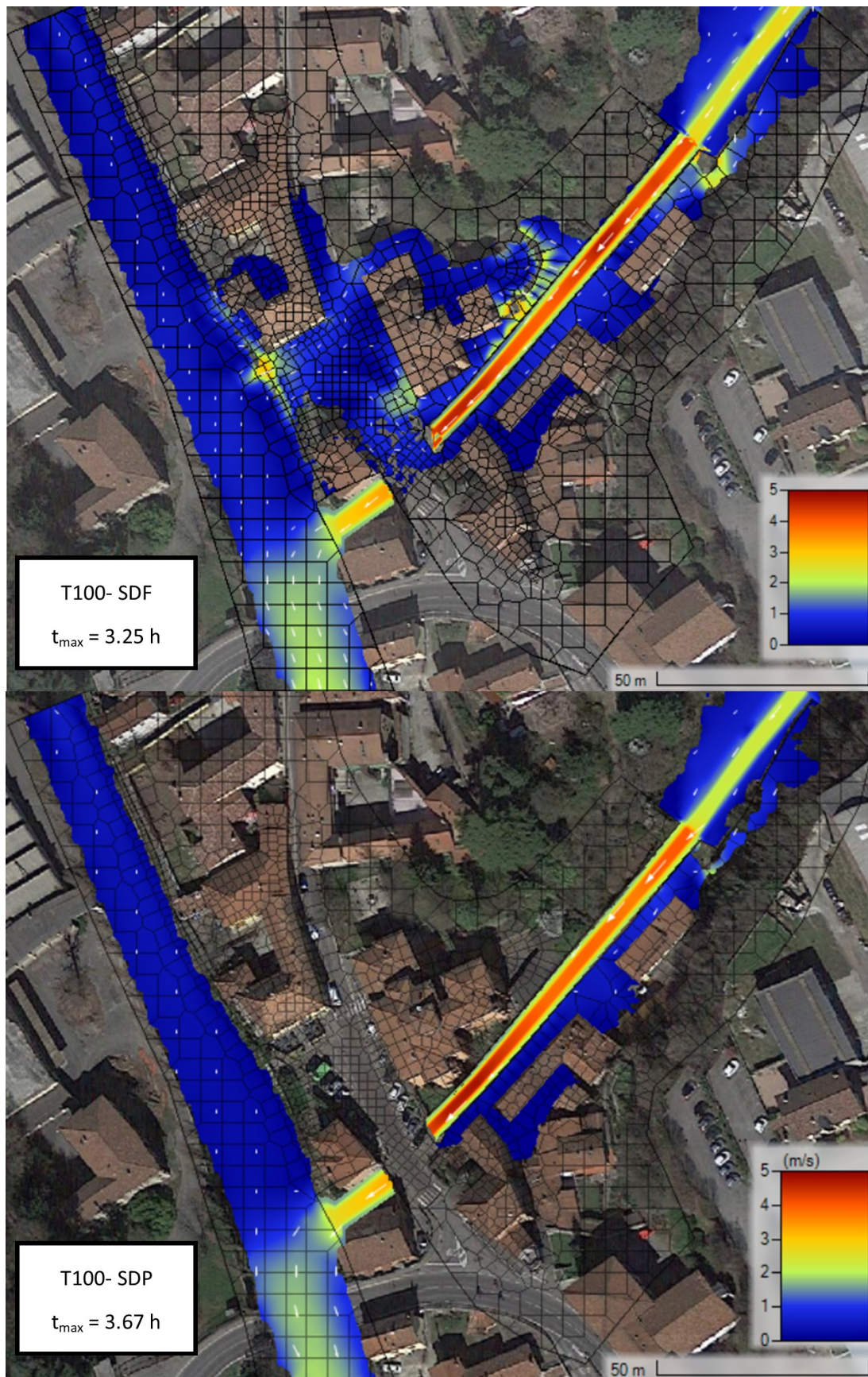


Figura 62: distribuzioni delle velocità della corrente idrica nel momento di massima criticità all'interno della frazione di Ponte Albiate, in condizioni di stato di fatto e stato di progetto, per l'evento di riferimento (T100) (REV 02)

Dall'analisi dei risultati riportati si possono trarre le seguenti considerazioni:

- lo sviluppo temporale della piena conferma, per l'evento di riferimento sia in stato di fatto che di progetto, la dinamica già intuibile dai risultati precedenti:
 - in condizioni di stato di fatto:
 - iniziale allagamento di Via Brovada in sponda sinistra (02:20);
 - a distanza di circa 10 minuti (02:30), esondazione della sponda destra e conseguente allagamento del cortile interno/area garage dell'edificio privato posto in Piazza Boretti, n. 5;
 - dopo ulteriori 30 minuti (03:00), l'estensione dell'allagamento a Piazza Boretti, a cui contribuiscono i volumi idrici in eccedenza provenienti sia da Via Brovada che dal cortile interno, e raggiungimento della condizione di massima criticità;
 - nell'arco di 60 minuti (04:00) dall'istante di massima criticità, si verifica lo svuotamento quasi totale di Piazza Boretti, principalmente mediante scarico dei volumi idrici nel Fiume Lambro tramite il punto di minimo in sponda sinistra. Anche Via Brovada inizia a svuotarsi, restituendo i volumi idrici esondati al Rio Brovada, al progressivo abbassarsi del pelo libero di quest'ultimo;
 - dopo diverse ore (08:00), abbondantemente passata anche la coda dell'onda di piena, rimangono importanti volumi idrici residui presenti sia in Via Brovada che, soprattutto, nel cortile interno in sponda destra. Ciò è dovuto al fatto che in entrambi i casi il piano campagna si trovi a una quota inferiore rispetto alle rispettive quote di sfioro del corso d'acqua per cui il drenaggio di tali aree rimane in capo alla rete fognaria meteorica/mista e/o alla presenza di strutture di disperdimento nel sottosuolo;
 - in condizioni di stato di progetto:
 - iniziale allagamento di Via Brovada in sponda sinistra (02:20);
 - dopo ulteriori 75 minuti (03:35), raggiungimento della condizione di massima criticità, con allagamenti limitati alla sola sponda sinistra del corso d'acqua (via Brovada e aree limitrofe);
 - dopo diverse ore (08:00), la situazione è qualitativamente analoga, ma lievemente migliore, rispetto allo stato di fatto, con il completo drenaggio delle aree allagate dipendente dal corretto funzionamento della rete di drenaggio delle acque meteoriche;
- osservando quantitativamente i valori dei tiranti massimi per i vari tempi di ritorno in entrambi gli scenari, riassunti in *Tabella 13*, nonché le distribuzioni di velocità per l'evento centennale si può affermare che:

#cella	zona	T10		T20		T50		T100	
		$h_{\max}$ SDF [cm]	$h_{\max}$ SDP [cm]	$h_{\max}$ SDF [cm]	$h_{\max}$ SDP [cm]	$h_{\max}$ SDF [cm]	$h_{\max}$ SDP [cm]	$h_{\max}$ SDF [cm]	$h_{\max}$ SDP [cm]
1118	Via Brovada	0	0	92	0	135	100	147	124
1351	Cortile interno	0	0	0	0	265	0	314	0
1244	Piazza Boretti	0	0	0	0	37	0	75	0
235	Fiume Lambro	109	95	126	103	146	126	159	146

Tabella 13: sintesi dei tiranti idrici massimi ottenuti in vari punti della frazione di Ponte Albiate a seguito dell'esondazione del Rio Brovada (REV 02)

- ancora una volta, è immediata la percezione del miglioramento passando dallo stato di fatto allo stato di progetto, confermando il parallelismo tra gli eventi T10-20 del primo scenario e T20-50 del secondo, e un miglioramento ancora più marcato per l'evento di progetto, situato in termini di pericolosità tra gli eventi T20 e T50 dello stato di fatto;
- Piazza Boretti è coinvolta in scenari di esondazione solo a partire da eventi cinquantennali per lo stato di fatto mentre, con questa configurazione dell'opera di regolazione, non viene coinvolta da allagamenti durante l'evento di progetto nemmeno per l'evento centennale. L'estensione dell'allagamento è significativa, coinvolgendo la quasi totalità della piazza, ma i tiranti massimi, pur non risultando trascurabili, non raggiungono il metro di altezza (75 cm per l'evento centennale). Accoppiando questo dato a valori di velocità della corrente – per l'evento T100 – abbastanza contenuti (0.3-0.7 m/s), rifacendosi al grafico di definizione della pericolosità idraulica proposto all'interno della D.g.r. 2616/2011 (All.4, Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da esondazione) e riportato in Figura 63, si assegna, conservativamente, un valore di pericolosità alta (H3) all'area per le condizioni di stato di fatto. Allo stato di progetto non è assegnata alcuna categoria, non presentando allagamenti;
- Via Brovada, in sponda sinistra, e il cortile interno dell'edificio di Piazza Boretti 5, in sponda destra, una volta allagati entrano rapidamente (nell'arco di pochi minuti) in condizioni critiche: nel primo caso, per il poco spazio a disposizione del fronte di allagamento per espandersi, essendo ostacolato dalla presenza di edifici a ridosso del versante; nel secondo, per il notevole dislivello (3-4 metri) tra la quota di stramazzo del muro di sponda e il piano campagna del cortile interno. Sia per lo stato di fatto che per lo stato di progetto, quando il Rio Brovada esonda si generano rapidamente aree allagate aventi tiranti superiori o molto superiori al metro d'altezza che, nonostante si accoppino a velocità della corrente non particolarmente elevate (inferiori a 1 m/s per lo stato di progetto, a 1.5 m/s per lo stato di fatto), obbligano a porre entrambe le aree, a livello di pericolosità idraulica, in classe H4 (pericolosità molto elevata) per l'evento di riferimento (l'edificio di Piazza Boretti 5 solo in riguardo alla condizione di stato di fatto, non presentando allagamenti in condizioni di progetto).

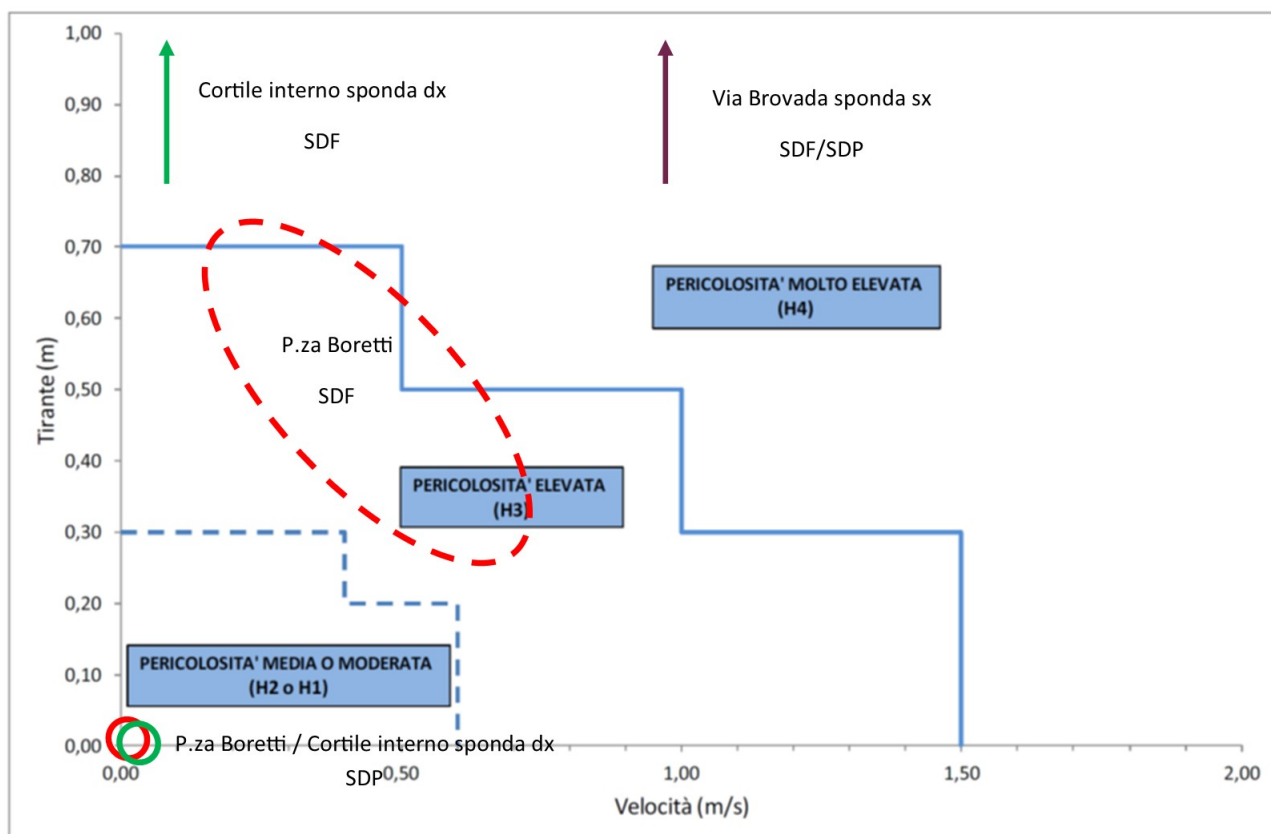


Figura 63: indicazione della stima della pericolosità idraulica delle varie aree della frazione di Ponte Albiate ai sensi dell'All.4 della D.g.r. 2616/2011 (REV 02)

- quanto riportato al punto precedente non sminuisce affatto l'utilità dell'opera di regolazione in progetto, in quanto si passa da una condizione, quella attuale, in cui le aree perfluviali sono da considerarsi a pericolosità molto elevata a partire da 20-50 anni di tempo di ritorno, a una in cui tale soglia viene innalzata a 50-100 anni di tempo di ritorno. Per la completa messa in sicurezza della frazione di Ponte Albiate nei confronti dell'evento di riferimento (T100), come già indicato a partire dal progetto di fattibilità tecnica ed economica, sarà necessario realizzare entrambe le aree di laminazione originariamente previste.
- infine, la presenza dell'opera riduce i tiranti massimi prodotti all'interno del Fiume Lambro dall'immissione dell'onda di piena del Torrente Brovada di una quantità compresa tra i 10 e i 30 cm.

Bisogna aggiungere che, indipendentemente da questa riduzione, l'evento di piena di riferimento del Rio Brovada produce una portata alla confluenza compresa tra i 30 (stato di progetto) e i 35 (stato di fatto) m³/s, inclusiva delle portate esondate afferenti al Fiume Lambro direttamente da Piazza Boretti. Tali valori, pur non essendo insignificanti, non sono tali da innescare fenomeni di esondazione lungo il Fiume Lambro a valle dell'immissione, a meno di trovarsi nella condizione in cui quest'ultimo si trovi già in piena ma, come è stato illustrato in precedenza, una situazione del genere risulta in primis poco probabile vista la differenza, in termini di dinamiche corrivative, dei bacini dei due corsi d'acqua, e in secondo luogo anche qualora ciò si verificasse si verrebbe a creare un'importante rigurgito del Lambro all'interno del Rio Brovada che porterebbe con ogni probabilità a un'esondazione della frazione di Ponte Albiate molto più estesa e severa di quella appena descritta, il cui

contenimento non può essere, se non marginalmente, scopo delle opere previste dal presente progetto.

Le modifiche alla configurazione dello sbarramento introdotte con la REV 02 hanno portato, in termini di conseguenze a valle, la significativa differenza del contenimento della piena in sponda destra, anche per l'evento di progetto (T100), con il conseguente mancato alluvionamento di piazza Boretti. Di contro, i tiranti idrici lungo l'asta del corso d'acqua risultano più elevati per eventi più frequenti (T10 – T20), rimanendo comunque contenuti all'interno dell'alveo inciso, pur con un minore franco di sicurezza.

