

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO DELLA LINEA GENOVA – VENTIMIGLIA  
TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA

IDROLOGIA E IDRAULICA

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudì

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.


IV01 00 D 09 RI ID0002 008 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	D. Polverelli	Gen. 2022	C. Cesali	Gen. 2022	G. Fadda	Gen. 2022	A. Vittozzi Gen. 2022

ITALFERR S.p.A.  
U.O. Opere Civili - Sezione delle varianti  
Dott. Ing. Paolo Vittozzi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
N° A20783

File: IV0100D09RIID0002008A.doc

n. Elab.:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

## INDICE


1	PREMESSA .....	3
1.1	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	4
2	INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO .....	5
2.1	OBIETTIVI DELLO STUDIO.....	6
2.2	ELENCO ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO.....	6
3	STUDIO IDRAULICO.....	7
3.1	GENERALITÀ .....	7
3.2	DATI DI BASE .....	7
3.2.1	DATI TOPOGRAFICI.....	7
3.2.2	DATI IDROLOGICO-IDRAULICI .....	8
3.3	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO .....	11
3.3.1	APPROCCIO MATEMATICO (2D).....	11
3.3.2	GENERAZIONE DEL MODELLO DIGITALE DEL TERRENO.....	16
3.3.3	DEFINIZIONE DEL DOMINIO E DELLA GRIGLIA DI CALCOLO .....	17
3.3.4	STRUTTURE IDRAULICHE ALL'INTERNO DEL MODELLO 2D .....	22
3.3.5	CONDIZIONI AL CONTORNO .....	24
3.3.6	CALIBRAZIONE.....	25
3.4	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE .....	27

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudì	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A	<b>FOGLIO</b> 3 di 29

## 1 PREMESSA

Il presente studio idraulico è stato redatto nell'ambito del progetto definitivo per gli interventi di raddoppio della linea Genova-Ventimiglia, nella tratta Finale Ligure - Andora.

Lo studio idraulico in oggetto ha lo scopo di definire l'idrodinamica del tratto investigato per i più rilevanti tempi di ritorno di interesse tecnico (50, 200 e 500 anni), ponendo particolare attenzione all'interferenza tra il Rio Barbona e il Rio Caudì e la linea ferroviaria in progetto.

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudì	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

## 1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI

Per quanto riguarda la normativa relativa alla definizione del rischio allagamenti, il riferimento normativo principale è costituito dal Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), introdotto dalla Direttiva europea 2007/60/CE (recepita nel diritto italiano con D.Lgs. 49/2010 per ogni distretto idrografico). Lo scopo del PGRA è quello di orientare, nel modo più efficace, l'azione sulle aree a rischio significativo organizzate e gerarchizzate rispetto all'insieme di tutte le aree a rischio, definire gli obiettivi di sicurezza e le priorità di intervento a scala distrettuale, in modo concertato fra tutte le amministrazioni e gli enti gestori, con la partecipazione dei portatori di interesse e il coinvolgimento del pubblico in generale.

Allo stato attuale, sia a livello nazionale che all'interno del distretto dell'Appennino Settentrionale, non sussiste completa uniformità relativamente alla valenza dei PGRA quali strumenti tecnico-normativi di riferimento per l'indirizzo e la regolazione delle trasformazioni del territorio e la gestione del rischio idraulico nei confronti dell'attività edilizia e dell'urbanistica. In particolare variano il rapporto tra PGRA e Piani per l'Assetto Idrogeologico (PAI) a suo tempo approvati – e in parte ancora vigenti – alla scala dei bacini idrografici della legge 183/1989, oggi abrogata. Con riferimento a questo importante aspetto, per il territorio del distretto idrografico Appennino Settentrionale, negli ex bacini regionali liguri il PAI si applica sia per la parte relativa alla pericolosità da frana e da dissesti di natura geomorfologica che per la parte di pericolosità idraulica, sia come norme che come perimetrazioni.

Per quanto riguarda il Rio Caudì e il Rio Barbona, vengono presi in esame nel Piano di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico per il bacino del Torrente La Liggia, approvato con Delibera del Consiglio Provinciale di Savona n. 43 del 28/10/2002; l'ultima modifica del piano è relativa al Decreto digitale del Direttore Generale n. 176 del 25/06/2018.

Altri riferimenti normativi includono

- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE;
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE;
- D.Lgs. n. 152/2006 - T.U. Ambiente;
- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie";
- Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018);

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

- "Manuale di Progettazione delle Opere Civili" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI) aggiornato;
- Piani stralcio di assetto idrogeologico, Regione Liguria;
- Piano di Gestione del Rischio Alluvioni 2015-2021, Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Settentrionale.


## 2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

La zona di studio è ubicata nell'area occidentale del Comune di Alassio. Entrambi i corsi d'acqua si articolano per circa metà della loro lunghezza sulle pendici collinari dove scorrono a pelo libero. Nell'ultimo tratto, corrispondente ad un percorso di circa 1300-1500 metri di lunghezza, i due corpi idrici scorrono in gran parte tombinati sotto il tessuto viario della città sino alla loro sezione di sbocco a mare. L'area interessata dal progetto si sviluppa in corrispondenza dei sopra citati tratti tombinati.



**Figura 1 – Inquadramento generale dell'area di studio**

*NOTA: il sistema di riferimento adottato per le coordinate indicate nelle mappe presentate nel presente rapporto è Gauss Boaga Fuso Ovest.*

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudì	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

## 2.1 OBIETTIVI DELLO STUDIO

L'obiettivo principale dello studio è quello di valutare allo stato attuale i processi idrodinamici che caratterizzano gli eventi estremi relativi ai Rii Barbona e Caudì, in particolare all'intersezione con la linea ferroviaria in progetto.


L'obiettivo sopra riportato è stato raggiunto articolando lo studio secondo le seguenti attività principali, descritte nella presente relazione:

- Studio delle normative di riferimento;
- Reperimento di analisi idrauliche esistenti nell'area di studio;
- Analisi dei dati idrologico-idraulici;
- Implementazione di un modello numerico bidimensionale per l'analisi dello stato attuale.

## 2.2 ELENCO ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO

ELABORATO	SCALA	CODIFICA
Relazione idrologica generale	-	IV0I00D09RIID0001001
Planimetria livelli idrici Rio Barbona e Rio Caudì - Modello 2D - ante operam - Tr 50 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002033
Planimetria livelli idrici Rio Barbona e Rio Caudì - Modello 2D - ante operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002034
Planimetria livelli idrici Rio Barbona e Rio Caudì - Modello 2D - ante operam - Tr 500 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002035
Planimetria valori velocità Rio Barbona e Rio Caudì - Modello 2D - ante operam - Tr 200 anni	1:1000	IV0I00D09P7ID0002036
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Rio Barbona e Rio Caudì - ante operam	varie	IV0I00D09WZID0002021
Sezioni significative con livelli idrici (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Rio Barbona e Rio Caudì - ante operam	varie	IV0I00D09WZID0002022
Profili di rigurgito (Modello 2D) - Tr 50, 200, 500 anni - Rio Barbona e Rio Caudì - ante operam	varie	IV0I00D09FZID0002015

Tabella 1 – Elenco elaborati annessi.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

### 3 STUDIO IDRAULICO

#### 3.1 GENERALITÀ

Lo studio idraulico è stato basato sull'implementazione di un modello numerico atto a rappresentare le dinamiche idrauliche durante gli eventi di piena del fiume in fase di studio. L'approccio metodologico seguito è partito dall'integrazione ed elaborazione di dati di base, fondamentale di natura topografica per poter correttamente implementare la geometria del sistema. Una volta elaborata la base topografica è stato possibile sviluppare un modello idraulico con il software HEC-RAS<sup>1</sup>(ver. 6.1), con schema puramente bidimensionale. La taratura dei modelli è stata effettuata in riferimento a quanto riportato nel Piano stralcio di assetto idrogeologico. Lo scenario analizzato è quello relativo allo stato di fatto, poiché lo stato di progetto non apporta alcuna modifica in alveo.

#### 3.2 DATI DI BASE

I dati di base utilizzati per lo sviluppo dello studio idraulico includono:

- Dati topografici;
- Dati idrologico-idraulici.

##### 3.2.1 Dati topografici

I dati topografici utilizzati per la ricostruzione della geometria del sistema comprendono diverse tipologie di informazione, provenienti da fonti differenti:

- Rilievo delle sezioni trasversali del 2010;
- Rilievo delle sezioni trasversali del 2021;
- Modello Digitale del Terreno del Ministero dell'Ambiente con risoluzione a 1 m;

La Figura 2 fornisce la mappa con il dettaglio dell'estensione delle informazioni topografiche a disposizione.

