



PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA INERENTI AI
TORRENTI ZERRA E SENIGA ALL'INTERNO DEL TERRITORIO DEI COMUNI
ALBANO S. ALESSANDRO, MONTELLO, S. PAOLO D'ARGON E TORRE DÈ
ROVERI
CIG Z5A2AF4200



TITOLO ELABORATO

RELAZIONE
IDROLOGICA E IDRAULICA

CODICE

A

SCALA

-

IL RESPONSABILE DELLO STUDIO



Studio Ing. Adriano Murachelli
info@idroam.it

Sede legale: Via Donizetti, 34 - 31046 Oderzo (TV)

Unità operativa: Via Gran S. Bernardo, 26 - 24068 Seriate (BG)

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Giovanni Giupponi

AGGIORNAMENTI:

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLL.	APPROV.
00	03/2020	EMISSIONE	Ing. Murachelli	Ing. Murachelli	Ing. Murachelli
01	07/2020	INTEGRAZIONE CON ANALISI E PERIMETRAZIONI POST-INTERVENTO 1A	Ing. Murachelli	Ing. Murachelli	Ing. Murachelli
2	10/2020	INTEGRAZIONE CON ANALISI E PERIMETRAZIONI POST-INTERVENTO 1A, 2A, 3A	Ing. Murachelli	Ing. Murachelli	Ing. Murachelli

INDICE

1	PREMESSA.....	3
2	ARTICOLAZIONE DELL'AGGIORNAMENTO DELLO STUDIO	7
2.1	Aggiornamento del quadro conoscitivo morfologico a seguito di approfondimenti topografici e di interventi già eseguiti.....	7
2.2	Analisi idrologica e idraulica	9
2.2.1	Analisi combinata idrologico-idraulica.....	10
2.2.2	Analisi idrodinamica	11
3	INQUADRAMENTO DEL RETICOLO IDROGRAFICO IN ESAME	13
3.1	Inquadramento idrologico e idraulico.....	13
3.2	Opere di mitigazione del rischio idraulico effettuate nel recente passato.....	14
4	ANALISI PLUVIOMETRICA.....	17
5	ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICA DELL'INTERO RETICOLO IDROGRAFICO	20
5.1	Il modello numerico utilizzato	20
5.2	Affinamento della calibrazione del modello numerico	26
5.3	aggiornamento dell'analisi idrologico-idraulica	29
6	MODELLAZIONE IDRODINAMICA	31
6.1	Obiettivi e scenari dell'analisi idrodinamica	31
6.2	Il modello matematico utilizzato.....	33
6.2.1	Modellazione monodimensionale	33
6.2.2	Modellazione bidimensionale.....	36
6.3	Aggiornamenti della modellazione dei torrenti zerra e seniga.....	40
6.4	Risultati delle analisi idrodinamiche monodimensionali	42
6.5	Risultati delle analisi idrodinamiche bidimensionali.....	51
7	AGGIORNAMENTO E INTEGRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITA' IDRAULICAa	58
7.1	AGGIORNAMENTO DELLE FASCE DI PERICOLOSITA' DEL PGRA	58
7.2	DETERMINAZIONE DELLE FASCE DI PERICOLOSITA' IDRAULICA ai sensi della DGR n. 2616/2011....	59
8	SCENARIO DI PERICOLOSITA' POST-INTERVENTO 1A: AREA DI LAMINAZIONE SUL T. ZERRA	61
8.1	MODELLAZIONE IDRODINAMICA DELL'AREA DI LAMINAZIONE	63
8.2	Pericolosità idraulica post-intervento: ipotesi di realizzazione intervento 1A	66
9	SCENARIO DI PERICOLOSITA' POST-INTERVENTO 1A + 2A + 3A	68
9.1	Pericolosità idraulica post-intervento: ipotesi di realizzazione interventi 1a + 2a + 3a.....	71
10	CONCLUSIONI.....	75

1 PREMESSA

I bacini idrografici dei torrenti Zerra e Seniga, interessati con elevata frequenza da problematiche idrauliche relative prevalentemente a locali fenomeni di esondazione dei corsi d'acqua in concomitanza di eventi meteorici di maggiore intensità, sono stati oggetto di studio idrologico-idraulico a scala di bacino redatto dallo scrivente nel 2017 tramite un apposito tavolo tecnico composto da Consorzio di Bonifica della Media Pianura Bergamasca, Regione Lombardia (UTR Bergamo), Uniacque S.p.A. (gestore del servizio idrico integrato) e dai Comuni di Torre De' Roveri, Scanzorosciate, Albano Sant'Alessandro, Cenate Sotto, San Paolo d'Argon, Montello, Costa di Mezzate e Bagnatica

La presente fase di studio rappresenta un ulteriore approfondimento ed aggiornamento delle indagini idrologico-idraulico effettuate in quella sede, intervenute a seguito di ulteriori informazioni raccolte e fornite dai Comuni interessati dal presente approfondimento e focalizzate sul rispettivo territorio comunale.

Tali aggiornamenti sono stati prevalentemente di natura:

- Topografica: a seguito della necessità di chiarire e meglio dettagliare diverse porzioni delle aree precedentemente oggetto di rilievo mediante volo con drone, i diversi Comuni hanno provveduto alla realizzazione di appositi rilievi integrativi di maggior dettaglio focalizzati su numerose aree risultanti dal precedente studio soggette a potenziali fenomeni di esondazione;
- Idrografica: rispetto alle informazioni disponibili nel corso del precedente studio, sono stati forniti ulteriori elementi inerenti alla modifica o soppressione di porzioni del reticolo minore comunale, quale la Roggia Passi Albana, con conseguente aggiornamento dei processi di formazione e propagazione dei deflussi in occasione di eventi di piena significativi;
- Morfologica e funzionale: nel periodo intercorso tra lo studio del 2017 ad oggi, in conseguenza delle problematiche idrauliche verificatesi nel recente passato, sono stati realizzati diversi interventi di mitigazione, tra cui l'adeguamento della sezione di deflusso del t. Zerra alla confluenza della Valle di Albano, la rimozione e adeguamento di attraversamenti sulla stessa Valle d'Albano, integrati da un canale diversivo rientrante tra le opere di sistemazione previste proprio dal citato studio del 2017, nonché nuovi presidi arginali quali quello in sponda destra del t. Zerra all'altezza delle case ALER in Comune di Torre de Roveri. A tali opere si affiancano locali interventi di sistemazione e risagomatura spondale sul restante reticolo idrografico di interesse.

Tali elementi hanno permesso, ripercorrendo le medesime analisi e adottando le stesse procedure metodologiche dello studio idrologico idraulico del 2017, di aggiornare il quadro conoscitivo di riferimento.

Tutte le analisi sullo scenario integrato ed aggiornato sono state opportunamente calibrate e tarate facendo riferimento ad eventi pluviometrici successivi alla realizzazione degli interventi citati, tra cui in particolare

l'evento pluviometrico del 29 ottobre 2018 per il quale sono stati forniti dagli stessi Comuni e dai rispettivi tecnici precisi elementi di riferimento idrometrico in diversi punti del reticolo.

L'aggiornamento del quadro conoscitivo idrologico e idrodinamico dell'area di studio è funzionale alla più puntuale definizione delle dinamiche idrauliche dell'asta principale e all'interazione con gli affluenti minori e le reti fognarie dei comuni attraversati.

Per quanto concerne gli aspetti legati al funzionamento delle reti di drenaggio urbano, con particolare riferimento agli scaricatori di piena nel torrente Zerra, Seniga e nei principali affluenti, l'analisi idrologica è stata integrata con le specifiche indicazioni fornite dal Uniacque S.p.A. e dai comuni interessati nel corso del precedente studio circa la geometria ed i materiali dei collettori, oltre che il tracciato e l'estensione della rete. Tali indicazioni hanno permesso di formulare le ipotesi necessarie alla definizione di un quadro idrologico e idraulico comprensivo degli apporti dei bacini urbani le cui reti di drenaggio sono interagenti con le aste principali dei torrenti Zerra e Seniga.

In particolare, il quadro idrologico e idraulico così definito ha permesso di individuare le attuali criticità (aree di esondazione, manufatti critici, ecc.), approfondendo ed aggiornando quanto risultante dallo studio pregresso. Al fine di poter svolgere le opportune analisi idrologiche per i tempi di ritorno di riferimento (20, 50, 100 e 200 anni), sono stati mantenuti i parametri pluviometrici di riferimento dello studio del 2017 e si è fatto riferimento alla medesima durata critica dell'evento pluviometrico che maggiormente sollecita il bacino imbrifero in esame, mantenendo quindi le medesime assunzioni di base per le analisi idrologiche di trasformazione afflussi-deflussi.

Sulla base delle modifiche idrografiche evidenziate e dei locali approfondimenti topografici, sono stati parzialmente aggiornate le perimetrazioni interne per alcuni sottobacini naturali ed urbani afferenti ai torrenti Zerra e Seniga, la cui perimetrazione si basa sull'orografia del terreno e sul tracciato e caratteristiche della rete di drenaggio urbano. Per quanto riguarda i bacini urbani, è stata mantenuta la modellazione dei tratti terminali dei collettori fognari che dagli scaricatori di piena recapitano le acque di sfioro ai corrispondenti scarichi. Il quadro idrologico ed idraulico è infatti fortemente dipendente, oltre che dal contributo di portate derivante dai bacini, anche dalle dimensioni e dalle quote di scorrimento dei collettori stessi, nonché dalla posizione degli scarichi rispetto ai livelli idrometrici in alveo.

Sono stati quindi ripresi i parametri precedentemente definiti legati all'uso del suolo, la permeabilità e la saturazione dei sottobacini di interesse. Tutte le suddette attività sono state svolte combinando le analisi idrologiche per la formazione dei deflussi con le condizioni idrodinamiche derivanti dalla propagazione dei deflussi stessi nel reticolo idrografico considerato.

Gli apporti meteorici, derivanti sia dalle porzioni di bacini naturali, sia dalle reti di drenaggio urbano, hanno costituito il dato di input, insieme ovviamente al rilievo topografico aggiornato, per la successiva analisi

idrodinamica, differenziata per i processi di propagazione della piena in alveo inciso e golene.

I primi sono stati trattati mediante modellazione di carattere monodimensionale su fondo non erodibile ed a moto vario, che ha permesso di calcolare i principali parametri idraulici di interesse (tiranti idrici, velocità medie della corrente, ecc.) raggiunti nelle varie sezioni trasversali ed in corrispondenza dei manufatti. La base topografica per questa analisi sono state le sezioni trasversali ed i manufatti rilevati nella campagna di indagini topografiche.

Visto invece il carattere assunto dai processi esondativi nelle golene, dove il flusso assume caratteristiche spiccatamente non monodimensionali, è stato ritenuto più opportuno ricorrere ad una modellazione 2D a moto vario, che si è basata sul DTM derivante dall'elaborazione del rilievo mediante drone opportunamente aggiornato con le ulteriori informazioni disponibili. Le porzioni modellate in 2D sono state poi opportunamente connesse, in corrispondenza delle sponde, con la porzione d'alveo inciso monodimensionale, in modo da consentire l'instaurarsi di flusso da entrambe le direzioni; in questo modo, il modello creato è risultato in grado di cogliere i fenomeni esondativi dall'alveo alle golene, che si instaurano quando il livello in alveo supera la sommità spondale, e il richiamo dell'acqua verso l'alveo nella fase di esaurimento della piena.

L'attività, condotta sullo scenario morfologico aggiornato, comprensivo degli ulteriori manufatti e opere rilevati, ha quindi consentito di confermare ed approfondire le principali criticità idrauliche individuate nell'attività precedente. Una volta terminato il processo di taratura mediante l'evento meteorico più gravoso verificatosi a seguito dei principali interventi di mitigazione recentemente attuati, sono stati riprodotti gli eventi di piena associati a tempi di ritorno di riferimento di 20,50, 100 e 200 anni.

Sulla base dei risultati ottenuti, si è quindi proceduto ad una proposta di aggiornamento delle aree di pericolosità idraulica ai sensi del Piano di Gestione del Rischio Alluvionale (PGRA), applicando le medesime ipotesi e considerazioni utilizzate per la precedente perimetrazione risultante dal citato studio eseguito dallo scrivente.

Sulla base dei risultati ottenuti, sono state successivamente perimetrate anche le aree di pericolosità ai sensi dell'allegato 4 del Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia del Gennaio 2012, avente come oggetto "Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da esondazione".

Facendo riferimento all'ipotesi di realizzazione di una vasca di laminazione in derivazione lungo il t. Zerra in Comune di Albano S. Alessandro (intervento 1A previsto nel citato studio del 2017 e sviluppata a livello di progetto di fattibilità tecnica ed economica), sono state perimetrate le aree di pericolosità che risulterebbero dalla realizzazione dell'opera così come prevista.

Infine, si sono considerati anche gli interventi 2A e 3A previsti ancora nel già citato studio del 2017, riferiti rispettivamente alla realizzazione di una cassa di espansione in derivazione sul t. Seniga in Comune di Cenate Sotto e di una vasca di laminazione in linea sul t. Valle d'Albano in Comune di Albano S. Alessandro.

Nell'ipotesi, dunque, di realizzazione di tutti gli interventi sopra esposti (1A lungo il t. Zerra, 2A lungo il t. Seniga e 3A lungo il t. Valle d'Albano) sono state perimetrate le aree di pericolosità che risulterebbero da questo ulteriore scenario di intervento.

Saranno comunque possibili ulteriori locali approfondimenti delle perimetrazioni effettuate sulla base di futuri elementi, quali rilievi, di maggior dettaglio.

2 ARTICOLAZIONE DELL'AGGIORNAMENTO DELLO STUDIO

Di seguito si analizzano gli aspetti salienti relativi allo svolgimento delle diverse fasi del presente aggiornamento dello studio idrologico-idraulico dei torrenti Zerra e Seniga. Dal punto di vista numerico, sono stati utilizzati gli stessi codici di calcolo, nella medesima versione, rispetto al precedente Studio del 2017, al fine di una completa confrontabilità tra i rispettivi risultati.

2.1 AGGIORNAMENTO DEL QUADRO CONOSCITIVO MORFOLOGICO A SEGUITO DI APPROFONDIMENTI TOPOGRAFICI E DI INTERVENTI GIÀ ESEGUITI

Una serie di aggiornamenti a livello morfologico ha permesso l'integrazione di dati per una più dettagliata analisi del bacino. Con riferimento alle aree che, nel precedente studio, avevano mostrato criticità, molte di queste hanno recentemente subito variazioni dell'assetto idraulico mediante sistemazioni dell'alveo o locali interventi di mitigazione del rischio idraulico. In particolare, tra i principali interventi effettuati si richiamano i seguenti:

- in Comune di Torre de' Roveri, in corrispondenza delle case ALER, a seguito delle criticità emerse dallo studio del 2017 e, soprattutto, delle numerose esondazioni per eventi anche non particolarmente intensi, è stato modificato l'assetto di un tratto del t. Zerra mediante la costruzione di un argine in sponda destra, abbinato a operazioni di pulizia e risagomatura dell'alveo e riprofilatura delle sponde;
- il tratto di t. Zerra in prossimità della confluenza del t. Valle d'Albano, in adiacenza a via Marconi in Comune di Albano S. Alessandro, è stato oggetto di un intervento di ampliamento della sezione di deflusso e di realizzazione di opere di protezione spondale;
- la stessa Valle d'Albano è stata oggetto di adeguamento mediante la realizzazione di una parte degli interventi definiti nel corso del citato Studio del 2017, consistenti nella realizzazione di una canale diversivo, nella rimozione di un attraversamento minore, nell'adeguamento di un ulteriore attraversamento e nell'adeguamento spondale del torrente, al fine di mitigare i processi di esondazione evidenziati in Comune di Albano S. Alessandro nella zona di via Marconi;
- lungo il t. Seniga, in Comune di S. Paolo d'Argon, sono stati recentemente realizzati locali interventi di pulizia e riprofilatura dell'alveo, nonché di ripristino di difese spondali.

Dal punto di vista topografico sono state indagate quelle aree che presentavano potenziali incongruenze tra lo stato dei luoghi e la conformazione risultante dal rilievo topografico effettuato con separato incarico del tavolo tecnico nel 2017 da una ditta piemontese mediante volo con drone. Sono stati, inoltre, approfonditi dal punto di vista topografico alcuni areali esterni alla zona coperta dal volo stesso, e per i quali era stato

utilizzato, ai fini modellistici, il DTM regionale. In particolare, i principali approfondimenti topografici, mediante rilievi a terra, hanno riguardato:

- la quota di sommità del rilevato ferroviario a sud del torrente Zerra in Comune di Albano S. Alessandro;
- rilievi integrativi di maggior dettaglio forniti dai comuni di Montello, Albano sant'Alessandro e San Paolo d'Argon focalizzati su numerose aree risultanti dal precedente studio soggette a potenziali fenomeni di esondazione; in particolare, è stato fornito un accurato DTM della zona alla confluenza tra i torrenti Zerra e Seniga, nonché il rilievo di dettaglio della morfologia delle strutture prossime all'alveo inciso;
- locali integrazioni topografiche sui restanti comuni, in relazione alle zone critiche evidenziate nel precedente studio.

Dal punto di vista della funzionalità idraulica, a seguito di osservazioni pervenute direttamente dal Comune di Montello, che hanno confermato la dismissione della Roggia Passi Albana, si è proceduto ad eliminare il contributo apportato dalla roggia al torrente Zerra nel tratto compreso tra l'attraversamento ferroviario e la confluenza del t. Seniga, in comune di Montello.

Tali attività sono state eseguite basandosi su informazioni pervenute direttamente dai comuni interessati dal presente aggiornamento, funzionali a descrivere l'evoluzione morfologica e funzionale a seguito di nuove opere e modificazioni dell'alveo e delle aree golenali, nonché a meglio dettagliare il quadro topografico per le aree golenali potenzialmente interessabili da fenomeni di esondazione.

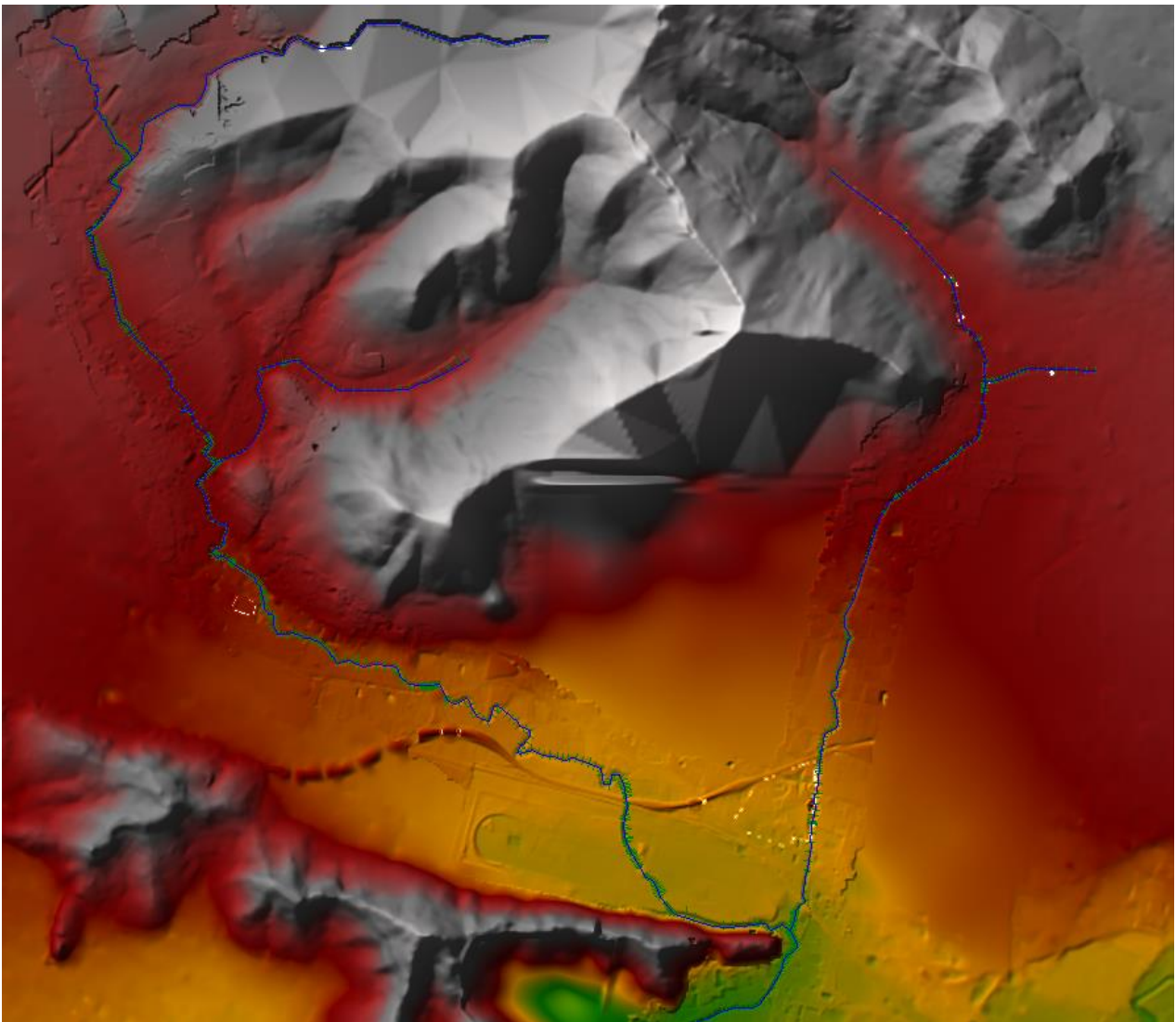


FIGURA 1 - VISTA DI INSIEME DEL DTM RISULTANTE DALL'AGGIORNAMENTO TOPOGRAFICO, PARTICOLARMENTE EVIDENTE NELLA ZONA PROSSIMA ALLA CONFLUENZA DEI TORRENTI ZERRA E SENIGA

2.2 ANALISI IDROLOGICA E IDRAULICA

L'aggiornamento del quadro conoscitivo idrologico e idrodinamico dell'area di studio è funzionale ad una miglior comprensione e definizione delle dinamiche idrauliche dell'asta principale e all'interazione con gli affluenti minori e le reti fognarie dei comuni limitrofi, alla luce delle ulteriori informazioni di dettaglio ed aggiornamento sopra elencate. Di seguito si riprendono ed illustrano le metodologie di analisi utilizzate, analoghe a quelle utilizzate per il citato studio pregresso.

Per quanto concerne gli aspetti legati al funzionamento delle reti di drenaggio urbano, con particolare riferimento agli scaricatori di piena nel torrente Zerra, Seniga e nei principali affluenti, l'analisi idrologica è stata integrata con le specifiche indicazioni fornite dal Uniacque S.p.A. e dai comuni interessati circa la geometria ed i materiali dei collettori, oltre che il tracciato e l'estensione della rete. Tali indicazioni hanno permesso di formulare le ipotesi necessarie alla definizione di un quadro idrologico e idraulico comprensivo degli apporti dei bacini urbani le cui reti di drenaggio sono interagenti con le aste principali dei torrenti Zerra e Seniga, necessario sia per l'analisi dello stato di fatto che per le opportune analisi di scenario connesse ai possibili interventi di mitigazione.

2.2.1 ANALISI COMBINATA IDROLOGICO-IDRAULICA

Al fine di poter svolgere le opportune analisi idrologiche per i tempi di ritorno di riferimento (20, 50, 100 e 200 anni), si è proceduto preliminarmente alla raccolta ed elaborazione dei dati pluviometrici aggiornati disponibili per le aree in esame.

Al fine della taratura dei modelli, è stato riprodotto il recente evento meteorico che ha colpito l'area nell'ottobre 2018, i cui effetti, in termini di livelli idrometrici raggiunti, sono stati ricostruiti grazie alla informazioni fornite dai tecnici dei Comuni coinvolti, ed hanno costituito il parametro di riferimento nella procedura di calibrazione.

Le registrazioni pluviometriche dell'evento di calibrazione più vicine all'area di interesse sono risultate essere quelle delle stazioni di Scanzorosciate e Cenate Sopra; quest'ultimo pluviometro, gestito dal Centro Meteo Lombardo è stato quello di riferimento per il processo di taratura, così come per l'evento del 2016.

Per la determinazione delle aree di pericolosità, il censimento dell'officiosità idraulica di attraversamenti e scarichi, nonché la prima definizione e pre-dimensionamento degli interventi strutturali, è stata invece effettuata un'analisi pluviometrica di tipo distribuito sugli areali di interesse a partire dalle curve di possibilità pluviometrica relative alla stazione di misura di gestite dall'Arpa della Regione Lombardia, al fine di poter ricostruire le portate idrologiche per i Tempi di ritorno (TR) di interesse.

Le elaborazioni dei dati di pioggia sono state effettuate per diverse durate dell'evento pluviometrico, comprese tra 1 e 24 ore, e per i tempi di ritorno compresi tra 20 e 200 anni, arrivando a definire per ciascuna combinazione la distribuzione delle rispettive isoiete, da cui si ricavano i dati di input per le analisi idrologiche di trasformazione afflussi-deflussi.

Si è poi proceduto a definire i sottobacini naturali ed urbani afferenti ai torrenti Zerra e Seniga, la cui perimetrazione si basa, per i primi, sull'orografia del terreno, per i secondi, anche sul tracciato e caratteristiche della rete di drenaggio. Inoltre per quanto riguarda i bacini urbani, come si avrà modo di descrivere meglio nei capitoli successivi, è risultato di interesse ai fini della modellazione dello scenario idrologico ricostruire i tratti terminali dei collettori fognari che dagli scaricatori di piena recapitano le acque

di sfioro ai corrispondenti scarichi. Il quadro idrologico ed idraulico è infatti fortemente dipendente, oltre che dal contributo di portate derivante dai bacini, anche dalle dimensioni e dalle quote di scorrimento dei collettori stessi, nonché dalla posizione degli scarichi rispetto ai livelli idrometrici in alveo.

Sono stati quindi definiti i parametri legati all'uso del suolo, la permeabilità e la saturazione dei sottobacini di interesse.

Tutte le suddette attività sono state svolte combinando le analisi idrologiche per la formazione dei deflussi con le condizioni idrodinamiche derivanti dalla propagazione dei deflussi stessi nel reticolo idrografico considerato.

2.2.2 ANALISI IDRODINAMICA

Gli apporti meteorici, derivanti sia dalle porzioni di bacini naturali, sia dalle reti di drenaggio urbano, hanno costituito il dato di input, insieme ovviamente al rilievo topografico, per la successiva analisi idrodinamica, differenziata per i processi di propagazione della piena in alveo inciso e golene.

I primi sono stati trattati mediante modellazione di carattere monodimensionale su fondo non erodibile in moto vario, che ha permesso di calcolare i principali parametri idraulici di interesse (tiranti idrici, velocità medie della corrente, ecc.) raggiunti nelle varie sezioni trasversali ed in corrispondenza dei manufatti. La base topografica per questa analisi sono state le sezioni trasversali ed i manufatti rilevati nelle campagne di indagini topografiche.

Visto invece il carattere assunto dai processi esondativi nelle golene, dove il flusso assume caratteristiche spiccatamente non monodimensionali, è stato ritenuto più opportuno ricorrere ad una modellazione 2D a moto vario, che si è basata sul DTM derivante dall'elaborazione del rilievo mediante drone opportunamente corretto ed integrato a seguito degli approfondimenti descritti in premessa.