4.5.2. Analisi dello stato di progetto al variare della configurazione della bocca tarata di fondo dello sbarramento (REV 02)

Questo sotto capitolo è stato aggiunto alla presente versione della relazione idraulica di progetto (REV 02) al fine di illustrare in dettaglio i motivi della scelta di modificare la configurazione definitiva della luce di fondo (passando da un'altezza di 1 metro a una di 1.5 metri, a parità di larghezza), a valle della richiesta di modifica della configurazione dell'opera inclusa all'interno delle prescrizioni regionali durante il procedimento di PAUR.

Innanzitutto, riducendo la tombinatura di fondo a un'opera snella, l'aggiunta di una paratoia a monte della bocca tarata è stato ritenuto opportuno quale elemento di regolazione (non durante l'evento, ma a solo scopo di taratura, come già illustrato in precedenza) della luce di fondo. La presenza della paratoia, tuttavia, ha reso necessario a fini pratici lo spostamento dello sfioratore superficiale a sinistra rispetto all'asse dello scarico di fondo, dovendo anche ridurne l'estensione (da 12.5 a 10 m) al fine di garantirne il funzionamento all'interno dell'alveo inciso.

Fatte le suddette considerazioni, in tabella si riportano i tiranti idrici massimi raggiunti a monte dello sbarramento e l'abbassamento ottenuto rispetto allo stato di fatto lungo il tratto artificiale di Ponte Albiate (tr. D), per ciascun tempo di ritorno considerato, per varie altezze della paratoia (1, 1.25, 1.5, 1.75 e 2 m, colore blu), oltre ai succitati valori ottenuti nella configurazione originaria (REV 01, colore verde) e al caso (B = 12.5, colore arancio) di configurazione tipo REV 02, con paratoia ad altezza 1 metro ma dimensioni dello sfioratore di superficie originarie (solo per T100):

		h _{MAX ODR} [m s.l.m.]				Δh _{max} SDP-SDF TR. D [m s.l.m.]			
	T	10	20	50	100	10	20	50	100
H _{LdF} [m]	1	240.25	241.45	242.28	242.71	21	35	48	16
	1.25	239.53	240.76	242.06	242.5	14	27	44	20
	1.5	238.35	240.11	241.59	242.25	8	20	40	27
	1.75	238.2	239.5	240.99	241.93	4	14	33	23
	2	237.78	238.94	240.42	241.46	1	9	27	15
H _{LdF} [m]	1 (B = 12.5 m)	242.56				10			
H _{TOMB REV01}	1	240.45	241.58	242.36	242.55	22	36	38	10

Tabella 14: sintesi dell'influenza delle modifiche apportate in REV02 allo Stato di Progetto

Dall'osservazione dei valori ottenuti si può affermare che:

- a parità di geometria dell'apertura e di sfioratore superficiale, il passaggio dalla soluzione originaria a quella attuale fornirebbe risultati analoghi per l'evento di progetto (confronto arancio – verde). Il solo cambiamento della tipologia di scarico di fondo (da tombinatura a opera "sottile"), pertanto, incide in maniera trascurabile sui risultati nel caso in esame, influenzando (peraltro positivamente) in maniera modesta soltanto gli output dei tempi di ritorno inferiori;
- la riduzione della larghezza dello scarico superficiale (attivo per T50 – T100, confronto verde-blu) ha come ovvio effetto un (leggero) aumento dei massimi tiranti idrici a monte dello sbarramento, che a discapito di una lieve riduzione del franco di sicurezza fornisce un miglioramento delle condizioni di valle, dovuto a un minore impatto del picco di piena connesso a una inferiore portata stramazzata;
- analizzando la risposta dell'alveo al variare dell'apertura della paratoia, si nota che per $H = 1.5$ m si ottiene la massima riduzione del tirante idrico in alveo (nonché degli allagamenti) del tratto di valle, a scapito di tiranti idrici più elevati (rispetto alla soluzione originaria) per T10 – T20 e comparabili per T50. L'altezza di massimo invaso a monte dello sbarramento si riduce di circa 30 cm.

Facendo riferimento all'osservazione finale, la scelta associata al grado di apertura della luce di fondo, al netto delle future valutazioni conseguenti alla taratura, si può sintetizzare tra decidere se efficientare maggiormente la risposta dello sbarramento per l'evento di progetto (T100, maggiore apertura) o per eventi di tempo di ritorno inferiori (T10 – T20). Posto che la decisione in ultimo spetterà al gestore responsabile dell'opera, anche in considerazione del funzionamento congiunto del presente sbarramento con l'eventuale seconda opera di regolazione prevista a valle dallo studio di fattibilità tecnica ed economica, è parere dello scrivente che, vista l'assenza di allagamento di Ponte Albiate per gli eventi T10 e T20 nonostante la ridotta resa della condizione di progetto, sia da preferirsi la prima opzione, che garantisce il funzionamento ottimale dell'invaso in corrispondenza dell'evento centennale.

4.6. Analisi idraulica dell'ipotetico collasso dell'opera (dam-break)

L'analisi della condizione di collasso è stata mantenuta invariata nella REV 02 – al netto di circostanziate modifiche relative ai riferimenti al capitolo precedente – in quanto:

- il tratto dello sbarramento dove è stata ipotizzata la rottura (la discontinuità tra l'opera in alveo – con nucleo in c.a. – e l'argine in terra rinforzata) non subisce variazioni;
- si è ritenuto concettualmente corretto e prudentiale fare comunque riferimento alla quota di massimo invaso originaria (242.55 m s.l.m.) piuttosto che a quella della configurazione aggiornata (242.25 m s.l.m.) in quanto essa continua a rappresentare lo scenario di partenza maggiormente catastrofico essenzialmente raggiungibile (eventi ancora più critici, al netto del tempo di ritorno molto elevato, genererebbero un esteso allagamento lungo e a monte di via della Valle, con un incremento del tirante idrico relativamente modesto).

Dopo aver estensivamente analizzato il comportamento del Torrente Brovada in condizioni di stato di fatto e di regolare esercizio dell'opera di regolazione, l'ultima parte della presente relazione tratta lo studio del corso d'acqua a valle dell'opera di regolazione (in particolare, del tratto "D" consistente nella frazione di Ponte Albiate) in caso di parziale collasso della struttura da realizzarsi.

Per la categoria di opere di cui fa parte la struttura in progetto (altezza compresa tra 5 e 10 m, volume di invaso compreso tra 10^4 e 10^5 m³), la prescrizione dell'analisi di dam-break rimane in capo all'autorità pubblica competente in una valutazione caso per caso, secondo quanto previsto al punto 9.4 della

Deliberazione 7/3699. Tuttavia, nel caso specifico, vista l'entità e la tipologia degli elementi esposti a tale evenienza, si è ritenuta scontata la necessità di procedere allo studio del potenziale collasso dell'opera, che pertanto viene presentato di seguito.

L'analisi verrà presentata secondo i successivi paragrafi:

- Definizione del dominio di indagine;
- Definizione della breccia e del meccanismo di collasso;
- Risultati ottenuti.

4.6.1. Dominio di indagine

In continuità con quanto stabilito per il funzionamento "ordinario" dello sbarramento, per cui lo studio del corso d'acqua può interrompersi alla confluenza dello stesso in un ricettore di maggiore capacità (punto 9.3), il punto 9.4 della Del. 7/3699 (nota 39) specifica che "in caso di confluenza in un altro corso d'acqua, il calcolo può essere arrestato solo allorché quest'ultimo presenti portate di piena naturali nettamente maggiori di quelle oggetto dello studio e cioè nei casi in cui sia scontato che la piena dovuta a manovre degli organi di scarico defluisca ben contenuta nell'alveo naturale a valle della confluenza". Tale descrizione inquadra piuttosto precisamente la situazione del presente progetto in quanto, come già più volte illustrato, il Rio Brovada si immette in un corso d'acqua di capacità significativamente superiore, il Fiume Lambro.

Per questa ragione, le analisi di dam-break sono state svolte adottando inizialmente il medesimo dominio di indagine delle simulazioni di regolare esercizio dell'opera. Dopo aver osservato che i tiranti idrici prodotti dallo scarico dell'onda di piena all'interno del Fiume Lambro, seppure ovviamente superiori, non erano tali da generare esondazioni da parte di quest'ultimo nemmeno dei pressì della confluenza, si è ritenuto non necessario estendere ulteriormente il dominio di indagine.

4.6.2. Definizione della breccia

La stima delle caratteristiche (modalità, geometria, tempo di formazione) della breccia che porta al (parziale) collasso di una struttura di contenimento di un invaso è un aspetto tanto cruciale quanto incerto nell'ambito di un'analisi di dam-break. Esse dipendono infatti, oltreché dalla conformazione dell'invaso e delle opere delle strutture di ritenuta (geometria, volume invasato, materiali utilizzati, tiranti idrici raggiunti, etc.), anche da condizioni – soprattutto in fase di innesco – difficilmente prevedibili a priori e associate a criticità localizzate dovute a un ventaglio di possibili cause quali difetti costruttivi, deterioramento nel tempo, mancata manutenzione, etc. Nel caso specifico, la difficoltà nella definizione di un plausibile meccanismo di collasso è ulteriormente cresciuta dal carattere temporaneo dell'invaso e dalla presenza di elementi (l'argine in terre rinforzate) per cui la letteratura tecnica nell'ambito specifico è piuttosto carente.

La stima dei parametri della breccia può essere fatta adottando modalità differenti, a seconda dei dati a disposizione e del problema affrontato. In particolare, è possibile:

- confrontare il proprio invaso con i dati storici provenienti da dighe collassate in passato di caratteristiche similari;
- sfruttare equazioni regressive prodotte dall'analisi dei dati di collasso di invasi di varia natura;
- utilizzare modelli fisicamente basati che vadano a stimare le proprietà della breccia sulla base del confronto tra la velocità (o lo sforzo tangenziale) della corrente e le caratteristiche di erodibilità del materiale costituente l'opera di ritenuta;

Prendendo come riferimento il testo *Using Hec-Ras for Dam Break Studies*, prodotto dall'USACE nel 2014 e poi riportato all'interno del *2D Modeling User's Manual*, si condivide il principio espresso secondo cui, più che la scelta di una certa tipologia modellistica (spesso peraltro condizionata dai dati a disposizione o da altri vincoli di natura economica o temporale), ad essere rilevante sia l'applicare un certo grado di flessibilità all'analisi, andando a indagare una diversità di possibili meccanismi di collasso, pur rimanendo nell'ambito di quanto plausibile per l'opera in esame.

Per il caso specifico, l'individuazione del meccanismo di collasso si è basata sulle seguenti considerazioni:

- considerando il carattere temporaneo dell'invaso, che comporterà una sollecitazione alla struttura da parte del volume idrico di monte, appare improbabile un collasso dell'opera di regolazione in alveo, costituita da un nocciolo in cemento armato, con la componente dilavabile (il mistone ghiaioso) adeguatamente protetta dal corazzamento in massi ciclopici;
- spostando l'attenzione all'arginatura in sinistra idraulica, con funzione di strada di manutenzione, i paramenti in terra rinforzata garantiscono l'integrità della struttura nei confronti di potenziali meccanismi erosivi (piping) o di sifonamento, a meno della presenza di superfici di debolezza della struttura dovuti a difetti costruttivi o mancanza di manutenzione;
- ipotizzando dunque la presenza di una zona di criticità lungo il paramento interno della struttura all'arrivo dell'onda di piena, il punto critico, nonché più ragionevole dove collocarla si è ritenuto essere il confine tra l'opera in alveo e l'arginatura in terra rinforzata, per le seguenti ragioni:
 - area di discontinuità nella sezione della struttura: termina il diaframma in calcestruzzo armato che, oltre alla funzione strutturale, funge da piano di interruzione dei potenziali moti di infiltrazione dell'acqua;
 - ci si trova sul ciglio della sponda sinistra, nel punto dell'arginatura di massima altezza e massima vicinanza all'opera, dove quindi un'eventuale rottura causerebbe i danni maggiori a valle;
- relativamente al meccanismo di collasso, l'unico che appare realistico è quello di erosione interna, o piping, con una breccia di diametro inizialmente contenuto che va poi ad espandersi per l'intera altezza dell'argine. Il collasso per sormonto (overtopping), infatti, può essere escluso per le seguenti ragioni:
 - come anticipato in precedenza, lo sfioratore superficiale dell'opera verrà adeguatamente corazzato in massi cementati;
 - relativamente all'argine in sponda sinistra, la quota di coronamento (243.6 m s.l.m.) risulta sensibilmente più elevata di buona parte del piano stradale di Via della Valle (242.7 m s.l.m.), nel tratto dell'attraversamento del Rio Brovada in ingresso all'area di laminazione: ciò significa che, ben prima di raggiungere la quota di coronamento (per la quale comunque servirebbero eventi catastrofici), si andrebbe a innescare un esteso fenomeno di rigurgito a monte di Via della Valle, con l'allagamento dell'area coltivata situata Nord della stessa, senza apprezzabili aumenti del tirante idrico interno alla vasca.

Alla luce delle considerazioni sovraesposte, si è stabilito di modellare una rottura per piping dell'argine di raccordo dell'opera di regolazione in prossimità del termine della struttura in calcestruzzo, lungo il ciglio della sponda sinistra del corso d'acqua. La quota del piano campagna, in questo tratto è circa pari a 239.00 m s.l.m.

La rottura si è ipotizzata avvenire nel peggiore istante possibile, ovvero al raggiungimento della quota di massimo invasore (242.55 m s.l.m.) all'interno dell'area di laminazione. Per quanto detto in precedenza in

merito al rigurgito a monte di Via della Valle, ipotizzare in ogni caso una quota più elevata sarebbe idraulicamente poco realistico.

La breccia è stata modellata sulla base di tre differenti equazioni regressive, sviluppate a partire da estensive ricerche sull'analisi del collasso di sbarramenti in terra, e proposte all'interno del testo *Using Hec-Ras for Dam Break Studies*: l'equazione di Froelich (1995); l'equazione di Froelich aggiornata (2008); l'equazione di Von Thun e Gillette (1990). Tutte e tre le equazioni forniscono una stima dei parametri caratterizzanti la breccia (larghezza media, B_{ave} [m] o di fondo, B_{bot} [m]; tempo di formazione, t_f [h]) sulla base delle caratteristiche dell'invaso e dell'opera.

Equazione di Froelich aggiornata

$$B_{ave} = 0.1803K_0V_w^{0.32}h_b^{0.19}$$

$$t_f = 0.00254V_w^{0.53}h_b^{-0.9}$$

Dove:

- K_0 [/] è un parametro adimensionale, funzione del meccanismo di collasso e pari a 1 in caso di piping;
- V_w [m³] è il volume di invasore al momento dell'inizio del collasso, insistente sulla breccia, fissato pari a 50'000 m³, considerando il volume compreso tra la quota di fondo della breccia (239 m s.l.m.) e la quota di massimo invasore (242.55 m s.l.m.);
- h_b [m] è l'altezza massima della breccia formata (4.6 m);
- g [m/s²] è l'accelerazione di gravità (9.81 m/s²);

Infine, la pendenza delle sponde (H:V) della breccia per questo metodo è indicata pari a 0.9.

