Studio idrogeologico e idraulico del torrente Erro tra la località Badia e la confluenza con il torrente Labioso

Relazione tecnica di stato di progetto



Comune di Pontinvrea

Relazione tecnica di stato di progetto

Novembre 2023

The expert in WATER ENVIRONMENTS

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Studio idrogeologico e idraulico del torrente Erro tra la località Badia e la confluenza con il torrente Labioso

Relazione tecnica di stato di progetto

Committente	Comune di Pontinvrea
Referente del Committente	egr. Camiciottoli Matteo



Vista da monte del ponte di Via Giovo

Project manager	Daniele Dolia
Quality supervisor	Davide Persi
Author	Jacopo Briano

Codice progetto - elaborato	22803988-01-00300
Data di approvazione	10/11/2023
Revisione	1.0
Classificazione	Open

DHI S.r.l. a socio unico• Via Bombrini 11/12• 16149 Genova• Italy•
Telefono: +39 010 84 81 220 • dhi-italia@dhigroup.com • www.dhigroup.com

INDICE

1 Premessa 1

2 Quadro conoscitivo e base dati 2

3 Interventi previsti e configurazioni di progetto 3

4 Implementazione dei modelli idraulici 4
4.1 Configurazione di sistemazione globale 6
4.1.1 Geometrie delle sezioni trasversali 7
4.1.2 Strutture implementate 10
4.1.3 Condizioni a contorno 12
4.1.4 Scabrezza idraulica 12
4.2 Configurazione di Lotto 1 13
4.2.1 Lotto 1 – modello monodimensionale 13
4.2.2 Lotto 1 – modello bidimensionale e accoppiamento modelli 14
4.3 Configurazione di Lotto 1 più Lotto 2 14
4.3.1 Lotto 1 più Lotto 2 – modello monodimensionale 14
4.3.2 Lotto 1 più Lotto 2 – modello bidimensionale e accoppiamento modelli 15

5 Risultati della modellazione 15
5.1 Assetto di sistemazione totale (Lotto 1+2+3) 15
5.2 Assetto di sistemazione di Lotto 1 18
5.3 Assetto di sistemazione di Lotto 1 più Lotto 2 24

6 Conclusioni 27

ALLEGATI

ALLEGATO A

Tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo

ALLEGATO B

Codice di calcolo MIKE by DHI MIKE Hydro River

ALLEGATO C

Codice di calcolo MIKE by DHI MIKE 21 HD

1 Premessa

La presente relazione tecnica fa riferimento all'insieme delle attività svolte da DHI S.r.l. nell'ambito dell'affidamento del servizio di consulenza denominato "Studio idrogeologico e idraulico, progetto di fattibilità tecnico ed economica delle opere di sistemazione idraulica lungo il t. Erro dalla località Badia fino a Valle della confluenza del t. Labioso" per ciò che concerne l'analisi idraulica dello stato di progetto, realizzato a partire dallo studio di stato attuale riportato nel documento "22803988-01-00200.pdf" e consegnato alla Committenza con lettera di trasmissione "Lett_280_23.pdf".

Lo studio di stato attuale ha perseguito come primo obiettivo l'individuazione della portata transitata nel corso dell'evento del 04/11/2021, risultata pari a circa 500 m^3/s a valle della confluenza con il rio del Giovo. Questo valore risulta analogo a quello indicato dal Dipartimento Ambiente e Protezione Civile di Regione Liguria – Settore Assetto del Territorio nel documento denominato "Evento alluvione del 04/10/2021 – Prima mappatura delle aree inondate in Comune di Pontinvrea (SV)". Questo documento conclude sottolineando che: *nelle more dell'aggiornamento dei relativi atti di pianificazione territoriale si ritiene che la portata da utilizzare come riferimento per la progettazione delle opere di arginatura e di sistemazione fluviale debba essere pari almeno alla portata stimata dell'evento del 4/10/2021 (500 m^3/s).*

In seconda battuta è stato riprodotto lo stesso evento nella configurazione geometrica di stato attuale che, a differenza di quanto rappresentato per la riproduzione dell'evento, ha visto ultimati i lavori di sistemazione delle sponde nel tratto a monte della SP 542 secondo quanto definito dall'intervento realizzato dal Comune di Pontinvrea denominato "Esecuzione di opere spondali a sostegno di Via Bigatti in somma urgenza a seguito degli eventi alluvionali del 04/10/2021 – Ordinanza n.44 del 02/11/2021" dell'ing. Alessandro Barbero, gennaio 2022.