Le porzioni modellate in 2D sono state poi opportunamente connesse, in corrispondenza delle sponde, con la porzione d'alveo inciso monodimensionale, in modo da consentire l'instaurarsi di flusso da entrambe le direzioni; in questo modo il modello creato è risultato in grado di cogliere i fenomeni esondativi dall'alveo alle golene, che si instaurano quando il livello in alveo supera la sommità spondale, e il richiamo dell'acqua verso le golene nella fase di esaurimento della piena.

L'attività, condotta sullo scenario morfologico aggiornato, comprensivo dei manufatti e delle opere rilevate, ha quindi consentito di confermare ed approfondire le principali criticità idrauliche individuate nell'attività precedente. Più nel dettaglio, tale modellazione idrodinamica applicata all'evento reale dell'Ottobre 2018 ha consentito di meglio calibrare l'analisi idrologico-idraulica descritta al punto precedente, sulla base dei dati disponibili e dei riscontri forniti dai tecnici dei Comuni che sono stati interessati da tale evento meteorico, il più intenso registrato a seguito dei principali interventi di mitigazione recentemente realizzati.

Il suddetto processo di calibrazione è stato svolto mediante procedura iterativa; infatti, sulla base dei risultati emersi dall'analisi idrodinamica, confrontati con i dati forniti dai comuni circa i livelli idrometrici raggiunti, è stato possibile affinare la taratura dei principali parametri idrologici e delle relative portate idrologiche, che a loro volta costituiscono la condizione al contorno della modellazione idrodinamica.

Una volta terminato il processo di taratura appena descritto, che ha portato all'affinamento della calibrazione tanto dei parametri idrologici che di quelli idrodinamici, sono stati riprodotti gli eventi di piena associati a tempi di ritorno di 20,50, 100 e 200 anni.

Questi ultimi costituiscono il quadro conoscitivo idrodinamico sulla base del quale è stata aggiornata la perimetrazione delle aree a diversa pericolosità idraulica.



FIGURA 2 PLANIMETRIA GENERALE DELL'AREA, EVIDENZIATI I CONFINI COMUNALI E LE ASTE FLUVIALI INTERESSATE

3 INQUADRAMENTO DEL RETICOLO IDROGRAFICO IN ESAME

3.1 INQUADRAMENTO IDROLOGICO E IDRAULICO

Il Bacino idrografico dei Torrenti Zerra e Seniga e del reticolo idrico secondario ad essi afferente occupa complessivamente una superficie di circa 3600 ha, comprensivo sia del bacino montano che delle aree urbane scolanti mediante scaricatori di piena fognari; la suddetta area è interamente ricadente entro i comuni di Torre De' Roveri, Scanzorosciate, Albano S. Alessandro, San Paolo d'Argon, Cenate Sotto, Pedrengo, Seriate, Brusaporto, Costa di Mezzate, Montello e Bagnatica.

Del totale indicato sopra, circa 760 ha sono relativi a sottobacini naturali ed urbani afferenti al T. Seniga ed ai suoi affluenti.

L'asta principale del T. Zerra è lunga quasi 11 km, a partire dal punto di origine nel corso d'acqua nella zona collinare del comune di Scanzorosciate, fino alla soglia di sfioro verso il canale scolmatore al F. Serio. Di questi, circa 8.4 km si trovano a monte della confluenza con il T. Seniga, che complessivamente risulta lungo circa 4 km.

Il reticolo idrografico afferente all'asta principale del T. Zerra comprende una serie di corsi d'acqua naturali e di rogge irrigue. Tra i primi, i principali contributi derivano dal Torrente Gamberone, affluente in destra del T. Zerra in comune di Scanzorosciate, e dal T. Valle d'Albano - Oriolo, affluenti di sinistra e compresi entro il territorio comunale di Albano Sant'Alessandro. Questi torrenti sono stati in parte oggetto di rilievo e di modellazione. Le principali rogge irrigue per apporto idrologico sono la roggia Borgogna (affluente di destra in comune di Albano S. Alessandro), la Roggia Roncaglia (affluente di destra in comune di Albano S. Alessandro), La roggia Vertova (affluente di destra in comune di Costa di Mezzate, a sua volta alimentata da una soglia di sfioro collocata più a monte lungo l'asta del T. Zerra in comune di Montello), La Roggia Cattanea (affluente di destra nel tratto terminale appena più a monte del primo manufatto di sfioro verso il canale scolmatore, in comune di Bagnatica). Tutte le suddette rogge non sono state modellate idrodinamicamente, ma è stato considerato il loro apporto idrologico di portata come immissione puntuale nel T. Zerra.

Oltre a questi affluenti, contribuiscono agli apporti idrologici dei corsi d'acqua analizzati gli scarico dagli scaricatori di piena delle reti fognarie di tipo misto presenti lungo i centri urbani attraversati, che drenano le porzioni urbane del territorio comunale.

La definizione di un quadro d'aggiornamento ha richiesto ulteriori campagne topografiche effettuate dai singoli comuni coinvolti, oltre ad un'indagine sul campo tramite sopralluoghi e misurazioni congiuntamente ai tecnici dei comuni coinvolti.

3.2 OPERE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO EFFETTUATE NEL RECENTE PASSATO

Le indagini relative ai T. Zerra e Seniga sono state estese al reticolo idrico superficiale tributario e/o interagente con i torrenti, facendo seguito alla necessità di aggiornare le dinamiche idrauliche complessive del sistema in esame a seguito degli effetti di mitigazione delle opere ed interventi recentemente realizzati, oltre che all'affinamento della modellazione numerica a seguito degli approfondimenti topografici e funzionali resi disponibili.

In particolare, si riportano alcune delle principali aree interessate da una riduzione delle condizioni di pericolosità idraulica rispetto al quadro conoscitivo dello studio pregresso.

A valle dell'immissione con il T. Gambarone in Comune di Torre de' Roveri, gli areali in sponda destra del t. Zerra in corrispondenza delle case ALER, oggetto di numerosi fenomeni di esondazione nel corso del recente passato, sono stati oggetto di un intervento di presidio arginale e di contestuale adeguamento della sezione di deflusso, con conseguente mitigazione dei locali fenomeni di esondazione (cfr. Figura 3)

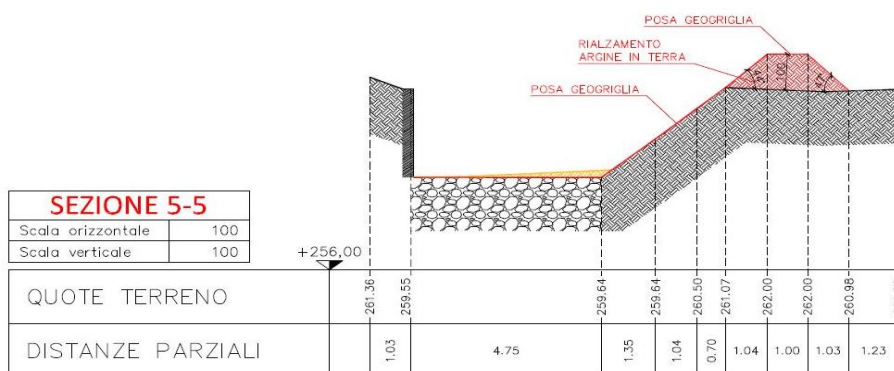


FIGURA 3 - PARTICOLARE DI PROGETTO DEL PRESIDIO ARGINALE E ADEGUAMENTO DELLA SEZIONE DI DEFLUSSO IN COMUNE DI TORRE DE ROVERI ALL'ALTEZZA DELLE CASE ALER

In adiacenza a via Marconi in Comune di Albano S. Alessandro, interessata da diverse esondazioni per insufficienza del T. Valle d'Albano in corrispondenza della confluenza con il T. Oriolo, è stato realizzato un canale diversivo della stessa Valle d'Albano (cfr. Figura 4), rientrante tra le opere di sistemazione previste

dal citato studio del 2017, congiuntamente alla rimozione di un attraversamento di accesso a proprietà privata e adeguamento di un secondo attraversamento che ne limitavano la sezione di deflusso. Tale intervento ha ripercussioni positive sulla porzione di territorio comunale adiacente alla stessa via Marconi, dato che la piattaforma stradale stessa convogliava i volumi di esondazioni e li propagava verso sud interessando i quartieri prospicienti tale viabilità.

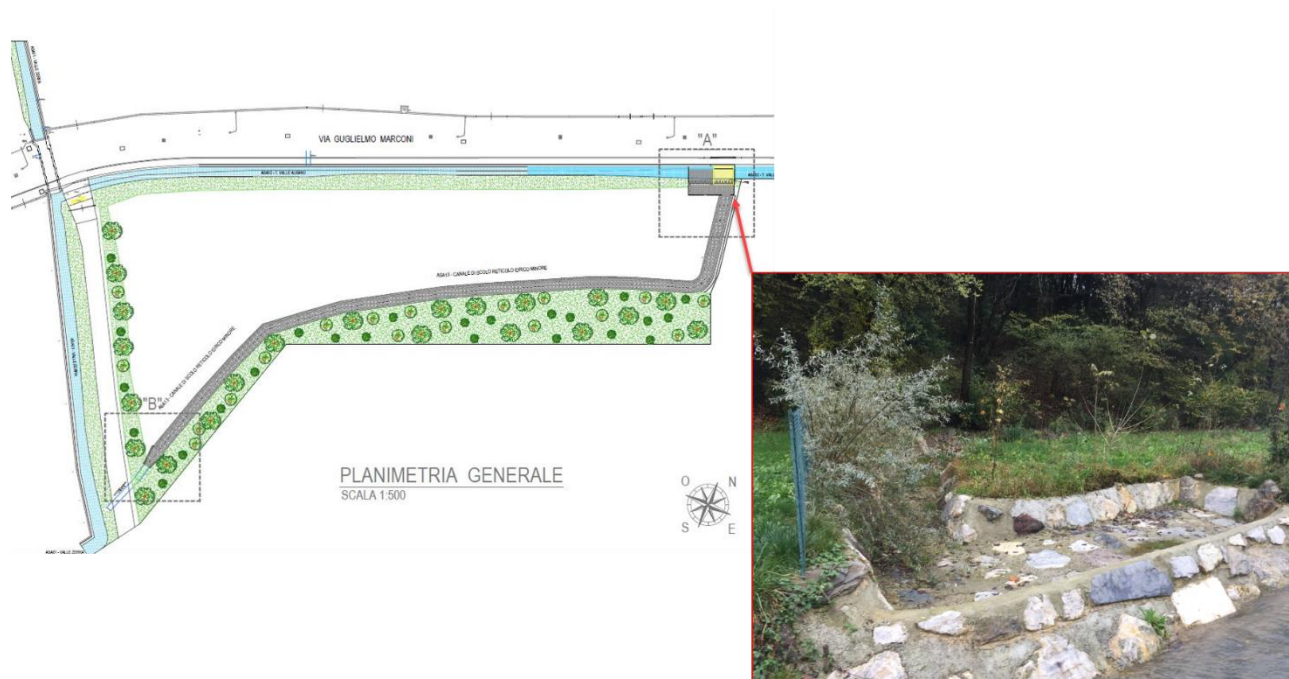


FIGURA 4 - PLANIMETRIA GENERALE DELL'INTERVENTO SUL T. VALLE D'ALBANO E PARTICOLARE DELLA RELATIVA SOGLIA DI ATTIVAZIONE

Il torrente Zerra è stato oggetto di un ulteriore intervento di locale adeguamento della sezione di deflusso, nel tratto immediatamente a monte della confluenza del t. Valle d'Albano, in Comune di Albano S. Alessandro, al fine di ridurre i processi di esondazione potenziale lungo la viabilità e gli abitati adiacente ad una doppia curva del torrente (cfr. Figura 5).



FIGURA 5 - ADEGUAMENTO DELLA SEZIONE DI DEFLUSSO DEL T. ZERRA A MONTE DELL'IMMISSIONE DEL T. VALLE D'ALBANO

Il torrente Seniga è stato anch'esso oggetto di locali pulizie e riprofilatura della sezione di deflusso, con contestuale ripristino di difese spondali, che hanno comportato locali miglioramenti della capacità di deflusso dell'alveo inciso.

Le restanti modifiche all'assetto idraulico riprodotto numericamente sono dovute ad approfondimenti di natura topografica, nonché idrologica per quanto riguarda la modifica di parte del reticolo minore.

4 ANALISI PLUVIOMETRICA

Al fine di poter disporre del necessario quadro conoscitivo meteorologico funzionale alle successive analisi idrologiche, le analisi pluviometriche effettuate nell'ambito del presente studio si sono basate sulle linee segnalatrici di possibilità pluviometriche elaborate a cura dell'ARPA Lombardia.

La dipendenza di tali linee, espresse in mm di pioggia, dalla durata D dell'evento pluviometrico è funzione di tre parametri secondo la formula:

$$h_T(D) = a_1 w_T D^n$$

L'immagine seguente mostra, a titolo di esempio, l'andamento qualitativo del parametro a_1 per la definizione delle linee di possibilità pluviometrica sul territorio Provinciale per eventi con durata compresa tra 1 e 24 ore.

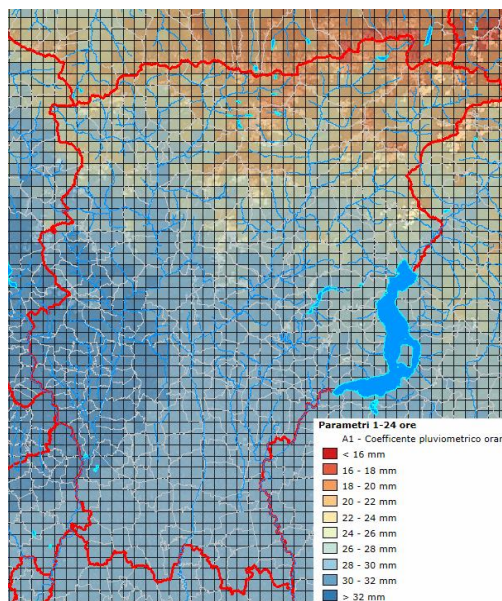


FIGURA 6- ANDAMENTO QUALITATIVO DEL PARAMETRO A1 PER LA DEFINIZIONE DELLE LINEE DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA PER DURATE TRA 1 E 24 ORE SULL'INTERO TERRITORIO PROVINCIALE (ARPA LOMBARDIA)

Le elaborazioni pluviometriche hanno, quindi, fatto riferimento ai dati forniti da ARPA Lombardia relativi all'area in esame, ottenute dall'elaborazione ed interpolazione dei dati delle più vicine stazioni pluviometriche, dai quali è stato possibile ricavare le curve di possibilità pluviometrica, che riassumono il legame tra altezze di pioggia e durata della precipitazione al variare del TR.

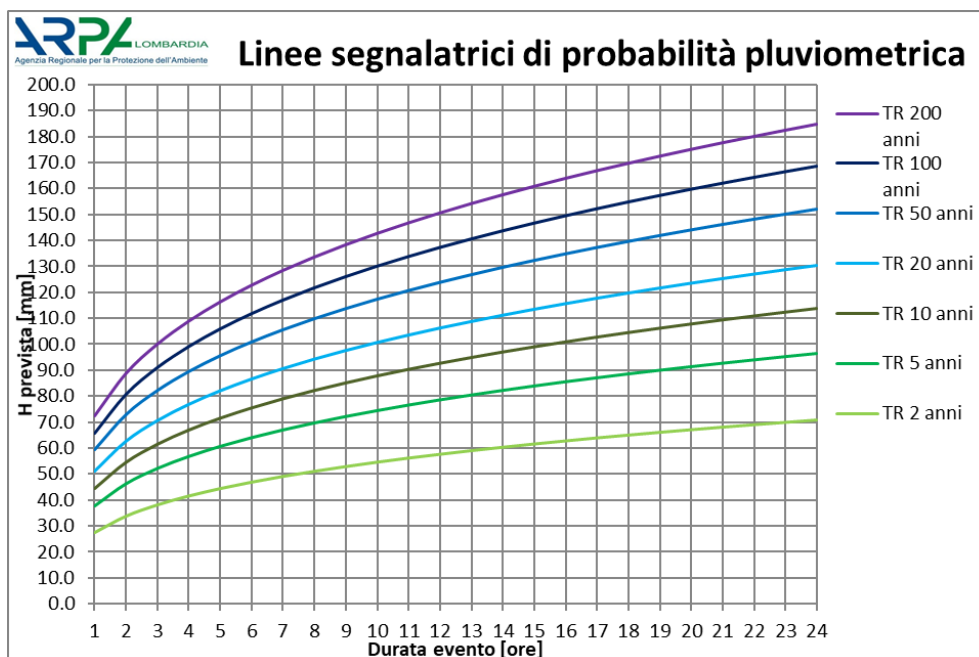


FIGURA 7 - CURVE SEGNALATRICI DI POSSIBILITÀ ARPA

Queste relazioni sono state utilizzate per ricavare gli ietogrammi adottati nelle successive analisi idrologiche afflussi-deflussi sul bacino dei torrenti Zerra e Seniga

TABELLA 1- ALTEZZE CUMULATE DI PIOGGIA PER VARI PERIODI DI RITORNO E DURATE DELL'EVENTO METEORICO OTTENUTE DAI DATI ARPA PER L'AREA IN ESAME

Altezze di cumulate di pioggia (mm)				
Durata (ore)	TR 20 anni	TR 50 anni	TR 100 anni	TR 200 anni
1	50.9	59.4	65.8	72.3
2	62.5	72.9	80.8	88.7
3	70.5	82.2	91.1	100.0
4	76.7	89.5	99.2	108.8
5	82.0	95.6	105.9	116.3
6	86.5	100.9	111.8	122.7
7	90.5	105.6	117.0	128.4
8	94.2	109.9	121.7	133.6
9	97.5	113.8	126.0	138.3
10	100.6	117.4	130.0	142.7
11	103.5	120.7	133.7	146.8
12	106.2	123.8	137.2	150.6
13	108.7	126.8	140.5	154.2

Altezze di cumulate di pioggia (mm)				
Durata (ore)	TR 20 anni	TR 50 anni	TR 100 anni	TR 200 anni
14	111.1	129.6	143.6	157.6
15	113.4	132.3	146.6	160.9
16	115.6	134.8	149.4	163.9
17	117.7	137.3	152.1	166.9
18	119.7	139.6	154.7	169.8
19	121.6	141.9	157.2	172.5
20	123.5	144.0	159.6	175.1
21	125.3	146.1	161.9	177.7
22	127.0	148.1	164.1	180.1
23	128.7	150.1	166.3	182.5
24	130.3	152.0	168.4	184.8

Per quanto riguarda invece la forma degli ietogrammi, che descrive l'andamento delle altezze di precipitazione durante l'evento meteorico, in questa sede sono stati adottati ietogrammi sintetici di forma triangolare, simmetrici rispetto al picco.

5 ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICA DELL'INTERO RETICOLO IDROGRAFICO

Partendo dalle analisi pluviometriche illustrate nel capitolo precedente, nella fase successiva si è passati all'interpretazione delle dinamiche di trasformazione afflussi deflussi con il metodo di calcolo SWMM che, a differenza di procedure e modelli di calcolo prettamente idrologici, descrive in maniera puntuale le dinamiche di trasformazione e propagazione nel reticolo idrografico in esame attraverso un'analisi integrata idrologico-idraulica.

Tale aspetto risulta particolarmente utile per la rete in esame, in cui il reticolo idrico naturale interagisce con gli scaricatori di piena delle reti fognarie, permettendo di determinare l'effettiva capacità recettiva dei torrenti Zerra, Seniga e dei loro affluenti rispetto ai deflussi meteorici collettati dai numerosi scaricatori di piena presenti lungo i tratti urbani.

Nei paragrafi seguenti si descrivono i criteri assunti per le modellazioni, gli strumenti di calcolo impiegati e i risultati per i diversi scenari simulati.

5.1 IL MODELLO NUMERICO UTILIZZATO

L'aggiornamento dell'analisi integrata idrologica e idraulica è stato effettuato tramite il codice di calcolo *Storm Water Management Model* (SWMM - versione 5.0) dell'*U.S. Environmental Protection Agency* (EPA).

Il modello SWMM descrive quantitativamente la trasformazione delle piogge in deflussi superficiali sulla estensione di un bacino imbrifero e in correnti idriche che confluiscono e si propagano lungo i suoi collettori drenanti. Fra le varie potenzialità del codice, in questa occasione è stata sfruttata soprattutto quella di valutare la formazione del ruscellamento superficiale e il suo trasferimento al reticolo di correnti monodimensionali lungo i corpi idrici drenanti.

Per quanto riguarda il deflusso di superficie, SWMM considera ogni area elementare utilizzata per la schematizzazione dell'intero bacino come un serbatoio non lineare con un singolo ingresso che rappresenta le precipitazioni, e con più uscite che rappresentano le perdite idrologiche, ossia l'infiltrazione, l'evaporazione e appunto il deflusso superficiale. La capacità del serbatoio non lineare rappresenta la capacità massima d'accumulo sulle superfici del bacino, fornita principalmente dai micro e macro avvallamenti delle superfici e dal velo d'acqua presente sulle superfici bagnate, d'altezza variabile durante l'evento di pioggia.

Nella logica del modello, il deflusso superficiale ha inizio solo quando il volume d'acqua nel serbatoio supera la capacità d'accumulo superficiale, mentre l'infiltrazione (solo nella porzione permeabile della superficie) e l'evaporazione riducono continuamente tale volume accumulato.

L'infiltrazione è stata modellata secondo il metodo *Curve Number*, o metodo CN, del National *Resources Conservation Service*, che consente di calcolare la pioggia netta, che origina i deflussi superficiali, in funzione di un parametro, detto *Curve Number* (CN), dipendente dall'uso del suolo, dalla potenzialità di deflusso del terreno e dal suo grado di saturazione.

Nei casi in cui l'infiltrazione e l'evaporazione risultino potenzialmente superiori alla precipitazione, il deflusso superficiale risulta ovviamente nullo. Non è presente la componente di deflusso ipodermico né quella di base, schematizzate come due serbatoi della regione sotterranea non lineari e interconnessi fra loro; tale elemento, che può simulare anche gli scambi idrici fra falda freatica e corsi d'acqua, riveste qui una importanza trascurabile nella simulazione di singoli eventi di piena, perché i tempi di risposta dei due serbatoi sotterranei eccedono largamente quelli del ruscellamento superficiale, fornendo un contributo al deflusso totale che diviene significativo solo in regime di magra.

Il processo appena descritto viene ripetuto per ogni area elementare schematizzata e per ogni passo temporale in cui è necessario discretizzare l'intervallo di tempo durante il quale interessa simulare la trasformazione afflussi-deflussi e la propagazione della conseguente onda di piena lungo il sistema idrografico, tenendo conto delle confluenze secondo la struttura topologica della sua rete.

Matematicamente il processo è rappresentato dalla soluzione di un sistema di equazioni differenziali che governano il bilancio della massa liquida (equazione di continuità) e della corrispondente energia meccanica (equazione del moto) tanto per il deflusso che si sviluppa come lama d'acqua fluente sulla superficie di una area elementare per effetto della saturazione del suolo e del superamento della sua capacità di infiltrazione, quanto del deflusso che si sviluppa come corrente essenzialmente monodimensionale in ciascuno dei tronchi elementari costituenti i collettori drenanti. Oltre tali equazioni differenziali, il modello impone contemporaneamente, attraverso ulteriori equazioni, le condizioni al contorno, ed in particolare l'identità del livello in tutti gli estremi di canali che connettono lo stesso nodo, il legame tra livello raggiunto nei nodi, dimensione fisica delle confluenze e livelli idrici nei canali riceventi.

Le condizioni iniziali nel reticolo vengono invece calcolate sulla base delle condizioni al contorno che riguardano i riceventi e della portata iniziale in ogni condotto.

Ai fini della modellazione, il bacino dei torrenti Zerra e Seniga è stato diviso in 146 sottobacini, 60 dei quali relativi a bacini naturali, gli altri ad aree urbanizzate, le cui principali caratteristiche sono riassunte in tabella 2. I confini dei bacini naturali sono di facile identificazione, in quanto coincidenti solitamente con linee di displuvio.

L'identificazione dei bacini urbani dipende invece fortemente anche dall'andamento della rete di drenaggio e dai canali di scolo; in generale ad ogni scaricatore di piena fognario identificato nei tratti in analisi è stato associato un bacino urbano. Dove nota la geometria e le quote di scorrimento, è stato modellato anche il

tratto di condotta a monte dello scarico, accorgimento che consente di valutare in maniera più verosimile l'interazione tra lo scarico e la piena in alveo.

Per ognuno dei sottobacini definiti nel modello idrologico, la percentuale di superficie impermeabile e l'uso del suolo, in base al quale è stato assegnato il corrispondente valore di CN (in relazione a ben note tabelle di letteratura), sono stati desunti da fotogrammi aerei ed immagini satellitari della zona. In via cautelativa, per il calcolo del Curve Number è stato assunto un terreno di classe D (a minor potenzialità di infiltrazione).

Il reticolo idrologico formato dai torrenti Zerra e Seniga, dai suoi principali affluenti e dai tratti terminali di collettori fognari compresi tra gli sfioratori di piena e gli scarichi è stato invece rappresentato mediante nodi idrologici, a cui è associata una quota di fondo alveo, e tratti di collegamento tra di essi.

Per questi ultimi, trattati dal modello come elementi monodimensionali su cui sono imposte le equazioni del moto, è necessario specificare la geometria della sezione (Il modello consente di definire tanto sezioni aperte quanto chiuse, queste ultime adottate per modellare gli scarichi degli sfioratori di piena, i ponti ed eventuali tratti tombinati) e la relativa scabrezza, potendo eventualmente distinguere tra alveo di magra e golenia. La pendenza del tronco è invece calcolata dal modello sulla base della quota di fondo alveo dei due nodi idrologici alle estremità.