Equazione di Froelich aggiornata

$$B_{ave} = 0.27K_0V_w^{0.32}h_b^{0.04}$$

$$t_f = 63.2 \sqrt{\frac{V_w}{gh_b^2}}$$

Dove i parametri sono i medesimi descritti per l'equazione precedente e la pendenza delle sponde (H:V) della breccia per questo metodo è indicata pari a 0.7.

Equazione di Von Thun e Gillette

$$B_{ave} = 2.5h_w + C_b$$

$$t_{f\ SET1} = 0.02h_w + 0.25$$

$$t_{f\ SET2} = \frac{B_{ave}}{4h_w}$$

Dove:

- h_w [m] è il tirante idrico al momento del collasso rispetto alla quota di fondo della breccia (3.55 m);
- C_b [/] è un parametro adimensionale funzione del volume di invasore, pari a 6.1 per il caso in esame;
- il tempo di formazione (t_f [h]) viene calcolato mediante due diverse formulazioni (set1 e set2), di cui si è utilizzato il valor medio.

Infine, la pendenza delle sponde (H:V) della breccia per questo metodo è indicata pari a 1.

I valori dei parametri di riferimento così ottenuti sono riassunti in *Tabella 15*.

SET DI EQUAZIONI	RISULTATI	
	B_{ave} [m]	t_F [h]
Froelich (1995)	7.68	0.2
Froelich (2008)	9.15	0.27
Von Thun & Gillette	15.1	0.7

Tabella 15: valori di B_{ave} e t_F della breccia per le varie formulazioni utilizzate

Una volta determinati i due parametri fondamentali per la modellazione della breccia, si sono definiti:

- la quota di formazione iniziale della breccia, fissata a 240 m s.l.m., prossima al fondo dell'argine;
- il coefficiente di efflusso della luce a battente durante la fase di piping, solitamente compreso tra 0.5 e 0.6, fissato pari al valor medio 0.55;
- il coefficiente di efflusso dello stramazzo a larga soglia formatosi a seguito del raggiungimento del coronamento dell'argine da parte della breccia in espansione, solitamente compreso tra 1.3 e 1.8 per le dighe in materiali sciolti non coesivi e fissato pari a 1.55 nel caso specifico, valore medio;
- la curva di progressione dello sviluppo della breccia in relazione al suo tempo di formazione, per cui si è scelta la forma sinusoidale mostrata in *Figura 64*.

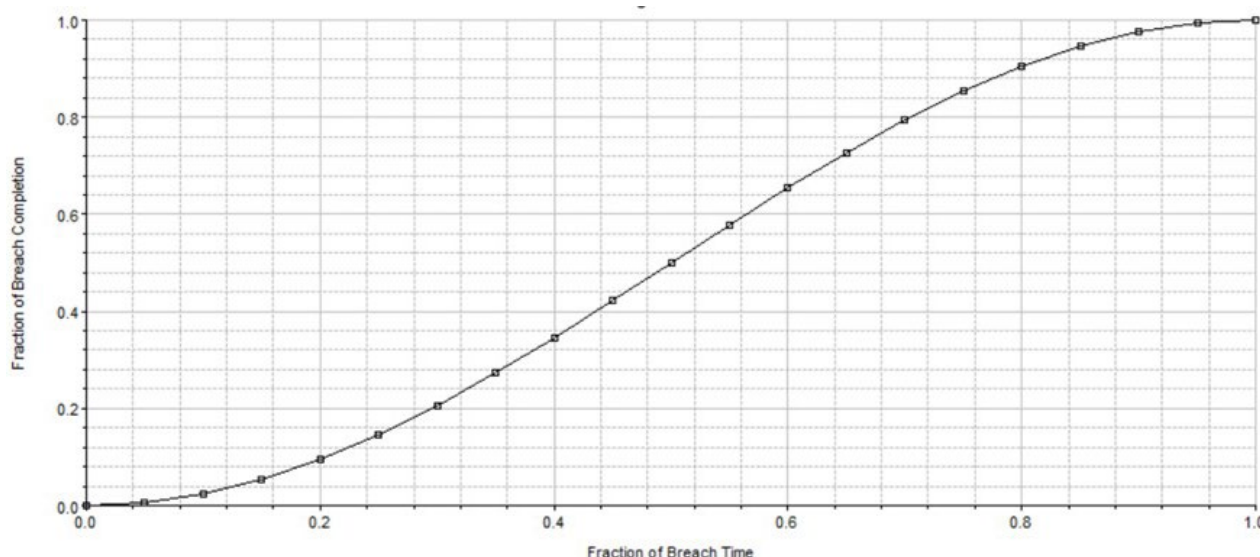


Figura 64: curva di sviluppo della breccia rispetto al relativo tempo di formazione

4.6.3. Risultati ottenuti

Una volta definiti il meccanismo e il tempo di formazione, le dimensioni e l'istante di innesco della breccia, si passa all'analisi dei risultati.

Idrogrammi in uscita dalla breccia

Il primo grafico che si ritiene opportuno commentare è relativo agli idrogrammi in uscita dalla breccia (*Figura 65*), in funzione della formulazione scelta per la definizione di quest'ultima. Dall'analisi degli idrogrammi risultanti, si possono fare le seguenti considerazioni:

- i tre idrogrammi appaiono molto consistenti tra di loro, indicando un (prevedibile) comportamento impulsivo dell'onda di piena formatasi a seguito della rottura, con una portata di picco compresa tra i 40 e i 50 m³/s e raggiunta nell'arco di pochi minuti;

- anche la fase di svuotamento dell'area di laminazione, di conseguenza, subisce una significativa riduzione;
- dal momento che la formulazione di Froelich aggiornata (2008) fornisce la risposta più severa, sarà quella che verrà utilizzata nella presentazione dei successivi risultati, procedendo verso valle lungo il corso d'acqua, a confronto con la configurazione di progetto in condizioni di massimo invaso;
- la portata in uscita dalla breccia diventa preponderante rispetto al corrispondente valore di picco della portata in uscita dall'opera (luce di fondo+sfioratore superficiale) in condizioni di massimo invaso, che si ricorda essere pari a 31.6 m³/s, come osservabile dal confronto tra gli idrogrammi di piena al termine del tratto B (sez. 103, circa 75 metri a valle dell'opera di regolazione) in *Figura 66*.

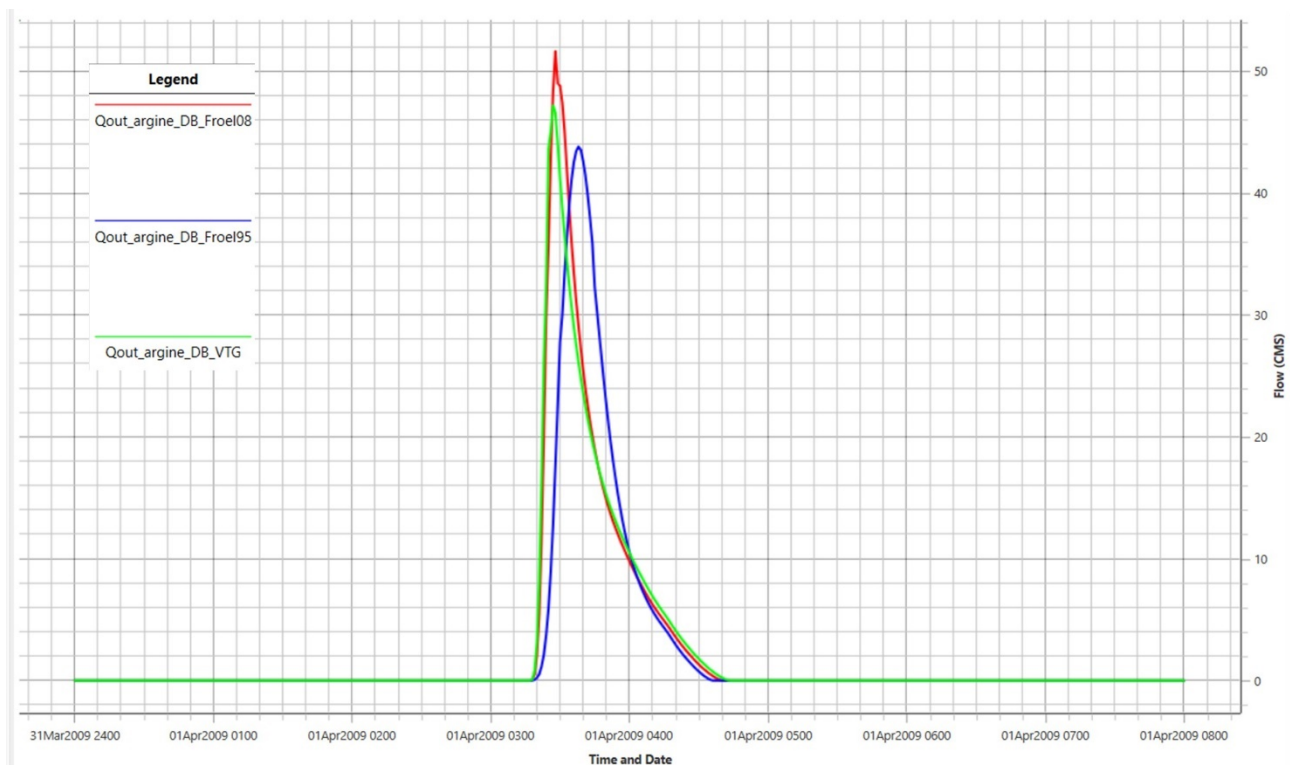


Figura 65: idrogrammi in uscita dalla breccia dell'argine di accesso all'opera di regolazione secondo le 3 formulazioni adottate

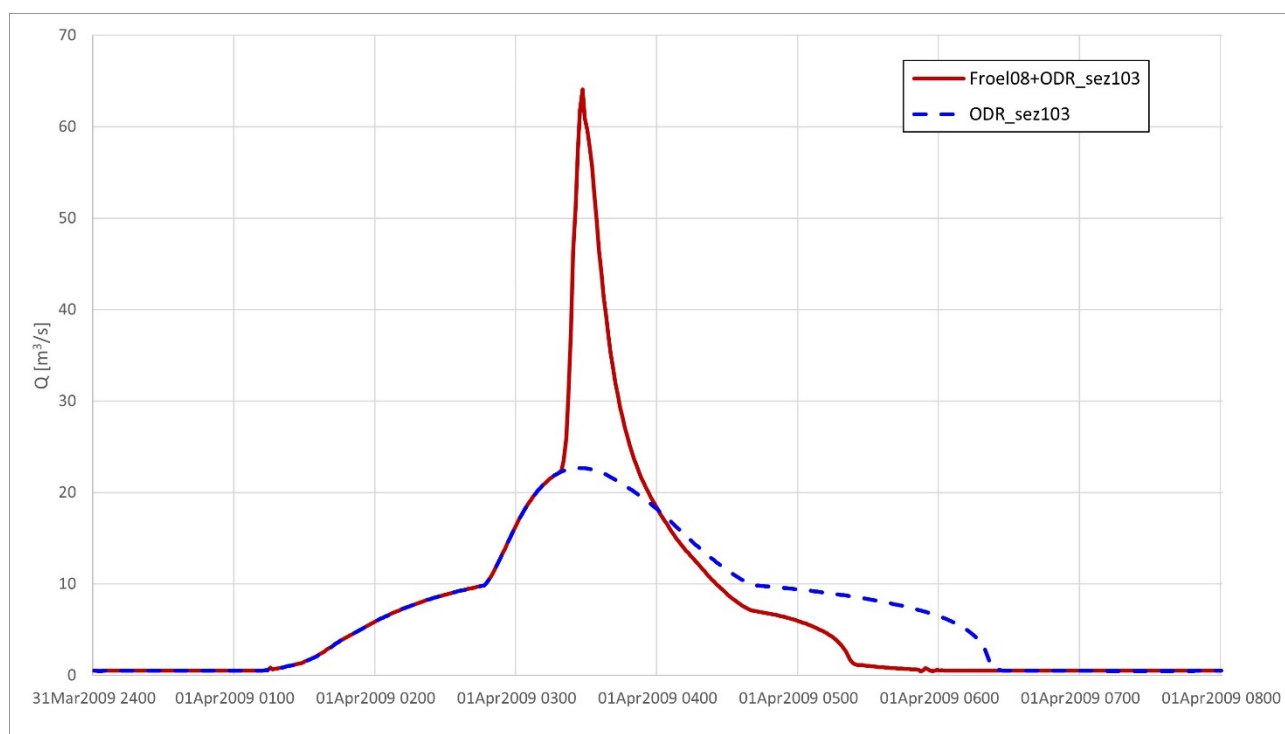


Figura 66: confronto tra gli idrogrammi di piena in condizioni di progetto e a valle del dam-break (formulazione aggiornata di Froelich) alla sezione 103 del modello

Idrogrammi di piena al termine dei tratti B, C e D

La successiva analisi mette a confronto gli idrogrammi di piena “netti”, generati dall’apertura della breccia (ottenuti per differenza tra l’idrogramma totale e l’idrogramma della normale condizione di progetto) alle sezioni terminali dei tratti B, C e D (rispettivamente sez. 103, 26, 10, Figura 67), al fine di poter valutare la propagazione dell’onda di piena lungo l’asta del Rio Brovada.

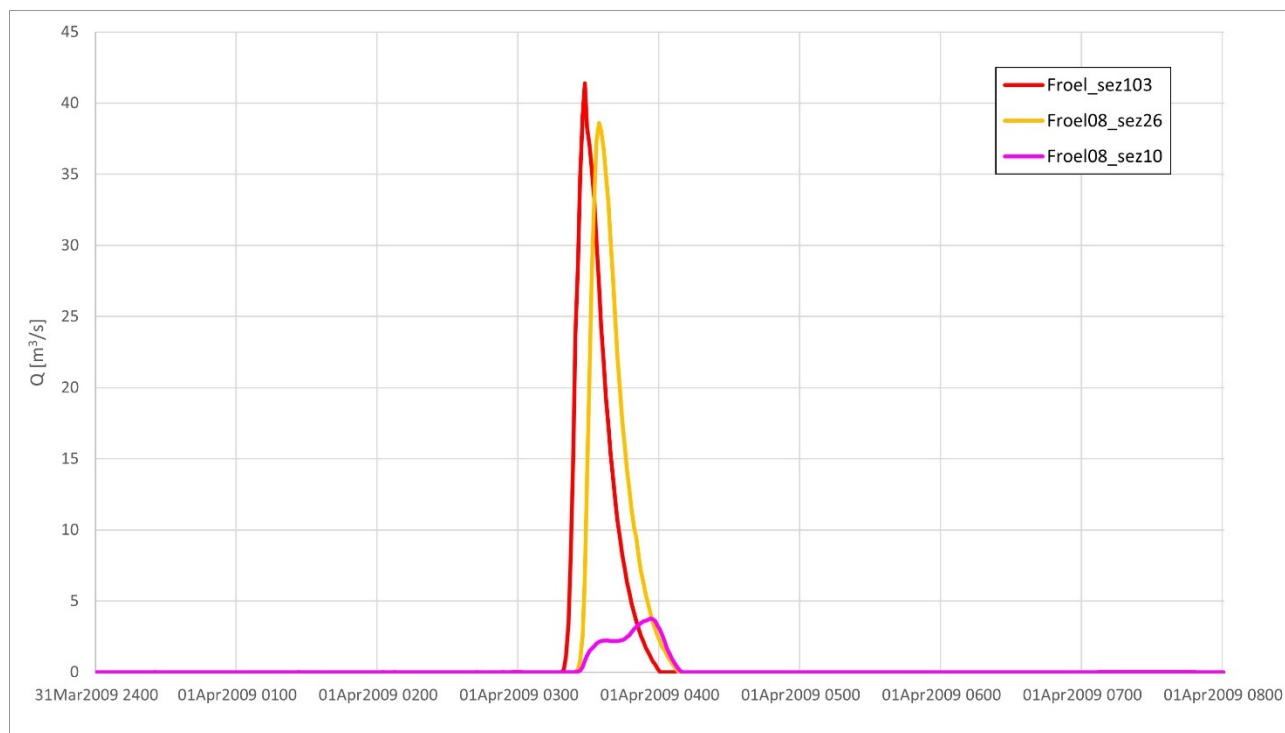


Figura 67: idrogrammi di piena generati dall’apertura della breccia, al termine dei tratti B (sez. 103), C (sez. 26) e D (sez. 10) del modello