I risultati della simulazione dell'evento del 2021, nell'assetto geometrico di stato attuale, mostrano come le criticità emerse in passato siano oggi ancora presenti e di simile entità a quelle occorse.

L'obiettivo principale delle attività dell'analisi idraulica di stato di progetto è dunque di supportare la progettazione per la messa in sicurezza del torrente Erro al fine di garantire la salvaguardia del centro abitato di Pontinvrea. Detta analisi è il risultato di un confronto congiunto con i progettisti del raggruppamento finalizzato a individuare, attraverso un processo iterativo di progettazione e modellazione idraulica, la configurazione definitiva del corso d'acqua.

In conformità a quanto indicato dallo studio di Regione Liguria, avvalorato e supportato dallo studio di dettaglio di stato attuale, in attesa dell'aggiornamento del Piano di Bacino con l'integrazione delle piogge più recenti, si è utilizzato, ai fini della progettazione delle necessarie sistemazioni fluviali, la portata al colmo e l'idrogramma dell'evento stesso.

Per far fronte alle criticità tecnico-economiche di una sistemazione idraulica definitiva, è stata prevista una suddivisione in lotti della stessa, definita in modo che la loro realizzazione non determini un aumento della pericolosità idraulica nelle aree non soggette a sistemazione.

Nel seguito della relazione vengono esplicitati nel dettaglio i dati utilizzati, le ipotesi adottate e le specifiche dei modelli implementati, nonché descritti e riportati i risultati ottenuti in termini sia di grandezze idrodinamiche in alveo sia di mappatura di tiranti e velocità.

2 Quadro conoscitivo e base dati

In questo Capitolo vengono riportate tutte le fonti di informazione consultate ed i dati utilizzati per lo svolgimento dello studio idraulico di progetto.

In questo contesto è stata allestita una piattaforma GIS che ha permesso di uniformare e catalogare tutti i dati territoriali disponibili e allo stesso tempo di visualizzare i risultati dello studio in modo efficace e dinamico. Il sistema di coordinate utilizzato è WGS 84 / UTM zone 32N (EPGS: 32632).

Le informazioni di base per la progettazione derivano da quelle elaborate durante lo studio di stato attuale, di cui alla relativa relazione (22802988-01-00200.pdf). Da tale studio è stato recepito il modello di stato attuale (che differisce da quello di assetto 2022 per le sistemazioni di somma urgenza a monte della SP 542), che è costituito da una componente monodimensionale (per quanto riguarda gli alvei del torrente Erro e dei suoi affluenti Giovo e Labioso) e da una bidimensionale (per il territorio allagabile limitrofo). Il modello, unitamente alla base cartografica che lo costituisce ed ai risultati delle simulazioni eseguite, costituisce quindi la base dati utilizzata per la progettazione.

Dal punto di vista della base cartografica, si ricorda che il modello è basato sul DTM fornito da Regione Liguria, realizzato a partire dal rilievo orto fotogrammetrico, condotto in giugno 2022, dell'intera area di studio. Detto DTM, utilizzato con risoluzione 0.5 m, è stato integrato dalle risultanze di rilievo dei manufatti (ponti, briglie) e delle opere di somma urgenza terminate dopo il giugno 2022, come da Capitolo 2 della relazione di stato attuale.

Per la definizione degli interventi di progetto, si è fatto riferimento alle grandezze idrauliche ottenute dalle simulazioni di stato attuale (tiranti, velocità, livelli in quota assoluta, mappe degli allagamenti). Si rimanda alla relazione di stato attuale ed ai relativi allegati per i dettagli.

Per quanto concerne le portate di progetto, è stata utilizzata la portata dell'evento 2021, così come ricostruito nello studio idrologico e idraulico di stato attuale condotto dagli scriventi, che ha confermato il valore al colmo di 500 m^3/s, così come riportato nella relazione tecnica redatta dal Dipartimento Ambiente e Protezione Civile di Regione Liguria – Settore Assetto del Territorio denominata "Evento alluvione del 04/10/2021 – Prima mappatura delle aree inondate in Comune di Pontinvrea (SV)". Si faccia riferimento al Capitolo 4 del presente documento per ulteriori dettagli.

3 Interventi previsti e configurazioni di progetto

La sistemazione idraulica del torrente Erro in Comune di Pontinvrea (SV), a fronte dell'evento occorso nell'ottobre 2021 di grande intensità e gravità per tutto l'abitato, richiede interventi numerosi e diffusi su gran parte dell'asta idraulica oggetto di studio. Particolare attenzione è stata rivolta ai ponti interferenti che, nel corso dell'evento, hanno ostacolato il deflusso della piena e sono stati in alcuni casi addirittura sormontati.