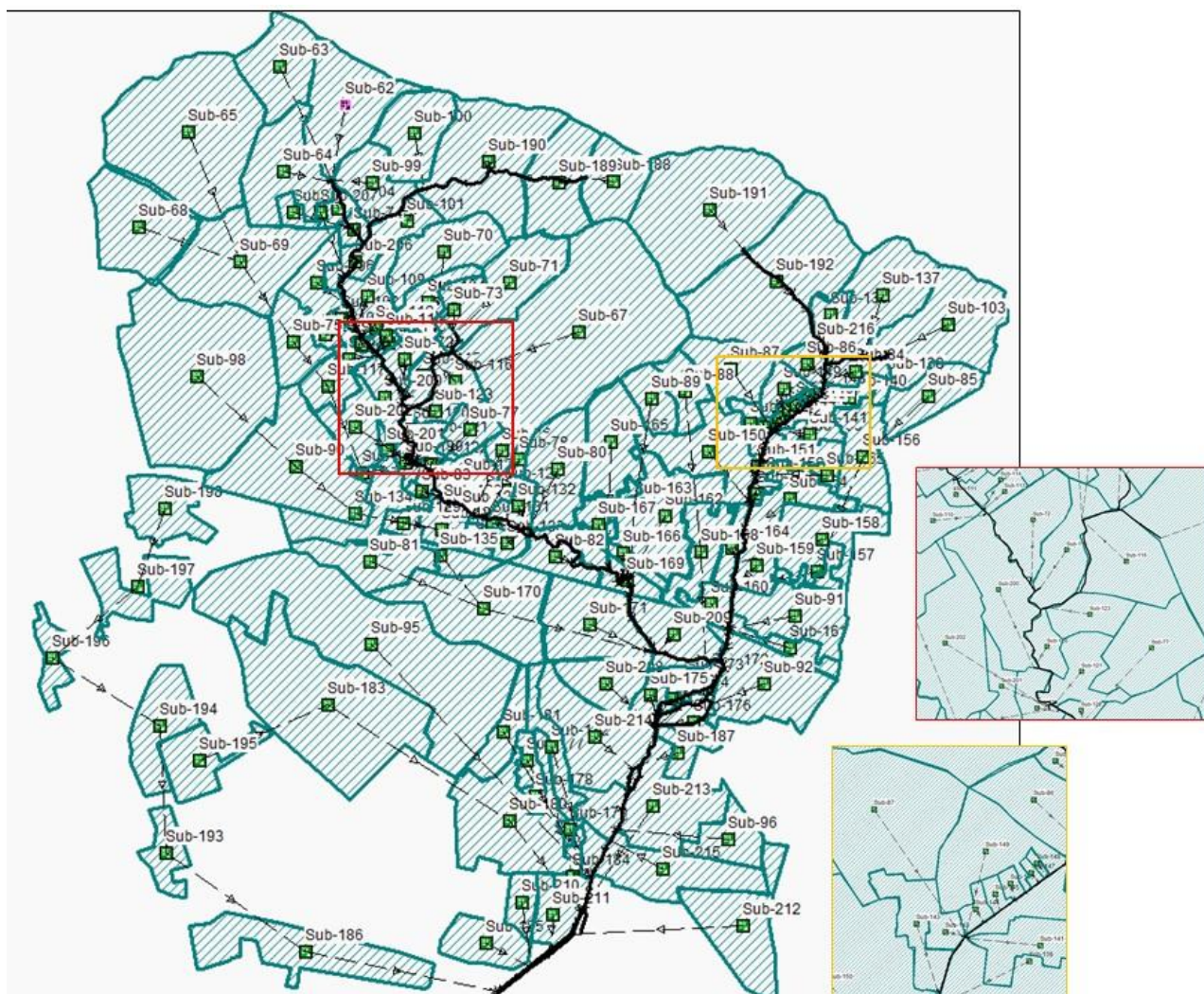


FIGURA 8 - DIVISIONE DEL BACINO DEI TORRENTI ZERRA E SENIGA IN SOTTOBACINI ADOTTATA AI FINI DELLA MODELLAZIONE (I NUMERI SONO RELATIVI ALLA TAB.2).

Nel dettaglio, le quote dei nodi idrologici sono state fatte coincidere con quelle delle sezioni ottenute dal rilievo topografico, mentre la geometria della sezione è stata assegnata al tratto immediatamente a valle del corrispondente nodo.

Nodi idrologici sono stati inoltre definiti in corrispondenza dei paramenti di monte e valle di tutti gli attraversamenti, in corrispondenza di scarichi e sfioratori delle reti fognarie. Per questi ultimi, le informazioni necessarie (quota di scorrimento degli scarichi, diametri ed eventualmente materiali delle condotte, profondità dei pozzetti sfioratori) sono state desunte incrociando le informazioni desunte dal rilievo topografico delle aste fluviali (che ha consentito di individuare gli scarichi in alveo) con le planimetrie e le monografie delle reti fognarie dei vari Comuni fornite dal gestore del SII.

Si precisa inoltre che il modello consente di attribuire ad ogni nodo un'altezza massima, che coincide con il massimo rigurgito ammissibile nel nodo in caso in cui instaurarsi di moto in pressione nel tronco a valle. Tale parametro è stato assunto diverso da zero solo per i nodi relativi a condotti fognari, dove è stato fatto coincidere con la profondità del corrispondente pozzetto fognario rispetto al piano campagna, ricavato dalle monografie degli sfioratori forniti dall'ente gestore della rete di drenaggio comunale, per simulare la capacità di invaso dello stesso, oppure in corrispondenza di ponti con intradosso particolarmente alto rispetto alle sommità spondali.

Dopo aver definito preliminarmente il reticolo drenante superficiale in termini di nodi e tratti fluviali il modello SWMM viene applicato congiuntamente alle 146 sotto unità identificate, specificandone il relativo nodo di afferenza.

Il modello è stato applicato per varie durate di pioggia e vari tempi di ritorno. **Verificato che la durata critica per il bacino del Torrente Zerra corrisponde alle due ore, i risultati successivi faranno per tanto riferimento ad eventi meteorici di tale durata.**

TABELLA 2 - CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEI SOTTOBACINI MODELLATI

Sottobacino	Area (ha)		Sottobacino	Area (ha)		Sottobacino	Area (ha)
Sub-100	34.52		Sub-163	2.24		Sub-72	9.81
Sub-101	12.42		Sub-164	10.06		Sub-73	8.97
Sub-103	57.76		Sub-165	36.24		Sub-74	5.80
Sub-104	17.49		Sub-166	7.65		Sub-75	22.60
Sub-105	5.43		Sub-167	16.35		Sub-76	6.28
Sub-106	18.11		Sub-168	25.09		Sub-77	14.62
Sub-107	4.23		Sub-169	10.06		Sub-78	3.17
Sub-108	3.02		Sub-170	69.78		Sub-80	39.04
Sub-109	19.94		Sub-171	48.41		Sub-81	29.21
Sub-110	5.69		Sub-172	3.41		Sub-82	18.33
Sub-111	1.23		Sub-173	5.96		Sub-83	1.87
Sub-112	1.32		Sub-174	3.12		Sub-84	9.01
Sub-113	1.76		Sub-175	7.71		Sub-85	26.70
Sub-114	2.67		Sub-176	13.49		Sub-86	8.49
Sub-115	9.52		Sub-177	6.90		Sub-87	28.55

Sottobacino	Area (ha)		Sottobacino	Area (ha)		Sottobacino	Area (ha)
Sub-116	13.94		Sub-178	4.04		Sub-88	17.04
Sub-117	13.14		Sub-179	2.57		Sub-89	16.62
Sub-119	1.80		Sub-180	66.40		Sub-90	78.06
Sub-120	3.21		Sub-181	18.83		Sub-91	38.37
Sub-121	7.11		Sub-182	17.14		Sub-92	52.11
Sub-122	1.53		Sub-183	127.51		Sub-95	176.20
Sub-123	5.88		Sub-184	10.04		Sub-96	20.94
Sub-124	22.70		Sub-185	22.93		Sub-98	149.48
Sub-125	4.30		Sub-186	60.11		Sub-99	25.27
Sub-126	2.32		Sub-187	8.92		Sub-151	1.03
Sub-127	1.38		Sub-188	27.94		Sub-152	2.26
Sub-128	9.06		Sub-189	41.93		Sub-153	1.66
Sub-129	6.41		Sub-190	81.70		Sub-154	24.52
Sub-130	5.21		Sub-191	109.13		Sub-155	3.58
Sub-131	2.39		Sub-192	106.69		Sub-156	31.79
Sub-132	9.34		Sub-193	16.49		Sub-157	7.27
Sub-133	7.51		Sub-194	34.67		Sub-158	36.86
Sub-134	27.53		Sub-195	25.65		Sub-159	13.16
Sub-135	13.85		Sub-196	14.22		Sub-160	10.23
Sub-136	10.10		Sub-197	30.55		Sub-161	11.60
Sub-137	48.97		Sub-198	28.73		Sub-162	47.75
Sub-138	12.24		Sub-199	4.98		Sub-214	51.59
Sub-139	17.69		Sub-200	14.67		Sub-215	48.54
Sub-140	4.77		Sub-201	3.96		Sub-216	1.39
Sub-141	8.27		Sub-202	21.97		Sub-62	53.69
Sub-142	1.92		Sub-204	5.88		Sub-63	37.30
Sub-143	6.64		Sub-206	11.92		Sub-64	45.43
Sub-144	1.47		Sub-207	1.02		Sub-65	121.41

Sottobacino	Area (ha)		Sottobacino	Area (ha)		Sottobacino	Area (ha)
Sub-145	0.99		Sub-208	24.97		Sub-67	180.39
Sub-146	0.85		Sub-209	28.82		Sub-68	53.88
Sub-147	0.50		Sub-210	10.97		Sub-69	71.89
Sub-148	0.37		Sub-211	14.59		Sub-70	37.79
Sub-149	11.48		Sub-212	48.26		Sub-71	42.77
Sub-150	41.39		Sub-213	58.59			

5.2 AFFINAMENTO DELLA CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Al fine di validare le ipotesi assunte alla base delle modellazioni idrologiche, è stato possibile effettuare la taratura del processo modellistico utilizzando una serie di informazioni reperite circa l'estensione delle aree di esondazione registrate nelle aree urbano in seguito al recente evento meteorico del 29/10/2018.

Il primo passaggio del processo di taratura è stato pertanto quello di reperire la registrazione pluviometrica di tale evento. I più vicini pluviometri della rete ARPA regionale (ponte Cenate, Bergamo via Goisis e Sarnico) hanno restituito registrazioni eterogenee e discordanti tra di loro, a sottolineare la notevole variabilità spaziale dell'evento analizzato.

Da quest'analisi è emersa la necessità di reperire dati pluviometrici relativi a punti di misura più vicini all'area in esame, pertanto si è effettuata una ricerca sui pluviometri gestiti da privati nell'area di interesse.

Ai fini del processo di calibrazione, si è deciso di utilizzare nel modello idrologico lo ietogramma derivante dalle registrazioni di Cenate Sopra, in quanto la serie storica presenta una frequenza di misura maggiore di quella di Scanzorosciate (misure acquisite ogni ora).

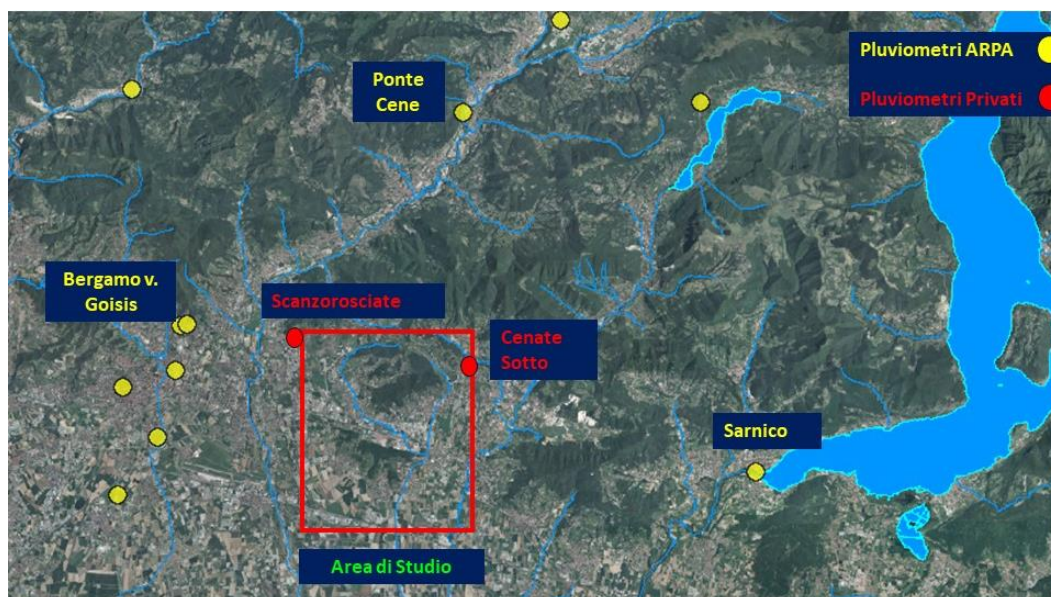


FIGURA 9: POSIZIONE DEI PIÙ VICINI PLUVIOMETRI RISPETTO ALL'AREA DI STUDIO

È stato modellato pertanto l'evento registrato dal suddetto pluviometro tra le 0:00 e le 24:00 del 29/10/2018 (cfr. Figura 10), durante il quale sono piovuti **98.6 mm di pioggia in 24 ore**.

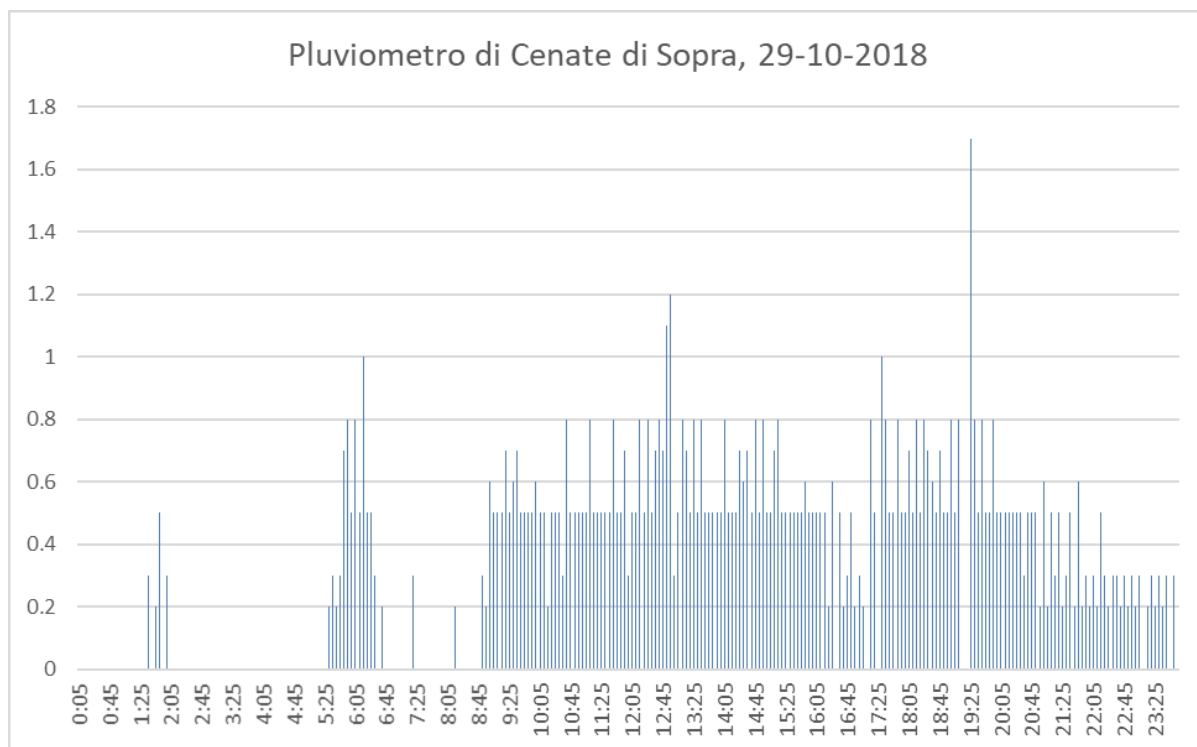


FIGURA 10: REGISTRAZIONE PLUVIOMETRICA PRESSO LA STAZIONE DI CENATE SOPRA (GESTITA DAL CENTRO METEOROLOGICO LOMBARDO PER L'EVENTO DEL

Confrontando l'altezza di pioggia cumulata ricavata dallo ietogramma dell'evento pluviometrico misurato dalla stazione di Cenate sopra con i risultati dell'analisi pluviometrica condotta al capitolo 4, è stato possibile ricostruire il periodo di ritorno di tale evento meteorico, che è risultata essere dell'ordine dei 5 anni (cfr. Figura 11), anche se presenta una distribuzione piuttosto omogenea lungo un arco di tempo nettamente superiore rispetto alla durata critica del bacino in esame.

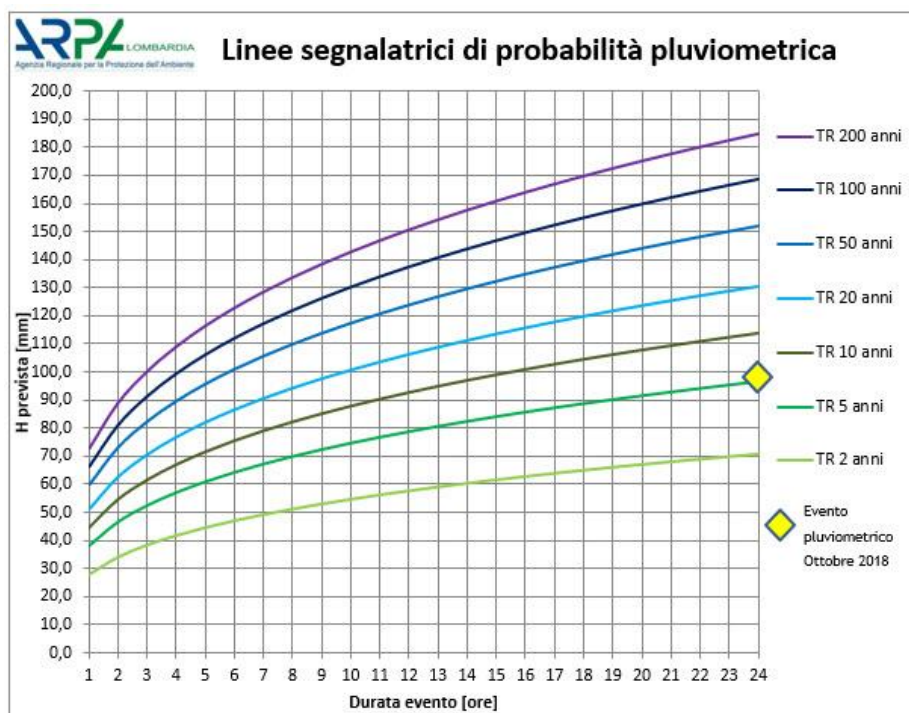


FIGURA 11 LINEE SEGNALETRICI DI POSSIBILITÀ PLUVIOMETRICA CON INDICATO L'EVENTO DELL'OTTOBRE 2018

È stato quindi simulato l'evento meteorico basato sulle registrazioni dell'idrometro di Cenate Sopra, al fine di verificare la corrispondenza, nei punti in esame, tra i dati simulati e quelli ricostruiti

I risultati della modellazione idrologica, in termini di portate generate dai bacini naturali e di quelle misurate nei collettori di scarico degli sfioratori fognari per i bacini urbani, sono stati assegnati come condizioni al contorno del modello idraulico bidimensionale implementato mediante il software HEC-RAS (descritto al capitolo successivo).

I risultati, in termini di livelli idrometrici raggiunti, sono stati confrontati con i dati e le registrazioni su tale evento note ai tecnici dei Comuni coinvolti.

In funzione di queste informazioni, e di tutte le testimonianze raccolte durante i sopralluoghi effettuati, è stata valutata la bontà della risposta della modellazione: in caso di sovrastima o sottostima del modello delle aree di esondazione in un certo punto o dei tiranti, si è proceduto ad affinare la calibrazione dei

parametri caratteristici dei bacini nel modello idrologico e quelli idraulici in quello idrodinamico (ad es. la scabrezza delle aree golenali).

A questo punto si è ripetuta la computazione idrologica e si è nuovamente proceduto ad immettere gli idrogrammi ottenuti come condizione al contorno del modello idrodinamico. Si è poi ripetuta anche l'analisi idrodinamica e si sono nuovamente analizzati i risultati.

La procedura iterativa qui schematicamente illustrata è stata reiterata finché non si è trovata la piena corrispondenza tra il dato riscontrato durante l'evento reale e la ricostruzione modellistica.

Tale processo ha permesso di affinare il modello numerico e di procedere alla successiva simulazione degli eventi di progetto per i tempi di ritorno di 20, 50, 100 e 200 anni sullo scenario morfologico aggiornato.

5.3 AGGIORNAMENTO DELL'ANALISI IDROLOGICO-IDRAULICA

Il principale obiettivo dell'aggiornamento della modellazione idrologico-idraulica è stato quello di meglio calibrare gli apporti idrologici presenti lungo l'asta fluviale dei torrenti analizzati al variare dei tempi di ritorno dell'evento meteorico, rispetto all'attuale assetto idraulico e morfologico-funzionale del reticolo idrico in esame derivante dall'aggiornamento delle informazioni disponibili.

L'analisi è stata svolta per i TR di riferimento di 20, 50, 100 e 200 anni a partire dai parametri idrologici definiti mediante il processo di affinamento della calibrazione riportato al paragrafo precedente.

La durata di pioggia critica è risultata essere quella pari a 2 ore, per la quale si verificano le condizioni in grado di evidenziare le maggiori criticità sul reticolo idrografico complessivo. Le massime sollecitazioni dovute al drenaggio dell'area urbana si hanno, invece, per eventi pluviometrici con durate inferiori alle 3 ore; i deflussi che ne derivano sono, però, inferiori rispetto a quelli convogliati all'interno del reticolo idrografico, per cui l'evento critico è associato prevalentemente alle dinamiche del reticolo naturale, pur con il contributo del drenaggio urbano.

Gli idrogrammi restituiti dal modello idrologico hanno costituito le condizioni al contorno della successiva fase di modellazione idrodinamica, sulla base dei risultati della quale sono state aggiornate le aree di esondazione, di conseguenza, le perimetrazioni delle aree a diversa pericolosità idraulica.

La modalità di estrapolazione dei risultati varia a seconda della tipologia di contributo analizzata. Per i bacini naturali infatti l'idrogramma di riferimento è quello idrologico del sottobacino stesso.

Il modello SWMM ha inoltre fornito informazioni su eventuali criticità delle reti fognarie, evidenziate dal modello come esondazioni dei pozzetti degli sfioratori e che sono da considerarsi rappresentative di

insufficienze idrauliche di tutta le reti di drenaggio a monte, non direttamente modellate. Più nel dettaglio, per i tempi di ritorno analizzati quasi tutte le reti fognarie modellate presentano funzionamento in pressione e locali insufficienze della capacità di deflusso.

Il modello permette di evidenziare anche criticità presenti lungo le aste fluviali modellate, aspetto che è stato meglio valutato con la successiva fase di modellazione idrodinamica bidimensionale. Le insufficienze riscontrate dalla modellazione idrologica sono risultate essenzialmente coerenti con quelle emerse poi dall'utilizzo del software HEC-RAS, riportate al capitolo successivo.

6 MODELLAZIONE IDRODINAMICA

6.1 OBIETTIVI E SCENARI DELL'ANALISI IDRODINAMICA

Basandosi sugli elementi morfologici ed idrologici sopra illustrati, si è proceduto all'aggiornamento della modellazione idrodinamica di carattere monodimensionale lungo l'alveo inciso e bidimensionale sulle aree golenali adiacenti alle aste torrentizie in esame.

In particolare, durante la prima fase di taratura le analisi modellistiche di tipo idrodinamico sono state eseguite in maniera iterativa rispetto alle indagini idrologiche-idrauliche illustrate nel capitolo precedente, utilizzando i risultati in termini di tiranti e di estensione delle aree di esondazione desunte dalle seconde come dati di calibrazione per le prime, imponendo i contributi di portata esterni dovuti a bacini naturali ed urbanizzati nelle diverse porzioni del corso d'acqua ricavate dalle indagini idrologico-idrauliche come dati di input per le modellazioni idrodinamiche. Tale procedimento è stato ripetuto sino alla congruenza dei risultati con le informazioni note circa l'evento di taratura (ietogramma del 29 ottobre 2018 registrata dalla stazione pluviometrica di Cenate Sopra).

Gli effetti del recente evento meteorico che ha colpito l'area nell'ottobre 2018, in termini di livelli idrometrici riscontrati in corrispondenza prevalentemente di attraversamenti oggetto di osservazione, sono stati forniti dai tecnici dei Comuni interessati da tale evento ed hanno costituito parametro essenziale di riscontro nella procedura di affinamento della calibrazione numerica (Figura 12).

La modellazione condotta è di tipo monodimensionale per quanto riguarda l'alveo di magra, mentre per valutare i fenomeni esondativi nelle aree golenali, marcatamente non monodimensionali, si è adottata una modellazione 2D, sfruttando il DTM elaborato dal rilievo con volo drone appositamente effettuato per il presente studio, localmente integrato con quello messo a disposizione dalla Regione Lombardia.

Alveo in 1D e golene in 2D sono state implementati in un unico modello idrodinamico, ricorrendo ad un'opportuna connessione idraulica definita in corrispondenza delle sponde che consenta lo scambio di portata in entrambe le direzioni, in funzione della differenza di livello che si instaura tra alveo e golena.

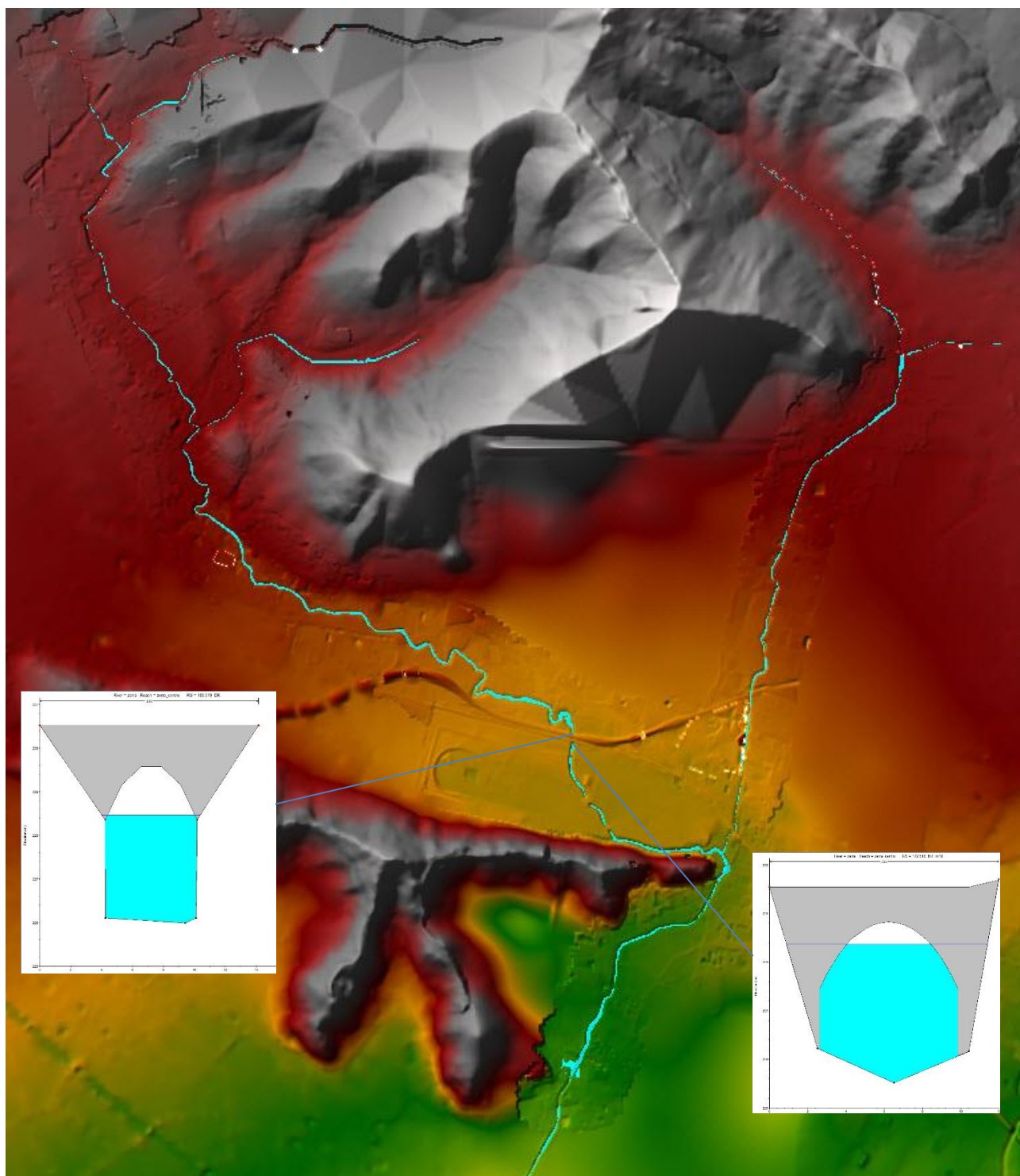


FIGURA 12 TARATURA DELLA MODELLAZIONE IDROLOGICA ED IDRAULICA CON L'EVENTO PLUVIOMETRICO DEL 29 OTTOBRE 2018, CON IL DETTAGLIO DEI LIVELLI IDROMETRICI OTTENUTI AD ALCUNE SEZIONI DI CONTROLLO SULL'ATTUALE ASSETTO DEL RETICOLO IDRICO

I risultati ottenuti dall'analisi idrodinamica sono stati utilizzati come base conoscitiva per l'aggiornamento della perimetrazione delle fasce di pericolosità idraulica, derivanti dalle aree di allagamento restituite dalla modellazione bidimensionale nelle golene sulla base del DTM aggiornato con le nuove informazioni disponibili.