<sup>1</sup> <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

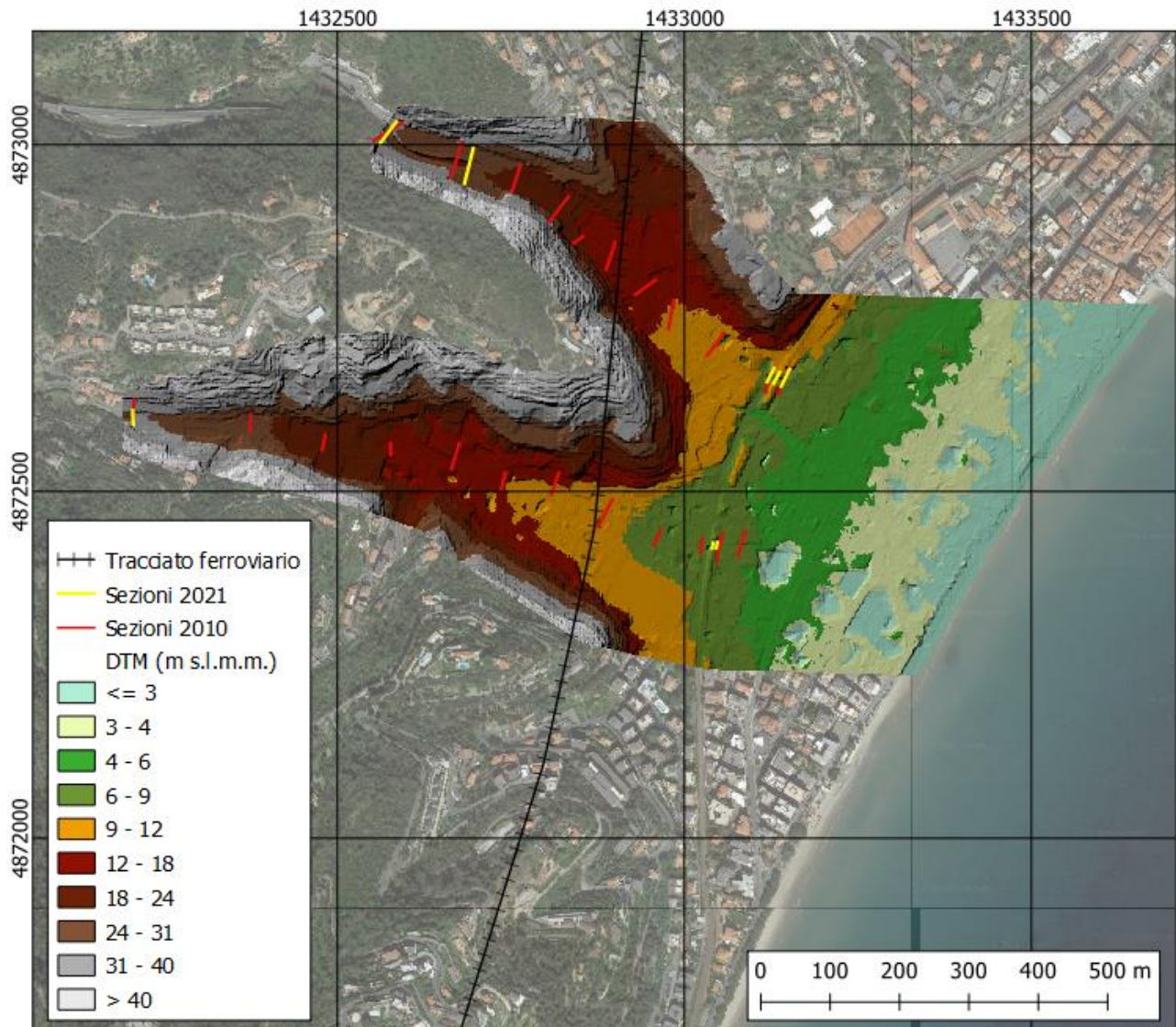


Figura 2: Informazioni topografiche a disposizione

### 3.2.2 Dati idrologico-idraulici

Le informazioni di base di carattere idrologico-idraulico includono i dati utilizzati per la definizione delle condizioni al contorno dei modelli e per la loro calibrazione.

Per quanto riguarda l'idrologia, si è fatto riferimento all'elaborato IV0I00D09RIID0001001A, che ha portato alla definizione degli idrogrammi di piena per assegnato tempo di ritorno immediatamente a monte del tratto di asta analizzato. Tali idrogrammi sono stati determinati secondo diversi approcci statistici applicati ai dati di precipitazione, sia secondo Gumbel sia secondo VAPI, comunemente accettati in letteratura nella valutazione degli eventi estremi, implementando



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudì	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

su tale base un modello di trasformazione afflussi-deflussi e scegliendo poi i valori più cautelativi per la condizione al contorno del modello idraulico. Gli idrogrammi più cautelativi sono risultati quelli ottenuti con il metodo di Gumbel sia per il Rio Caudì che per il Rio Barbona e sono stati utilizzati per la determinazione delle aree potenzialmente inondabili di riferimento.

TEMPO DI RITORNO	VALORE AL COLMO (m <sup>3</sup> /s)
<b>Rio Caudì</b>	
Tr 50	34
Tr 200	47
Tr 500	55
<b>Rio Barbona</b>	
Tr 50	20
Tr 200	28
Tr 500	33

Tabella 2 – Valori di picco degli eventi estremi considerati

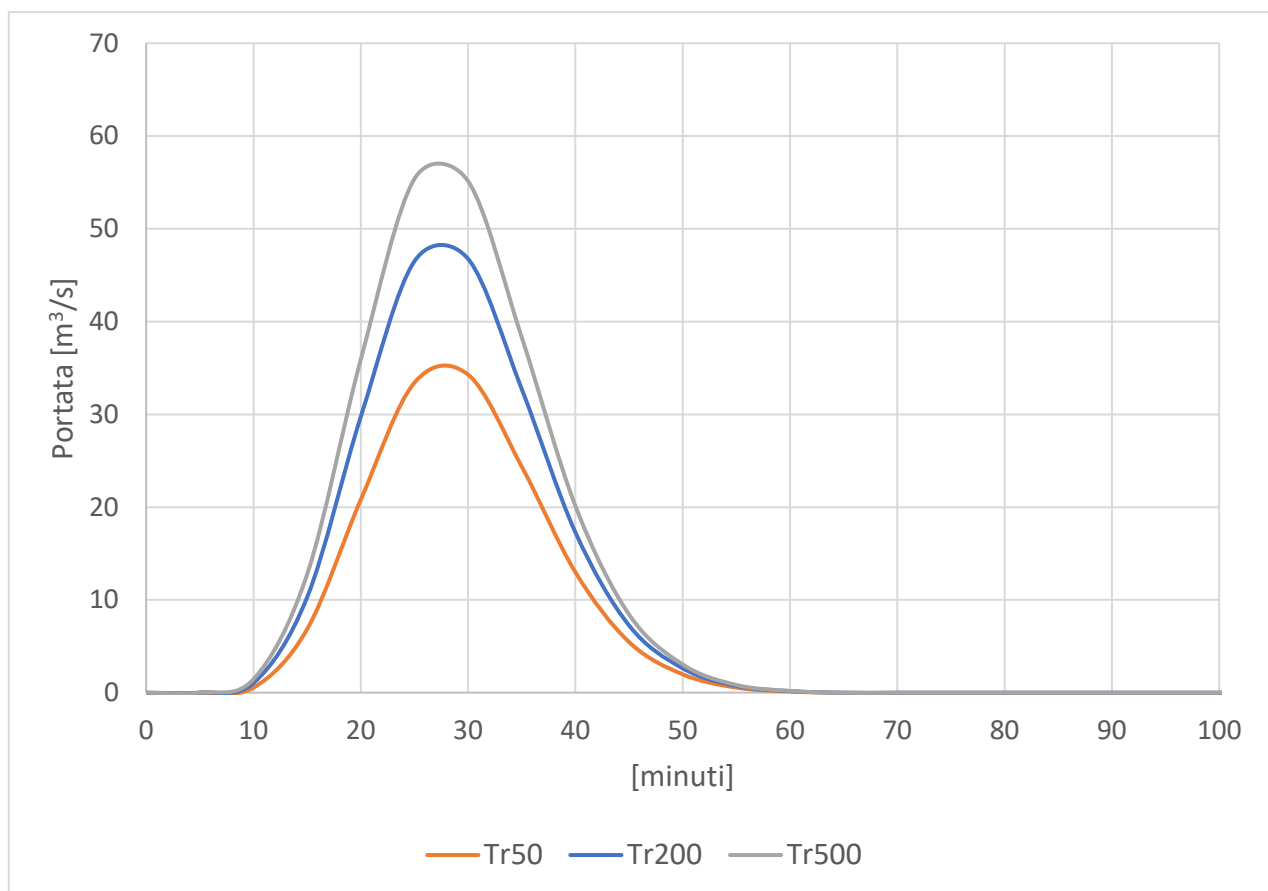
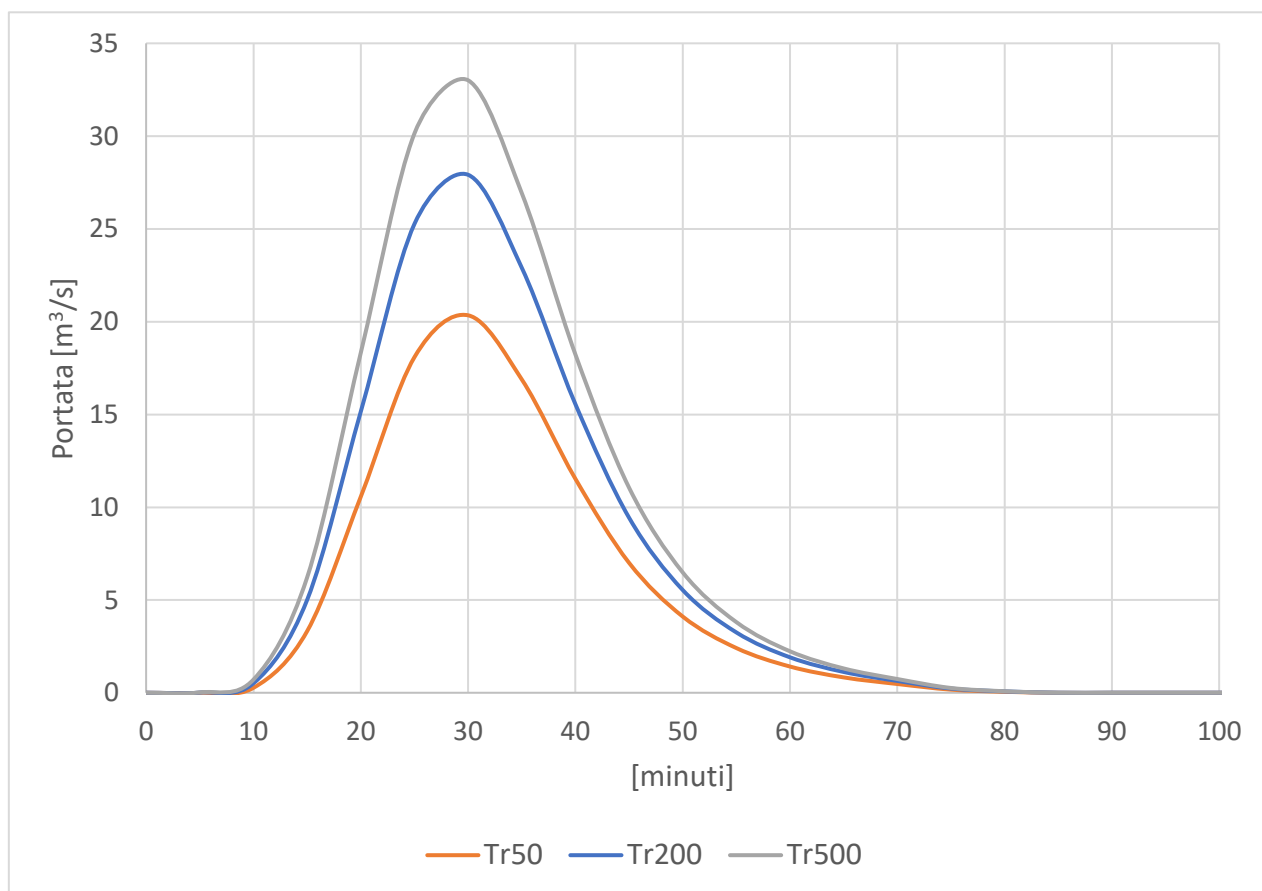


Figura 3: idrogramma di piena del Rio Caudì all'intersezione con la ferrovia per Tr 50, 200 e 500 anni

**PROGETTO DEFINITIVO**


Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale  
dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 008	A	10 di 29



**Figura 4: idrogramma di piena del Rio Barbona all'intersezione con la ferrovia per Tr 50, 200 e 500 anni**

Altra informazione utilizzata è costituita dalle aree di allagamento per evento con duecento anni di tempo di ritorno definite dall'Autorità di Bacino.