Dall'osservazione del grafico è possibile effettuare alcuni commenti circa il comportamento dell'onda di piena nel suo percorso verso valle:

- in primis, appare immediata la drastica differenza nel passaggio tra la sezione 103 e la sezione 26 (tratto C), e tra la sezione 26 e la sezione 10 (tratto D). Infatti, a dispetto del fatto che il tratto C è quasi dieci volte più lungo del tratto D (1.6 km contro 200 m), nel primo l'onda subisce solo un leggero smorzamento, rimanendo quasi uguale in termini di forma e portata al picco all'onda originaria della sezione 103, nel passaggio dalla sezione 26 all'immissione nel Fiume Lambro l'idrogramma perde circa il 90% del suo volume e portata al picco. Questo porta a due considerazioni:
 - come già anticipato nell'analisi idraulica a regime, il tratto C si conferma un tratto interlocutorio, all'interno del quale l'onda di piena trasla quasi rigidamente dal suo inizio fino alla fine, senza mai espandersi al di fuori dell'alveo inciso (alveo non a caso quasi sempre marcatamente infossato tra sponde abbastanza alte per le portate transistanti, e quindi di capacità adeguata);
 - il tratto di Ponte Albiate verrebbe messo in crisi da un eventuale collasso dell'argine delle dimensioni paventate, dal momento che la quasi totalità del volume dell'onda da esso generata finirebbe per esondare nel territorio della frazione;
- il secondo aspetto da sottolineare è l'estrema rapidità di trasferimento dell'onda dall'opera alle porte di Ponte Albiate, con il picco di piena che passa dalla sezione 103 alla sezione 26 nell'arco di 6 minuti, tradotto in una celerità della stessa superiore ai 5 m/s.

Profilo longitudinale del tratto D

Si passa dunque all'analisi dei profili longitudinali del pelo libero del tratto terminale del Rio Brovada, aggiungendo ai due profili dell'evento di riferimento (T100) contenuti in *Figura 52* anche quella della simulazione di dam-break, nel relativo istante di picco (*Figura 68*).

Osservando i risultati ottenuti, si manifesta un significativo incremento del tirante idrico in quest'ultima condizione rispetto alle precedenti, soprattutto in corrispondenza dell'inizio del tratto artificializzato (sez. 21, rispettivamente 35 e 60 cm in più rispetto a stato di fatto e stato di progetto). Tale valore si riduce progressivamente procedendo verso valle, fino a raggiungere i valori rispettivamente di 10 e 40 cm alla sezione 13, fornendo una prima indicazione dello sviluppo dell'esondazione in caso di dam-break, come si mostrerà chiaramente con i successivi output, ossia che il Rio Brovada in questo caso scaricherà portate consistenti anche in direzione del cortile privato in sponda destra.

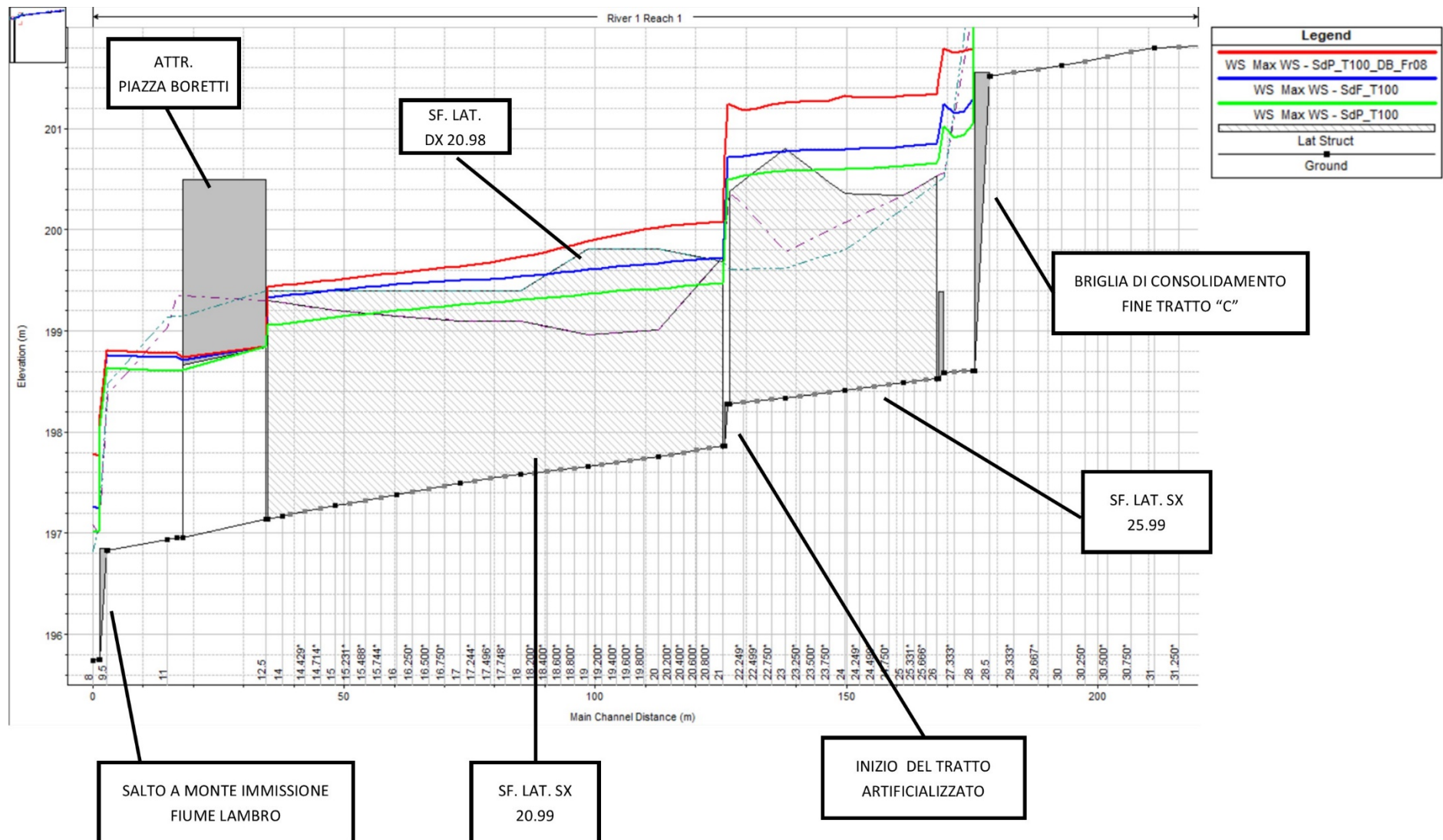


Figura 68: confronto tra profili longitudinali delle altezze idriche massime raggiunte all'interno del Rio Brovada per le condizioni di stato di fatto (blu), stato di progetto (verde) e dam-break (rosso) (REV 02)

Portate stramazze dagli sfioratori laterali

L'ultima serie di grafici (*Figura 69*) riguarda il passaggio dall'asta del Rio Brovada all'area 2D che rappresenta la frazione di Ponte Albiate, mediante i consueti sfioratori laterali già descritti in precedenza.

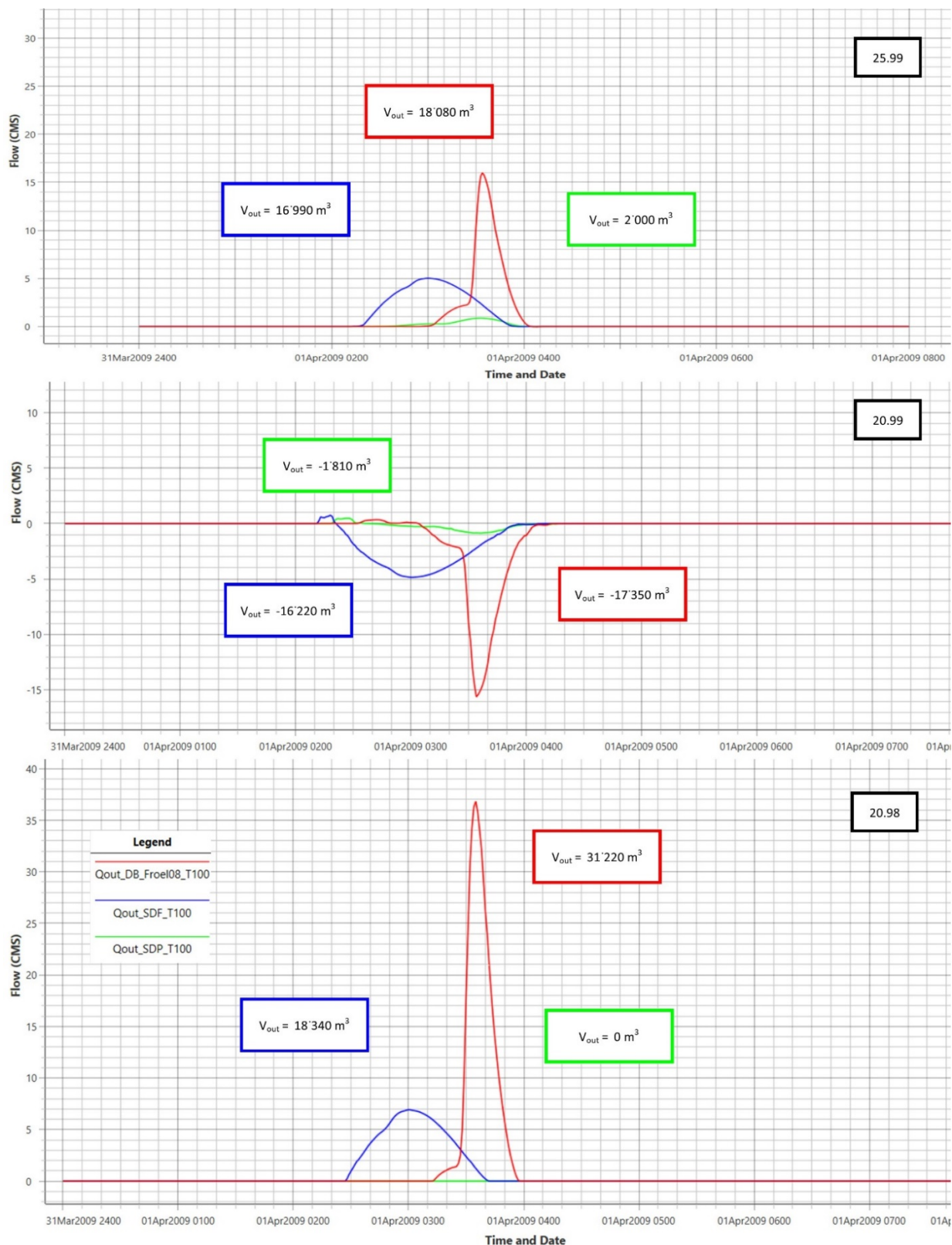


Figura 69: confronto tra le portate transanti per gli sfioratori laterali del tratto D, in condizioni di progetto e in caso di dam-break (REV 02)

Confrontando gli idrogrammi per le tre casistiche presentate (stato di fatto, stato di progetto, dam-break), emergono le seguenti considerazioni:

- lungo la sponda sinistra, anche per il dam-break si ripropone qualitativamente lo stesso meccanismo di allagamento già verificatosi nelle altre due situazioni, con un'esondazione del corso d'acqua da monte, tramite l'elemento 25.99, e il successivo drenaggio delle acque nuovamente verso il Rio Brovada tramite l'elemento 20.99. I volumi idrici coinvolti sono comparabili a quelli dello stato di fatto, ma l'esondazione ha naturalmente un comportamento decisamente più impulsivo, che si traduce, come si vedrà in seguito, in valori più elevati dei tiranti massimi e delle velocità della corrente nelle aree esondate;
- in sponda destra si verificano i maggiori cambiamenti: i maggiori tiranti generati, tanto all'interno del corso d'acqua quanto in sponda sinistra, a fronte di uno scarico ordinario (l'attraversamento di Piazza Boretti) ormai saturo e prossimo al funzionamento a battente, "spingono" di fatto l'onda di piena – in arrivo a grande rapidità – a scaricare verso il cortile in sponda destra che, si ricorda, ha quote di piano campagna sensibilmente più basse del fondo del corso d'acqua. Si spiega in questo modo la grande differenza, in termini di volumi esondati dall'elemento 20.98, tra stato di fatto e condizione di dam break, a fronte di una situazione in sponda sinistra simile in termini di bilancio complessivo.

Opera di regolazione – Mappe di allagamento e velocità

Passando alla componente bidimensionale, le mappe in Figura 70 e Figura 71 mostrano il comportamento idraulico – sintetizzato mediante le due variabili di maggiore interesse, il tirante idrico h [m] e la velocità della corrente v [m/s] – nei pressi dell'opera di regolazione e dell'argine di raccordo in sponda sinistra al verificarsi dell'apertura della breccia in quest'ultimo.

L'analisi dei risultati consente di affermare che:

- l'estensione dell'area allagata, anche nell'istante di maggiore espansione (03:30), non è particolarmente estesa, mantenendosi all'interno di un raggio di 50 metri dalla breccia, e all'interno di un'area coltivata priva di elementi esposti e molto distante dalla Via della Valle;
- tuttavia:
 - la fase ascendente dell'allagamento avviene molto rapidamente (dall'istante dell'innescio a quello di massima criticità passano circa 15 minuti);
 - i valori del massimo tirante idrico (160 cm) e velocità della corrente (5 m/s), raggiunti immediatamente a valle dell'opera, sono tali da considerare l'area allagata a pericolosità molto elevata secondo la classificazione di Figura 63;

Pertanto, il piano di protezione civile comunale e lo studio del rischio idraulico comunale dovranno tenere conto di questo aspetto.

Oss: la modellazione dell'evento è stata effettuata a partire da circa 10 metri a valle dell'arginatura, anziché a ridosso della stessa, a causa dell'impossibilità, in Hec-Ras, di sagomare il passaggio tra opera e argine, come avverrà nella realtà. Dal momento che questa approssimazione non comporta alcuna significativa differenza nell'analisi del comportamento a collasso della struttura, essa può ritenersi ragionevolmente valida.

Frazione di Ponte Albiate – Mappe di allagamento e velocità

Infine, in Figura 72 e Figura 73 si mostrano rispettivamente, per la frazione di Ponte Albiate:

- lo sviluppo dell'esondazione, in termini di tiranti idrici, per i medesimi istanti temporali e la medesima situazione di Figura 61, a cui si aggiunge l'apertura della breccia;

- lo sviluppo della distribuzione di velocità della corrente per l'evento di dam-break durante gli istanti centrali della fase di esondazione.