6.2 IL MODELLO MATEMATICO UTILIZZATO

Il modello numerico adottato per l'aggiornamento delle simulazioni idrodinamiche condotte è HEC-RAS (*River Analysis System*), software di calcolo open source sviluppato dall' *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del *US Army Corp of Engineers*. Si tratta di un software trova un largo impiego in applicazioni ingegneristiche per la modellazione idrodinamica, sia monodimensionale che bidimensionale ai volumi finiti di reticoli idrici naturali e artificiali.

Il modello consente di effettuare simulazioni sia in moto permanente (solo in 1D) che vario, nonché di riprodurre l'effetto di un'ampia gamma di strutture sia longitudinali (come per esempio prese, soglie di sfioro, ecc. ...), che trasversali (p.es ponti, attraversamenti, briglie, soglie, ecc.).

Come detto in precedenza, nell'ambito di questo lavoro, per il calcolo dei massimi livelli di piena in alveo e di tutti gli altri parametri idraulici si è sfruttata la modellazione monodimensionale su alveo inerodibile ed a moto vario. Per le golene e tutte le aree oltre i confini dell'alveo inciso si è sfruttato il modulo di calcolo bidimensionale in moto vario.

6.2.1 MODELLAZIONE MONODIMENSIONALE

Il modello è stato progettato per contenere vari moduli di analisi idraulica monodimensionale: analisi di moto permanente, analisi del moto vario, analisi del trasporto solido in letto mobile. Tra le diverse componenti, quella utilizzata nel presente studio consiste nell'algoritmo di calcolo idraulico per la determinazione delle variazioni di portata, tiranti idrometrici, della velocità, della larghezza del pelo libero della corrente e di altre caratteristiche idrauliche del moto durante la propagazione verso valle della corrente idrica in condizioni di moto vario per effetto della morfologia dell'alveo, della sua resistenza d'attrito e della presenza di opere interagenti con la corrente (ponti e traverse).

La modellazione in moto vario si basa su una serie di ipotesi semplificative (distribuzione delle pressioni idrostatica; pendenza del fondo tale da poter confondere la direzione normale alla corrente con la verticale; corso d'acqua approssimato a tratti prismatici, perdite di carico espresse con la formulazione di Manning per il moto uniforme, velocità ed accelerazioni lungo la verticale trascurabili, variazioni di densità del flusso trascurabili);

Queste ipotesi vengono applicate alle equazioni che governano il moto monodimensionale di una corrente fluida in un alveo prismatico, ossia all'equazione di continuità e di conservazione della quantità di moto. Nel caso più generale, il modello consente di trattare sezioni composite, costituite da alveo di magra (*main channel*) e golene (*floodplains*), per le quali è possibile definire scabrezze differenti anche entro la stessa sezione monodimensionale.

Le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto vengono applicate separatamente ad alveo e golene, assumendo però che il pelo libero dell'acqua sia un'unica superficie orizzontale per tutta la sezione; per semplicità si trascurano anche gli scambi di quantità di moto tra alveo e golena.

Da queste ultime considerazioni deriva che, durante il moto, alveo e golene sono legati dalla seguente relazione:

$$Q = \Phi Q_c = (1 - \Phi) Q_f$$

dove:

- Q è la portata totale in alveo smaltita dalla sezione;
- Q_c e Q_f sono rispettivamente la portata nell'alveo di magra e nelle golene, la cui somma è pari a Q ;
- Φ è un coefficiente di ripartizione tra alveo e golene, che dipende dalle sezioni idrauliche, dalle scabrezze e dal perimetro bagnato del *main channel* e delle *floodplains*.

Applicando quindi l'equazione di continuità e di quantità di moto ad alveo e golene, sotto le ipotesi semplificative di cui discusso sopra, e tenuto conto della ripartizione del flusso tra alveo e golena appena esposta, si ottiene infine la seguente formulazione delle equazioni di de St. Venant 1D:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\Phi)Q]}{\partial x_f} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\Phi^2 Q^2 / A_c)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\Phi)^2 Q^2 / A_f]}{\partial x_f} + g A_c \left[\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_{fc} \right] + g A_f \left[\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_{ff} \right] = 0 \end{cases}$$

Dove:

- t è la variabile temporale
- x_c e x_f sono le ascisse spaziali, avente direzione ed orientazioni il più possibile coincidenti rispettivamente con linee di flusso nell'alveo di magra (*main channel*) e nelle golene (*floodplains*)
- A_c e A_f sono le aree bagnate in alveo e golena

- g è l'accelerazione di gravità
- z è la quota della superficie libera (livello)
- S_{fc} e S_{ff} sono le *friction slope* di alveo e golene, derivante dalle tradizionali relazioni di Mannig-Chezy per il moto uniforme (dipendono dalla scabrezza dell'alveo e dalle variabili idrodinamiche).

Per risolvere il precedente sistema di equazioni differenziali, che costituisce il modello matematico, occorre il ricorso a tecniche di integrazione numerica che prevedono la discretizzazione spaziale del dominio. Questa che viene stabilita dall'utente mediante la definizione di un certo numero di sezioni trasversali lungo l'asta fluviale.

Una volta definita la geometria da parte dell'utente, la tecnica (solutore) usata per la risoluzione numerica delle equazioni di de St Venant 1D è quella delle differenze finite con schema implicito.

Molto brevemente, questa tecnica consiste nell'approssimare i termini differenziali a rapporti incrementali, previa la definizione di un opportuno passo di discretizzazione spaziale per alveo e golene (Δx_f e Δx_c) e temporale (Δt). I primi derivano dalla distanza tra le sezioni trasversali definite dall'utente lungo le aste fluviali; la discretizzazione temporale deve invece essere direttamente esplicitata, previa analisi di sensitività per accertare che il valore specificato dall'utente sia tale da non introdurre instabilità numeriche.

Infine, il problema differenziale risulta determinato solo previa definizione da parte dell'utente di opportune condizioni al contorno e condizioni iniziali. Le prime vanno definite in corrispondenza di ogni sezione di monte del corso d'acqua (eccetto nel caso di confluenze di due corsi d'acqua o divisioni in più rami) e possono essere: idrogrammi di portata, variazioni di livelli nel tempo, oppure una scala delle portate. In maniera analoga vengono definite anche le condizioni iniziali, col vincolo che però HEC-RAS non ammette sezioni 1D asciutte.

Il modello richiede infine anche la definizione di condizioni al contorno per tutte le sezioni di valle dei corsi d'acqua (eccetto nel caso di confluenze di corsi d'acqua o divisioni in più rami), in questo caso sono assegnabili le stesse condizioni applicabili alle sezioni di monte, più quella di moto uniforme.

Inoltre l'utente deve definire opportune condizioni al contorno per tutti i manufatti (che siano strutture in linea o laterali) dotati di aperture (*gates*), al fine di descrivere il funzionamento di eventuali paratoie presenti sulle aperture. Infine è possibile definire, in corrispondenza di ogni sezione monodimensionale, eventuali immissioni/sottrazioni di portata.

Il modello consente infine all'utente di inserire nella geometria strutture trasversali (per simulare manufatti come briglie, soglie, prese, traverse ecc...), ponti (anche con pile), scatolari e strutture laterali (p.es soglie di sfioro). Tutti questi elementi vengono opportunamente inseriti nel sistema di equazioni del moto, al fine

modellare gli effetti da essi indotti (contrazioni o espansioni della vena fluida, con conseguenza perdita di carico e modifica delle caratteristiche idrodinamiche; immissione/sottrazione di portata ecc.).

6.2.2 MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE

Il sistema di equazioni che descrive il moto di un fluido in acque basse (shallow water equations 2DH) deriva dai principi di conservazione della massa e della quantità di moto applicati a una corrente fluida bidimensionale, sotto una serie di ipotesi (quali acque basse, fluido incomprimibile, corrente gradatamente variata nello spazio e nel tempo, distribuzione idrostatica delle pressioni sulle sezioni e piccole pendenze di fondo).

Il principio di conservazione della massa, applicato ad un opportuno volume di controllo preso all'interno del campo di moto di una corrente fluida bidimensionale, a pelo libero ed in moto vario, impone che il flusso di massa in di fluido entrante nell'unità di tempo dal volume di controllo sia pari a quello uscente meno la variazione di massa contenuta nel volume. Matematicamente, tale principio si traduce nell'equazione di continuità:

$$m_e - m_u = \frac{\partial m}{\partial t}$$

Il principio di conservazione della quantità di moto deriva invece dall'applicazione del secondo principio della dinamica al volume di controllo, che si traduce in un'equazione vettoriale lungo le due componenti x e y del moto:

$$\vec{I} + \vec{M}_u - \vec{M}_e = \vec{G} + \vec{\Pi}$$

dove M_u e M_e sono rispettivamente i flussi di quantità di moto uscente ed entrante, I rappresenta l'inerzia locale del fluido, G e Π sono le risultanti delle forze di massa e di superficie agenti sul volume di controllo.

Sotto le ipotesi di cui accennato all'inizio del paragrafo, i principi di conservazione della massa e della quantità di moto vengono, con semplici passaggi matematici, associati in un sistema di tre equazioni (shallow water equations 2DH) esprimibile nella seguente forma vettoriale:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot h\vec{V} + q = 0 \\ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -g\nabla H + \nu_t \nabla^2 \vec{V} - c_f \vec{V} + f\vec{k} \times \vec{V} \end{cases}$$

La prima equazione scalare rappresenta la conservazione della massa, la seconda è vettoriale ed indica il principio di conservazione della quantità di moto lungo x e y . La terminologia adottata è la seguente:

- H rappresenta il livello
- t la variabile temporale
- h è il tirante
- V è la velocità (vettore)
- q è il termine sorgente, che rappresenta sottrazioni od immissioni di massa nel volume di controllo
- g è l'accelerazione di gravità
- ν_t è la viscosità turbolenta (eddy viscosity)
- cf è il coefficiente di scabrezza del fondo
- f è il parametro di Coriolis
- k è un versore orientato in direzione verticale

Nell'ambito di questo lavoro è stata adottata l'approssimazione dell'onda diffusiva (Diffusion Wave form) delle equazioni di De St Venant, che consente di incorporare e semplificare alcuni termini (come quelli avvevativi, la turbolenza, Coriolis).

Il sistema delle equazioni differenziali costituenti le shallow water equations 2DH rappresenta il modello matematico, ossia la rappresentazione analitica del fenomeno in esame; tuttavia, eccettuato in casi piuttosto semplici, esso non può essere integrato in forma chiusa. La ricostruzione delle grandezze idrodinamiche d'interesse nel dominio prevede pertanto l'utilizzo di opportune tecniche di per la soluzione approssimata di problemi differenziali, da implementare in codici di calcolo per la risoluzione mediante calcolatori (modello numerico).

Nello specifico, il modello numerico prevede che il problema differenziale presentato sia risolto mediante una tecnica ibrida, che unisce due dei principali metodi di discretizzazione usati nell'idraulica computazionale:

- differenze finite: le derivate spaziali e temporali vengono approssimate tramite rapporti incrementali. Il metodo prevede la preventiva definizione di un passo di integrazione spaziale e temporale, quest'ultimo definito mediante una griglia di calcolo o mesh;
- volumi finiti: tale tecnica prevede la discretizzazione del dominio di integrazione in volumi di dimensioni finite, definiti attraverso un'opportuna griglia di calcolo o mesh. I volumi così individuati vengono assunti come volumi di controllo a cui applicare le equazioni del moto.

Per risolvere le equazioni del moto occorre pertanto che l'utente definisca preventivamente la mesh computazionale lungo tutto il dominio di calcolo bidimensionale. In HEC-RAS la mesh di calcolo può essere composta da elementi, anche irregolari, con un numero di facce compreso tra 3 e 8.

Nel solutore ibrido implementato in HEC-RAS il metodo delle differenze finite è utilizzato per approssimare le derivate temporali, mentre per le derivate nello spazio si ricorre ad esso solo per facce di elementi di una griglia di calcolo perpendicolari. Il metodo dei volumi finiti entra invece in gioco laddove la griglia non risulta localmente ortogonale.

Completa la definizione univoca del problema differenziale l'imposizione, da parte dell'utente, delle opportune condizioni iniziali ed al contorno.

Le prime rappresentano il valore assunto dalle principali variabili idrodinamiche nell'istante iniziale delle simulazioni; nello specifico è possibile fissare un valore di livello per tutte le celle del dominio; di default gli elementi sono assunti asciutti.

Le condizioni al contorno sono invece assegnate alle facce degli elementi della mesh lungo il contorno esterno della stessa oppure, se specificato dall'utente, anche lungo linee interne. Come condizione al contorno l'utente può assegnare un flusso imposto (entrante ed uscente), una condizione di moto uniforme (per consentire la fuoriuscita di acqua dal dominio), un livello imposto (anche variabile nel tempo), una scala delle portate, la connessione idraulica a tratti 1D od a storage areas (in entrambi i casi la direzione del flusso dipende dalla differenza di livelli che si instaura a cavallo della connessione). In assenza di specificazioni, il modello assumerà la condizione al contorno di parete, che impedisce l'uscita dell'acqua dal dominio.

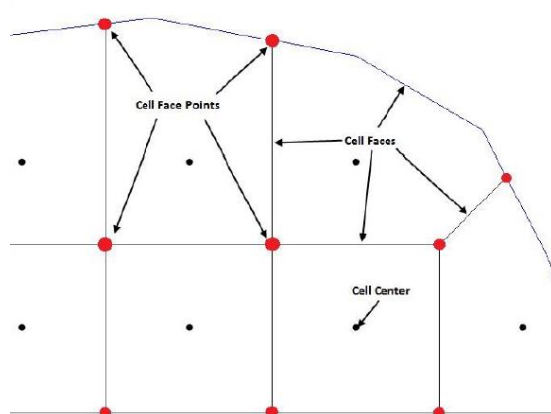


FIGURA 13: ELEMENTI CARATTERISTICI DI UNA MESH DI CALCOLO BIDIMENSIONALE

Mediante tale procedimento, descritto in questa sede molto sommariamente, è infine possibile ricavare, per ogni elemento della mesh (identificato dal suo baricentro o centro cella) ed a tutti gli intervalli di

discretizzazione temporale, i valori di tiranti e velocità della corrente, associate al baricentro di ogni cella della mesh di calcolo.

È comprensibile come tale approssimazione risulta tanto più accurata quanto più piccole sono le dimensioni degli elementi della griglia di calcolo. Per contro, un aumento del numero di elementi porta ad un conseguente aumento nei tempi di elaborazione dei risultati e pertanto la definizione della mesh deve costituire un compromesso tra queste due necessità contrapposte.

In generale comunque, fissate le dimensioni della mesh, la scelta dell'intervallo di discretizzazione spaziale Δt non è del tutto arbitraria, ma deve essere tale da garantire il rispetto la condizione di stabilità CFL:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta X_{\min}}{U_{\max}} Cr$$

Dove:

- ΔX_{\min} è la minima dimensione della mesh di calcolo
- U_{\max} è la massima celerità ottenuta nel dominio di calcolo
- Cr è il numero di Courant che in genere è pari a 1 (meglio se 0.8), ma può arrivare fino a 2 con l'approssimazione diffusiva

Se la precedente condizione non è soddisfatta, il solutore numerico diviene instabile e può dare luogo ad oscillazioni non realistiche della soluzione, oppure addirittura divergere negli elementi della mesh dove la condizione di stabilità non risulta verificata,

Sempre riguardo alla mesh di calcolo, risulta opportuno operare un'importante precisazione. Mentre infatti l'utente stabilisce (mediante la definizione della mesh) l'intervallo di discretizzazione spaziale entro cui il modello determina i principali parametri idrodinamici, la precisione del dato batimetrico rimane quella stabilita dalla definizione DTM usata come base (ossia solitamente maggiore di quella della mesh).

Preliminarmente al lancio del solutore numerico vero e proprio, HEC-RAS esegue un preprocessore geometrico in cui associa ad ogni cella della mesh il volume calcolato dal terreno sottostante, e ad ogni sua faccia il dettagliato andamento del terreno desunto dal DTM. Ogni faccia di ciascun elemento della mesh risulta così assimilabile ad una sezione idraulica 1D, rappresentata dal terreno sottostante e discretizzata secondo la precisione di quest'ultimo.

La definizione del dato batimetrico rappresenta pertanto a tutti gli effetti una sotto-griglia più fitta della mesh di calcolo, grazie alla quale è possibile considerare l'effetto sul moto di ostacoli (edifici, rilevati, montagnole...) o di vie preferenziali di flusso (piccoli canali di bonifica od irrigui, fossi al piede di argini o di

drenaggio di strade...) aventi dimensioni minori ed orientamento differente di quelli degli elementi della mesh.

6.3 AGGIORNAMENTI DELLA MODELLAZIONE DEI TORRENTI ZERRA E SENIGA

Ai fini dell'applicazione del modello per l'analisi idrodinamica dei Torrenti Zerra e Seniga, è stato necessario integrare e modificare la conformazione geometria del corso d'acqua e delle aree adiacenti sulla base del nuovo assetto morfologico e idraulico risultante dalle ulteriori informazioni raccolte.

Le aree 2D sono state opportunamente connesse idraulicamente all'alveo 1D in modo da consentire il transito di flusso da alveo e golene e viceversa, a seconda della differenza di tiranti che si instaura tra le due zone. Il livello idrometrico può essere infatti marcatamente differente in golena rispetto all'alveo, in quanto dipendente dai fenomeni di propagazione della piena a monte, fenomeno non adeguatamente rappresentabile ricorrendo ad una sola modellazione monodimensionale; proprio in virtù di questa differenza di livelli, possono instaurarsi flussi laterali tra i due attraverso le connessioni definite, che provocano l'esondazione di acqua verso le golene (se livello in alveo è maggiore di quello in golena) o viceversa in richiamo di acqua verso l'alveo (se il livello in golena è maggiore di quello in alveo).

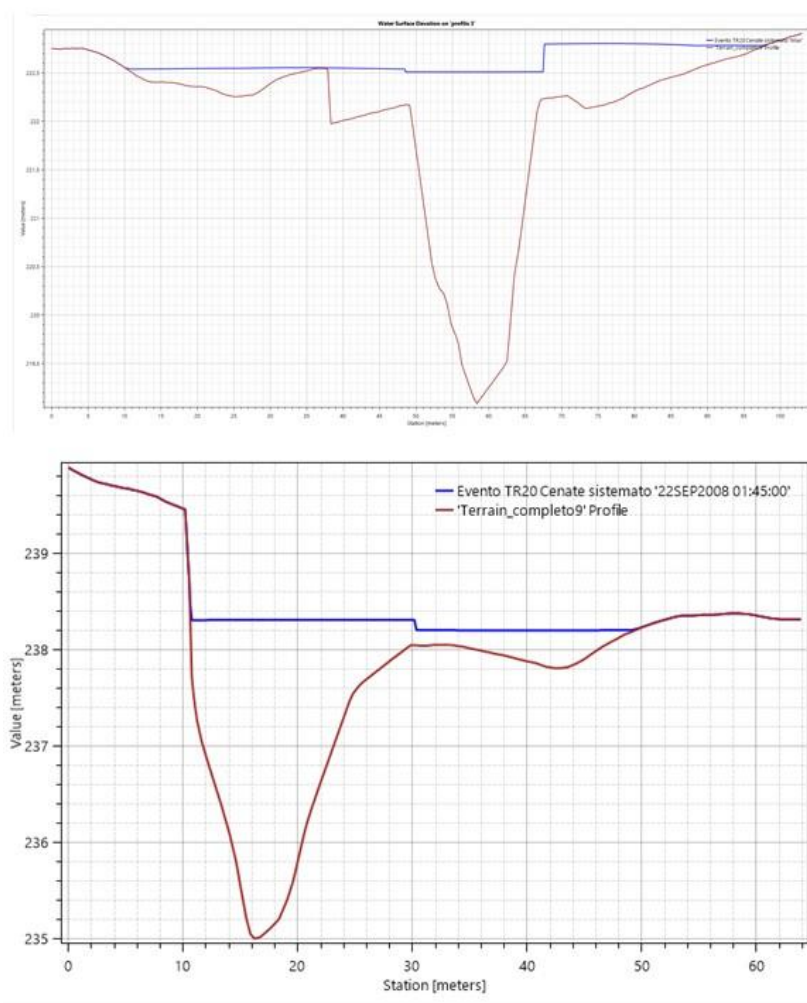


FIGURA 14: I DUE GRAFICI SONO ESEMPLIFICATIVI DEL MECCANISMO DI SCAMBIO DI FLUSSO TRA ALVEO (MODELLATO IN 1D) E GOLENE (MODELLATE IN 2D) IN FUNZIONE DELLA DIFFERENZA TRA LIVELLI. I LIVELLI IN ALVEO E GOLENE SONO INFATTI GENERALMENTE DIFFERENTI. NEL PRIMO CASO ILLUSTRATO, TIPICO DELLA FASE CALANTE DELLA PIENA, IN GOLENA CI SONO LIVELLI MAGGIORI CHE IN ALVEO E QUINDI L'ACQUA VIENE RICHIAMATA IN QUEST'ULTIMO, SVUOTANDO LE GOLENE. IL SECONDO GRAFICO È TIPICO DELLA FASE DI CRESCITA DELLA PIENA, IN CUI VENGONO PROGRESSIVAMENTE ALLAGATE LE GOLENE PER IL FLUSSO CHE SI ISTAURA DALL'ALVEO (LIVELLI A QUOTA MAGGIORE)

Le portate inserite nel modello sono state ricavate dalla precedente modellazione idrologica per tempi di ritorno T_r di 20, 50, 100 e 200 anni. Nello specifico sono stati assegnati come contributi esterni di portata tutti gli idrogrammi restituiti dal modello SWMM in corrispondenza di immissioni laterali (p.es in corrispondenza della confluenza con affluenti non modellati, a livello degli sfioratori di piena ecc.).

La scabrezza d'alveo è stata espressa attraverso il coefficiente di Gauckler-Strickler, definendo scabrezze differenti per alveo e golene. I valori utilizzati sono stati mutuati dalla letteratura e dall'esperienza e confermati dalle indagini e dai rilievi sul campo.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, sono stati attribuiti alle corrispondenti sezioni d'alveo tutti i contributi di portata desunti dalla precedente modellazione idrologica (bacini naturali, rogge, sfioratori ecc... assegnando l'intero idrogramma).

Come condizione al contorno di valle della modellazione monodimensionale in corrispondenza dell'ultima sezione di valle (cade in corrispondenza dello scolmatore) è stata assegnata condizione di moto uniforme, giustificata dal fatto che il canale di derivazione verso il F. Serio è a sezione e pendenza pressoché costanti e quindi, sufficientemente lontano dal manufatto di imbocco, è ragionevole assumere l'istaurarsi di un moto uniforme.

Una simile condizione è stata assegnata al confine di valle della mesh, in modo da consentire la fuoriuscita dell'acqua proveniente da eventuali aree di esondazioni in prossimità di tale contorno.

6.4 RISULTATI DELLE ANALISI IDRODINAMICHE MONODIMENSIONALI

Di seguito si illustrano i risultati dell'analisi idrodinamica monodimensionale lungo le aste principali.

Per come è stata impostata la modellazione, i risultati riportati nei grafici seguenti hanno la valenza di livelli contenuti nell'alveo inciso, e non sono strettamente rappresentativi delle dinamiche esondative che avvengono oltre le sponde, dove entra in gioco la modellazione bidimensionale. Quest'ultima è, invece, rappresentata negli elaborati B e C allegati alla presente relazione.

Come già introdotto, nelle golene possono istaurarsi tiranti sensibilmente diversi da quelli dell'alveo inciso, inoltre le aree di esondazione e quindi le sezioni liquide possono essere notevolmente estese, anche centinaia di metri, con velocità assai modeste rispetto a quelle dell'alveo inciso. Visto quindi la sostanziale difformità tra le caratteristiche del flusso in alveo e golena, nonché il fatto che siano state calcolate con schemi numerici differenti (1D e 2D), risulta non significativo presentare dei parametri unici per alveo e golene. Nel proseguo si presenteranno pertanto risultati differenziati in funzione della finalità delle varie analisi.

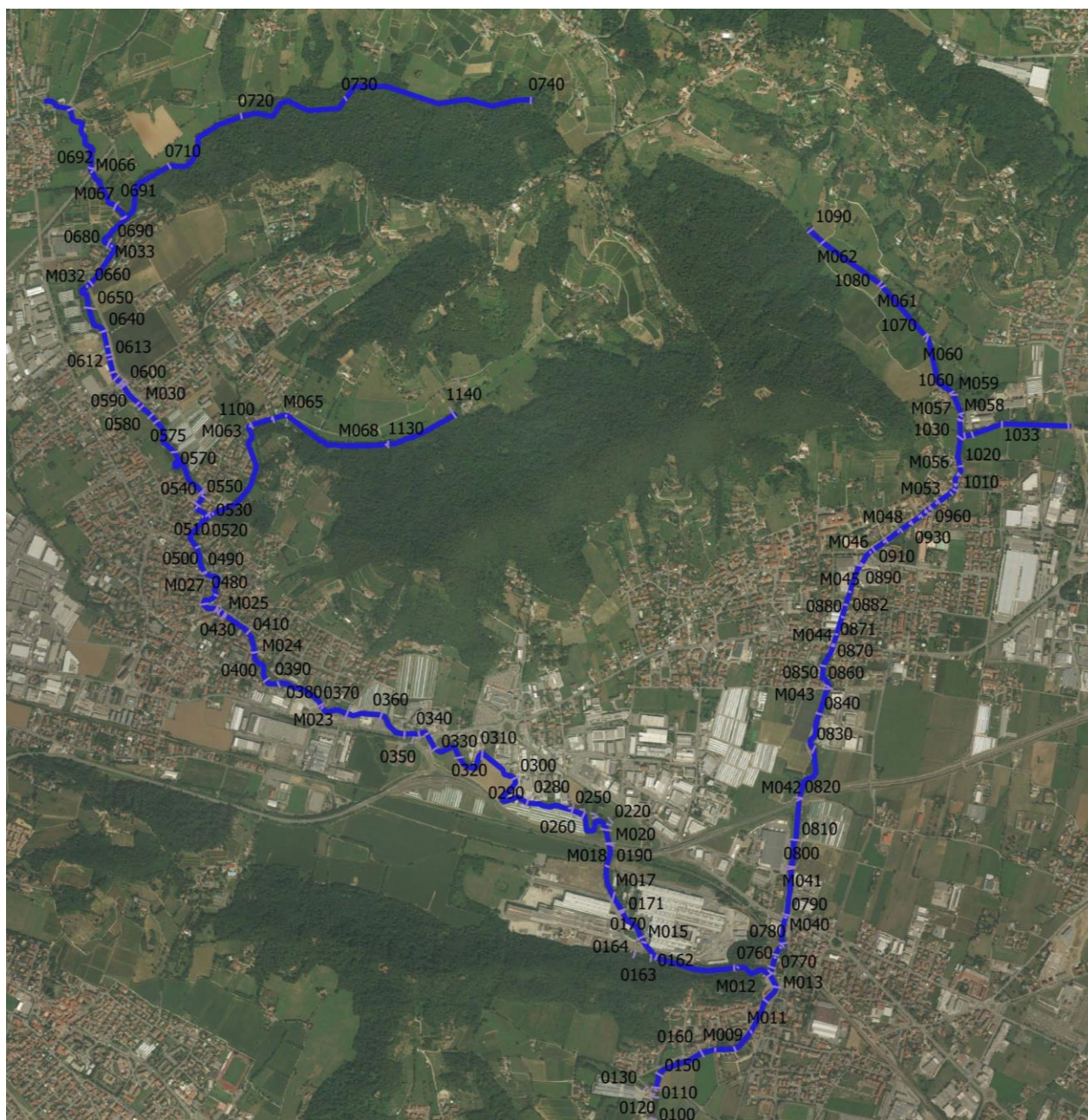


FIGURA 15 RETICOLO IDRICO SUPERFICIALE AFFERENTE AI TORRENTI ZERRA E SENIGA CON INDICAZIONE NUMERICA DELLE SEZIONI DI RIFERIMENTO

In particolare, ai fini dell'aggiornamento della perimetrazione delle aree di pericolosità idraulica sono di interesse i fenomeni esondativi nelle aree golenali e pertanto esse derivano dai risultati della modellazione bidimensionale.