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

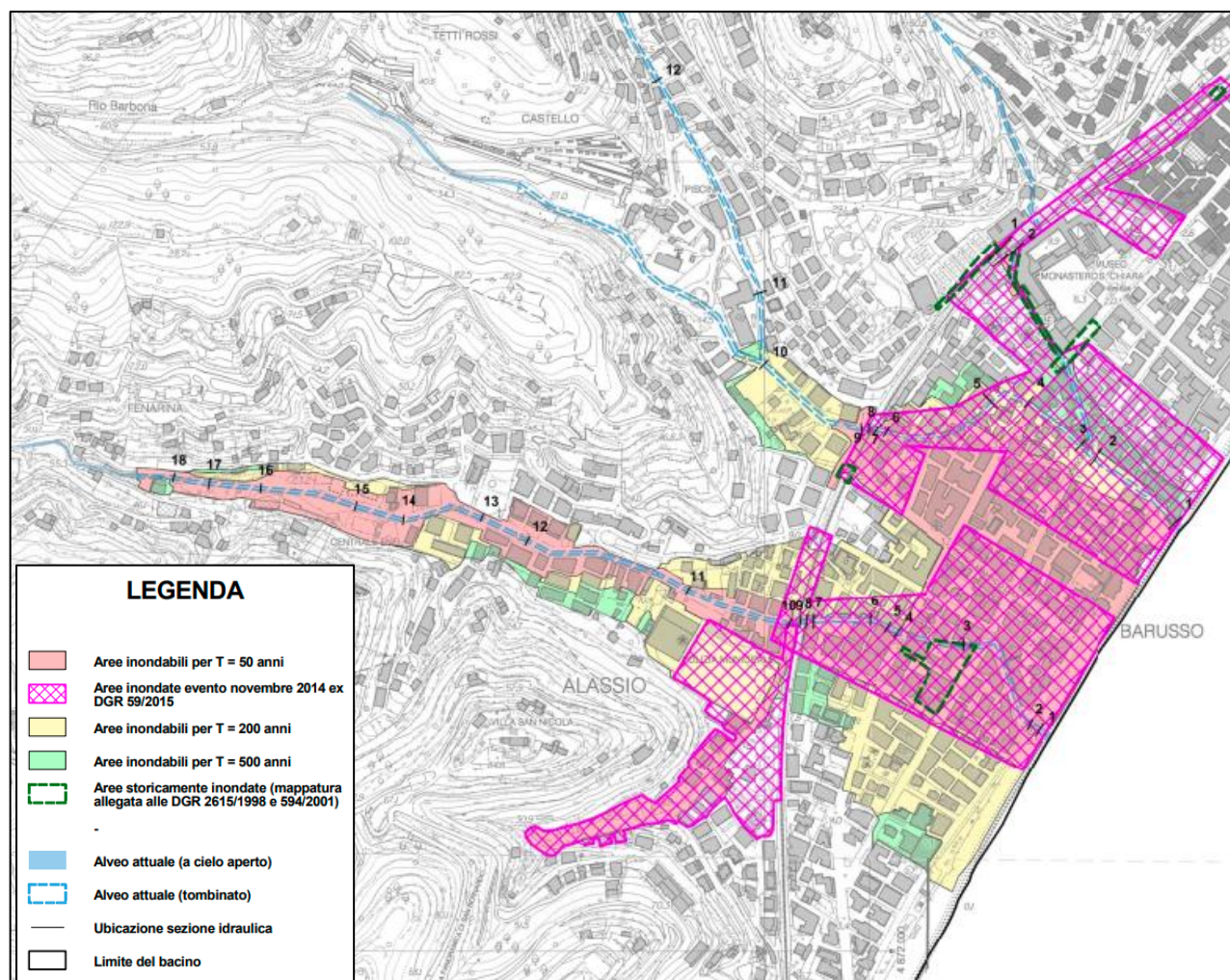


Figura 5: Estratto delle mappe di allagamento dal Piano di bacino stralcio per l'assetto idrogeologico per il Rio Caudi e il Rio Barbona


### 3.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

#### 3.3.1 Approccio matematico (2D)

Il codice di calcolo utilizzato per l'implementazione del modello bidimensionale dei tratti in fase di studio è il software HEC-RAS 6.1 sviluppato dall'Hydrologic Center del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America.


Le caratteristiche principali dell'algoritmo di modellazione del software HEC-RAS sono:

- Modellazione combinata 1D e 2D che prevede la possibilità di eseguire una simulazione combinata 1D e 2D all'interno dello stesso modello in regime di moto vario che permettendo


 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

di lavorare su schemi fluviali più complessi, utilizzando come sopra descritto la modellazione 1D per l'alveo, e la modellazione 2D aree inondabili esterne.

- Equazioni complete di Saint Venant o di diffusione dell'onda in 2D: Il programma risolve sia le equazioni 2D di diffusione dell'onda o quelle complete di Saint Venant. Questa opzione è selezionabile dall'utente, offrendo quindi una maggiore flessibilità. In generale, le equazioni di diffusione dell'onda in 2D consentono al software di funzionare più velocemente garantendo inoltre una maggiore stabilità. Le equazioni 2D in forma completa di Saint Venant sono applicabili a una gamma più ampia di problemi, ma la grande maggioranza delle situazioni può essere modellata con sufficiente precisione con le equazioni di diffusione dell'onda.
- Algoritmo di soluzione ai volumi finiti: Il risolutore delle equazioni di moto bidimensionale utilizza un algoritmo implicito ai volumi finiti. L'algoritmo di soluzione consente di utilizzare step temporali di calcolo maggiori rispetto ai metodi espliciti. L'approccio ai volumi finiti fornisce una misura dei miglioramenti in termini di stabilità e robustezza rispetto alle tradizionali tecniche differenziali di soluzione basate su metodi agli elementi finiti.
- Algoritmo per la soluzione accoppiata dei modelli 1D e 2D: Gli algoritmi di soluzione 1D e 2D sono strettamente accoppiati nello stesso passo temporale di calcolo permettendo una perfetta coerenza a ogni step tra i modelli 1D e 2D. Ad esempio, se un fiume è modellato in 1D, ma l'area dietro un argine è modellata in 2D, il deflusso al di sopra dell'argine o eventualmente attraverso una breccia nell'argine è valutato utilizzando come carico di monte il livello nel fiume 1D e come carico di valle il livello nell'area 2D. L'equazione dello stramazzone è utilizzata per calcolare il deflusso al di sopra dell'argine o attraverso la breccia.
- Maglie computazionali strutturate e non strutturate: Il software è stato progettato per utilizzare mesh computazionali strutturate o non strutturate. Ciò significa che le cellule computazionali possono essere triangoli, quadrati, rettangoli o anche elementi a cinque e sei facce. La maglia può essere una miscela di forme e dimensioni delle celle. Il contorno esterno della maglia computazionale è definito con un poligono.

 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

- Tabella dettagliata delle proprietà idrauliche per le celle di calcolo: All'interno di HEC-RAS le celle e le facce delle celle si basano sui dati del terreno sottostante (DTM). Ogni cella della maglia computazionale è pre-elaborata per sviluppare dei grafici dettagliati sulle proprietà idrauliche basate sul terreno sottostante che vengono utilizzati nella modellazione di HEC. Inoltre, ogni faccia delle celle viene valutata come una sezione trasversale dove vengono elaborate in tabelle che descrivono le proprietà idrauliche. Il flusso si muove in tutta la faccia (tra le celle) basandosi su questi dati. Questo permette agli utenti di utilizzare delle celle molti grandi senza però perdere troppo il dettaglio del terreno sottostante che governa il movimento del flusso. Il vantaggio è un minor numero di calcoli e quindi tempi di esecuzione molto più veloci.
- Dettagliata mappatura dello scenario degli allagamenti con animazioni: La perimetrazione delle aree allagabili così come le animazioni dello scenario degli allagamenti in funzione del tempo può essere fatta all'interno di HEC-RAS utilizzando le funzionalità di RAS-Mapper. La mappatura delle aree allagate si basa sul DTM, ciò significa che la reale superficie bagnata sarà basata sui dettagli della morfologia del terreno sottostante e non sulla dimensione della cella di calcolo. Le celle quindi possono anche essere parzialmente bagnate/asciutte.
- Algoritmo di calcolo basato su sistemi Multi-Processore: Il modello di calcolo 2D è stato programmato per sfruttare i sistemi multi-processore presenti sui computer moderni (architettura parallela). In questo l'algoritmo di soluzione presenta una maggiore velocità e quindi i computer dotati di più processori saranno in grado di eseguire la modellazione 2D più velocemente rispetto ai computer a singolo processore.
- Motori di calcolo a 64 e 32 bit: HEC-RAS è dotato di motori di calcolo sia a 64 bit che a 32 bit. Il software utilizzerà automaticamente i motori di calcolo a 64 bit se si installa su un sistema operativo a 64 bit.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

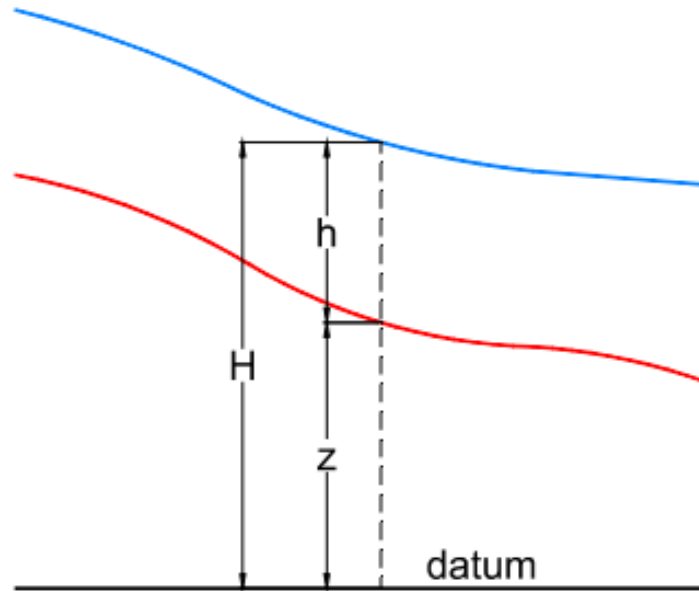


Figura 6 – Software Hec Ras 6.0: sistema di riferimento.