La progettazione è stata condotta secondo un metodo iterativo. La configurazione di progetto di primo tentativo, definita dal progettista, è stata integrata nella modellazione idraulica monodimensionale dagli scriventi, al fine di determinare l'efficacia degli interventi ipotizzati tramite l'analisi delle nuove grandezze idrodinamiche che ne derivano. Laddove la configurazione di primo tentativo non avesse prodotto i risultati previsti in termini di regolarità del deflusso e rispetto dei franchi di progetto, si è proceduto per successive iterazioni fino a raggiungere la configurazione di sistemazione dell'asta fluviale ottimale dal punto di vista idraulico e tecnico.

In generale, la sistemazione fluviale ha previsto l'abbattimento dei ponti esistenti, in alcuni casi senza ricostruzione, laddove fosse stata individuata la possibilità di raggiungere le aree servite dal ponte preesistente utilizzando quelli limitrofi. I ponti di cui è stata prevista la ricostruzione sono stati definiti a campata unica (senza pile in alveo) e con le spalle non interferenti con l'alveo sistemato, in accordo con le prescrizioni di normativa.

Le sistemazioni arginali sono state definite con scogliere ove possibile, in conformità con le direttive di carattere paesaggistico, ecologico e dell'ingegneria naturalistica. Laddove ciò non è stato possibile (nei pressi dei ponti da ricostruire), sono stati previsti muri in c.a. opportunamente fondati.

Le quote del fondo alveo sono state mantenute nei limiti del possibile simili a quelle di stato attuale, al fine di non modificare la situazione di equilibrio mediamente mantenuta dal corso d'acqua. L'intervento è stato limitato quindi alla regolarizzazione del fondo alveo in senso trasversale.

Di seguito sono descritti in maniera sintetica gli interventi previsti, da monte verso valle, secondo la numerazione di cui alle tavole di planimetria di progetto.

Si faccia riferimento alla relazione di progetto per una descrizione completa:

- intervento 1: realizzazione di scogliera in sponda sinistra in area rurale (pressi Via Ferriera di Alto);
- interventi 2, 3 e 4: allargamento di sezione e realizzazione di scogliere su ambo le sponde del torrente Erro, nei pressi di Via Bigatti (sede dell'intervento di somma urgenza) e della confluenza con il rio del Giovo. Il rio del Giovo è a sua volta interessato dalla sistemazione a scogliera nella sua parte terminale;
- interventi 5 e 6: demolizione del ponte della SP 542 sull'Erro e sostituzione con nuovo impalcato senza pile in alveo. Demolizione senza ricostruzione del ponte in muratura di Via Giovo. Allargamento di sezione e realizzazione di paratie verticali in c.a. su ambo le sponde;
- interventi 7, 8, 9 e 16: allargamento di sezione e realizzazione di scogliere nel tratto fluviale che scorre nell'abitato di Pontinvrea;
- interventi 10 e 11: demolizione del ponte di Via Pastorino, allargamento di sezione e sostituzione con nuovo impalcato. Allargamento di sezione e realizzazione di paratie verticali in c.a. su ambo le sponde;
- interventi 12 e 13: allargamento di sezione e realizzazione di scogliere su ambo le sponde, demolizione della briglia esistente;

- interventi 14 e 15: demolizione del ponte della SP 542 sul Labioso e sua ricostruzione a sezione più larga. Allargamento di sezione e realizzazione di scogliere in sponda destra a monte del ponte, in sponda sinistra a valle fino a proteggere le abitazioni di Via Acqui, civici 1 e 2;
- intervento 17: demolizione senza ricostruzione del ponte di Via Martini, allargamento di sezione in sinistra (monte e valle del ponte) senza realizzazione di scogliera.

Il modello idraulico monodimensionale adottato è relativo quindi alla configurazione di sistemazione globale del corso d'acqua e comprende tutti i progetti su elencati. Le caratteristiche di implementazione ed i risultati sono descritti rispettivamente nei Capitoli 4 e 5.

Data l'elevata estensione degli interventi da realizzarsi ed il relativo onere economico, è stata prevista una fase di studio idraulico ulteriore al fine di definire una lottizzazione razionale degli stessi, di modo che la realizzazione di ciascun lotto non aggravasse il rischio idraulico nelle zone non ancora protette dalle sistemazioni.

Tale studio è stato condotto con schema numerico accoppiato monodimensionale e bidimensionale, facendo affidamento sulle caratteristiche del modello di stato attuale come base, e modificando opportunamente lo schema monodimensionale nelle sezioni in cui sono previste le lavorazioni del lotto in oggetto.