Si ricorda inoltre che le analisi fanno riferimento al transito delle sole portate liquide del torrente, non ricomprendendo gli effetti del trasporto solido di fondo e flottante che potrebbe aggravare ulteriormente le criticità idrauliche individuate.

Si precisa infine che tutti i risultati presentati nel prosieguo e nell'Elaborato B - *Risultati della modellazione idraulica bidimensionale aggiornata*, sono relativi all'istante temporale di modellazione in cui, per ogni punto del dominio si è ottenuto il massimo tirante, **indipendentemente dall'istante temporale di simulazione in cui tale valore si è verificato** (si tratta cioè di un involucro nel tempo).

Nelle immagini seguenti si riportano i profili di rigurgito corrispondenti ai vari tempi di ritorno investigati. Nei profili, oltre al fondo ed al pelo libero dell'acqua sono segnati i confini dell'alveo inciso; coerentemente con le premesse condotte, il superamento di tali quote implica trasferimento di flusso verso le aree golenali, modellate in 2D, il verso del flusso dipende dalla differenza di livello tra alveo e golena.

Circa i risultati riportati nelle figure successive in alcuni tratti, di solito in corrispondenza di attraversamenti, si sono ottenuti valori molto simili di livelli al colmo per tutti e tre i tempi di ritorno analizzati. Questo risultato deriva sia dalle limitazioni alla portata imposte sia dalla geometria dell'alveo che, soprattutto, dalle restrizioni di sezioni in corrispondenza dei ponti. In corrispondenza delle criticità precedentemente illustrate, infatti, si verifica l'uscita delle portate in eccesso che le sezioni non riescono a smaltire; pertanto, i valori di picco degli idrogrammi che transitano immediatamente a valle di un punto di esondazione risultano approssimativamente gli stessi per tutti i tempi di ritorno analizzati, pari alla massima capacità dell'alveo. Al variare del tempo di ritorno, i risultati si differenziano invece in termini di forma degli idrogrammi e quindi di volumi sia transitanti in alveo che esondati nelle aree critiche, e quindi in termini di estensione delle aree di esondazioni e dell'entità dei tiranti ottenuti dalla modellazione bidimensionale (Elaborato B).

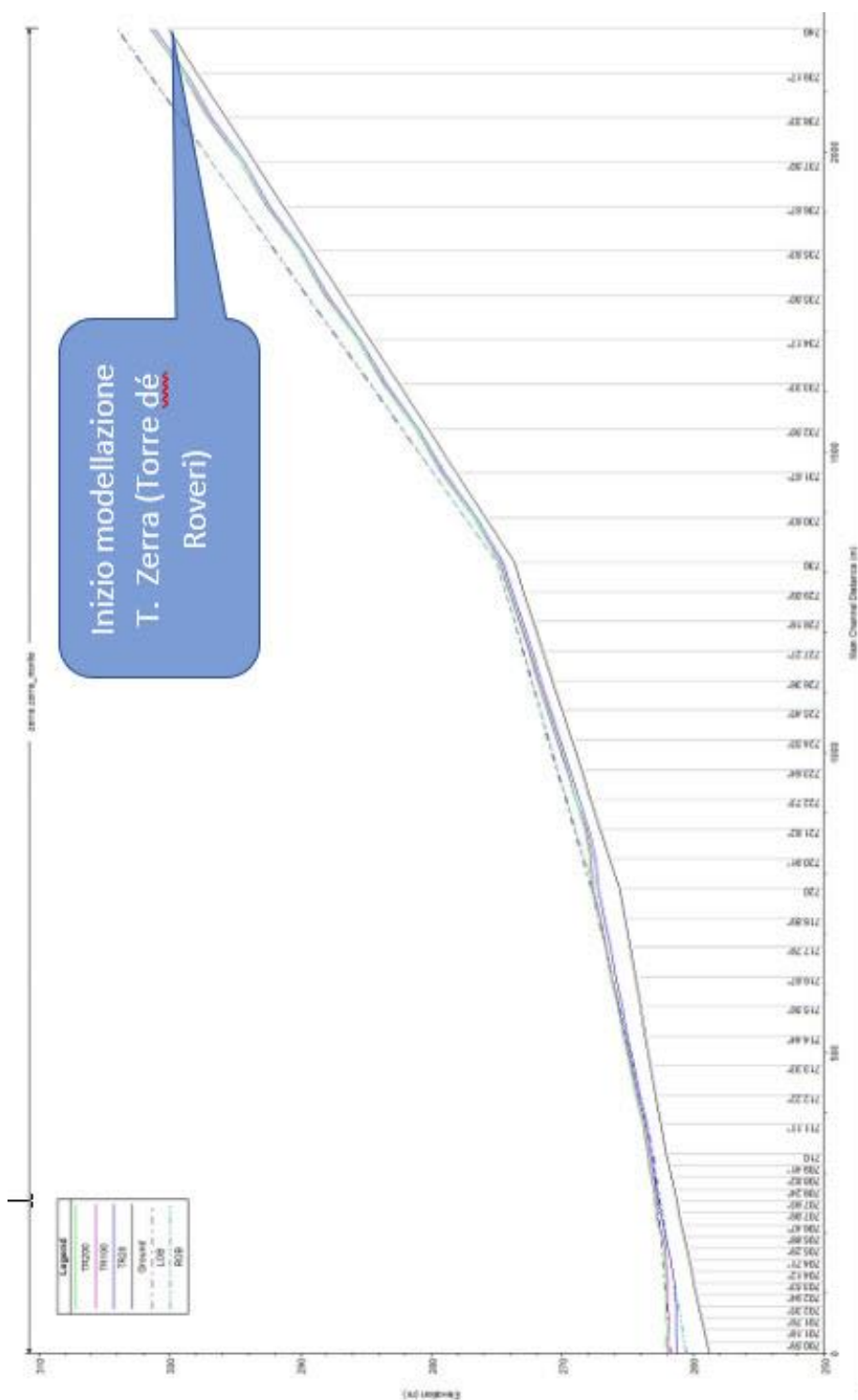


FIGURA 16: PROFILI DI RIGURGITO AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO PER QUANTO RIGUARDA L'ALVEO INCISO DEL T. ZERRA NEL TRATTO DI MONTE (COMUNE DI TORRE DE' ROVERI)

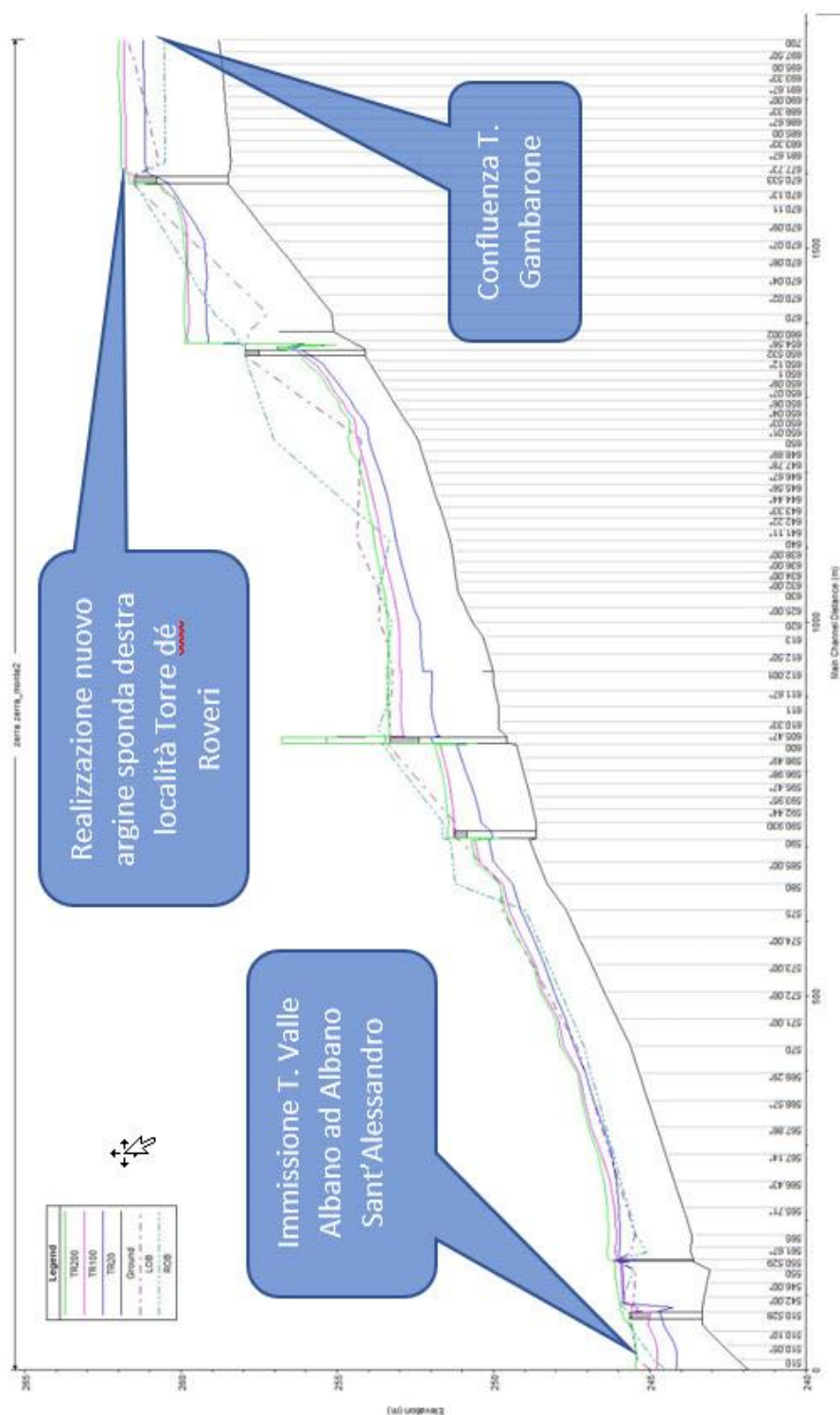


FIGURA 17: PROFILI DI RIGURGITO AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO PER QUANTO RIGUARDA L'ALVEO INCISO DEL T. ZERRA NEL TRATTO DI MONTE (COMUNE DI TORRE DE' ROVERI, A CAVALLO IMMISSIONE DEL T. GAMBARONE)

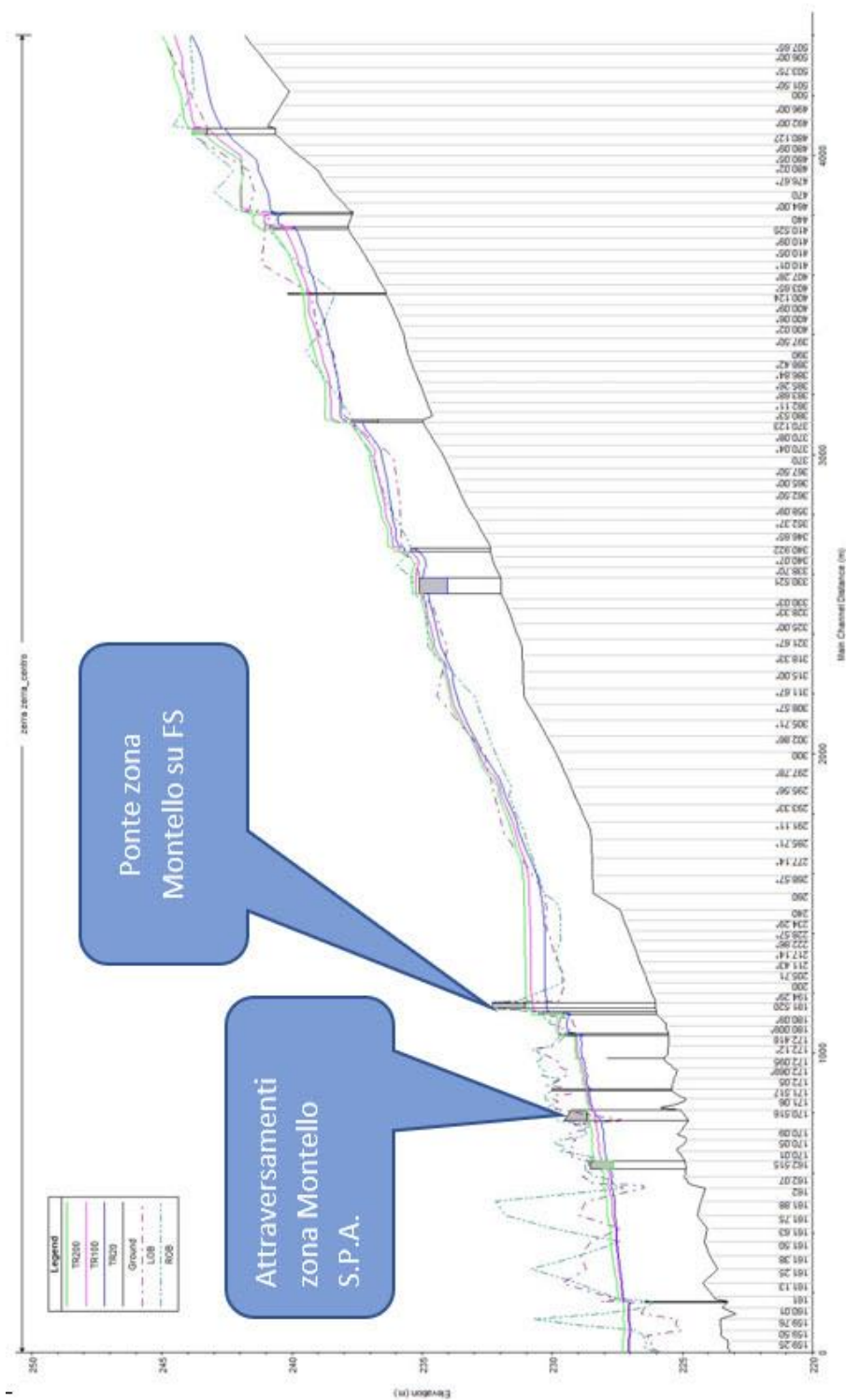


FIGURA 18: PROFILI DI RIGURGITO AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO PER QUANTO RIGUARDA L'ALVEO INCISO DEL T. ZERRA NEL TRATTO DI TRA I COMUNI DI ALBANO S. ALESSANDRO E MONTELO

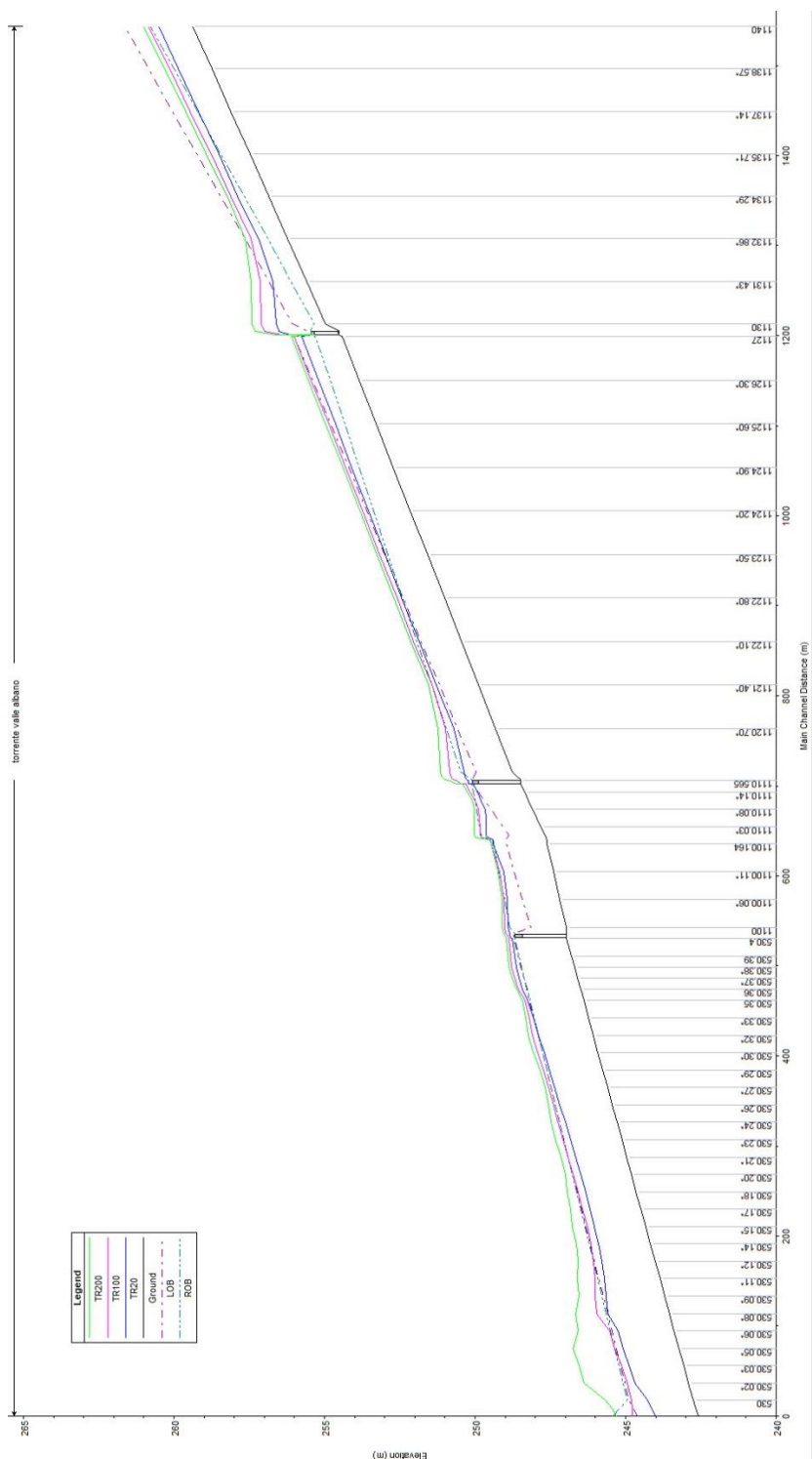


FIGURA 19: PROFILI DI RIGURITO AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO PER QUANTO RIGUARDA L'ALVEO INCISO DEL T. VALLE D'ALBANO NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI ALBANO S. ALESSANDRO

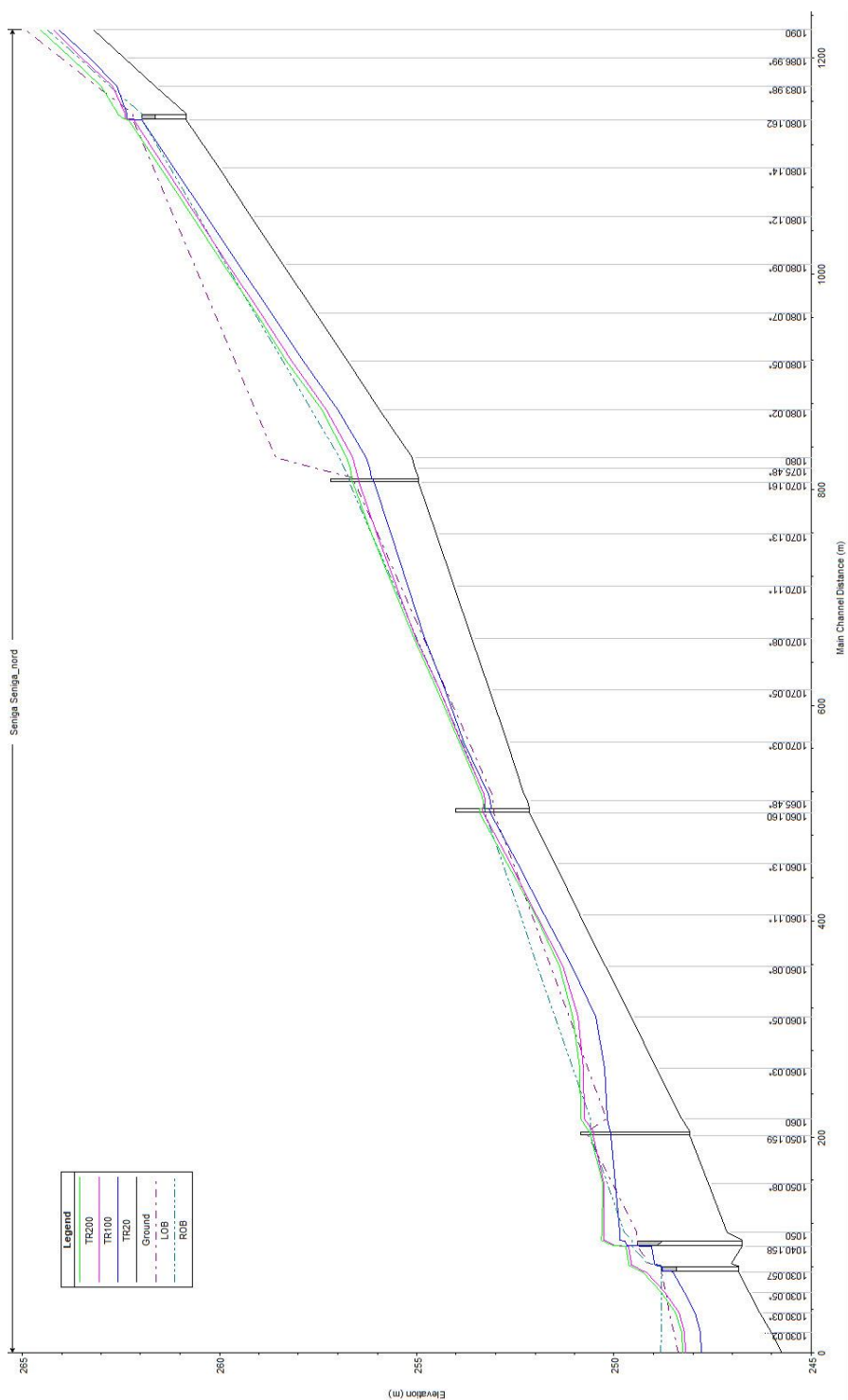


FIGURA 20: PROFILI DI RIGURGITO AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO PER QUANTO RIGUARDA L'ALVEO INCISO DEL T. SENIGA 1/2

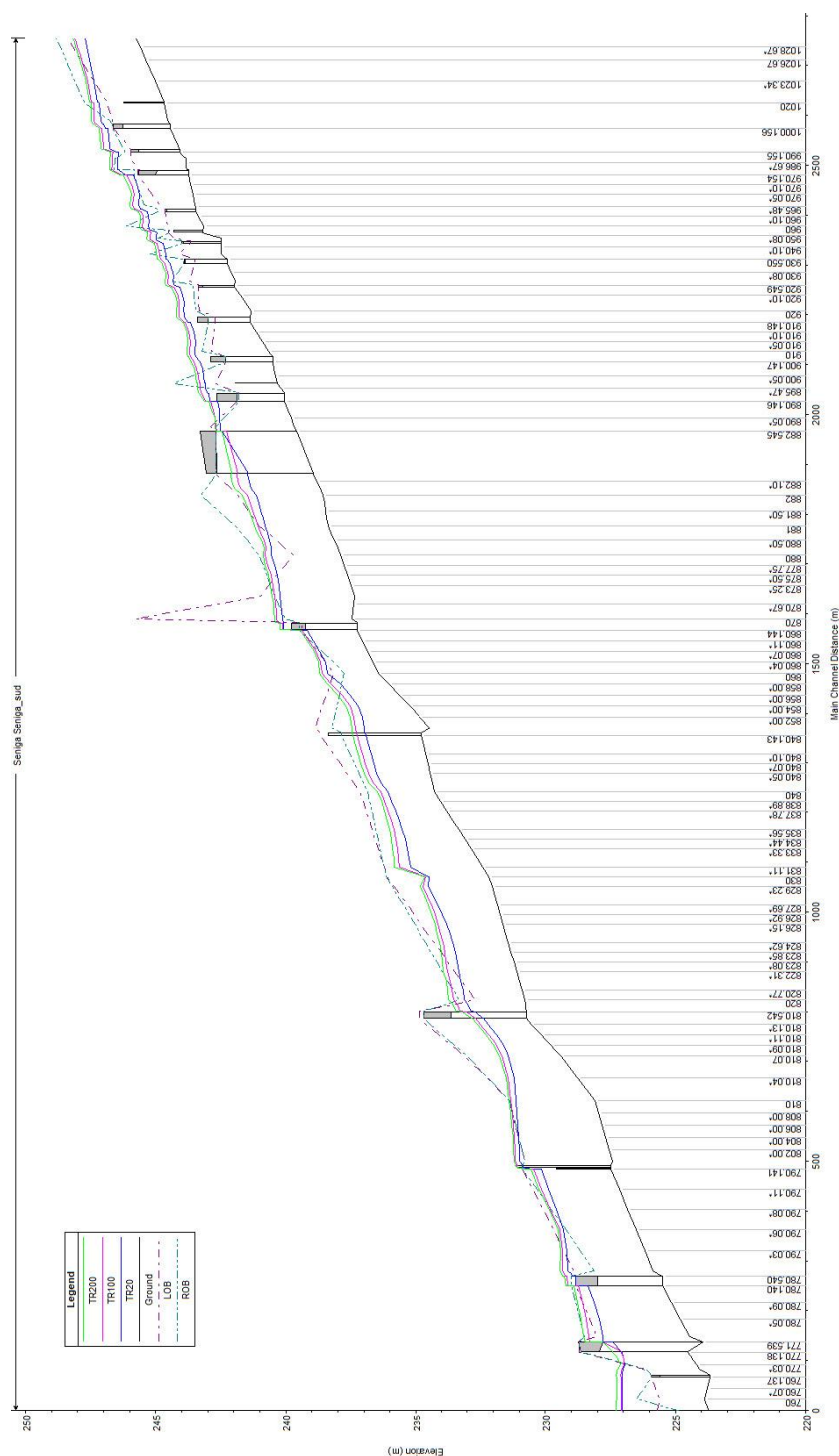


FIGURA 21: PROFILI DI RIGURGITO AL VARIARE DEL TEMPO DI RITORNO PER QUANTO RIGUARDA L'ALVEO INCISO DEL T. SENIGA 2/2

6.5 RISULTATI DELLE ANALISI IDRODINAMICHE BIDIMENSIONALI

Dall'analisi idrodinamica bidimensionale delle golene è stato possibile ricavare l'andamento delle principali variabili idrauliche per tutti gli elementi della mesh di calcolo.