Il modello matematico bidimensionale utilizza le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, che vengono risolte con uno schema ai volumi finiti. Si riporta di seguito il sistema di riferimento di HEC-RAS 2D, ove la quota del terreno è indicata con  $z(x,y)$ , l'altezza idrica con  $h(x,y,t)$  e l'altezza del pelo libero con  $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$ .

**Conservazione della massa:** assumendo il fluido incomprimibile, l'equazione differenziale della conservazione della massa (continuità) in moto vario è:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (h \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial (h \cdot v)}{\partial y} + q = 0$$

in cui  $t$  è il tempo,  $u$  e  $v$  sono rispettivamente le componenti di velocità lungo le direzioni  $x$  e  $y$ , e  $q$  è la portata in ingresso ed in uscita dovuta a immissioni od uscite di acqua.

**Conservazione della quantità di moto:** quando la dimensione orizzontale caratteristica dell'area di studio è molto maggiore della dimensione verticale, gli effetti legati alla componente verticale della velocità possono essere trascurati e si può assumere una distribuzione idrostatica delle pressioni, a

 <b>ITALFERR</b> <small>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</small>	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

partire dalle equazioni di Navier-Stokes. In tali ipotesi e nell'ipotesi di densità del fluido costante, l'equazione di conservazione della quantità di moto assume la seguente forma:

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

in cui oltre ai simboli già illustrati,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $\nu_i$  è il coefficiente di viscosità turbolenta,  $c_f$  è il coefficiente di attrito al fondo, ed  $f$  è il coefficiente di Coriolis.

Utilizzando la formula di Chézy il coefficiente di scabrezza sul fondo è dato da:

$$c_f = \frac{g \cdot |V|}{C^2 \cdot R}$$

in cui  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $|V|$  è il modulo del vettore velocità,  $C$  è il coefficiente di Chézy e  $R$  è il raggio idraulico. Utilizzando la formula di Manning  $C = R^{1/6}/n$ , in cui  $n$  è il coefficiente di scabrezza di Manning, pertanto si ha:


$$c_f = \frac{n^2 \cdot g \cdot |V|}{R^{4/3}}$$

Per la modellazione del campo di moto HEC-RAS utilizza l'approccio batimetrico sub-grid sviluppato da Casulli.

Con tale approccio si riesce a sfruttare informazioni topografiche ad alta risoluzione (ad esempio dati Lidar con passo della griglia pari ad 1m) pur utilizzando celle di calcolo a dimensione caratteristica maggiore rispetto alla risoluzione dei dati in ingresso. Per ogni singola cella di calcolo infatti in fase di pre-processing viene ricavata la legge di variazione con la quota del pelo libero delle grandezze idrauliche caratteristiche, basandosi sui dati topografici ad alta risoluzione relativi alla cella stessa.

Vengono così determinate: curva di invaso della cella, area, contorno bagnato e raggio idraulico su ogni bordo della cella. Tale schema di risoluzione consente di sfruttare al massimo il dettaglio dei dati in ingresso.



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

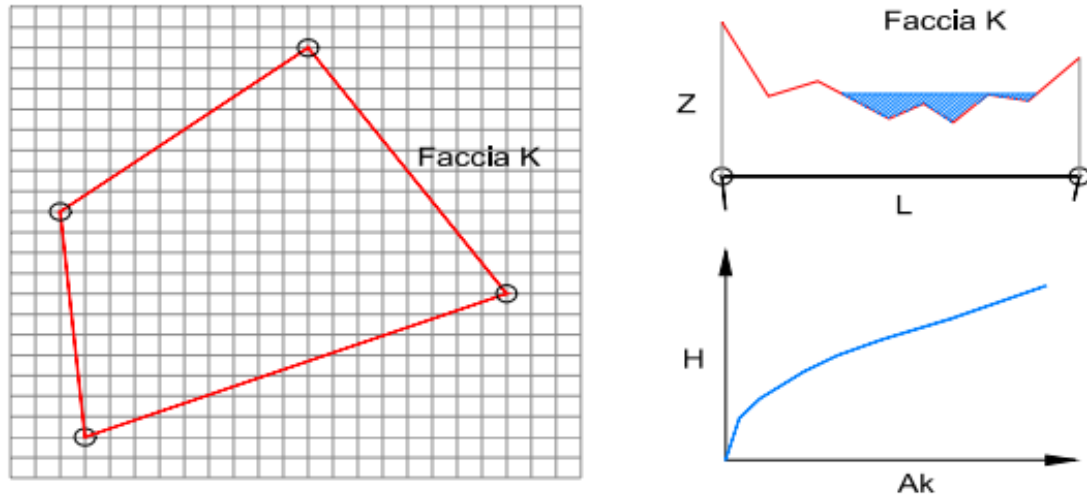



Figura 7 – Software Hec Ras: in grigio il dato della griglia DTM, in rosso la cella di calcolo del modello idraulico. A destra la schematizzazione effettuata da Hec Ras sulle facce del bordo della cella.

### 3.3.2 Generazione del Modello Digitale Del Terreno

Il primo passo per l'implementazione della geometria del modello prevede la definizione delle quote del terreno dell'alveo e della pianura alluvionale tramite la generazione di un Modello Digitale del Terreno (DTM). Tali informazioni sono state estratte dai dati topografici disponibili descritti nel paragrafo 3.2.1, avendo cura di integrare le informazioni derivate dalle sezioni trasversali rilevate in alveo con quelle relative al piano campagna provenienti dal modello digitale del terreno. Tale approccio è stato seguito per i tratti a cielo aperto: benché generalmente la sezione trasversale battuta fornisca valori puntuali più precisi del DTM, dove possibile si è preferito mantenere il DTM che fornisce una rappresentazione continua dell'alveo, considerata più rappresentativa di quella ottenibile da interpolazione dei dati puntuali forniti dalle sezioni. Diversamente, per i tratti tombati le sezioni di rilievo sono state utilizzate per fornire le geometrie delle strutture idrauliche, indipendenti dal modello digitale del terreno.

Nei tratti a cavallo della linea ferroviaria esistente, è stata effettuata una interpolazione geospaziale delle sezioni rilevate, in ambiente GIS tramite il software XS Interpolator<sup>2</sup>, in modo da poter prendere in considerazione le variazioni puntuali presenti tra le sezioni rilevate, siano esse dovute a

<sup>2</sup><https://shop.m3eweb.com/home/32-xs-interpolator.html>

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

restringimenti, allargamenti o cambiamenti di direzione del corso d'acqua; il risultato di tale interpolazione è costituito da un modello digitale dell'alveo, integrato con il DTM per le quote del terreno di piano campagna.

La figura che segue fornisce un esempio dell'interpolazione effettuata, mostrando l'integrazione tra il DTM e il modello digitale dell'alveo del Rio Barbona in corrispondenza dell'intersezione con la linea ferroviaria esistente; in figura sono indicati anche i profili delle sezioni trasversali rilevate, per meglio apprezzare la ricostruzione della geometria in alveo.

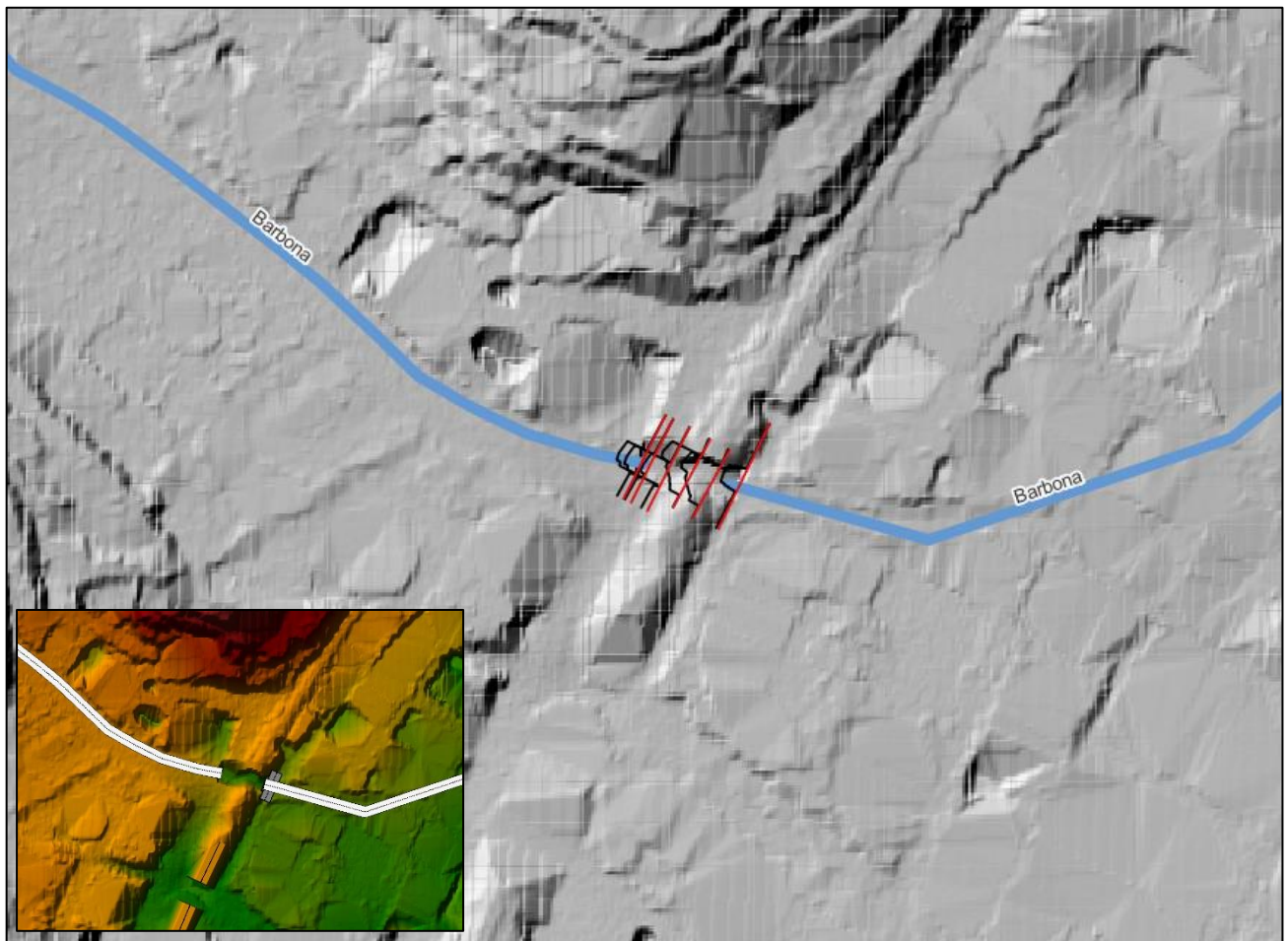



Figura 8: Estratto del DTM ottenuto integrando il DTM originario con le sezioni trasversali

### 3.3.3 Definizione del dominio e della griglia di calcolo

Per l'implementazione del modello si è in prima battuta identificato un dominio di calcolo che fosse coperto dalle informazioni topografiche disponibili e che fosse sufficientemente esteso a monte e a

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A


valle del nodo di interesse, in modo che il calcolo non risenta delle condizioni al contorno imposte. In particolare, a valle, si è scelto di chiudere il modello alla foce dei due corpi idrici.