Osservando i risultati ottenuti, si possono trarre diverse conclusioni sul comportamento idraulico dell'area in caso di collasso dell'arginatura, tra cui:

- vengono essenzialmente confermate le considerazioni effettuate nell'analisi negli elementi monodimensionali precedentemente affrontati, per cui si assiste allo "scarico" della quasi totalità della componente aggiuntiva dell'onda di piena generata dal dam-break verso il cortile privato/area garage ribassato in sponda destra. Questa zona, infatti, si allaga con tiranti elevati (oltre 4 m), a fronte di una situazione in sponda sinistra aggravata di circa 50 cm (da 124 a 178 cm) nel suo punto peggiore;
- lo scarico in sponda destra si riverbera a sua volta in un repentino allagamento di Piazza Boretti, con il raggiungimento di tiranti idrici superiori al metro (125 cm) massime velocità della corrente oltre 3 m/s;
- va sottolineata ancora una volta l'estrema celerità dell'intero processo di dam-break: come si nota particolarmente bene osservando le velocità (ma pure i valori dei tiranti idrici), con una fase critica di circa 40 minuti di durata (03:20 – 03:40), raggiungendo il picco di intensità (03:35) circa 20 minuti dopo l'inizio dell'apertura della breccia nei pressi dell'opera di regolazione;
- infine, anche il Fiume Lambro risente moderatamente dell'evento di dam-break: l'immissione impulsiva di una portata superiore ai 50 m³/s genera un incremento di livello di circa 110 cm nei pressi della confluenza rispetto alle condizioni di morbida (portata 5 m³/s) e di 60 cm rispetto al valore di picco raggiunto in condizioni di progetto regolari. Il tirante raggiunto rimane ancora sensibilmente inferiore rispetto ai relativi eventi di piena anche di tempo di ritorno inferiore rispetto all'evento di progetto e abbondantemente inferiore alla quota dell'intradosso dell'attraversamento di Via Vittorio Veneto, situato immediatamente a valle della confluenza, generando al più localizzate e ridotte esondazioni in corrispondenza dei cigli di sponda. Per queste ragioni, considerando anche l'estrema straordinarietà dell'evento, si reputa non necessario estendere ulteriormente il dominio di indagine.

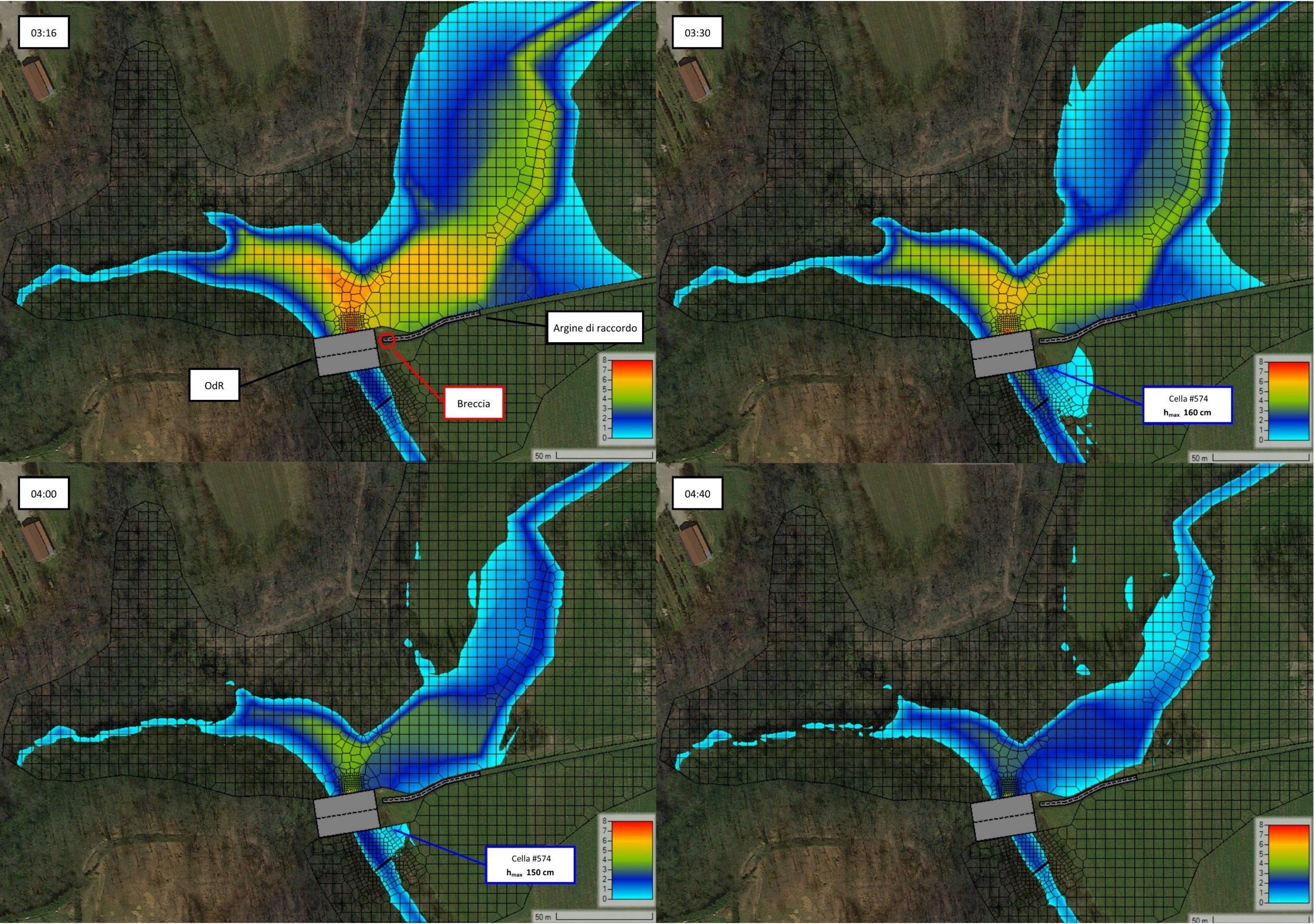


Figura 70: tiranti idrici a monte e valle dell'opera di regolazione appena prima dell'apertura della breccia (03:16), alla massima espansione (03:30), in fase regressiva (04:00), all'esaurirsi dell'apporto della breccia (04:40)

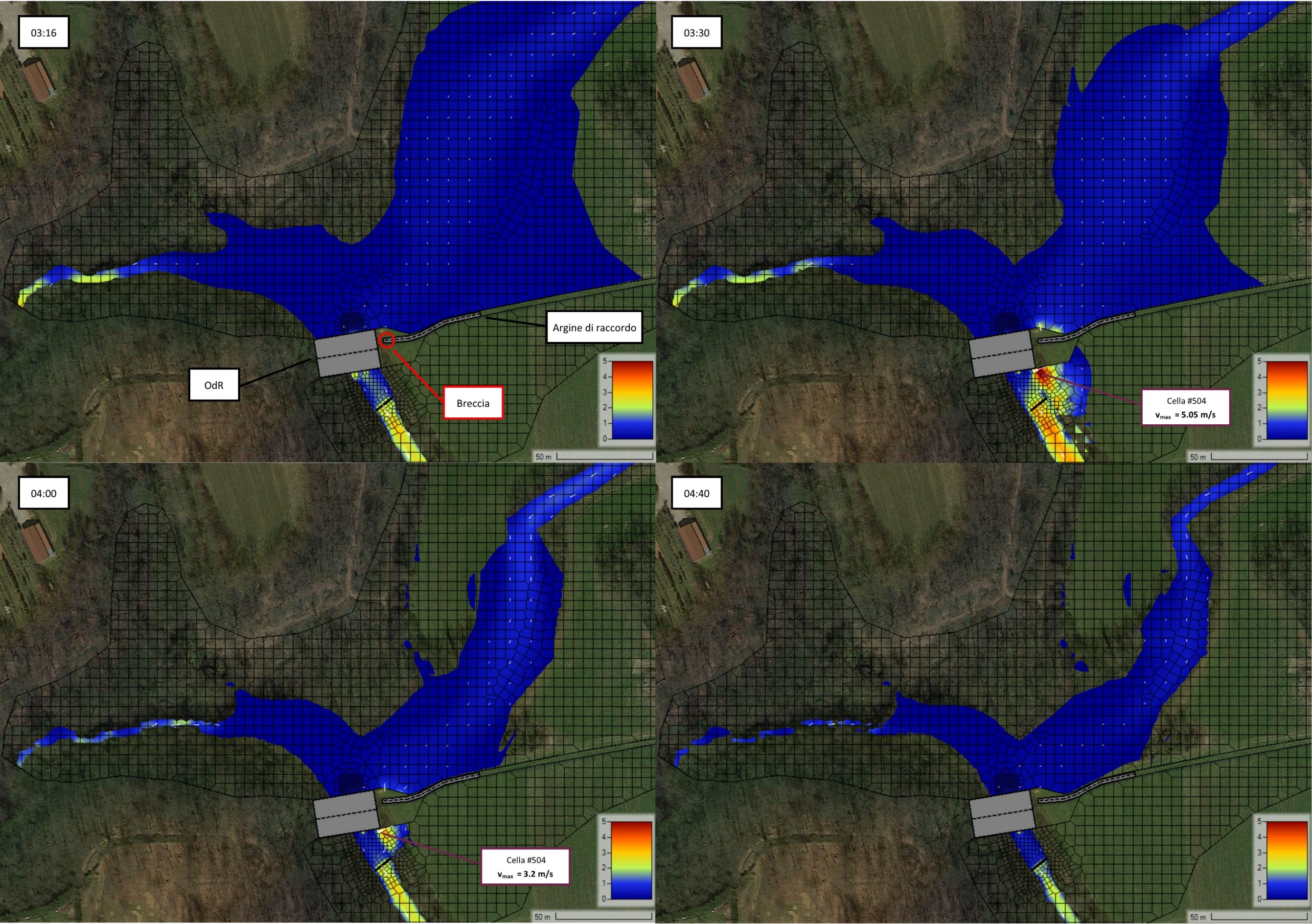


Figura 71: distribuzione delle velocità della corrente a monte e valle dell'opera di regolazione appena prima dell'apertura della breccia (03:16), alla massima espansione (03:30), in fase regressiva (04:00), all'esaurirsi dell'apporto della breccia (04:40)

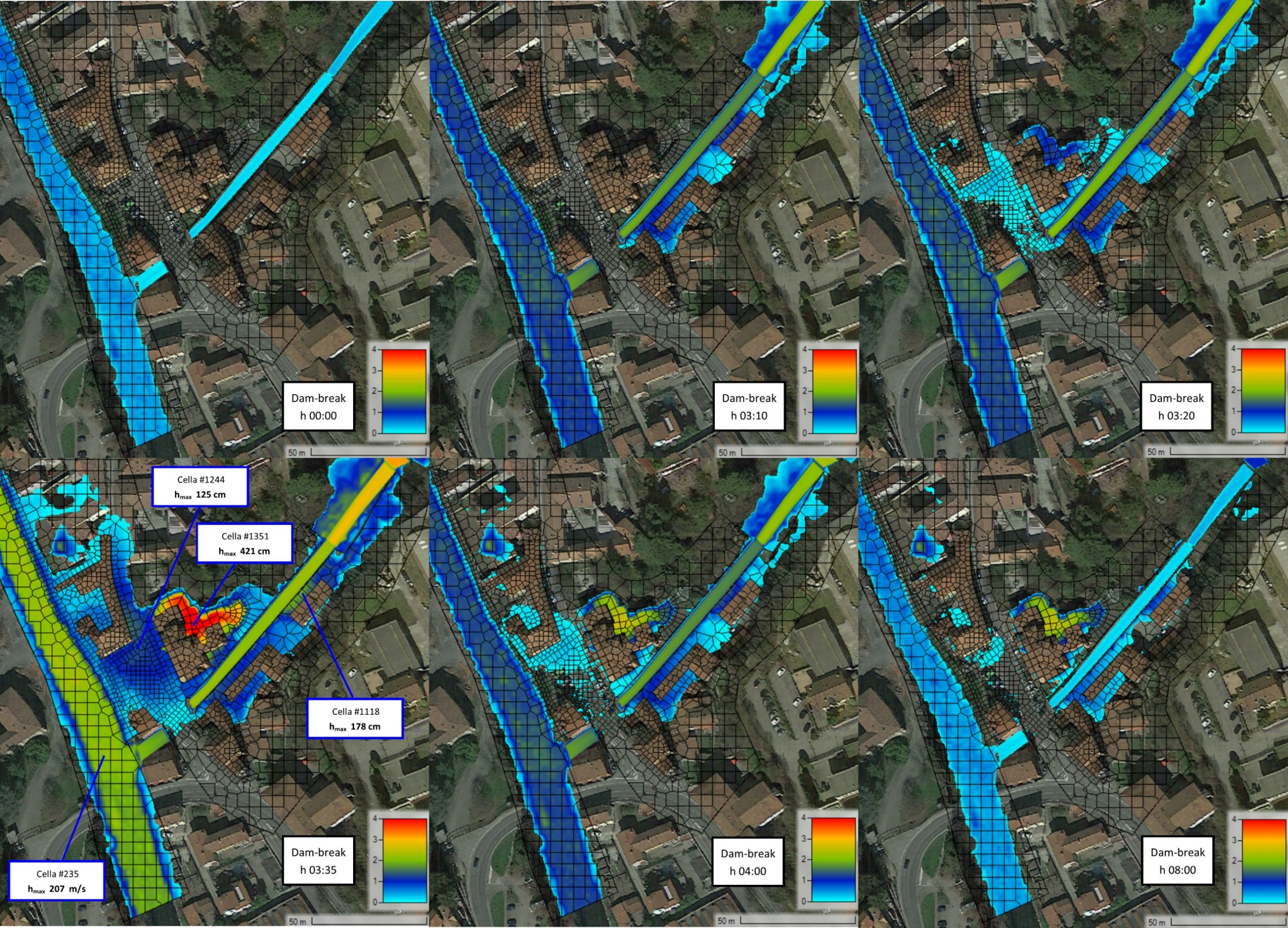


Figura 72: tiranti idrici nella frazione di Ponte Albiate al passaggio dell'onda di piena, inclusiva del dam-break in condizioni di massimo invaso

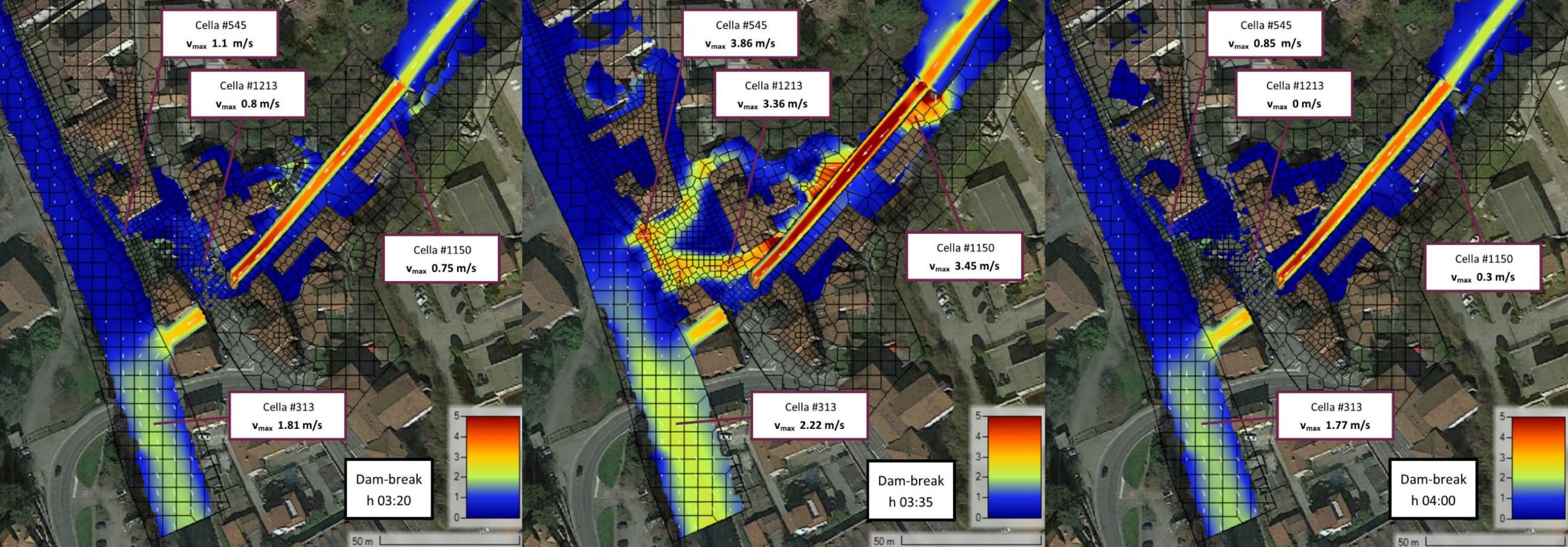


Figura 73: distribuzione della velocità della corrente nella frazione di Ponte Albiate al passaggio dell'onda di piena, inclusiva del dam-break in condizioni di massimo invaso

5. Conclusioni

Le considerazioni conclusive riportate nella versione originaria del progetto rimangono essenzialmente valide anche a valle della REV 02, con le sole modifiche introdotte al fine di renderle consistenti laddove si è fatto riferimento a risultati differenti.