Si precisa che, a differenza di altri modelli idrodinamici bidimensionali, in HEC-RAS 5.0 la rappresentazione del piano campagna non dipende dalla risoluzione della mesh di calcolo, ma da quella del DTM usato (nel caso in esame generalmente 0.5m x 0.5m); più nel dettaglio, la faccia di ogni cella della mesh è trattata come una sezione rappresentata dal terreno sottostante e discretizzata secondo la precisione di quest'ultimo. Sempre sulla base del terreno di base, il software computa la relazione tra volume e tirante nella cella. Ciò consente di cogliere, nella modellazione, elementi del terreno aventi dimensioni minori di quelli delle celle, oppure diversamente orientati rispetto alla mesh.

In funzione di questi risultati, in particolar modo dell'andamento dei tiranti nella configurazione di 'inviluppo temporale' (ossia per ogni elemento della mesh si è considerato il massimo tirante ottenuto, indipendentemente dall'istante temporale indipendentemente dall'istante temporale di simulazione in cui esso si è verificato, che generalmente in un'area così estesa può essere diverso per varie porzioni del dominio di calcolo) è stata aggiornata la perimetrazione delle aree di pericolosità idraulica, riportate nell'Elaborato C - *Proposta di aggiornamento delle aree di pericolosità idraulica*. Più nello specifico:

- La perimetrazione delle aree ad alta pericolosità deriva dall'elaborazione dei risultati per $T_r=20$ anni;
- La perimetrazione delle aree a media pericolosità deriva dall'elaborazione dei risultati per $T_r=100$ anni;
- La perimetrazione delle aree a bassa pericolosità deriva dall'elaborazione dei risultati per $T_r=200$ anni.

In questa sede si tende a precisare però come la definizione delle aree di pericolosità non derivi da un'accettazione passiva ed immediata dei dati del modello, ma preveda al contrario un'analisi ed interpretazione ingegneristica dei risultati, in funzione anche delle conoscenze delle ipotesi alla base del modello matematico stesso, nonché delle locali approssimazioni topografiche delle condizioni morfologiche ed antropiche.

Per colmare le seconde, che derivano dall'impossibilità di rilevare in modo continuo l'alveo e dalla necessità di affidarsi ad un numero discreto di sezioni, sono risultati di primaria importanza i sopralluoghi in sito e le ulteriori informazioni messe a disposizione dai Comuni coinvolti durante lo svolgimento della presente fase di aggiornamento.

Si noti che lo stesso DTM usato come base per la modellazione bidimensionale è frutto di elaborazione e di una serie di ipotesi condotte. Si ricorda infatti che l'algoritmo utilizzato ha pulito il DTM della vegetazione

(alberi, ecc...) e degli edifici; questi ultimi sono stati rimossi a livello del piano campagna, qualora non fosse stata rilevata la presenza di semiinterrati o rampe di discesa; in caso contrario, gli edifici sono stati rimossi alla quota del piano interrato, inferiore quindi al piano campagna circostante.

L'utilizzo di questo particolare algoritmo di elaborazione, se da un lato ha consentito di individuare facilmente tutte quelle abitazioni che si trovano in una situazione di rischio idraulico per la presenza di piani interrati allagati, dall'altro ha portato ad avere nella restituzione degli output modellistici riportati nell'Elaborato B locali aree di incremento dei tiranti, corrispondenti alle impronte degli edifici dotati di piano interrato. Ovviamente questo risultato è una conseguenza dell'elaborazione condotta.

Inoltre l'operazione stessa di pulizia del DTM dagli edifici, prassi usuale ai fini pianificatori, può portare, per esempio, ad avere confini tra asciutto o bagnato a metà tra abitazioni e strutture esistenti. Ciò è stato corretto in fase di definizione delle fasce fluviali.

In generale, si è proceduto inoltre a regolarizzare il contorno delle aree di esondazione restituite dal modello, facendole coincidere, se possibile, con limiti ben individuabili in cartografia (come strade, rilevati ecc.) al fine di semplificare le successive operazioni pianificatore; inoltre, a favore di sicurezza, nella perimetrazione delle aree sono stati trascurati eventuali zone asciutte di limitata estensione (p.es locali aree sopraelevate).

La presente fase di aggiornamento non esaurisce, comunque, la possibilità di ulteriori puntuali approfondimenti, atti a meglio definire locali situazioni non approfondite in maniera dedicata in questa fase.

Di seguito si riportano gli idrogrammi di piena di riferimento per le sezioni immediatamente a monte dei tratti in cui si verificano le esondazioni più significative, distribuite lungo i diversi tratti di aste torrentizie interessanti i comuni coinvolti. L'ubicazione planimetrica di tali sezioni è riportata nella figura seguente.



FIGURA 22 - UBICAZIONE PLANIMETRICA DELLE SEZIONI DI RIFERIMENTO PER GLI IDROGRAMMI DI SEGUITO RIPORTATI

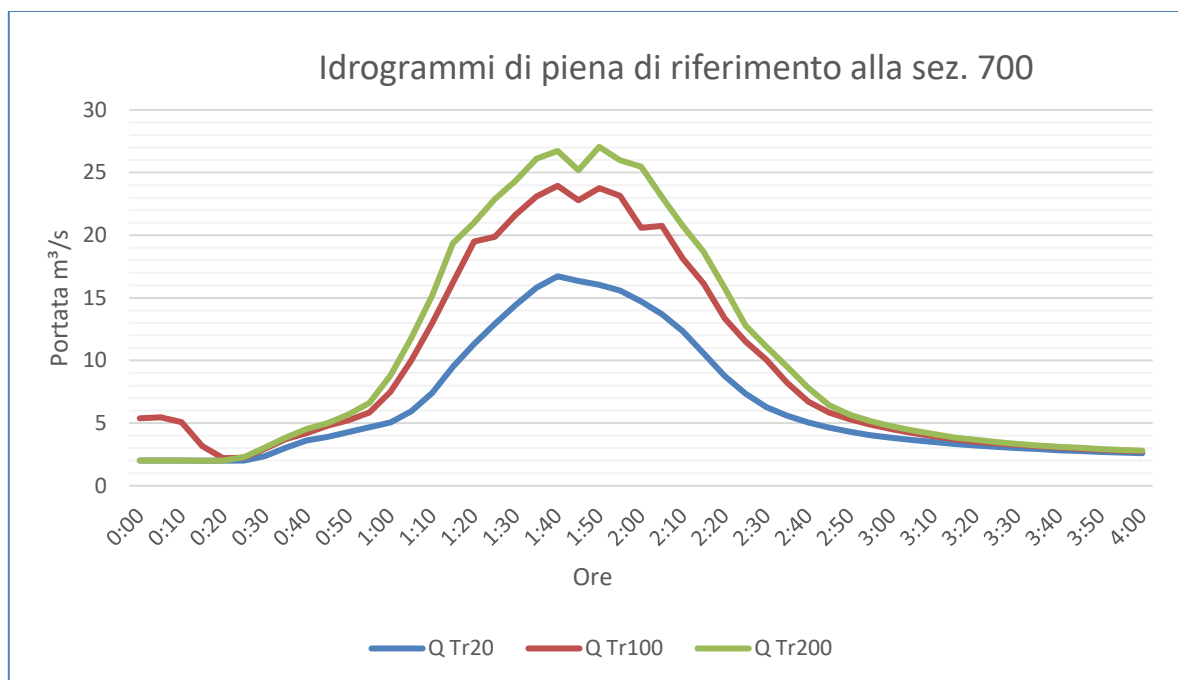


FIGURA 23 - IDROGRAMMI DI PIENA DI RIFERIMENTO ALLA SEZIONE 700 IN COMUNE DI TORRE DÈ ROVERI A MONTE DELLA NUOVA COSTRUZIONE DELL'ARGINE

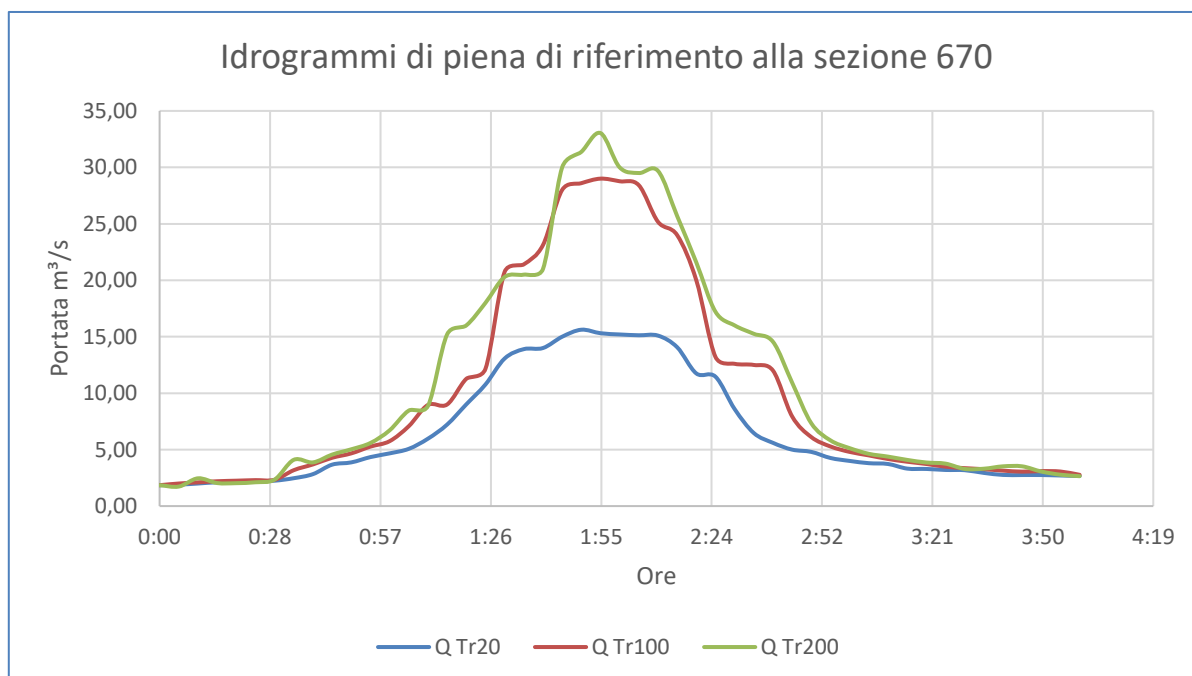


FIGURA 24 - IDROGRAMMI DI PIENA DI RIFERIMENTO ALLA SEZIONE 670 IN COMUNE DI TORRE DÈ ROVERI, A VALLE DEL NUOVO ARGINE

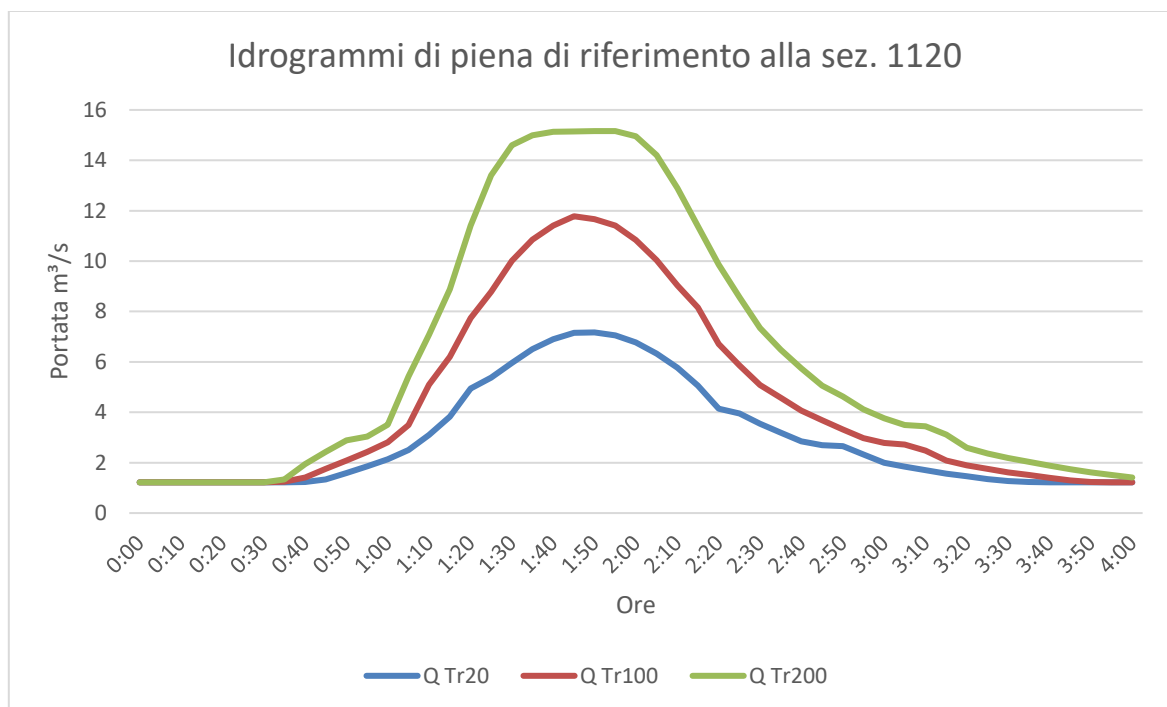


FIGURA 25 - IDROGRAMMI DI PIENA DI RIFERIMENTO ALLA SEZIONE 1120 LUNGO IL T. VALLE D'ALBANO, IN COMUNE DI ALBANO S. ALESSANDRO

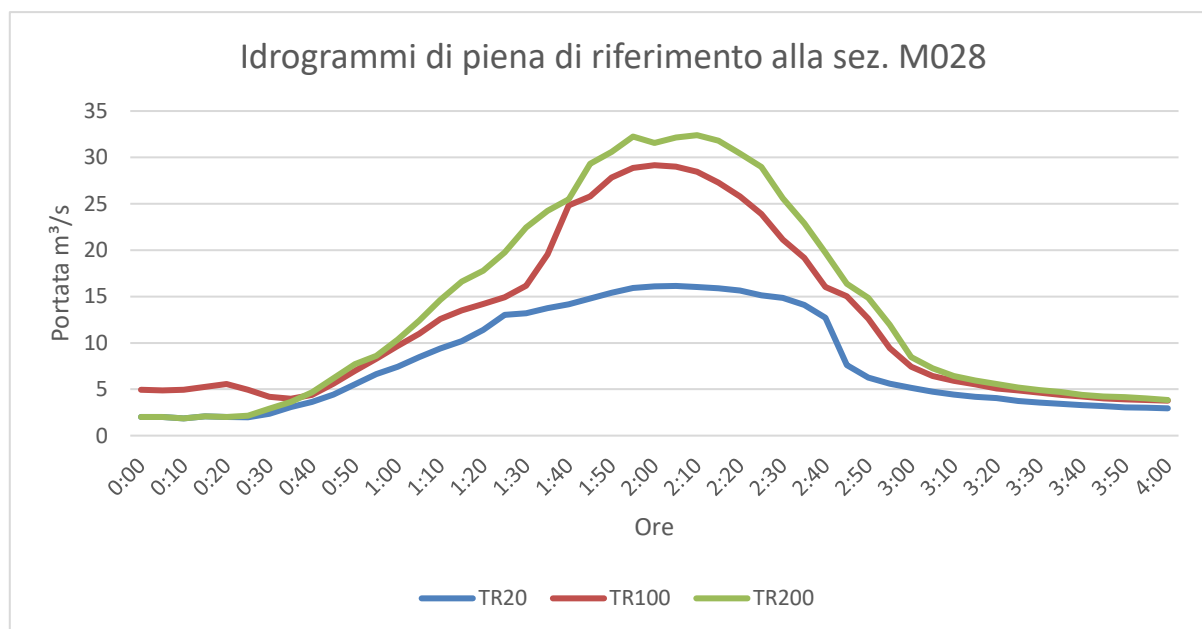


FIGURA 26 - IDROGRAMMI DI PIENA DI RIFERIMENTO ALLA SEZIONE M028, LUNGO IL T. ZERRA A MONTE DELLA CONFLUENZA DEL T. VALLE ALBANO

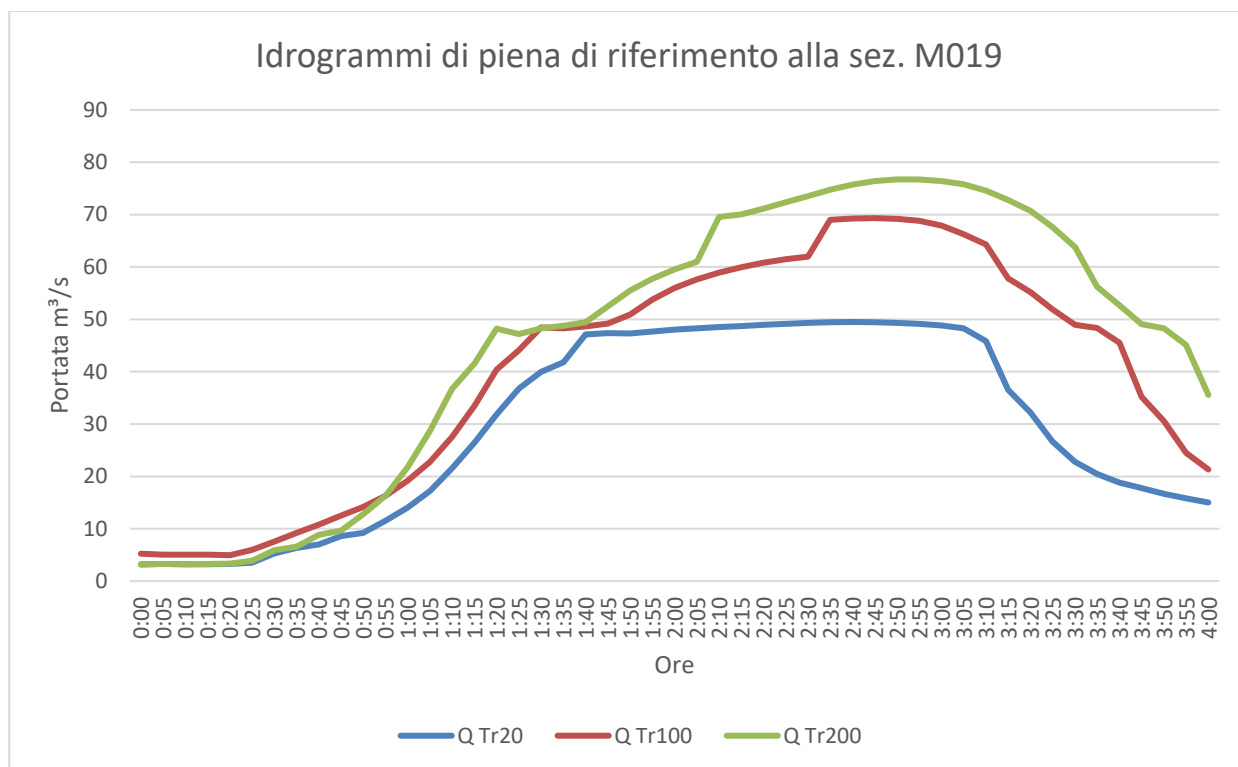


FIGURA 27 - IDROGRAMMI DI PIENA DI RIFERIMENTO ALLA SEZIONE M019 DEL T. ZERRA A MONTE DELL'ATTRAVERSAMENTO FERROVIARIO IN COMUNE DI S. PAOLO D'ARGON

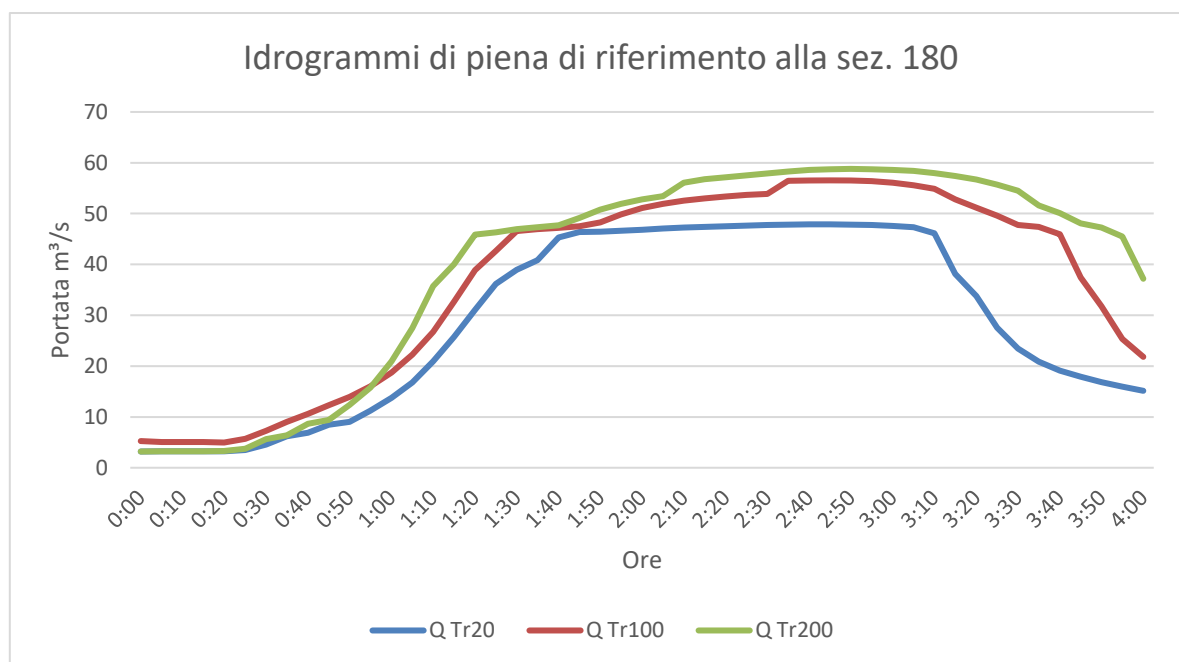


FIGURA 28 - IDROGRAMMI DI PIENA DI RIFERIMENTO ALLA SEZIONE 180 DEL T. ZERRA IN COMUNE DI MONTELLO

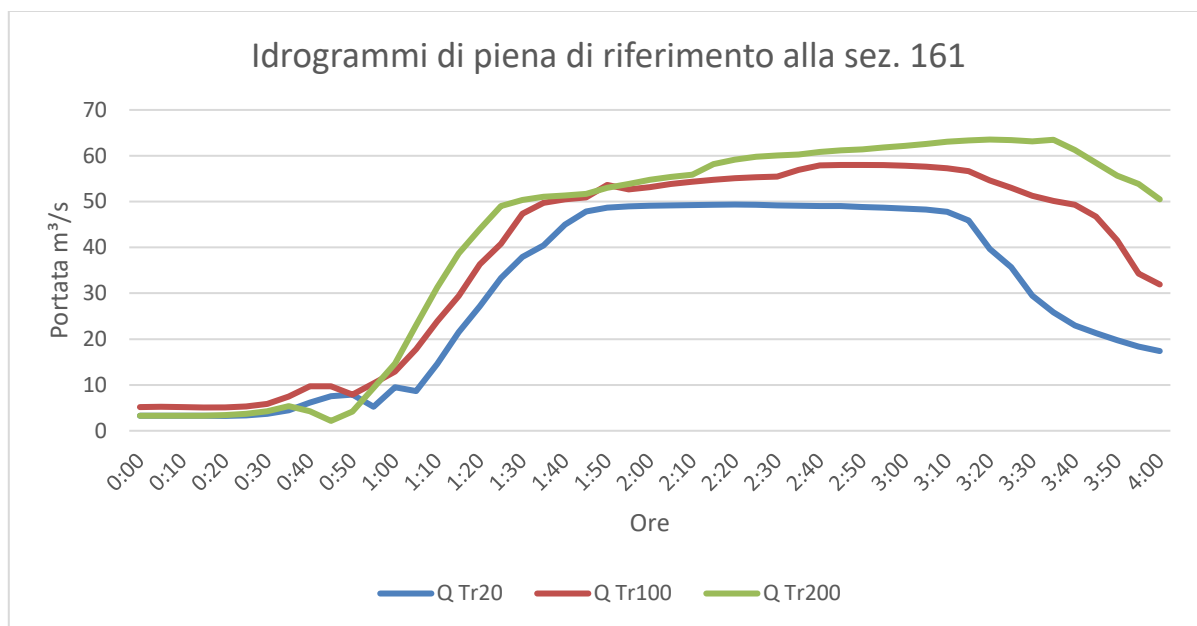


FIGURA 29 - IDROGRAMMI DI PIENA DI RIFERIMENTO ALLA SEZIONE 161 DEL T. ZERRA A MONTE DELLA CONFLUENZA DEL T. SENIGA IN COMUNE DI MONTELLO

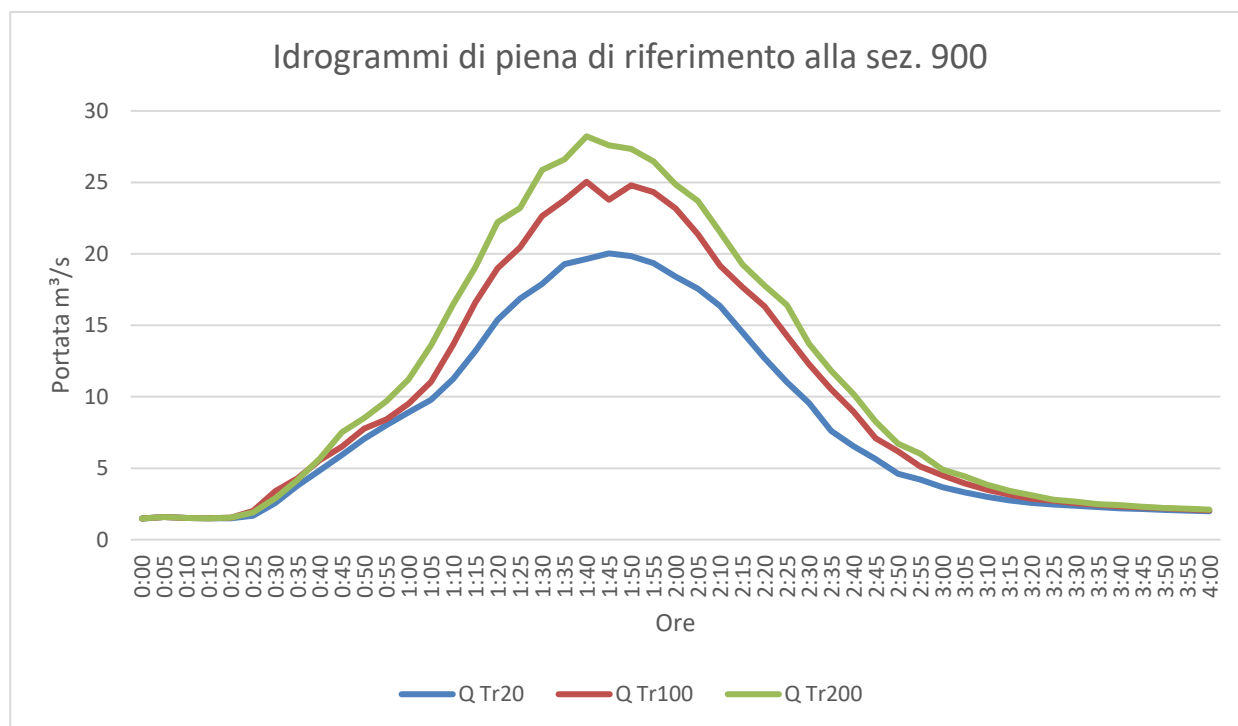


FIGURA 30 - IDROGRAMMI DI PIENA DI RIFERIMENTO ALLA SEZIONE 900 DEL T. SENIGA, COMUNE DI SAN PAOLO D'ARGON

7 AGGIORNAMENTO E INTEGRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITA' IDRAULICA

7.1 AGGIORNAMENTO DELLE FASCE DI PERICOLOSITA' DEL PGRA

Ai fini dell'aggiornamento delle fasce di pericolosità secondo quanto prescritto dal PGRA (*Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni*) si sono ridefinite le aree allagabili in funzione del tempo di ritorno considerato nell'area oggetto di studio. Più precisamente, sono stati verificati e aggiornati gli scenari di pericolosità ricadenti all'interno dei Comuni in esame secondo gli stessi criteri utilizzati per la delimitazione delle aree a diversa pericolosità utilizzati nel citato studio del 2017 avente come oggetto le analisi di tipo idrologico e idraulico dei torrenti Zerra e Seniga.