Figura 9: Estensione del dominio di calcolo

Per quanto riguarda la griglia di calcolo, HEC-RAS 2D utilizza uno schema di soluzioni a volumi finiti, che consente l'utilizzo di una griglia di calcolo (mesh) strutturata o non strutturata. Ciò significa che la mesh può essere costituita da celle di calcolo da 3 a 8 lati. A partire dal modello digitale del terreno finale implementato come descritto sopra, è stata selezionata una risoluzione nominale della griglia pari a 3 m e sono stati utilizzati gli strumenti automatizzati all'interno di HEC-RAS per la costruzione della griglia di calcolo nel piano campagna.



	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

L'alveo dei due corpi idrici, nel tratto a cielo aperto in corrispondenza della linea ferroviaria esistente, è stato schematizzato con griglia a 1 m.

La griglia così definita è costituita da 43'853 celle, di estensione media pari a 8.48 m<sup>2</sup>, con una variazione da 0.52 m<sup>2</sup> a 20.72 m<sup>2</sup>.

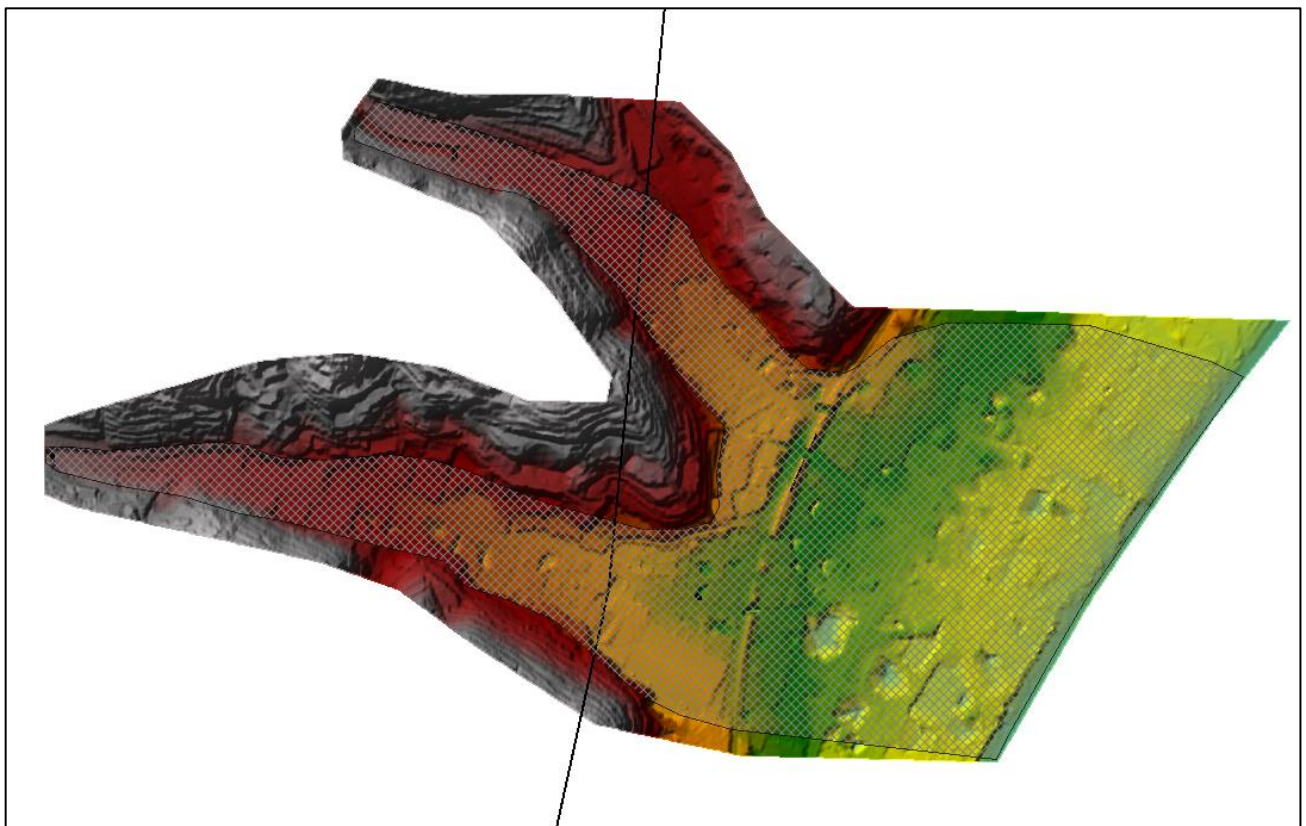
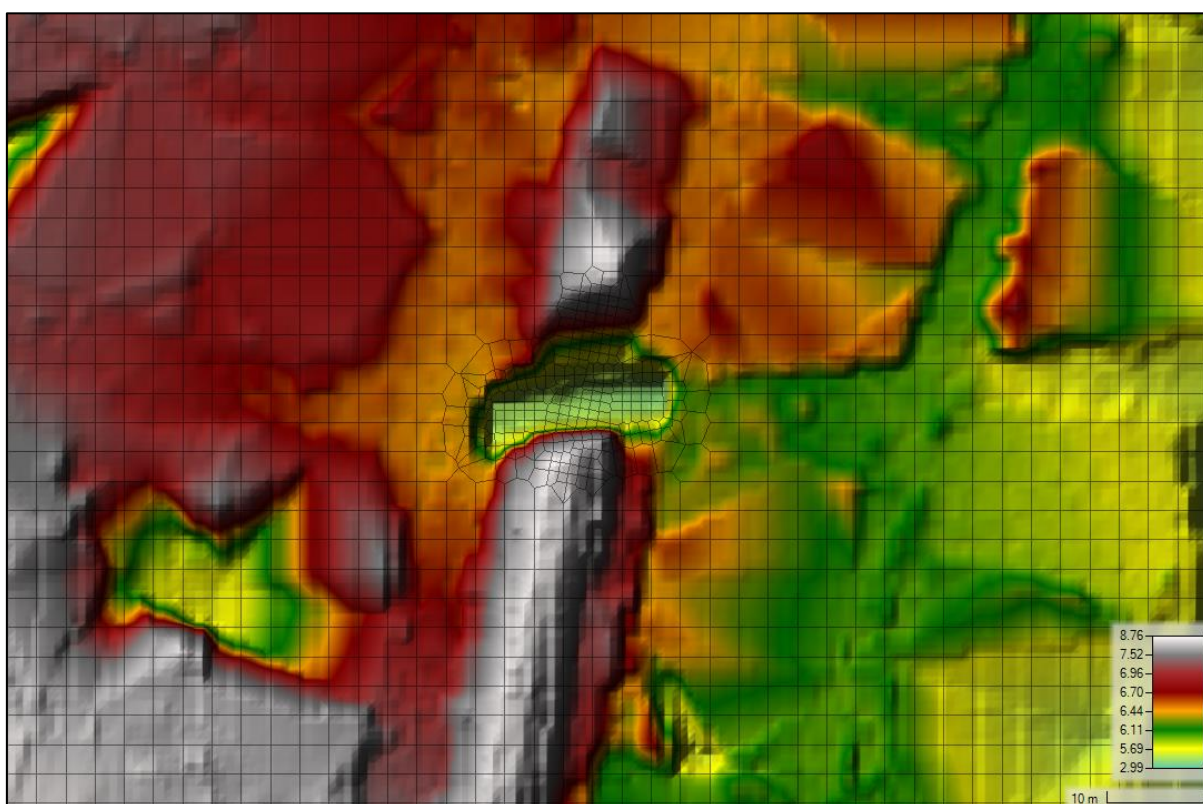


Figura 10: Dominio di calcolo e definizione della mesh


**PROGETTO DEFINITIVO**

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale  
dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudì

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IVOI	00	D 09 RI	ID 0002 008	A	20 di 29



**Figura 11: Dettaglio della mesh del Rio Caudì all'interferenza con la linea ferroviaria esistente**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

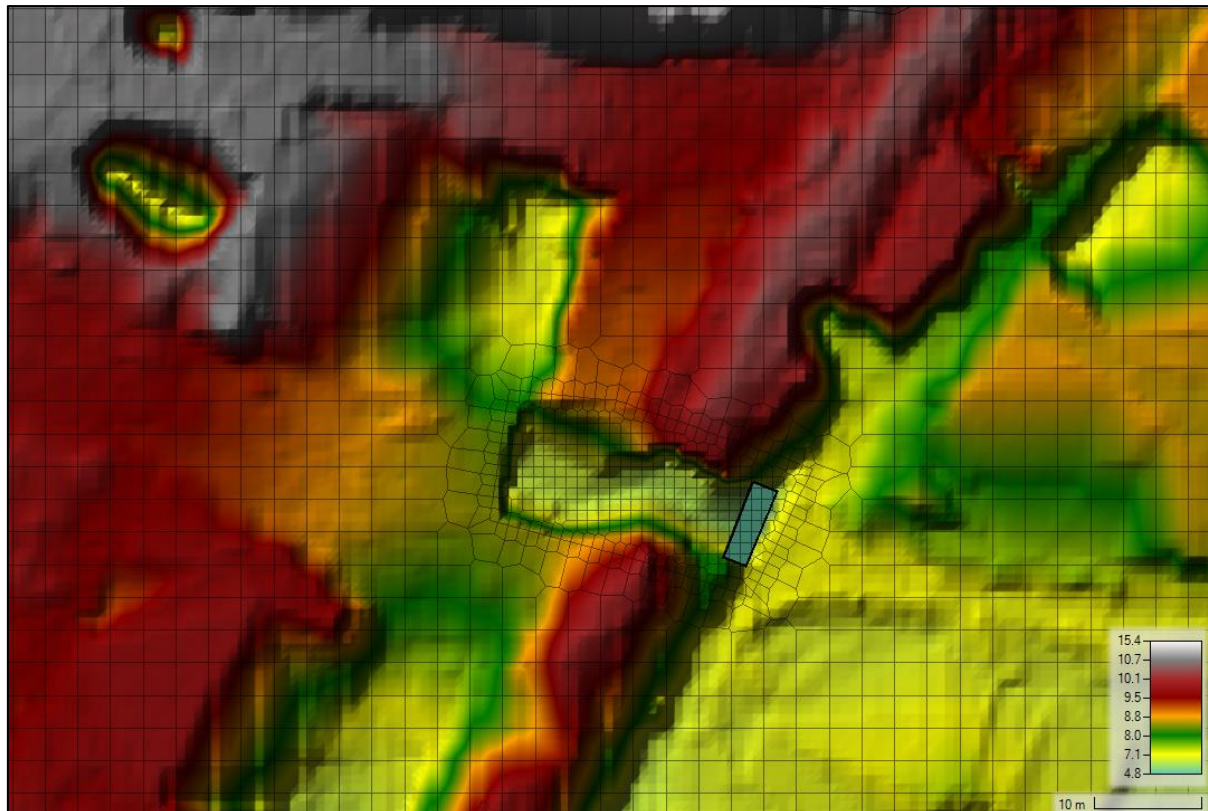



Figura 12: Dettaglio della mesh del Rio Barbona all'interferenza con la linea ferroviaria esistente