La presente relazione sintetizza e illustra i risultati della modellazione idrologica del bacino del Torrente Brovada e della modellazione idraulica del tratto terminale (quasi 3 km) del corso d'acqua medesimo, in condizioni di stato di fatto, di stato di progetto e di dam-break, nell'ambito del progetto definitivo *Area di esondazione controllata del Rio Brovada – Lotto 1: area di monte in Comune di Besana in Brianza (MB)*. La relazione è stata redatta in conformità a quanto previsto dalla normativa vigente, facendo riferimento alla L.R. 8/98 e alla successiva D.g.r. 7/3699, contenente le direttive applicative della legge.

Innanzitutto, lo studio dello stato di fatto ha confermato la maggiore criticità del corso d'acqua, più volte ripresentatasi dalla seconda metà del secolo scorso ad oggi, ovvero l'insufficienza idraulica del suo tratto terminale prima dell'immissione nel Fiume Lambro, un canale a cielo aperto artificializzato di circa 150 metri di lunghezza, all'interno della frazione di Ponte Albiate. Tale struttura risulta di capacità adeguata a smaltire eventi meteorologici di tempo di ritorno relativamente ridotto (indicativamente fino a 10 anni), andando a esondare nella frazione urbanizzata circostante, dove sono presenti numerosi elementi esposti (edifici residenziali e commerciali, infrastrutture pubbliche, discreto transito di persone), in situazioni più severe. La risposta quantitativa dell'analisi idraulica ha fornito dei valori delle grandezze di riferimento (tiranti idrici e velocità della corrente) che portano, per l'evento di riferimento ($T = 100$ anni), a una classificazione della pericolosità dell'area massima (H4, molto elevata, ai sensi della D.g.r. 2616/2011), assolutamente non accettabile per un centro urbanizzato.

Da qui la necessità di un intervento di regimazione del Rio Brovada, introdotto nella sua totalità nel Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica (2017), che prevede la realizzazione di due aree di esondazione controllata lungo l'asta del corso d'acqua, di cui il presente progetto definitivo ha sviluppato il primo lotto, occupandosi del dimensionamento dell'area di laminazione di monte, da realizzarsi immediatamente a valle di una briglia esistente all'interno della frazione di Calò, in Comune di Besana in Brianza, circa 2 km a monte della confluenza nel Fiume Lambro. L'introduzione dell'opera, una struttura mista in calcestruzzo armato, terra e massi ciclopici cementati, completata da un'arginatura di collegamento alla strada in sinistra idraulica, e dotata di una bocca tarata non regolabile al fondo e uno sfioratore di superficie a larga soglia, ha avuto lo scopo primario di alleviare le condizioni di rischio idraulico nei pressi di Ponte Albiate, laminando le portate in ingresso nella rispettiva area – in parte boschiva, in parte coltivata – di monte, racchiusa tra l'opera, Via della Valle e il cimitero di Calò. L'area, in condizioni di massimo invaso, racchiude un volume di circa 50'000 m³, sparsi su circa 24000 m² di superficie, con un tirante idrico massimo di oltre 6 metri.

La modellazione dello stato di progetto ha permesso di quantificare il miglioramento indotto dalla laminazione per la frazione di Ponte Albiate, sintetizzabile in una sostanziale equivalenza tra gli eventi T20 di progetto e T50 di stato di fatto, con conseguente parziale abbassamento della pericolosità dell'area. È stata tuttavia confermata anche, al fine di rendere il tratto terminale del corso d'acqua sufficiente nei confronti dell'evento di riferimento, la necessità di procedere al completamento della configurazione prevista all'interno del PFTE, ovvero di dover realizzare anche la seconda area di esondazione controllata per evitare completamente l'allagamento di Ponte Albiate.

Infine, l'analisi di dam-break dell'opera di regolazione, ha fornito un'indicazione quantitativa della gravità degli allagamenti (non tanto nei pressi dell'opera di regolazione quanto nella frazione di Ponte Albiate), in termini di estensione, tiranti idrici e velocità della corrente delle aree coinvolte. Oltre ai dati di tipo strettamente idraulico, prevedibilmente critici, ciò che risulta maggiormente rilevante nel caso specifico, a parere del progettista, è la ridotta tempistica con cui si verifica il fenomeno, il quale nasce, raggiunge la condizione di picco e si esaurisce in meno di un'ora. Detto che le ipotesi effettuate nell'analisi sono state conservative, e che la probabilità dell'occorrenza di un collasso quale quello modellato appare remota, sarà necessario che la versione definitiva del disciplinare per l'esercizio, la manutenzione e la vigilanza dell'opera, nonché tutti gli altri documenti aventi una valenza in termini di gestione emergenziale del rischio idraulico per l'area di interesse (es. i Piani di protezione civile dei comuni coinvolti) contemplino al loro interno questa eventualità, descrivendo in dettaglio tutte le azioni da compiere da parte dei soggetti incaricati per la messa in sicurezza di beni e persone.

L'incremento dell'apertura di fondo ha comportato una variazione nei valori di altezza e volume di massimo invaso, come riportato all'interno della relazione. Tuttavia, cautelativamente, nella redazione della bozza di disciplinare per l'esercizio, manutenzione e vigilanza dello sbarramento si è deciso di fare in ogni caso di riportare i valori originari, nel caso in fase di esercizio il gestore decida di optare per una configurazione dello scarico di fondo maggiormente restrittiva.

Allegato A – Idrogrammi di piena risultanti dalla modellazione afflussi-deflussi dell'evento critico per vari tempi di ritorno

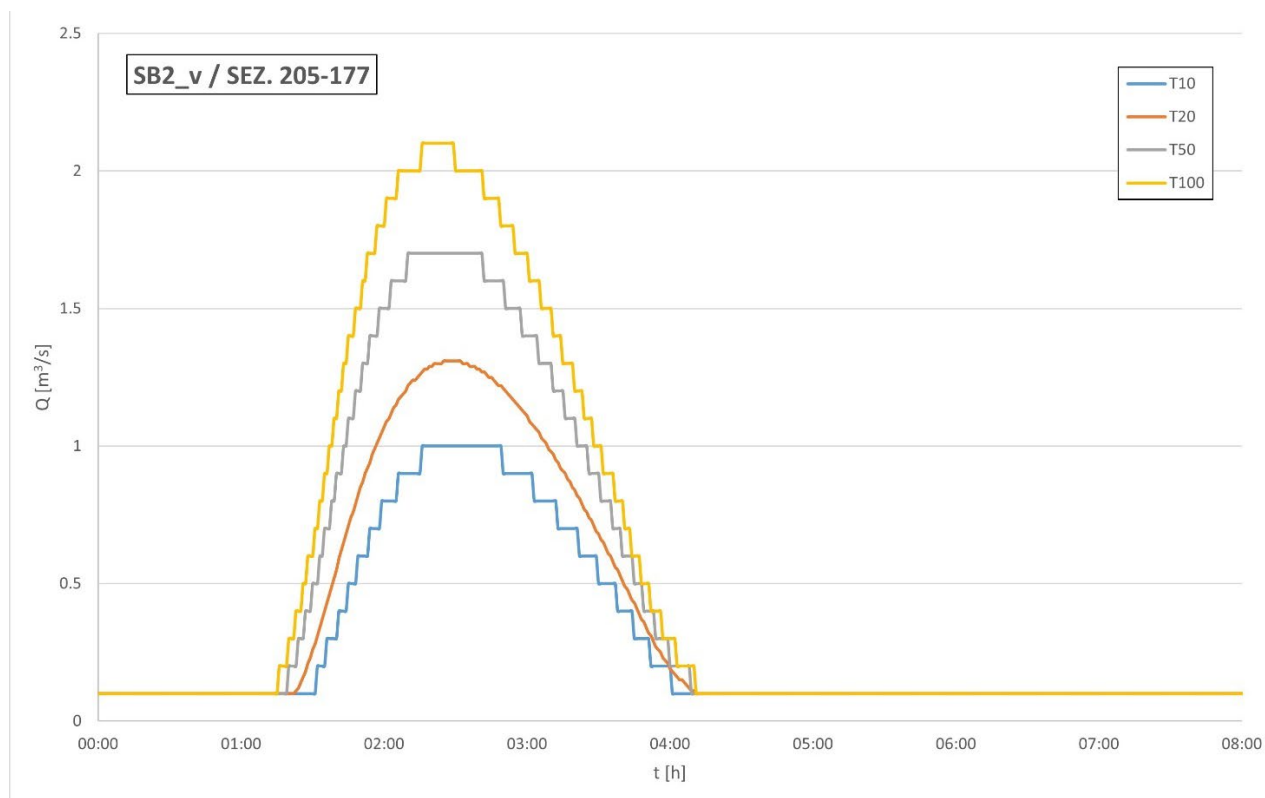


Figura 74: idrogrammi di piena per vari tempi di ritorno prodotti dal modello afflussi-deflussi implementato Hec-HMS in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino SB2_v

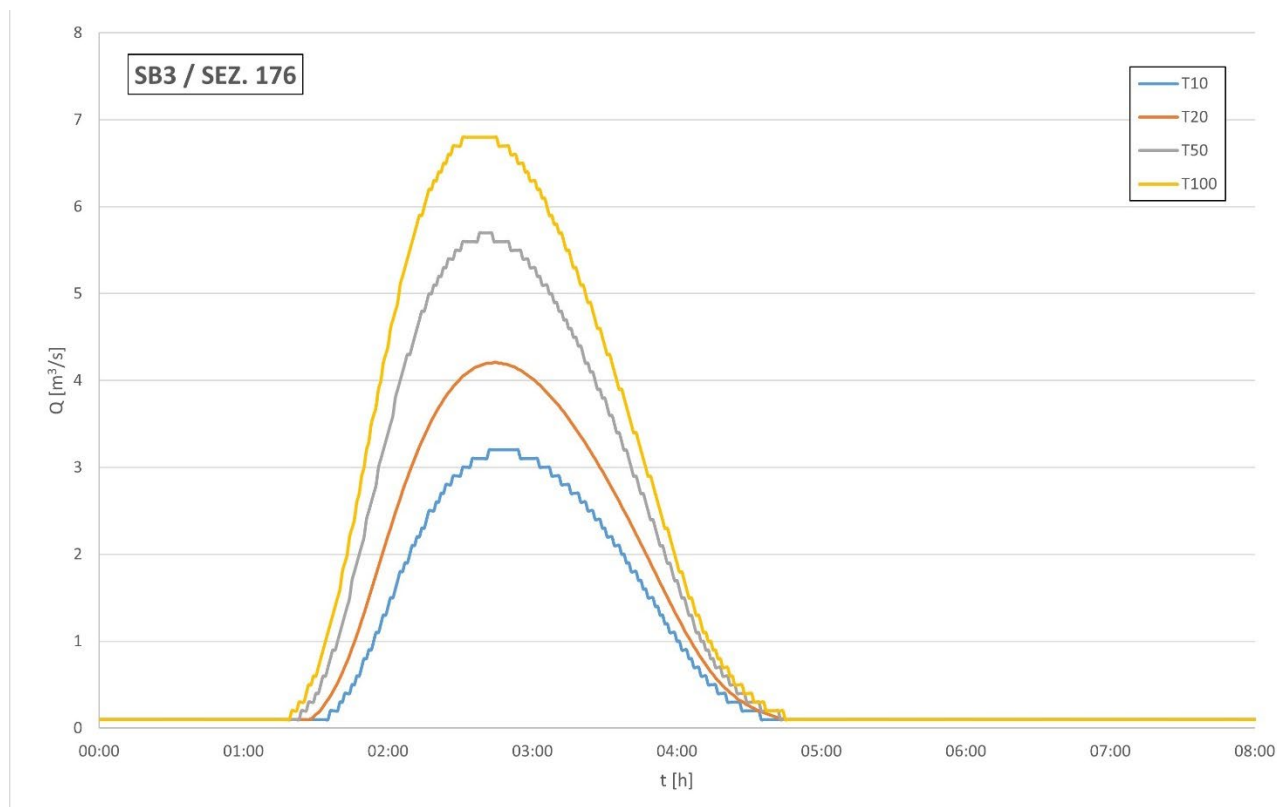


Figura 75: idrogrammi di piena per vari tempi di ritorno prodotti dal modello afflussi-deflussi implementato Hec-HMS in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino SB3