Si sono dunque tenuti in considerazione i nuovi elementi ottenuti grazie all'approfondimento topografico, idrografico e funzionale precedentemente illustrati e secondo i risultati delle analisi modellistiche aggiornate.

Le perimetrazioni aggiornate sono riportate nell'elaborato *C - Proposta di aggiornamento delle aree a diversa pericolosità idraulica*.

La figura seguente riporta il confronto tra le aree di pericolosità idraulica aggiornate mediante lo studio attuale rispetto a quelle determinate mediante lo studio pregresso. Le variazioni tra i due scenari discendono dall'approfondimento delle dinamiche idrauliche di piena dei corsi d'acqua sullo scenario morfologico e funzionale aggiornato mediante ulteriori informazioni di maggior dettaglio inerenti, come descritto, a opere di mitigazione del rischio idraulico recentemente realizzate, nonché ad approfondimenti topografici e funzionali sulla base di dati e informazioni fornite dai Comuni interessati.

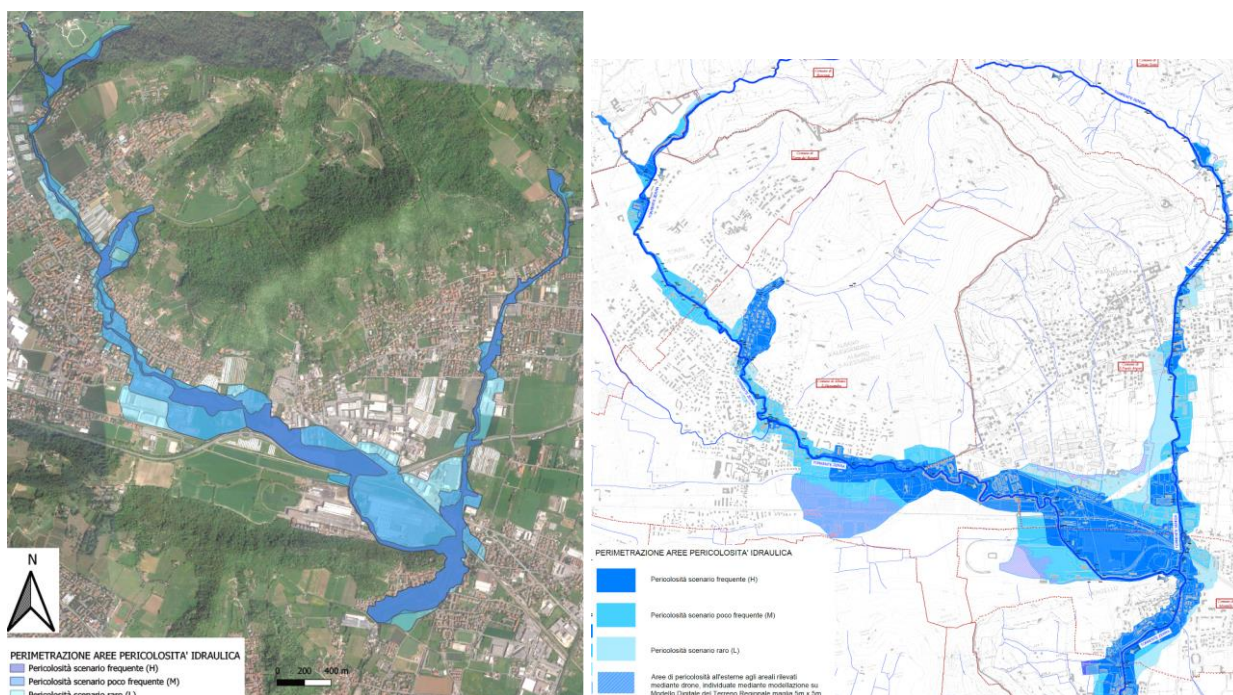


FIGURA 31 - CONFRONTO TRA LA PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ DEL PRESENTE AGGIORNAMENTO PER I COMUNI IN ESAME (A SINISTRA) RISPETTO ALLO SCENARIO DEFINITO MEDIANTE IL PRECEDENTE STUDIO DEL 2017 (A DESTRA)

7.2 DETERMINAZIONE DELLE FASCE DI PERICOLOSITÀ IDRAULICA AI SENSI DELLA DGR N. 2616/2011

Sulla base dei risultati ottenuti, sono state perimetrare anche le aree di pericolosità secondo i criteri definiti dall'allegato 4 del Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia del Gennaio 2012, avente come oggetto "Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da esondazione".

Nella determinazione delle fasce di pericolosità idraulica si è fatto riferimento ai risultati ottenuti dalle modellazioni idrologico-idrauliche condotte per un tempo di ritorno $T_r=100$ anni. All'interno delle aree esondabili individuate per un tempo di ritorno centennale, sono state delimitate zone a diverso livello di pericolosità idraulica sulla base dei tiranti idrici e delle velocità di scorrimento.

Per la classificazione dei diversi livelli di pericolosità idraulica si faccia riferimento al grafico seguente:

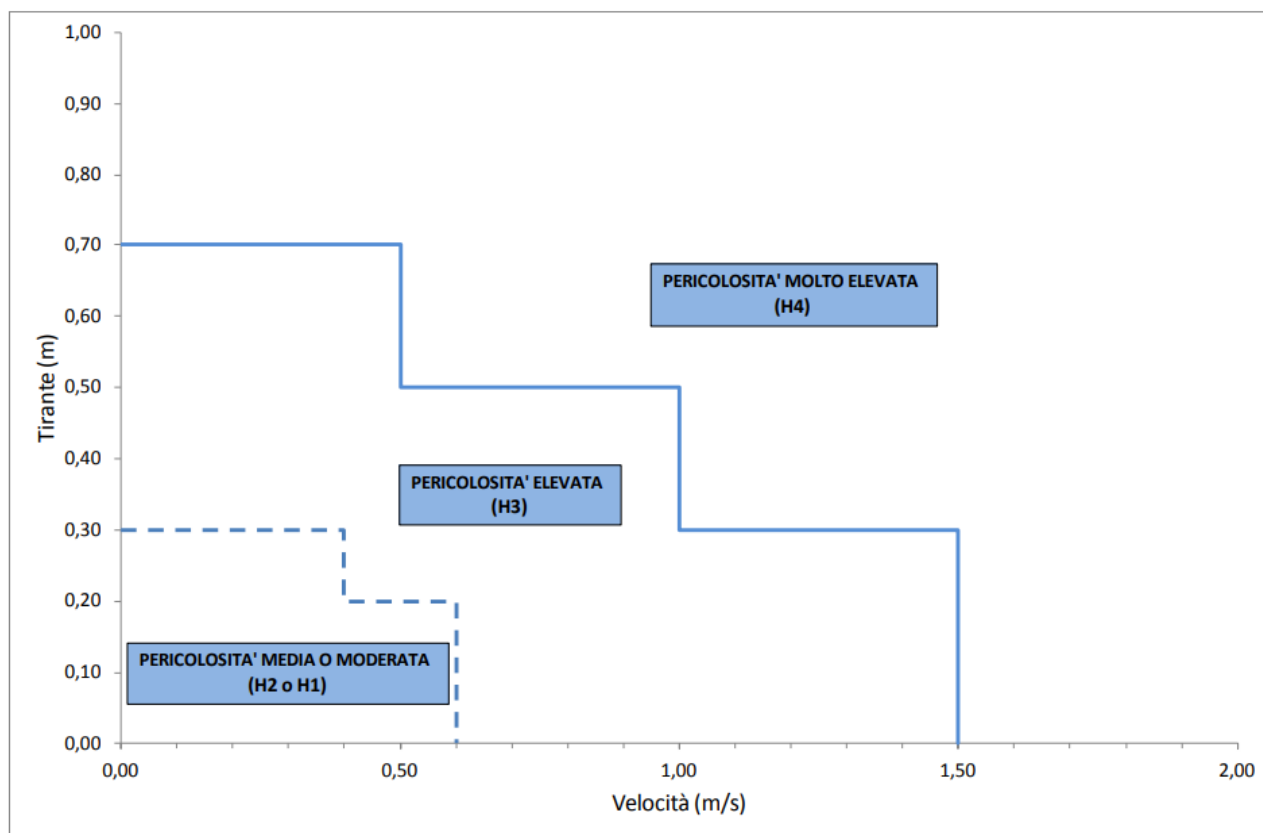


FIGURA 32: ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ

Come riportato nella figura precedente si individuano quattro diverse zone di pericolosità in funzione dei tiranti e delle velocità, ovvero:

- H1: pericolosità moderata;
- H2: pericolosità media;
- H3: pericolosità elevata;
- H4: pericolosità molto elevata.

I dati relativi ai tiranti e velocità che si instaurano a causa dei fenomeni esondativi dei corsi d'acqua studiati per un tempo di ritorno pari a 100 anni, sono stati ripresi dalle modellazioni idrauliche aggiornate.

L'estensione della perimetrazione delle aree a diversa pericolosità nello scenario attuale è stata estesa lungo l'asta del t. Zerra sino al confine dei Comuni in esame.

8 SCENARIO DI PERICOLOSITÀ POST-INTERVENTO 1A: AREA DI LAMINAZIONE SUL T. ZERRA

Nell'ambito del sopra citato studio del 2017 è stata proposta una serie di interventi di mitigazione del rischio idraulico, suddivisi in tre lotti, a loro volta articolati in sotto lotti.

Prendendo in considerazione l'intervento ritenuto prioritario, si è proceduto ad analizzare lo scenario di pericolosità che si otterrebbe a seguito della realizzazione delle opere di laminazione denominate 'intervento 1A', costituite da una cassa di espansione in derivazione, e relativi manufatti di regolazione, lungo il t. Zerra in Comune di Albano S. Alessandro.

Si ricorda come tale opera costituisca l'intervento principale di tre aree di laminazione in serie, oltre a interventi di ripristino ambiente fluviale, sul T. Zerra in comune di Albano Sant'Alessandro e San Paolo d'Argon, finalizzati a ridurre le portate al colmo transitanti a valle e ad alleggerire lo scenario idraulico alla confluenza con il T. Seniga. Il lotto 1 si suddivide, infatti, nei tre sotto lotti: lotto 1A, lotto 1B e lotto 1C.

L'intervento 1A, che è stato individuato come prioritario all'interno del lotto, prevede la realizzazione di una cassa di espansione in derivazione in sponda destra del T. Zerra, ubicata in un'area di pertinenza fluviale e nel Comune di Albano S. Alessandro. L'area risulta delimitata fisicamente dall'alveo del torrente e dal rilevato della tangenziale (Figura 33).



FIGURA 33: COLLOCAZIONE ENTRO IL TERRITORIO DEL COMUNE DI ALBANO S. ALESSANDRO DELL'INVASO DI LAMINAZIONE PREVISTO NEL LOTTO 1A.

L'invaso previsto adotta una configurazione in derivazione rispetto al corso d'acqua; l'invaso è pertanto provvisto di un opportuno manufatto di imbocco, di modulazione delle portate e di restituzione.

L'area destinata all'invaso risulta interclusa da arginature non tracimabili; per le arginature esterne, il coronamento è a quota di tale da presentare almeno 1m di franco di sicurezza rispetto al livello di massimo vaso della cassa. Nel tratto di monte le arginature lato fiume risultano leggermente più alte di quelle esterne per contenere i livelli in alveo, mentre nel tratto di valle sono state abbassate, presentando un sufficiente franco di sicurezza rispetto ai livelli in alveo, notevolmente più bassi. Complessivamente le arginature esterne della cassa si attestano alla quota di 234.7 m s.l.m., mentre quelle lato fiume variano tra 234.2 m s.l.m e 235.5m s.l.m.

Al fine di massimizzare i volumi di vaso è stata prevista la riprofilatura del piano campagna; il criterio seguito è stato quello di mantenere una quota minima della cassa almeno superiore di mezzo metro al fondo dell'alveo nella sezione di restituzione. È previsto di assegnare al fondo della vasca una pendenza dello 0.2% per favorire il ruscellamento delle acque per tiranti esigui nella cassa.

TABELLA 3: CARATTERISTICHE DELL'INVASO PREVISTO ENTRO IL LOTTO 1A.

Area complessiva (mq)	33'300
Area al netto degli argini (mq)	23'350
Volume di vaso (mc)	91'600
Quota di massimo vaso (m s.l.m)	233.70
Quota di coronamento delle arginature esterne (m s.l.m)	234.70
Quota di coronamento delle arginature lato fiume (m s.l.m)	234.20-235.50
Quote di fondo cassa di progetto (m s.l.m)	229.90-230.60
Quote di P.C. allo stato di fatto (m s.l.m)	232.00-233.50
Volume di scavo stimato (m ³)	57'000

Il manufatto di imbocco consiste in una soglia sfiorante ottenuta mediante un abbassamento locale, con opportuno rivestimento e raccordo al fondo, delle arginature lato fiume della cassa, fino ad una quota leggermente inferiore rispetto a quella di massimo vaso della cassa.

Un manufatto di modulazione (briglia di modesta altezza con un'opportuna luce di fondo che consenta lo smaltimento non rigurgitato della portata di magra del torrente) è posto appena più a valle dell'imbocco della cassa di laminazione crea un rigurgito controllato al passaggio della portata di progetto, che innalza localmente i tiranti favorendo il riempimento dell'invaso. È stato verificato preliminarmente, mediante

modellazione idrodinamica monodimensionale, che il rigurgito dovuto al modulatore non aggrava ulteriormente lo scenario di criticità idraulica in cui verte il manufatto scatolare collocato immediatamente a monte dell'intervento. Infine, il manufatto di restituzione della portata in alveo è costituito da uno scarico di fondo ed un troppo pieno di emergenza, con quota di attivazione pari alla quota di massimo invaso.

Il manufatto di imbocco è stato dimensionato al fine di ottenere il completo riempimento dell'invaso per l'evento di $Tr=100$ anni. Eventuali modifiche e ottimizzazioni al dimensionamento in fase progettuale dell'opera potrebbero comportare modifiche alla conseguente perimetrazione delle aree di pericolosità idraulica nello scenario post-intervento.

8.1 MODELLAZIONE IDRODINAMICA DELL'AREA DI LAMINAZIONE

La valutazione della capacità di laminazione degli invasi è stata effettuata con l'ausilio della modellazione idrodinamica monodimensionale mediante il software HEC-RAS, di cui si riportano i risultati nel seguito. Oltre all'evento di progetto ($Tr=100$ anni) per il quale è stato dimensionato il manufatto di imbocco, è stato valutato il comportamento della cassa di espansione e la sua efficacia laminativa anche per gli eventi di $Tr=20$ anni e $Tr=200$ anni.

Evento di progetto di $Tr=100$ anni

Si riportano i risultati ottenuti dalla modellazione idrodinamica del funzionamento della cassa d'espansione in analisi al verificarsi dell'evento di progetto ($Tr=100$), per il quale il volume di invaso disponibile risulta interamente sfruttato.

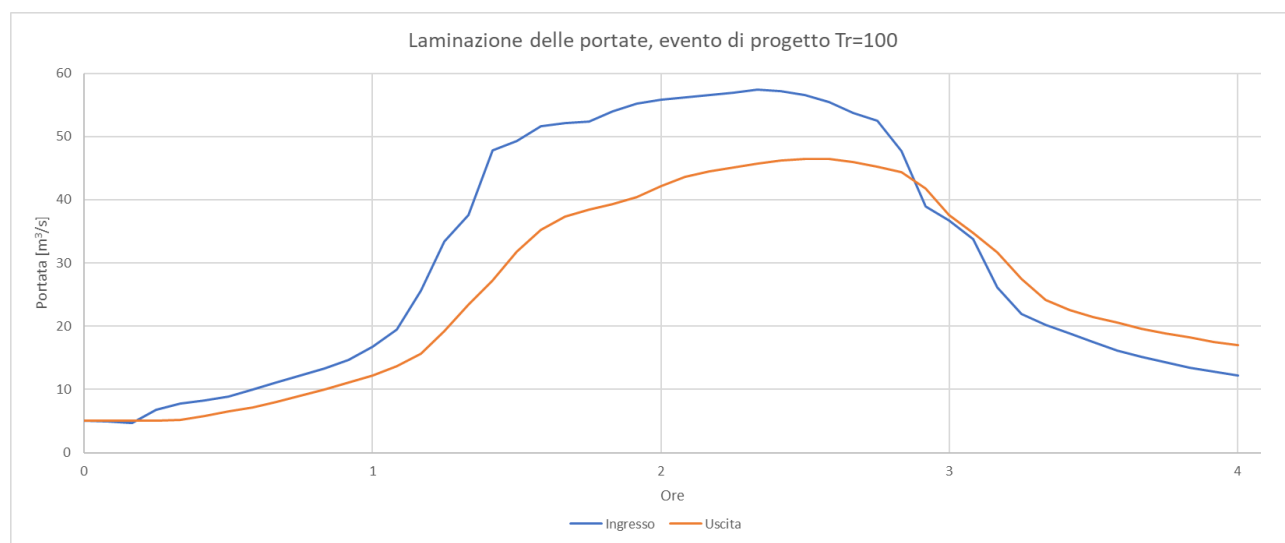


FIGURA 34: LAMINAZIONE DELL'EVENTO $Tr=100$ ANNI (EVENTO DI PROGETTO) APPORTATA DALL'AREA DI LAMINAZIONE PREVISTA NEL LOTTO 1A

Come si vede dalla figura precedente, il picco dell'idrogramma in ingresso all'area di invaso si attesta sui $57.4 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre il colmo di quello laminato in uscita dalla cassa è pari a $46.5 \text{ m}^3/\text{s}$. L'effetto della cassa di espansione è quindi di abbattere il colmo della piena centenaria di circa $10.9 \text{ m}^3/\text{s}$. In particolare, l'invaso porta il colmo della piena di $T_r=100$ anni ad un valore paragonabile a quello di una piena cinquantennale (il colmo dell'evento di $T_r=50$ anni è $Q=46.1 \text{ m}^3/\text{s}$).

Evento di $T_r=20$ anni

Si è verificato successivamente il funzionamento della cassa d'espansione dimensionata per l'evento centennale in corrispondenza della piena avente $T_r=20$ anni. In tale condizione il volume occupato risulta essere circa il 70% del volume complessivo.

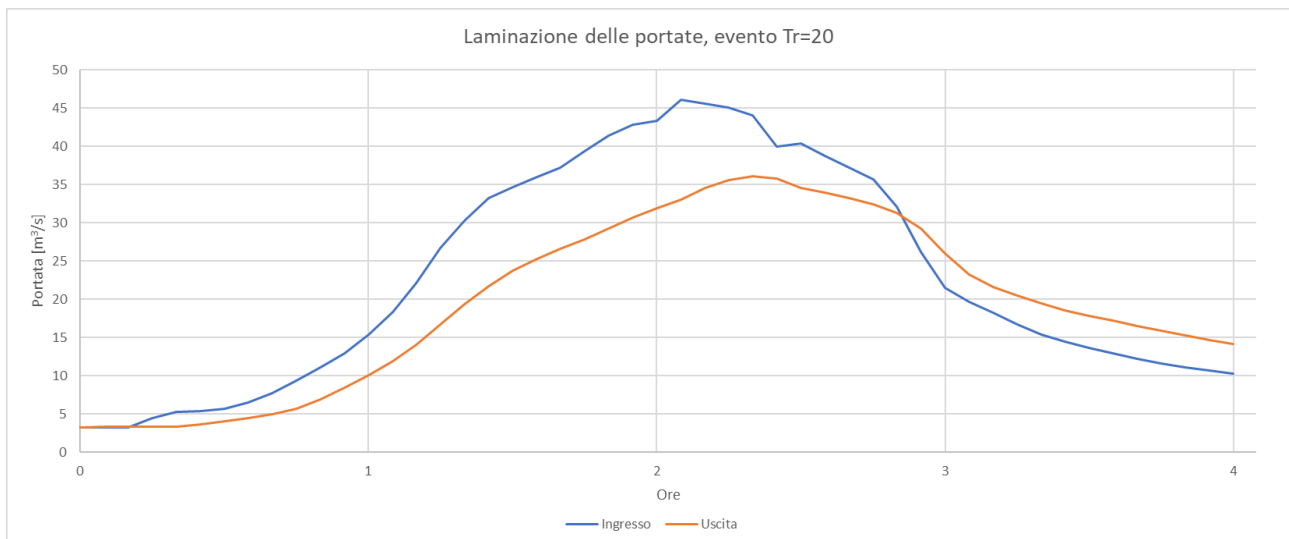


FIGURA 35: LAMINAZIONE DELL'EVENTO $T_r=20$ ANNI APPORTATA DALL'AREA DI LAMINAZIONE PREVISTA NEL LOTTO 1A, DIMENSIONATA PER L'EVENTO DI $T_r=100$ ANNI

Dalla figura precedente si vede che il valore massimo dell'idrogramma in ingresso all'area di invaso si attesta sui $46.1 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre quello dell'idrogramma in uscita è pari a $36.1 \text{ m}^3/\text{s}$. La cassa di espansione permette dunque di abbattere il colmo della piena ventennale di circa $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Evento di $T_r=200$ anni

Si è verificato infine il comportamento della cassa di espansione per l'evento di piena di $T_r=200$ anni, superiore al tempo di ritorno per cui l'invaso è stato dimensionato. In questa situazione l'opera in progetto

consente di abbattere il colmo della piena duecentennale di circa $13 \text{ m}^3/\text{s}$, con un volume eccedente rispetto al massimo volume invasabile che si attesta intorno al 9%.

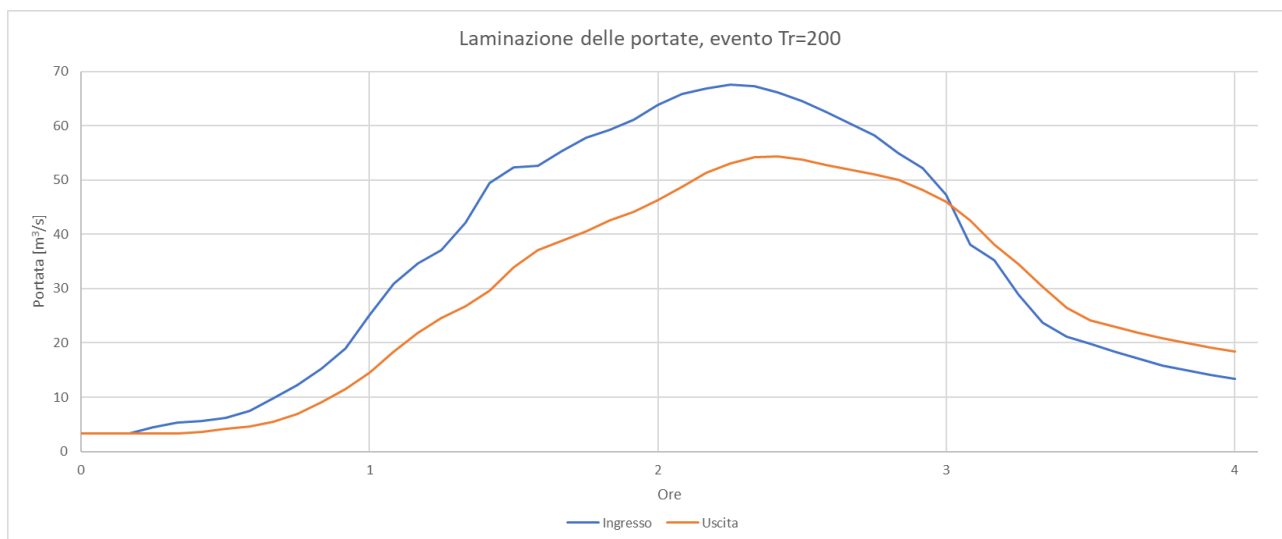


FIGURA 36: : LAMINAZIONE DELL'EVENTO $Tr=200$ ANNI APPORTATA DALL'AREA DI LAMINAZIONE PREVISTA NEL LOTTO 1A, DIMENSIONATA PER L'EVENTO DI $Tr=100$ ANNI

La figura precedente mostra che il colmo dell'idrogramma in ingresso all'invaso si attesta sui $67.6 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre il colmo di quello laminato, in uscita dalla cassa, è pari a $54.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Di seguito si riporta un prospetto riepilogativo delle simulazioni svolte, con indicazione della portata in ingresso all'invaso, della portata laminata e della percentuale del volume di invaso occupato dalla piena.

TABELLA 4: RIEPILOGO DEI RISULTATI IN TERMINI DI LAMINAZIONE DELLA CASSA D'ESPANSIONE DI PROGETTO PER LE VARIE CONFIGURAZIONI ED I TEMPI DI RITORNO INVESTIGATI.

Tr	Q ingresso (m^3/s)	Q uscita (m^3/s)	Vol. invaso occupato (% al netto del franco di sicurezza)
100	57.4	45.4	97
20	46.1	36.1	69
200	67.6	54.3	109

8.2 PERICOLOSITÀ IDRAULICA POST-INTERVENTO: IPOTESI DI REALIZZAZIONE INTERVENTO 1A

Noti gli idrogrammi in uscita dalla cassa di espansione, dimensionata per l'evento di piena di $T_r=100$ anni, si è successivamente proceduto all'aggiornamento della modellazione idrodinamica a livello di bacino al fine di valutare gli effetti dell'invaso di laminazione a valle dello stesso.

La modellazione realizzata riprende quella precedente descritta al Capitolo 6, considerando l'effetto di laminazione della cassa di espansione e, quindi, l'effetto di riduzione delle portate di piena lungo il t. Zerra a valle della stessa.

I risultati di tale analisi (cfr. [Elaborato B](#)) sono stati utilizzati come base di partenza per la determinazione dello scenario di pericolosità post-intervento (cfr. [Elaborato C](#)) che si avrebbe nell'ipotesi di realizzazione dell'intervento 1A in progetto.

Le perimetrazioni delle aree di pericolosità idraulica ai sensi del PGRA nello stato di progetto ([Elaborato C](#)) sono state riportate solamente per i comuni oggetto del presente aggiornamento; dai risultati delle analisi numeriche risulta, comunque, prevedibile un marcato miglioramento delle condizioni di pericolosità e rischio idraulico anche per il Comune di Costa di Mezzate, immediatamente a valle delle aree rappresentate negli elaborati grafici allegati.