La discretizzazione delle celle è stata ritenuta sufficientemente dettagliata per rappresentare la dinamica di allagamento; tuttavia, è opportuno considerare che, in realtà, il livello di dettaglio del modello HEC-RAS non dipende solo dalle dimensioni della cella. La specificità della modellazione in RAS 2D è legata al fatto che il software è in grado di considerare nel calcolo un'informazione topografica più dettagliata rispetto alla griglia di calcolo che utilizza. Questa prerogativa lo differenzia in maniera netta rispetto a tutti gli altri software di modellazione 2D, dove l'informazione topografica è al più sui nodi di calcolo.

Infatti, pur mantenendo un solo punto di calcolo all'interno di ogni cella della griglia e quindi calcolando un solo livello, il pre-processore del software per ogni cella determina, sulla base del DEM sotteso dalla cella:

- la relazione livello-volume invasato nella cella, che utilizza nella soluzione dell'equazione di continuità,



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudì	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

- la relazione livello area di deflusso per ogni contorno di scambio tra 2 celle, che utilizza nella soluzione dell'equazione del moto.

Questa tecnica permette quindi di considerare dettagli topografici non legati alla dimensione delle celle di calcolo, ma legati alla definizione del DEM di base.

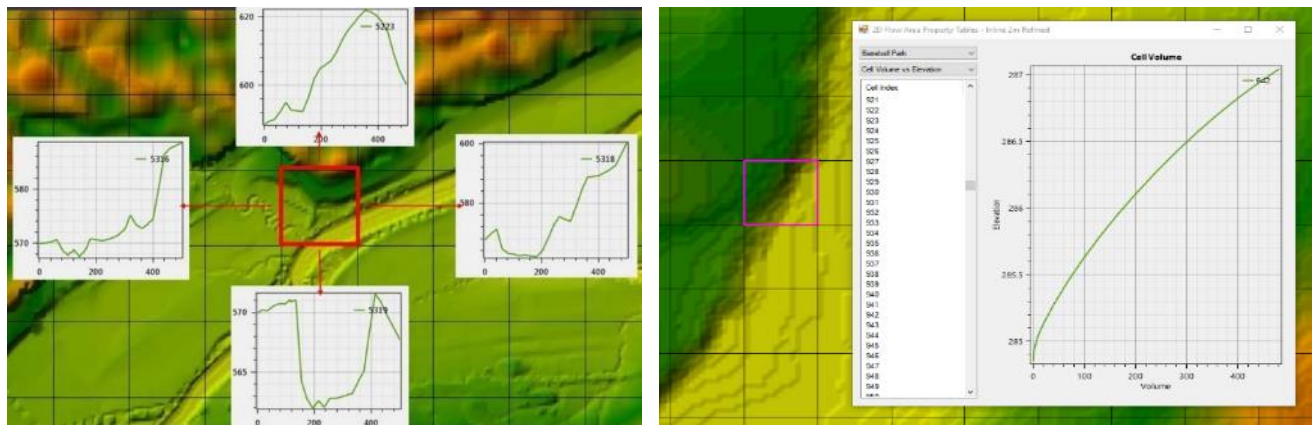



Figura 13: Esempio di DEM a sinistra estrazione dei profili lungo i confini delle celle, a destra curva livello-volume invasato

Anche il post-processore del software per identificare le aree allagate utilizza il DEM, quindi all'interno di una cella di calcolo considera allagati solo i pixel del DEM che hanno una quota inferiore a quella del livello idrico calcolato per la cella stessa.

### 3.3.4 Strutture idrauliche all'interno del modello 2D

Nella geometria del modello sono stati inseriti i tratti tombati dei due corpi idrici, che fondamentalmente, sia per il Rio Caudì che per il Rio Barbona, coprono un primo tratto, che parte da poco a valle del contorno del dominio fino alla linea ferroviaria esistente, e un secondo tratto, che inizia immediatamente a valle della linea FS esistente, fino allo sbocco a mare. I tratti tombati sono stati inseriti come culvert, definiti come tratti unici a geometria costante, con quote differenziate per ingresso e uscita della struttura. L'attraversamento ferroviario esistente sul rio Caudì è stato inserito come struttura specifica all'interno della geometria del modello, mentre quello sul Rio Barbona non è stato inserito come struttura, poiché di fatto non costituisce impedimento al deflusso, vista la mancanza di spalle o pile in alveo e data la quota dell'impalcato.



 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b></p>					
<p><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi</p>	<p>COMMESSA IV0I</p>	<p>LOTTO 00</p>	<p>CODIFICA D 09 RI</p>	<p>DOCUMENTO ID 0002 008</p>	<p>REV. A</p>	<p>FOGLIO 23 di 29</p>

Le figure seguenti mostrano le posizioni planimetriche dei tratti tombati, e la schematizzazione delle sezioni dell'attraversamento esistente all'interno del modello.

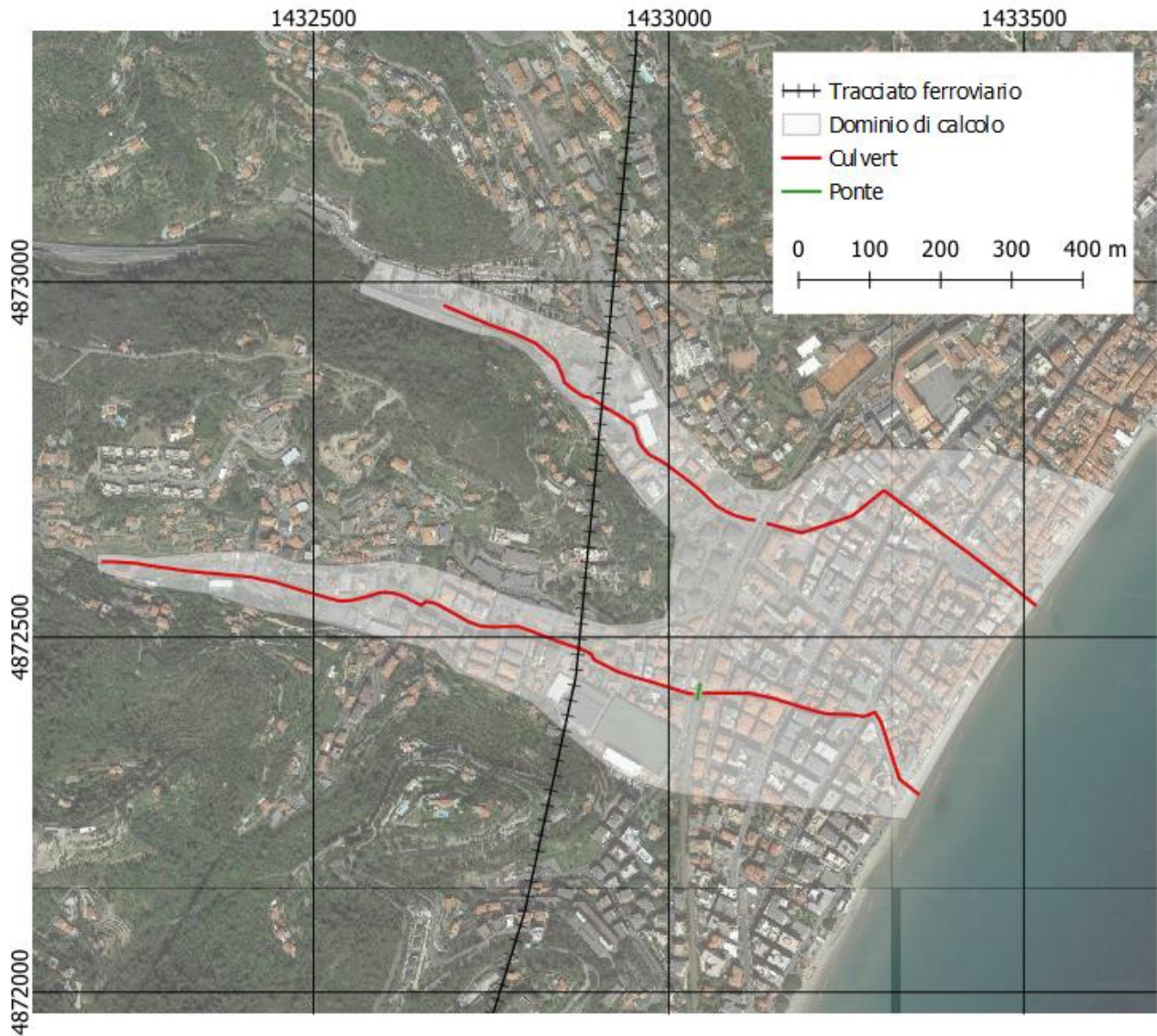



Figura 14: Strutture idrauliche inserite all'interno del modello

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudì	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