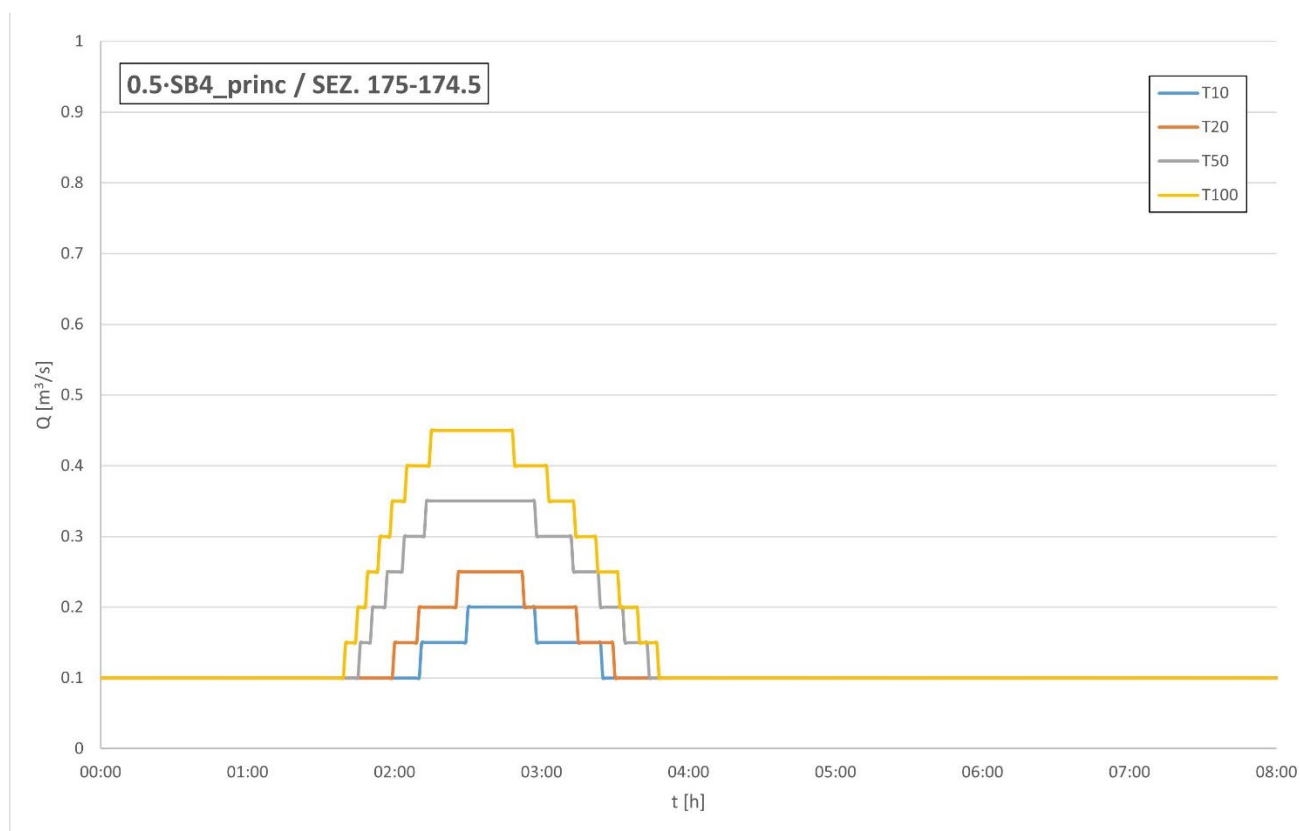


Figura 76: idrogrammi di piena per vari tempi di ritorno prodotti dal modello afflussi-deflussi implementato Hec-HMS in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino SB4_princ (al 50%)

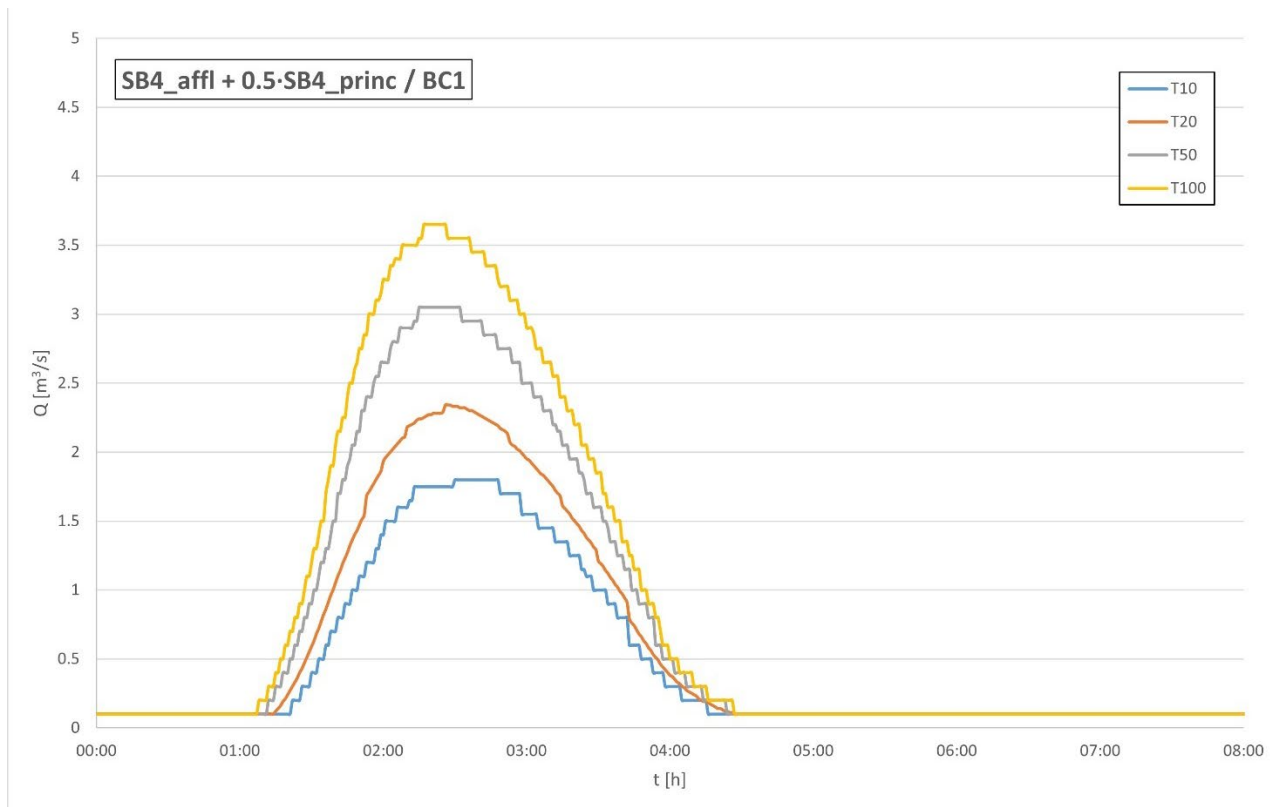


Figura 77: idrogrammi di piena per vari tempi di ritorno prodotti dal modello afflussi-deflussi implementato Hec-HMS in corrispondenza della sezione di chiusura dei bacini SB4_princ (al 50%) + SB4_affl

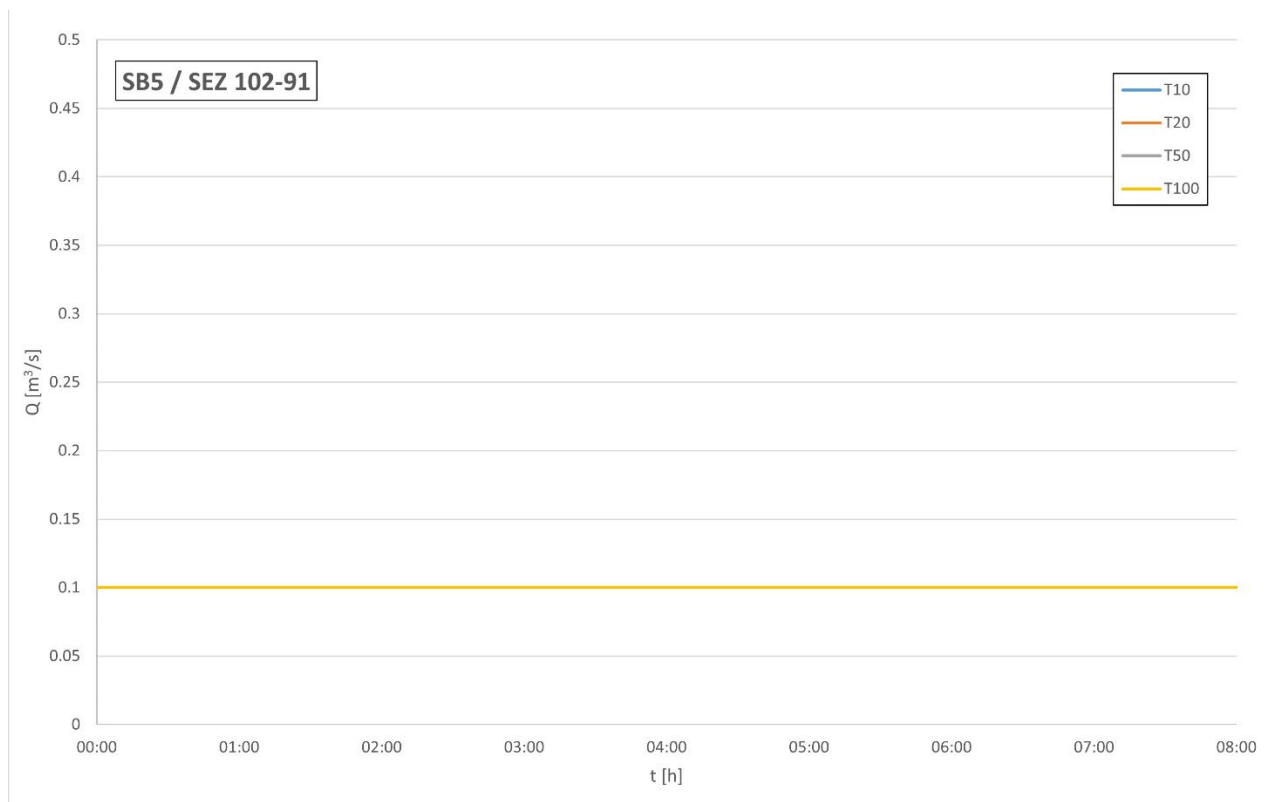


Figura 78: idrogrammi di piena per vari tempi di ritorno prodotti dal modello afflussi-deflussi implementato Hec-HMS in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino SB5

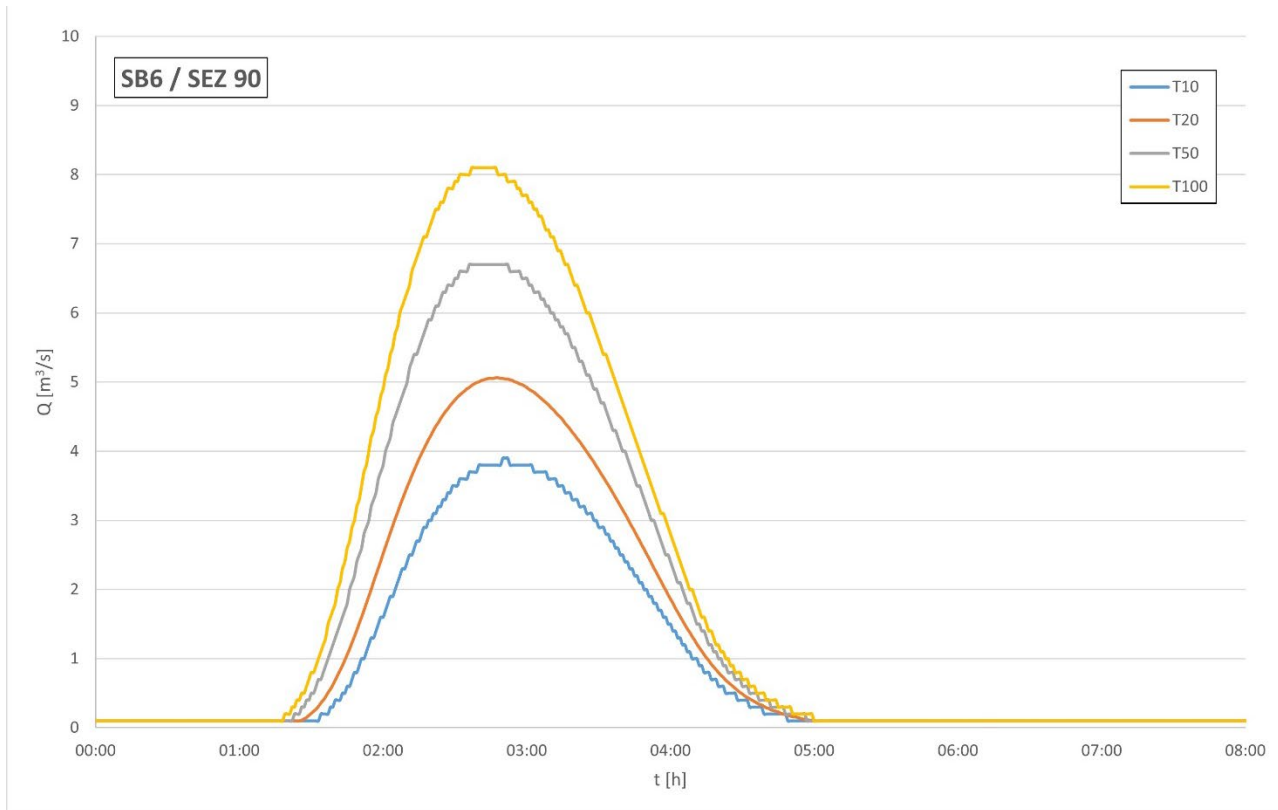


Figura 79: idrogrammi di piena per vari tempi di ritorno prodotti dal modello afflussi-deflussi implementato Hec-HMS in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino SB6

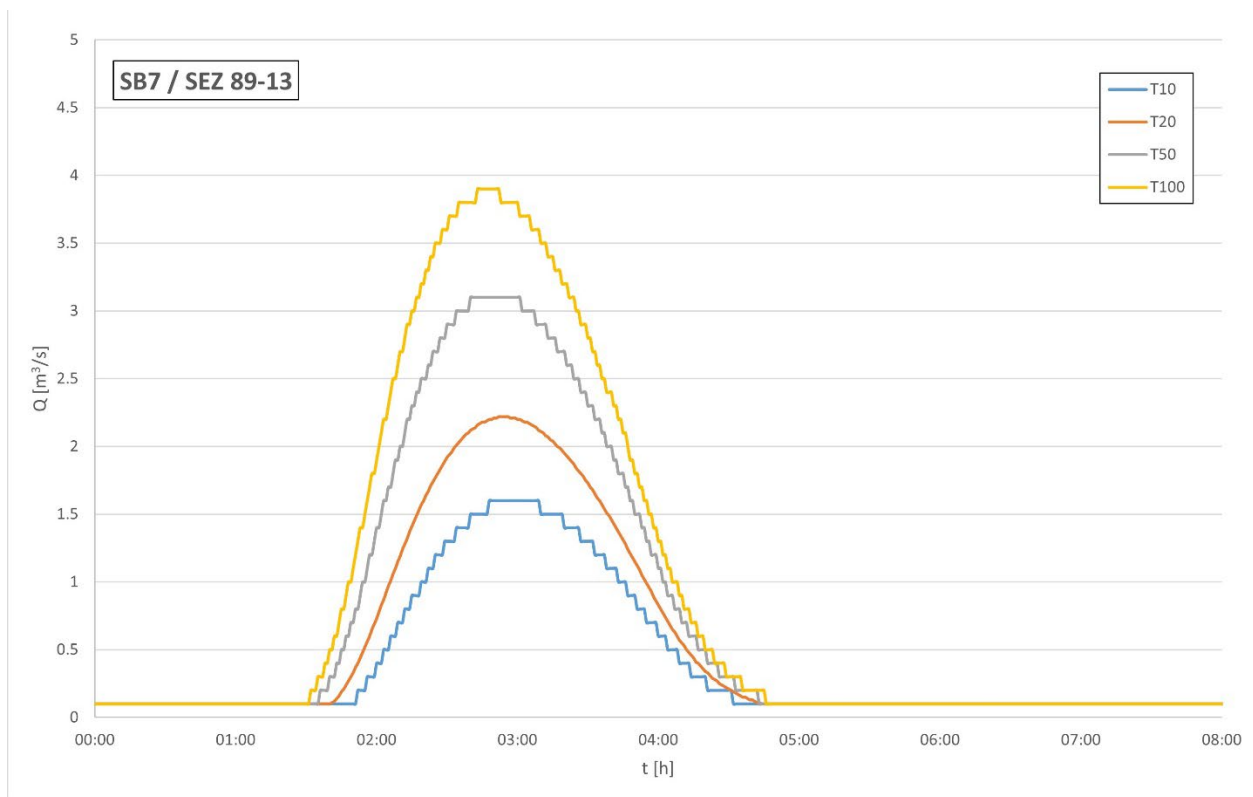


Figura 80: idrogrammi di piena per vari tempi di ritorno prodotti dal modello afflussi-deflussi implementato Hec-HMS in corrispondenza della sezione di chiusura del bacino SB7

Allegato B - Descrizione del codice di calcolo di moto vario di Hec-Ras

Il flusso dell'acqua all'interno di un corso d'acqua (caso 1D) o attraverso una superficie bidimensionale (caso 2D) in condizioni di moto vario – ovvero variabile nel tempo e nello spazio – è governato dalle seguenti leggi fisiche:

- principio di conservazione della massa. Il flusso netto di portata attraverso un volume di controllo è pari alla variazione di volume interno dello stesso:

$$Q_i - Q_u = \frac{\partial W}{\partial t} + Q_l$$

dove Q_i e Q_u rappresentano i flussi in ingresso e in uscita W il volume interno e Q_l il contributo laterale;

- principio di conservazione della quantità di moto. Riformulando la seconda legge di Newton si può dire che la somma delle forze esterne agenti su un volume di controllo e del flusso netto di quantità di moto attraverso tale volume è pari alla variazione di quantità di moto interna allo stesso:

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{M}}{dt}$$

dove $\sum \vec{F}$ è la somma delle forze agenti sul sistema e $\frac{d\vec{M}}{dt}$ la variazione di quantità di moto.