La Figura 37 che segue riporta le aree di pericolosità idraulica ai sensi del PGRA sullo scenario attuale, aggiornate mediante l'attuale studio, a confronto con le aree di pericolosità post-intervento definite secondo gli stessi criteri, come sopra descritto, nell'ipotesi di realizzazione dell'intervento 1A.

Dal confronto tra le due perimetrazioni emerge una buona riduzione dell'estensione delle aree di pericolosità, sia a monte della confluenza tra il torrente Zerra e il torrente Seniga, sia nel territorio comunale di Montello.

Tale riduzione si rende più evidente andando a confrontare la pericolosità ai sensi della DGR 2616/2011, che considera la combinazione tra tiranti idrometrici e velocità della corrente per l'evento con $TR100$ anni, come illustrato nell'Elaborato C e in Figura 38.

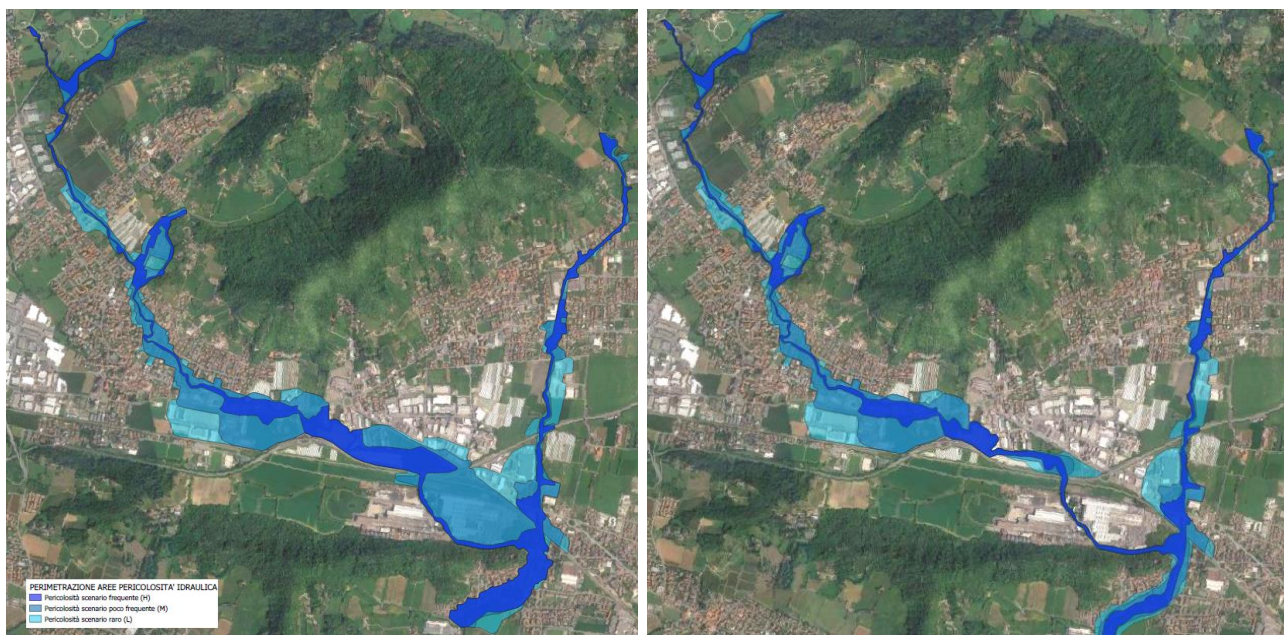


FIGURA 37: PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ AI SENSI DEL PGRA NELLO STATO DI FATTO (A SINISTRA) E SCENARIO ALLO STATO DI PROGETTO, NELL'IPOTESI DI REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO 1A (A DESTRA)

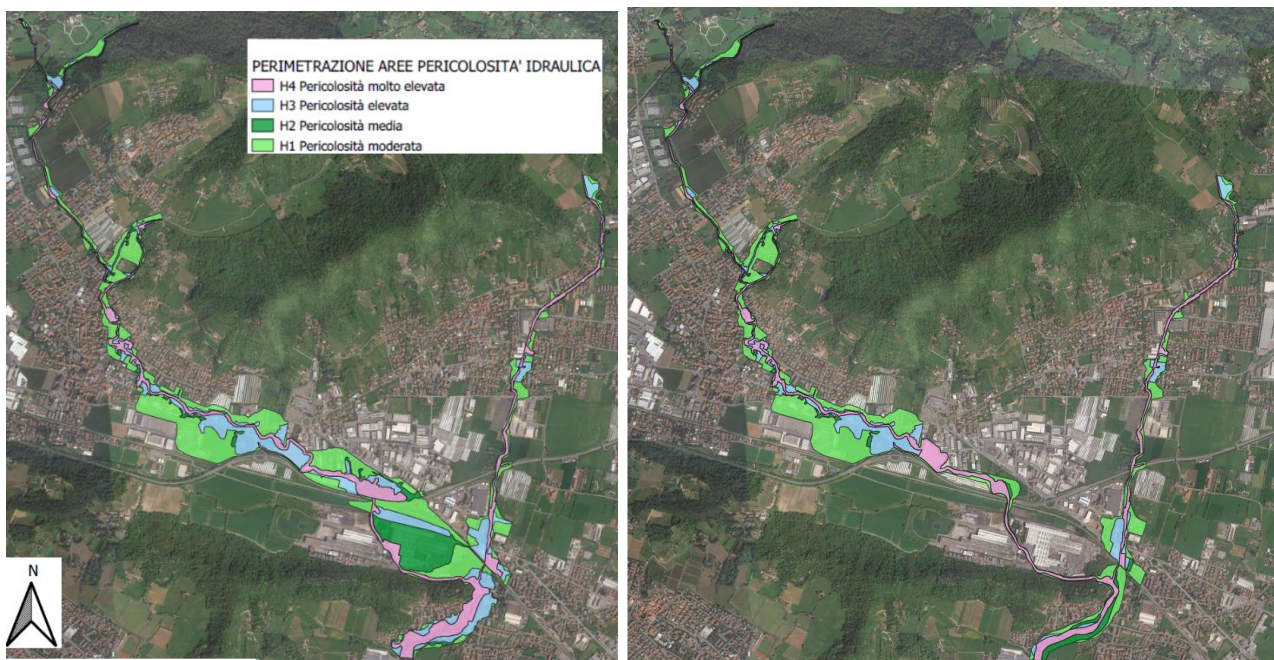


FIGURA 38: PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ AI SENSI DELLA DGR 2616/2011 NELLO STATO DI FATTO (A SINISTRA) E SCENARIO ALLO STATO DI PROGETTO, NELL'IPOTESI DI REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO 1A (A DESTRA)

9 SCENARIO DI PERICOLOSITÀ POST-INTERVENTO 1A + 2A + 3A

Nello studio del 2017 è stata proposta una serie di interventi di mitigazione del rischio, suddivisi in lotto 1, lotto 2 e lotto 3, a loro volta articolati in sotto lotti, sulla base di un criterio gerarchico di priorità dell'opera.

Nell'ambito del presente studio e su richiesta dei Comuni coinvolti, si è proceduto ad analizzare lo scenario di pericolosità che si otterrebbe a seguito dalla realizzazione delle opere di laminazione ritenute prioritarie per ciascun lotto e indicate nello studio del 2017 come 'intervento 1A', 'intervento 2A' e 'intervento 3A'.

Nel seguito si riporta una breve descrizione delle opere previste per i lotti 1, 2 e 3 e, in particolare, di quelle inserite all'interno del gruppo di interventi A.

All'interno del **lotto 1** l'intervento 1A, come già descritto al precedente Capitolo 8, prevede la realizzazione di una cassa di espansione in derivazione in sponda destra del T. Zerra, ubicata in un'area di pertinenza fluviale e nel Comune di Albano S. Alessandro.

Il **lotto 2** comprende interventi prevalentemente di laminazione sul T. Seniga avente il fine di ridurre le portate al colmo transitanti alla confluenza con il t. Zerra e a mitigare le criticità idrauliche in cui verte via dei Benedettini a S. Paolo d'Argon. In particolare, l'intervento 2A prevede la realizzazione di una cassa di espansione in derivazione, senza riprofilatura del piano campagna, sul t. Seniga, a monte dell'immissione del BG06904, in Comune di Cenate Sotto. L'opera prevista risulta ubicata in un'area di pertinenza già fluviale, in sponda sinistra del t. Seniga (Figura 39).



FIGURA 39: COLLOCAZIONE DELLA CASSA D'ESPANSIONE IN DERIVAZIONE SUL T. SENIGA IN COMUNE DI CENATE SOTTO.

L'invaso previsto adotta una configurazione in derivazione rispetto al corso d'acqua, pertanto è provvisto di un opportuno manufatto di imbocco, di modulazione delle portate e di restituzione.

L'area destinata all'invaso risulta interclusa da arginature non tracimabili, con il coronamento a quota tale da presentare almeno 1m di franco di sicurezza rispetto al livello di massimo vaso della cassa. Le arginature lato fiume sono state estese a monte della cassa al fine di contenere il rigurgito creato dalla presenza del modulatore di portata. Il manufatto di imbocco consiste in una soglia sfiorante ottenuta mediante un abbassamento locale delle arginature lato fiume della cassa, fino ad una quota pari, o leggermente inferiore, a quella di massimo vaso della cassa. Infine, il manufatto di restituzione della portata in alveo è invece composto da uno scarico di fondo ed un troppo pieno di emergenza, con quota di attivazione pari alla quota di massimo vaso.

Non è prevista la riprofilatura del piano campagna. Tale accorgimento potrà essere introdotto nelle successive fasi progettuali al fine di incrementare ulteriormente l'efficacia dell'intervento di laminazione, solo a seguito di un'opportuna caratterizzazione delle terre presenti in situ.

Nella tabella successiva sono riassunte le principali caratteristiche dell'intervento analizzato.

TABELLA 5: CARATTERISTICHE DELL'INVASO PREVISTO ENTRO IL LOTTO 2A.

Area complessiva (mq)	11'000
Area al netto degli argini (mq)	6'400
Volume di vaso (mc)	16'500
Quota di massimo vaso (m s.l.m)	253.5
Quota di coronamento delle arginature esterne (m s.l.m)	254.5
Quota di coronamento delle arginature lato fiume (m s.l.m)	254.5
Quote di fondo P.C. (m s.l.m) allo stato di fatto e di progetto	250.6-252.3

Nel **lotto 3** sono stati previsti interventi di laminazione e di miglioramento dell'efficienza idraulica del t. Valle d'Albano in Comune di Albano S. Alessandro. L'intervento 3A, ritenuto prioritario, è relativo alla realizzazione di una cassa di espansione in linea in un'area attualmente non edificata, a monte del tratto urbano (Figura 40).

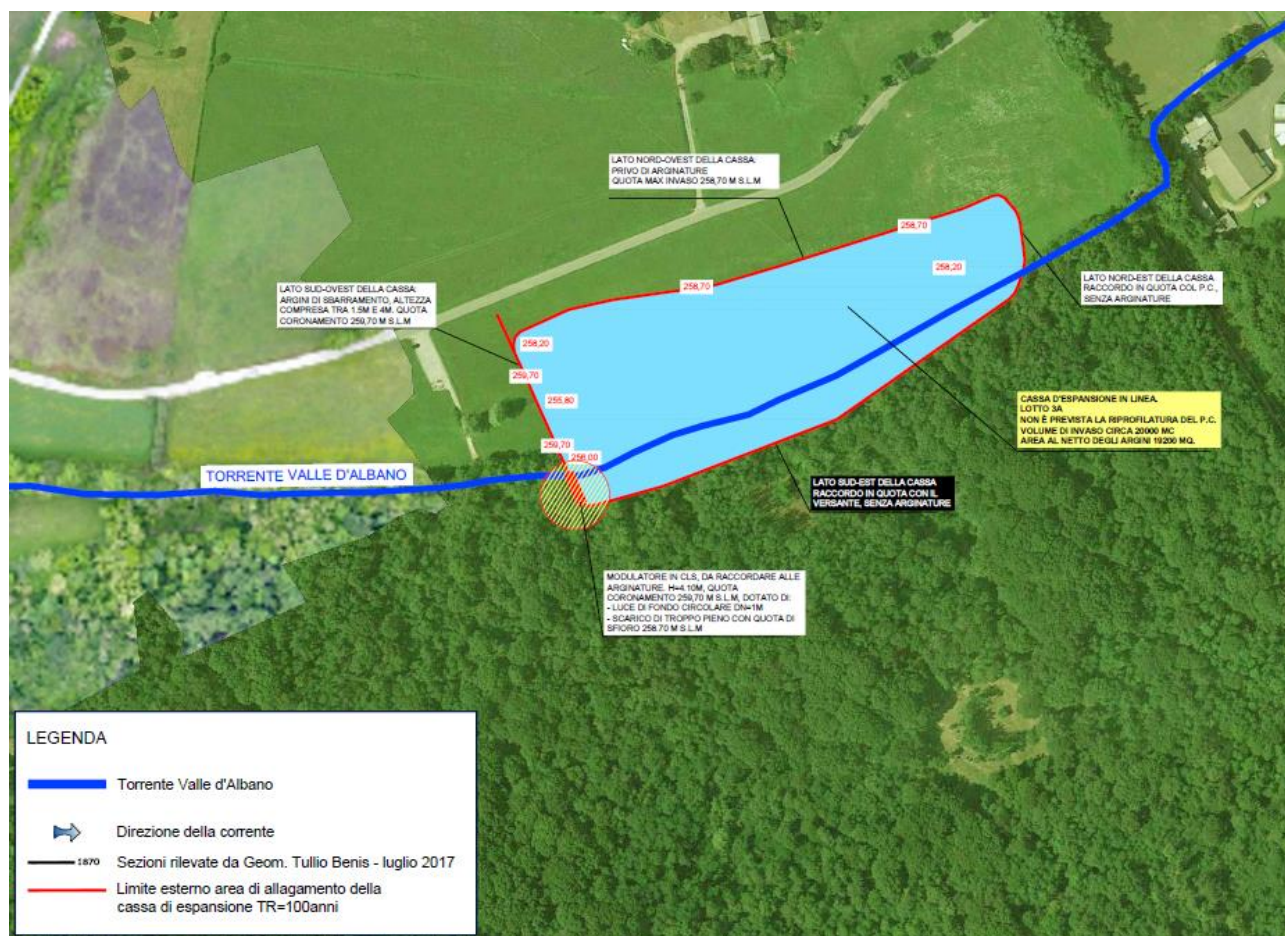


FIGURA 40: COLLOCAZIONE DELLA CASSA D'ESPANSIONE IN LINEA SUL T. VALLE D'ALBANO AD ALBANO S. ALESSANDRO

L'area di invaso si trova prevalentemente in sponda destra, mentre la sponda sinistra è caratterizzata dalla presenza di un versante che sale ripidamente a poca distanza dall'alveo; l'area allo stato attuale risulta destinata a prato.

Si prevede la realizzazione di un invaso in linea senza la riprofilatura del piano campagna, con un manufatto modulatore collocato nella sezione di valle della cassa e raccordato alle arginature; queste ultime hanno quota di coronamento tale da presentare un franco idraulico di 1m rispetto alla quota di massimo invaso della cassa d'espansione.

Visto l'andamento acclive del piano campagna le arginature non risultano necessarie né sulla sponda sinistra e destra né nel lato di monte della cassa; l'assenza di argini sulla sponda sinistra consente la laminazione diretta di eventuali acque di ruscellamento del versante; le arginature risultano invece necessarie nel lato di valle, dove arrivano l'opera di sbarramento e regolazione dei deflussi arriva ad un'altezza massima di

circa 4.0m in corrispondenza dell'alveo del corso d'acqua, per poi raccordarsi in quota con il piano campagna.

La tabella successiva riassume le principali caratteristiche dell'invaso.

TABELLA 6: CARATTERISTICHE DELL'INVASO PREVISTO ENTRO IL LOTTO 3A.

Area complessiva (mq)	19'200
Volume di invaso (mc)	20'000
Quota di massimo invaso (m s.l.m)	258.70
Quota di coronamento delle arginature (m s.l.m)	259.70
Quote di fondo piano campagna (m s.l.m) allo stato di fatto e di progetto	256.00-259.70

In linea con quanto esposto al Capitolo 8 per l'intervento 1A, anche per i lotti 2A e 3A è stata condotta la valutazione della capacità di laminazione degli invasi, con l'ausilio della modellazione idraulica.

Si sono così ottenuti gli idrogrammi di piena in uscita da ciascuna cassa, che sono stati successivamente utilizzati per l'aggiornamento della modellazione idrodinamica a scala di bacino.

9.1 PERICOLOSITÀ IDRAULICA POST-INTERVENTO: IPOTESI DI REALIZZAZIONE INTERVENTI 1A + 2A + 3A

Noti gli idrogrammi in uscita dalle tre casse 1A, 2A e 3A, si è proceduto ad aggiornare la modellazione idrodinamica a livello di bacino, allo scopo di valutare l'effetto complessivo dei tre invasi di laminazione.

I risultati di tale analisi sono stati utilizzati come base di partenza per la determinazione dello scenario di pericolosità post-intervento (cfr. Elaborato C) che si avrebbe nell'ipotesi di realizzazione degli interventi 1A, 2A e 3A.

Le perimetrazioni delle aree di pericolosità idraulica ai sensi del PGRA nello stato di progetto (Elaborato C) sono state riportate solamente per i comuni oggetto del presente aggiornamento; dai risultati delle analisi numeriche risulta anche in questo caso prevedibile un marcato miglioramento delle condizioni di pericolosità e rischio idraulico anche per il Comune di Costa di Mezzate, immediatamente a valle delle aree rappresentate negli elaborati grafici allegati.

La Figura 41 che segue riporta le aree di pericolosità idraulica ai sensi del PGRA per lo scenario post-intervento nell'ipotesi di realizzazione del solo intervento 1A a confronto con la perimetrazione relativa all'ipotesi di realizzazione dei tre interventi 1A, 2A e 3A.

Dal confronto emerge, nello scenario che considera i tre interventi rispetto al solo intervento 1A, un'ulteriore riduzione delle aree di pericolosità a monte della confluenza tra il torrente Zerra e il torrente Seniga. Anche il territorio comunale di Montello, a valle della confluenza, è interessato da un importante sgravio dello scenario di pericolosità idraulica.



FIGURA 41: PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ AI SENSI DEL PGRA NELLO STATO DI PROGETTO CON REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO 1A (A SINISTRA) E SCENARIO ALLO STATO DI PROGETTO CON REALIZZAZIONE DEI TRE INTERVENTI 1A, 2A E 3A (A DESTRA)

Per completezza, in Figura 42 si riportano le aree di pericolosità idraulica ai sensi del PGRA sullo scenario attuale, aggiornate mediante l'attuale studio, a confronto con le aree di pericolosità post-intervento definite secondo gli stessi criteri, come sopra descritto, nell'ipotesi di realizzazione degli interventi 1A, 2A e 3A.

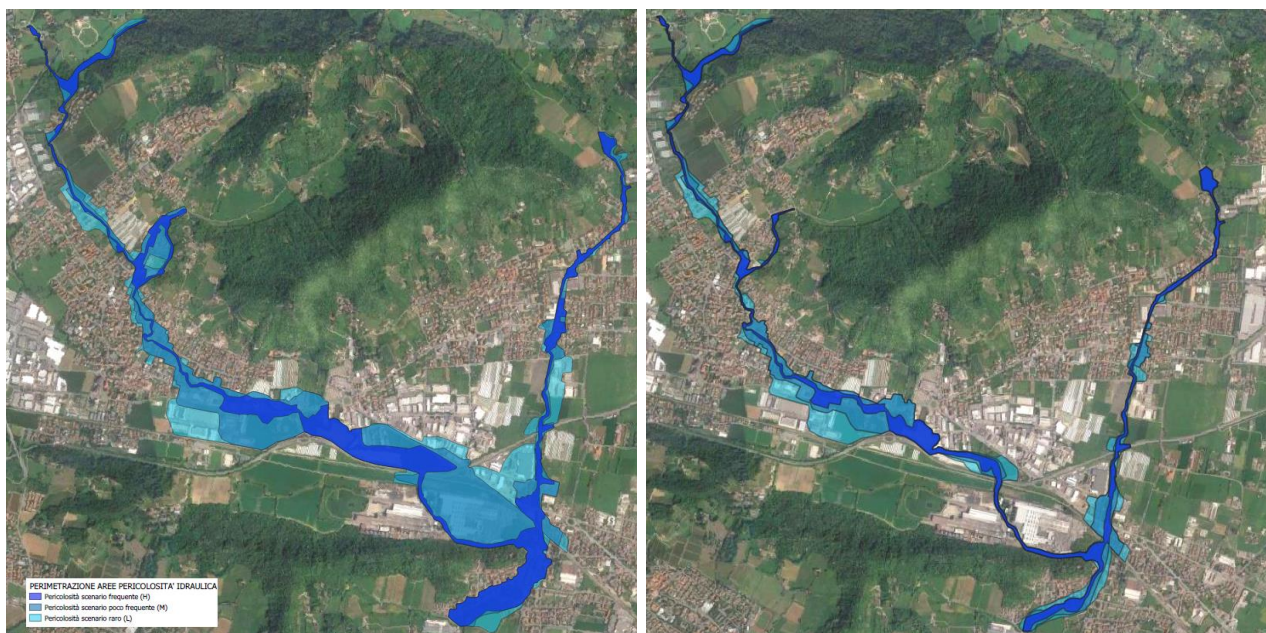


FIGURA 42: PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ AI SENSI DEL PGRA NELLO STATO DI FATTO (A SINISTRA) E SCENARIO ALLO STATO DI PROGETTO, NELL'IPOTESI DI REALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI 1A, 2A E 3A (A DESTRA)

La riduzione delle aree di pericolosità idraulica nello scenario allo stato di progetto, con realizzazione degli interventi 1A, 2A e 3A, si rende più evidente andando a confrontare la pericolosità ai sensi della DGR 2616/2011, che considera la combinazione tra tiranti idrometrici e velocità della corrente per l'evento con TR100 anni, come illustrato nell'Elaborato C e in Figura 43 e Figura 44.



FIGURA 43: PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ AI SENSI DELLA DGR 2616/2011 NELLO STATO DI PROGETTO CON REALIZZAZIONE DELL'INTERVENTO 1A (A SINISTRA) E SCENARIO ALLO STATO DI PROGETTO CON REALIZZAZIONE DEI TRE INTERVENTI 1A, 2A E 3A (A DESTRA)

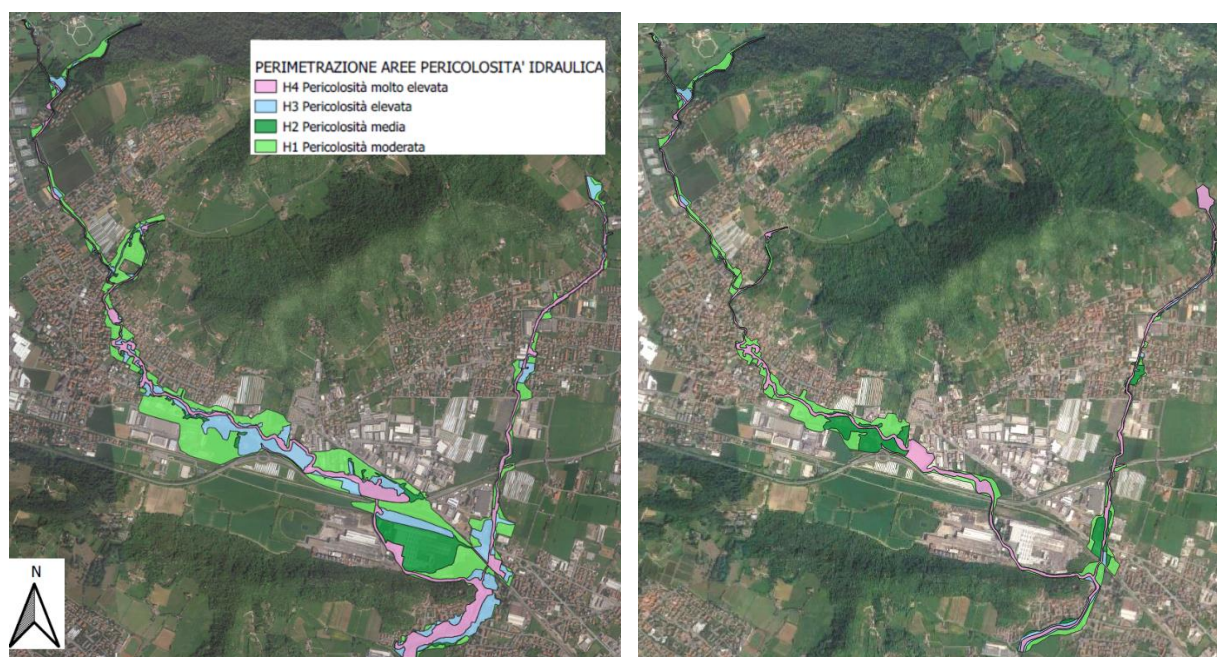


FIGURA 44: PERIMETRAZIONE DELLE AREE DI PERICOLOSITÀ AI SENSI DELLA DGR 2616/2011 NELLO STATO DI FATTO (A SINISTRA) E SCENARIO ALLO STATO DI PROGETTO, NELL'IPOTESI DI REALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI 1A, 2A E 3A (A DESTRA)

10 CONCLUSIONI

La presente fase di aggiornamento dello studio idrologico e idraulico del bacino idrografico in esame ha permesso di aggiornare e meglio definire il quadro conoscitivo complessivo delle caratteristiche idrologiche e idrauliche dell'asta dei Torrenti Zerra e Seniga e dei loro principali affluenti all'interno dei territori comunali interessati, al fine di adeguare la perimetrazione delle aree di pericolosità ai sensi del PGRA e definire la conseguente perimetrazione ai sensi dell'allegato 4 del Bollettino Ufficiale della Regione Lombardia del Gennaio 2012, avente come oggetto "Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità e del rischio da esondazione".

Le analisi idrologiche e idrauliche hanno permesso di calibrare le analisi numeriche mediante modellazione idrodinamica e di aggiornare la quantificazione delle diverse criticità del reticolo in esame, affinando lo scenario di pericolosità attuale.

Tale approfondimento (cfr. Elaborato B) ha, infatti, consentito di aggiornare la perimetrazione delle aree a diversa pericolosità idraulica relative ai torrenti attraverso un'analisi più dettagliata delle dinamiche idrauliche di formazione e spagliamento dei processi di esondazione lungo i corsi d'acqua in esame; queste ultime analisi hanno portato a definire le perimetrazioni riportate nell'Elaborato C.

Le analisi effettuate, quindi, aggiornano e sostituiscono i risultati prodotti dal citato studio del 2017 redatto dallo scrivente.

Ad integrazione delle analisi sullo scenario attuale opportunamente aggiornato, sono state definite anche le nuove perimetrazioni al fine di quantificare, in termini di riduzione della pericolosità, i benefici che deriverebbero dalla realizzazione delle opere di laminazione prioritarie (scenario relativo alla realizzazione del solo intervento 1A lungo il t. Zerra in Comune di Albano S. Alessandro e scenario relativo alla realizzazione degli interventi 1A + 2A + 3A), previste nel citato studio del 2017 e definite a livello di progetto di fattibilità tecnica ed economica.

Le perimetrazioni della pericolosità nello scenario di progetto sono incluse nell'Elaborato C allegato al presente studio ed illustrano gli evidenti benefici apportati dalle opere di mitigazione in esame.