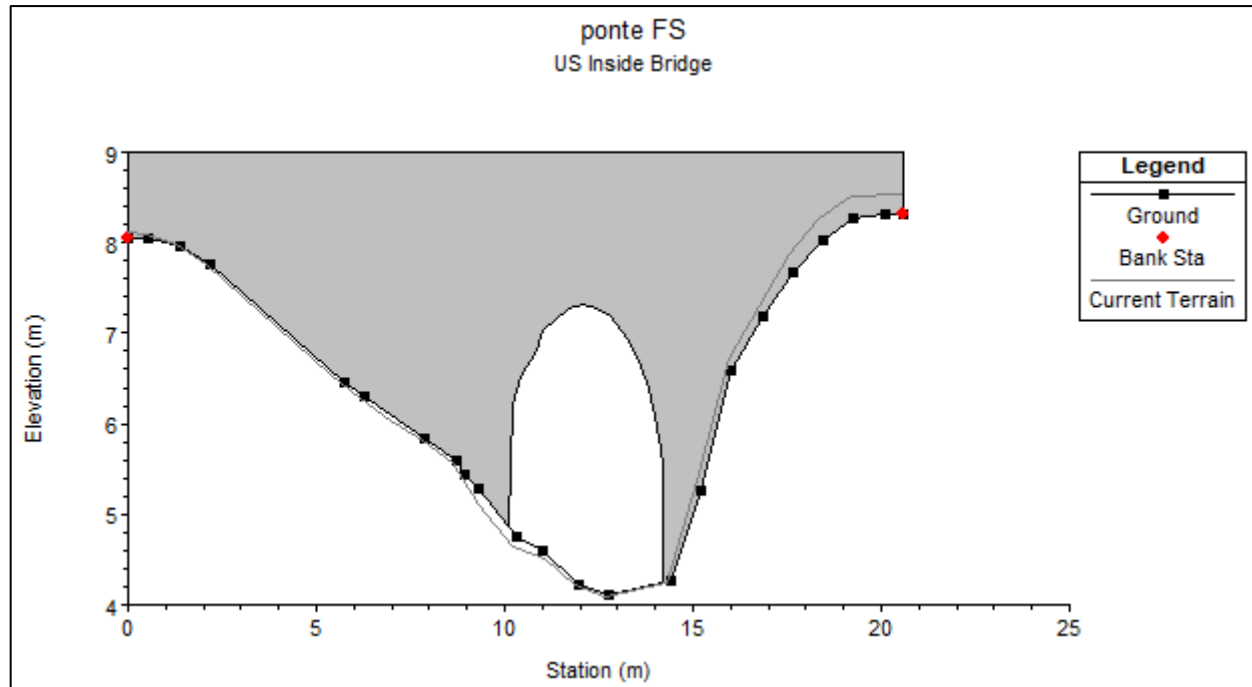


Figura 15: Schematizzazione dell'attraversamento ferroviario sul Rio Caudì


### 3.3.5 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte al modello includono:

- idrogrammi di piena di riferimento in input a monte;
- condizioni al contorno di valle lungo il contorno a mare: è stata imposta la condizione di livello pari a 2 m s.l.m.m. corrispondente ad una condizione estrema che prende in considerazione l'azione di storm surge e l'innalzamento del livello del mare al 2100 dovuto ai cambiamenti climatici, così come definito da studio ENEA disponibile basato sulla stazione di Imperia (rif. IV0I00D09RIID0001001A);
- condizione al contorno di valle sul lato sud-ovest dell'area di calcolo dove è previsto il passaggio di acqua attraverso il contorno del dominio: è stata imposta la condizione di *normal depth*, corrispondente ad una condizione di moto uniforme, localmente definita tramite il calcolo della pendenza del terreno.

La Figura 16 mostra la schematizzazione delle principali condizioni al contorno imposte.



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

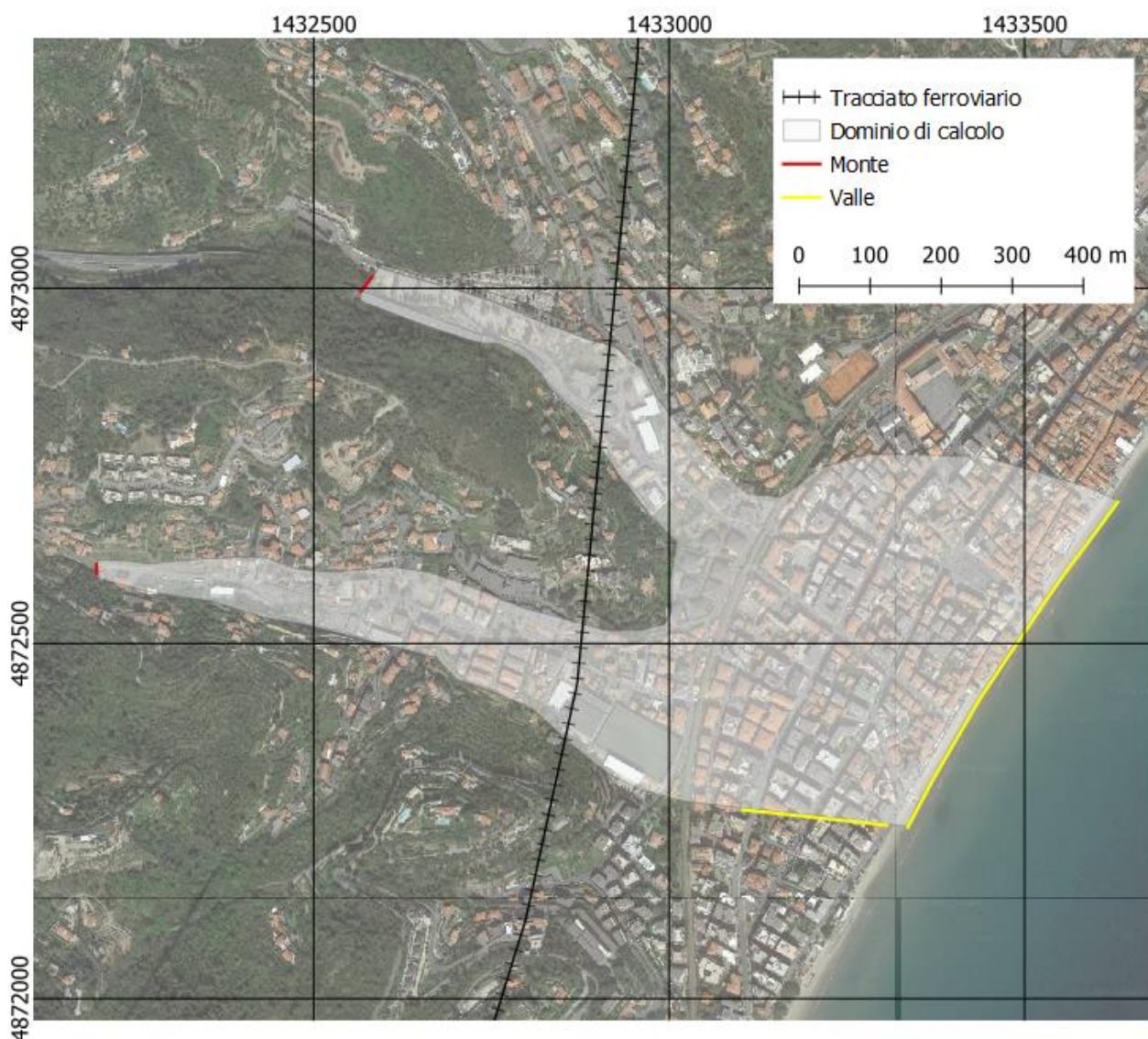


Figura 16: Condizioni al contorno imposte al modello

### 3.3.6 Calibrazione

Non essendo disponibili informazioni relative a misurazioni idrometriche durante eventi specifici, si è potuto calibrare il modello unicamente sulla base degli allagamenti definiti nel PAI dall’Autorità di Bacino per un evento duecentennale.



**PROGETTO DEFINITIVO**

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale  
dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 008	A	26 di 29

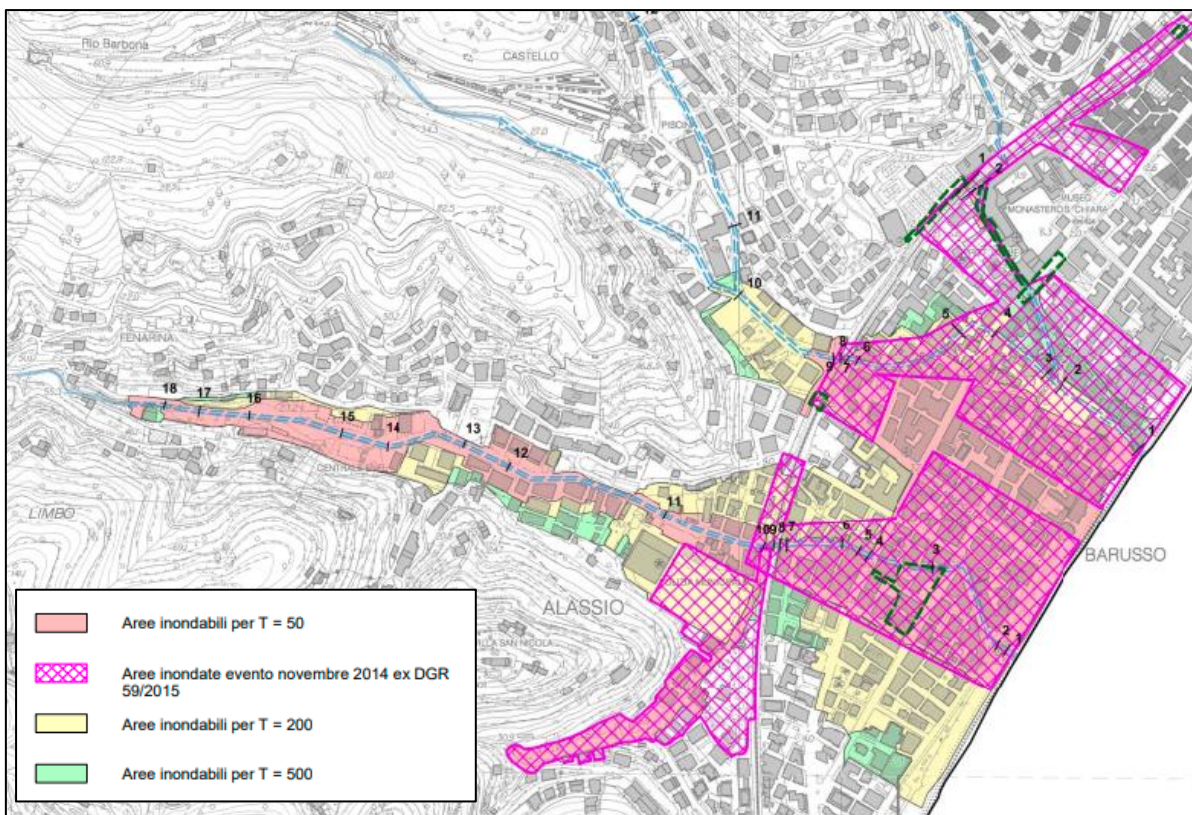



Figura 17: Confronto tra gli allagamenti ottenuti con il modello e quelli definiti dal PAI

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV01	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

I risultati descritti nelle figure precedenti sono stati ottenuti con il seguente set di scabrezze, riportato nella tabella seguente secondo la notazione di Manning  $n$  [ $s \cdot m^{-1/3}$ ]. In particolare, il valore assegnato in alveo (per i tratti non tombati e per quelli in corrispondenza della linea ferroviaria esistente) è stato scelto sia secondo quanto suggerito dalla letteratura tecnica, sulla base della documentazione fotografica disponibile da sopralluogo e dalla fotointerpretazione di immagini satellitari, che in funzione dell'estensione degli allagamenti definiti dal PAI; il valore assegnato all'area di piana alluvionale è stato invece valutato in modo da considerare la presenza degli edifici; tale scabrezza non appare tuttavia influenzare in modo significativo i livelli in alveo, che costituiscono l'oggetto dell'analisi condotta.