Entrambe queste leggi vengono espresse a livello matematico come equazioni differenziali alle derivate parziali, note come equazioni di De Saint-Venant, sotto le seguenti ipotesi:

- fluido incompressibile (densità costante);
- corrente gradualmente variata (distribuzione della pressione dell'acqua di tipo idrostatico lungo la verticale);
- piccole pendenze, in modo da poter assumere che l'affondamento del fondo alveo misura lungo la verticale coincida con la linea piezometrica, misurata rispetto alla normale al fondo;
- moto assolutamente turbolento per il calcolo delle resistenze.

All'interno del presente allegato se ne mostrerà sinteticamente la formulazione adottata da Hec-Ras e la relativa tecnica di risoluzione numerica delle stesse implementata nel programma, per i casi mono e bidimensionale. Una spiegazione dettagliata dell'impianto teorico alla base di tali formulazioni nonché dell'intero processo di calcolo numerico si trova al capitolo 2.1 del *Hydraulic Reference Manual* (Ver. 5.0) del programma.

Caso monodimensionale

Per le analisi monodimensionali, le equazioni di De Saint-Venant si declinano nella seguente forma differenziale:

- equazione di continuità (cons. massa):

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

dove:

- A_T è l'area bagnata complessiva (somma dell'area di flusso attiva A e di quella inattiva S) della sezione traversa (di fatto la sezione centrale di un volume di controllo infinitesimo);
- Q è il flusso della corrente in alveo;
- q_l è il flusso in ingresso laterale per unità di lunghezza;
- equazione del moto (cons. quantità di moto):

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

dove il primo termine rappresenta il tasso di accumulo di quantità di moto, il secondo il flusso di quantità di moto, il terzo è la somma delle forze idrostatica e gravitazionale, e il quarto rappresenta la forza d'attrito. Per quanto riguarda le singole variabili non ancora illustrate, si ha che:

- g è l'accelerazione di gravità;
- V è la velocità della corrente;
- z è l'elevazione in termini assoluti del pelo libero della corrente, come somma della quota di fondo z_0 e del tirante idrico h ;
- S_f è la cadente piezometrica, ottenuta tramite la formula di Chezy del moto uniforme stazionario:

$$Q = \frac{1}{n} S_f^{1/2} A R^{2/3}$$

dove n è il parametro di scabrezza di Manning ed R è il raggio idraulico della sezione.

Per passare ai valori finiti, le equazioni di continuità e di moto devono essere necessariamente risolte per via numerica. Hec-Ras, a questo proposito, adotta il cosiddetto "box scheme", uno dei metodi più utilizzati in assoluto per la risoluzione delle equazioni 1D di moto vario, ossia uno schema implicito alle differenze finite applicato a celle di calcolo a 4 nodi (come quella in *Figura 81*), in cui i valori delle variabili incognite e delle derivate spaziali sono calcolate in un punto interno di coordinate $[(j+0.5)\Delta x, (n + \theta) \Delta t]$, dove il parametro θ è (teoricamente, secondo le analisi di stabilità di Von Neumann realizzata da Fread (1974) e Ligette e Cunge (1975)) incondizionatamente stabile se compreso tra 0.5 (non incluso) e 1.

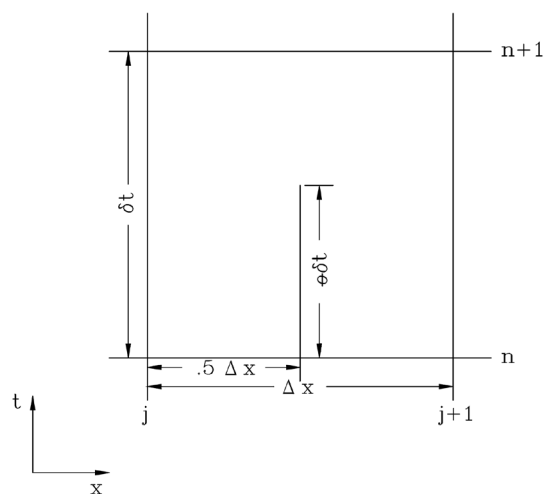


Figura 81: rappresentazione del "box scheme"

Con questo tipo di schema risolutivo tutte le equazioni relative all'intero tronco del corso d'acqua studiato vengono scritte per la linea temporale passante per $(n + \theta) \Delta t$, creando un sistema di equazioni non lineari risolto simultaneamente, ottenendo i valori delle variabili ricercate (flussi e tiranti) per l'istante $(n + 1) \Delta t$. Le condizioni al contorno e le condizioni iniziali (di fatto coincidenti con gli assi cartesiani nel "box scheme"), unite naturalmente alla conoscenza delle proprietà geometriche e idrauliche del corso d'acqua, rendono il sistema determinato e dunque risolvibile.

I metodi impliciti sono matematicamente più complessi di quelli espliciti, ma con la potenza degli attuali calcolatori ciò non costituisce ormai più un problema, e vista la loro maggiore stabilità e velocità computazionale tendono ormai ad essere sempre preferiti per essere implementati nei programmi di calcolo. Hec-Ras, nello specifico, prima di risolvere il sistema di equazioni sopra descritto, compie un ulteriore passo,

ossia la linearizzazione dello stesso mediante una tecnica sviluppata da Preismann e Chen (1973), poiché la versione non lineare obbligava alla sua risoluzione mediante il metodo di Newton-Raphson, uno schema iterativo relativamente lento in termini computazionali e che, soprattutto, tende a creare problemi di instabilità in corrispondenza di brusche discontinuità nella geometria dell'alveo.

Caso bidimensionale

Per le analisi bidimensionali, Hec-Ras dà la possibilità di utilizzare sia la versione completa della formulazione 2D delle equazioni di De Saint-Venant (dette "Shallow water" equations, in quanto a loro volta una riduzione delle equazioni complete di Navier-Stokes della dinamica dei fluidi in 3 dimensioni), oppure una versione ridotta detta Diffusion Wave, in cui vengono semplificati alcuni termini dell'equazione di moto. Vista la tipologia di problema in esame, si è optato per un utilizzare la formulazione completa di DSV, per cui le leggi di conservazione della massa e del moto assumono le seguenti formulazioni differenziali:

- equazione di continuità (cons. massa):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

dove:

- H è la quota del pelo libero dell'acqua in termini assoluti all'istante t ;
- h è il tirante idrico rispetto al fondo;
- u e v sono le componenti della velocità della corrente in direzione x e y ;
- q è un termine di portata di tipo "sink/source", ovvero non proveniente dalle celle confinanti ma di tipo puntuale quale ad esempio una pompa (equivalente ai contributi laterali nella versione 1D).

Un aspetto importante della modellazione 2D in Hec-Ras è che il programma adotta, per la discretizzazione dell'equazione di continuità, un approccio ai volumi finiti (Casulli, 2008) in cui, al fine di ottimizzare significativamente i tempi di calcolo (aspetto fondamentale nella modellazione bidimensionale), si utilizza una mesh a maglie piuttosto larghe senza perdere i dettagli alla piccola scala (Figura 82), poiché le caratteristiche d'interesse delle singole celle vengono sintetizzate in specifiche curve in funzione del tirante idrico (ad esempio, la curva d'invaso della cella e la curva area bagnata – altezza di ciascuna faccia, come illustrato nell'esempi in Figura 83).

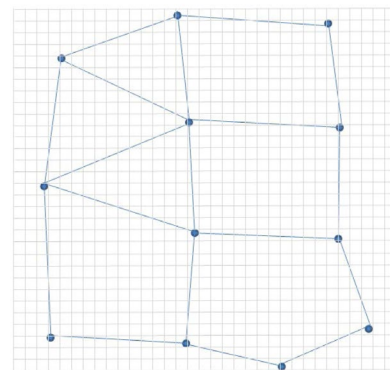


Figura 82: sinteticizzazione a diverse scale di una superficie

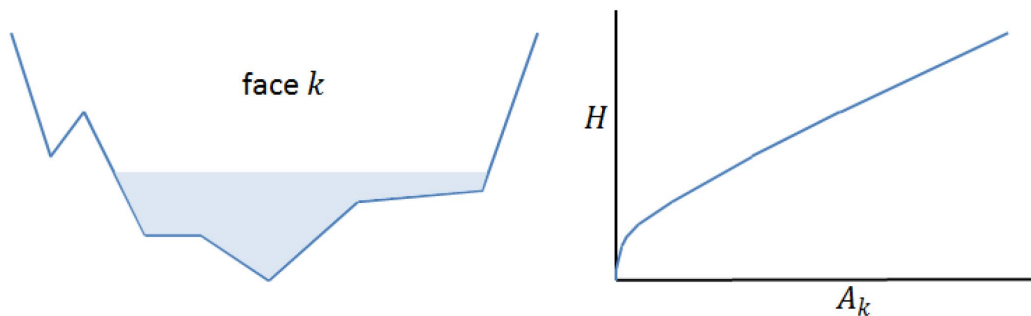


Figura 83: sinteticizzazione delle caratteristiche di una cella nell'approccio volumi finiti

- equazioni di moto (cons. quantità di moto):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u$$

dove:

- g è l'accelerazione di gravità;
- ν_t è la viscosità cinematica;
- c_f è il coefficiente di attrito di fondo;
- f è il coefficiente di Coriolis.

Tali espressioni sono derivabili dalla seconda legge di Newton, con i termini al primo membro che rappresentano le accelerazioni e i termini al secondo membro l'azione delle forze esterne. Nello specifico:

- $\frac{\partial u}{\partial t}$ e $\frac{\partial v}{\partial t}$ sono i termini di accelerazione lineare;
- $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}$ e $u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}$ sono i termini di accelerazione convettiva;
- $-g \frac{\partial H}{\partial x}$ e $-g \frac{\partial H}{\partial y}$ rappresentano l'azione della gravità dovuta a un gradient di pressione tra due aree differenti;
- $\nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$ e $\nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$ sono i termini di viscosità cinematica, rappresentano gli effetti dovuti alla turbolenza interna al fluido;
- $-c_f u$ e $-c_f v$ sono i termini attritivi, in cui il coefficiente c_f è come di consueto ricavato dalla formula di Chezy;
- $f v$ e $f u$ sono i termini legati all'effetto di Coriolis, funzione dell'angolo di latitudine e della velocità angolare della terra.

Note le equazioni da risolvere, le proprietà di carattere geometrico e idraulico vengono sintetizzate in una serie di celle la cui maglia (mesh) è determinata dall'utente. Il programma poi realizza una seconda maglia legata alla prima da un rapporto duale nodi – celle (Figura 84), necessaria alla risoluzione numerica del problema vista la presenza di derivate del secondo ordine. La corretta determinazione delle proprietà della mesh, in termini di dimensioni, orientazione e geometria delle celle, è di fondamentale importanza in termini della stabilità, accuratezza e onerosità dei tempi computazionali del modello. In generale, l'ortogonalità della mesh è il parametro maggiormente importante, in quanto dove garantita il programma può utilizzare uno schema alle differenze finite per la discretizzazione delle derivate, altrimenti è costretto ad adottare un molto più oneroso approccio ibrido alle differenze e ai volumi finiti.

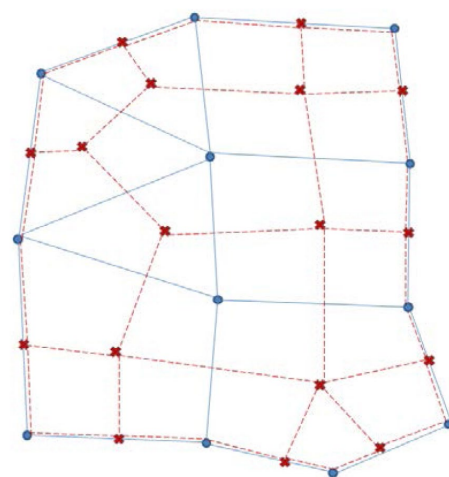


Figura 84: rappresentazione della doppia mesh per la risoluzione numerica dei modelli 2D

Sintesi dei passi della procedura di calcolo

Sia nel caso di modellazione mono che bidimensionale, il programma segue la seguente scaletta nel calcolo della soluzione numerica per un determinato problema:

- 1) Note proprietà geometriche e idrauliche, CC e CI del sistema, il risolutore assegna un valore di tentativo alle incognite (flussi, tiranti, derivate, etc.) per il passo temporale successivo e cerca una prima soluzione applicando lo schema a differenze finite implicito per la modellazione 1D oppure lo schema a volumi finiti/ibrido per la modellazione 2D;
- 2) In ciascun nodo del sistema si valuta per ogni incognita se la differenza tra il valore ottenuto e il precedente è inferiore alla soglia di tolleranza prefissata (modificabile);
- 3) Se il responso è positivo, il programma assume tali valori come corretti per quel determinato passo temporale e procede al calcolo del successivo, utilizzando i dati di quello appena calcolato come nuova condizione iniziale;
- 4) Viceversa, procede con una nuova iterazione, stimando nuovamente le derivate e calcolando dei nuovi valori per le incognite;
- 5) Se durante il processo iterativo i risultati scendono sotto la soglia di tolleranza, li assume come corretti e prosegue all'istante successivo;
- 6) Via via che procede con le iterazioni, il programma salva in memoria la soluzione con l'errore minore, anche se superiore alla soglia di tolleranza, aggiornandola ogni qualvolta ne viene calcolata una migliore;
- 7) Se raggiunge il numero massimo fissato di iterazioni (solitamente 20) senza convergere al di sotto della precisione richiesta, la simulazione emette un messaggio di warning, indicando il nodo caratterizzato dal massimo errore e l'entità dello stesso. Assume comunque la miglior iterazione ottenuta come corretta e passa all'istante di tempo successivo, anche nel caso in cui il calcolo diventi totalmente instabile.

Oss. si sono illustrate le equazioni e la procedura di calcolo che governano la modellazione idraulica di un corso d'acqua a cielo aperto, nel caso mono e bidimensionale. Per il dettaglio della teoria e dell'implementazione numerica relativa ai singoli elementi introdotti nel modello (ponti, sfioratori laterali, culvert, etc.) si rimanda ai rispettivi capitoli ricompresi all'interno del *Hydraulic Reference Manual* di Hec-Ras.