**Tabella 3: Scabrezze adottate nel modello**

<b>Copertura</b>	<b>n</b>
Alveo	0.04
Tratto in corrispondenza della linea FS esistente	0.03
Pianura alluvionale	0.08

In linea generale i risultati ottenuti per l'evento duecentennale appaiono consistenti, in termini di estensione delle aree allagabili, rispetto a quanto illustrato nelle carte degli allagamenti PAI per lo stesso tempo di ritorno, benché meno conservativi per il Rio Barbona. È tuttavia opportuno evidenziare che la morfologia della piana alluvionale e le pendenze esistenti causano un significativo scorrimento superficiale dei volumi esondati, dinamica che è ben rappresentata dalla modellazione bidimensionale, dove i volumi esondati seguono sostanzialmente la pendenza del DTM. La differenza con i risultati PAI è giustificabile perché il processo sopra descritto è generalmente meno correttamente rappresentato dalla modellazione monodimensionale, su cui è effettivamente basata la definizione delle aree allagabili PAI.

### **3.4 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE**

Dopo le procedure di calibrazione, il modello 2D, così come descritto nel paragrafo 3.3, è stato utilizzato per condurre tre simulazioni per lo scenario relativo allo stato attuale, rispettivamente per i tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni, utilizzando gli idrogrammi definiti nel paragrafo 3.2.2.

	<b>RADDOPPIO LINEA GENOVA - VENTIMIGLIA</b> <b>TRATTA FINALE LIGURE - ANDORA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi	<b>COMMESSA</b> IV0I	<b>LOTTO</b> 00	<b>CODIFICA</b> D 09 RI	<b>DOCUMENTO</b> ID 0002 008	<b>REV.</b> A

I risultati ottenuti hanno portato all'identificazione del campo dei tiranti e delle velocità in tutto il dominio di calcolo, e in particolare dei livelli idrici che si instaurano durante gli eventi estremi presi in considerazione in corrispondenza della linea ferroviaria in progetto.

Si deve tuttavia sottolineare che la linea ferroviaria in progetto è prevista passare nell'area in fase di studio in galleria, al di sotto della linea di thalweg dei corpi idrici. Pertanto, non sono previste opere in progetto che possono modificare l'attuale espansione delle piene, né interventi di risoluzione di eventuali criticità di natura idraulica o di sistemazione idraulica dell'alveo. Di conseguenza, i livelli idrici definiti dal calcolo numerico non hanno rilevanza per il progetto ferroviario, ma sono indicativi solamente dell'officiosità idraulica dei due rii, e forniscono informazioni sugli allagamenti attesi; inoltre, per quanto riguarda il Rio Barbona, in corrispondenza della linea ferroviaria di progetto, il deflusso risulta contenuto all'interno del tratto tombato presente.

Tenendo in considerazione tali premesse, i livelli in corrispondenza dell'interferenza in progetto sono riassunti nella tabella che segue.

**Tabella 4: Livelli massimi a monte dell'attraversamento ferroviario per tempo di ritorno**

	<b>Livello (m s.l.m.m.)</b>
<b>Rio Caudi</b>	
Tr 50	9.88
Tr 200	9.97
Tr 500	10.04
<b>Rio Barbona</b>	
Tr 50	-*
Tr 200	-*
Tr 500	-*

\* il deflusso risulta contenuto all'interno del tratto tombato presente

Le figure seguenti forniscono a scopo illustrativo i risultati in termini di tiranti idrici massimi e velocità massime nell'intorno dell'attraversamento ferroviario in progetto, in riferimento all'evento con tempo di ritorno pari a 200 anni.

Si rimanda agli elaborati specifici per la restituzione grafica dettagliata dei risultati, come definiti nel paragrafo 2.2.



**PROGETTO DEFINITIVO**

Relazione idraulica - Studio idraulico bidimensionale  
dei corsi d'acqua Rio Barbona e Rio Caudi

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IV01	00	D 09 RI	ID 0002 008	A	29 di 29

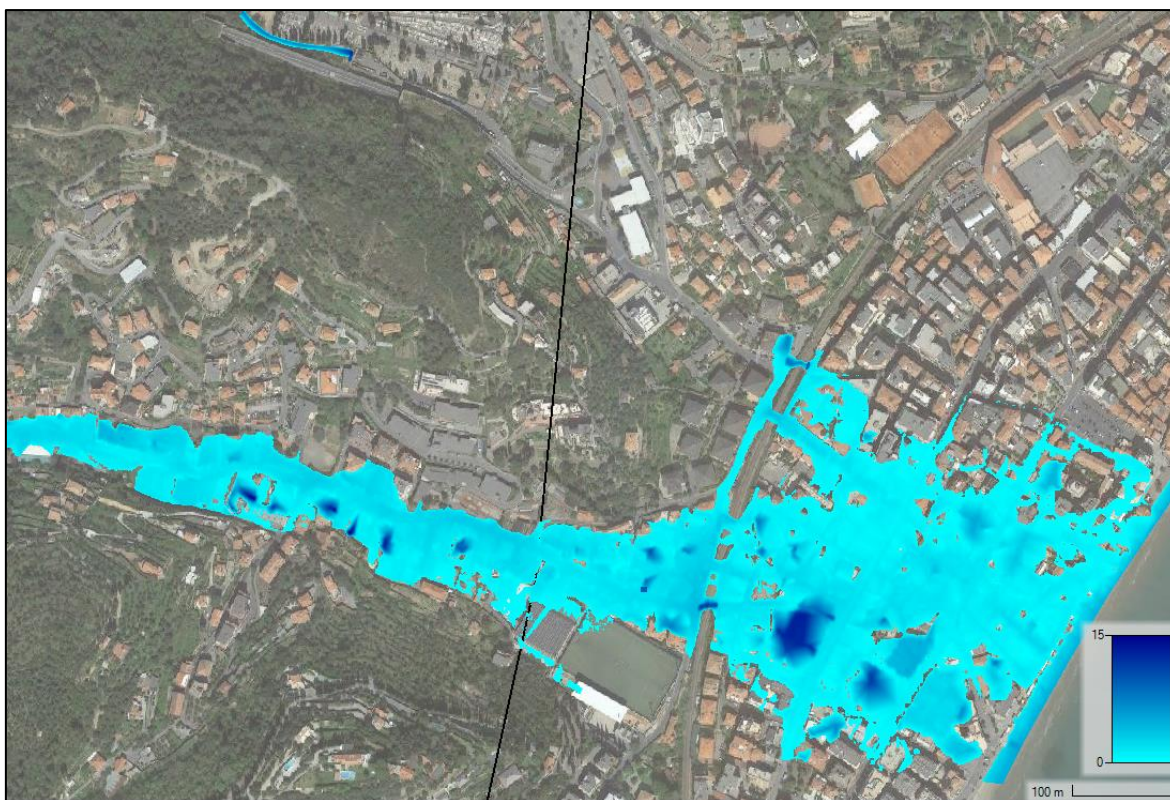


Figura 18: Campo dei tiranti idrici massimi per l'evento Tr 200 nell'intorno dell'attraversamento ferroviario in progetto

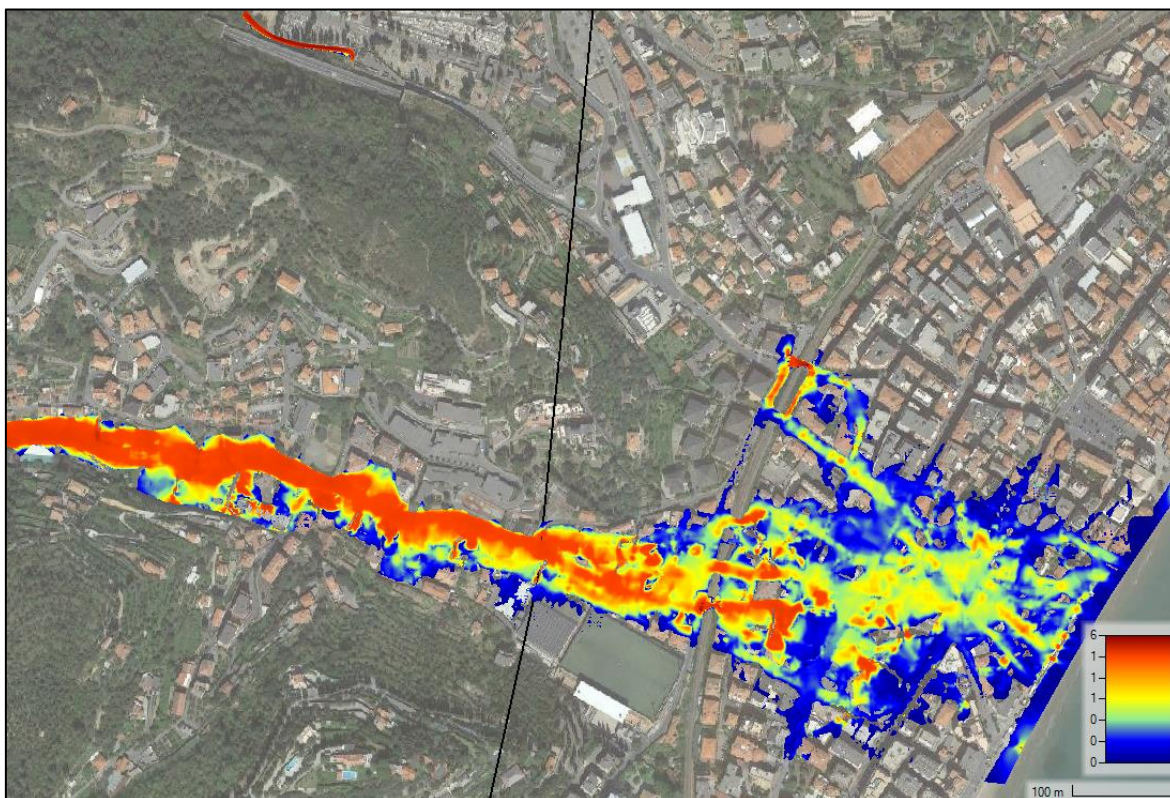


Figura 19: Campo delle velocità massime per l'evento Tr 200 nell'intorno dell'attraversamento ferroviario in progetto