In tal senso, sono stati definiti tre lotti totali, che comprendono i seguenti interventi, secondo la numerazione definita pocanzi:

- Lotto 1: sistemazione del tratto di monte, fino a valle del ponte di Via Giovo. Interventi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e una porzione dell'8, fino alla sezione 54.5. Inoltre, è previsto in questa fase l'intervento 17 di demolizione del ponte di Via Martini e allargamento, al fine di ridurre in maniera significativa l'effetto collo di bottiglia provocato dallo stesso;
- Lotto 2: sistemazione del tratto centrale dell'asta idraulica dell'Erro, nel tratto urbano, da valle del ponte di Via Giovo fino al ponte di Via Pastorino compreso. Gli interventi sono l'8, 9, 16, 10 e 11;
- Lotto 3: sistemazione del tratto vallivo rimanente sull'Erro e lavorazioni sul Labioso. Interventi 12, 13, 14 e 15. Il suo completamento corrisponde quindi alla sistemazione definitiva.

Dal punto di vista della modellazione sono state definite quindi due ulteriori configurazioni di analisi, relative alla configurazione di Lotto 1 e di Lotto 1 più Lotto 2.

Come per lo schema monodimensionale di progetto (relativo quindi, per chiarezza, alla somma dei tre lotti sopra definiti), anche per questi modelli accoppiati le caratteristiche ed i risultati sono descritti rispettivamente nei Capitoli 4 e 5.

Si noti che le geometrie di progetto, comprendenti le quote arginali e di intradosso degli attraversamenti, sono state determinate facendo riferimento al modello monodimensionale nella configurazione di sistemazione totale. Le configurazioni di Lotto 1 e Lotto 1 più Lotto 2 sono state condotte allo scopo di analizzare il rischio idraulico residuo, e non per determinare le geometrie di progetto, già definite appunto nella sistemazione globale.

4 Implementazione dei modelli idraulici

Nel presente Capitolo vengono descritte le attività inerenti all'implementazione della modellistica idraulica atta a simulare i fenomeni che occorrono nel corso dell'evento di piena, nelle configurazioni indicate al Capitolo 3.

A partire dai dati elencati nel Capitolo 2 e dalle configurazioni definite al Capitolo 3, sono stati allestiti tre modelli idraulici:

- modello monodimensionale di sistemazione globale (Lotto 1 + Lotto 2 + Lotto 3), eseguito in moto vario con portata costante (portata al colmo dell'evento 2021);
- modello accoppiato mono e bidimensionale di sistemazione parziale (Lotto 1), eseguito in moto vario con idrogramma di portata dell'evento 2021;
- modello accoppiato mono e bidimensionale di sistemazione parziale (Lotto 1 + Lotto 2), eseguito in moto vario con idrogramma di portata dell'evento 2021;

Nel caso dei modelli accoppiati di allagamento è stato allestito un modello idraulico basato appunto su uno schema integrato monodimensionale e bidimensionale. Definiti i limiti di interfaccia tra i due domini di calcolo, si è adottato:

- il modello idraulico MIKE HYDRO River per la schematizzazione geometrica dell'alveo inciso dei corsi d'acqua in termini di definizione delle sezioni trasversali, degli attraversamenti, della scabrezza idraulica, delle condizioni al contorno e degli altri parametri idrodinamici della modellazione monodimensionale;
- il modello bidimensionale MIKE 21 FM per la rappresentazione su maglia di calcolo triangolare dell'area di potenziale esondazione;
- il codice MIKE FLOOD per la definizione delle strutture di collegamento tra i due modelli MIKE HYDRO River e MIKE 21 FM.

Per la modellazione relativa alla sistemazione globale, non essendo prevista l'uscita di acqua dagli argini, è stato utilizzato il solo modello idraulico MIKE HYDRO River, secondo le stesse modalità di cui sopra. Si noti inoltre che in questa sede è stata adottata la portata al colmo costante, anziché l'idrogramma, per mera semplicità computazionale: i risultati dei due approcci sono infatti uguali.

Per quanto concerne l'approccio modellistico e le caratteristiche specifiche dei moduli su elencati, si faccia riferimento alla relazione di stato attuale. Si precisa che il sistema di coordinate di riferimento per l'intero schema modellistico è WGS 84 / UTM zone 32N (EPGS: 32632).

Come anticipato in Capitolo 2, la portata al colmo ed il relativo idrogramma di progetto sono stati derivati dallo studio di stato attuale (22802988-01-00200.pdf, Paragrafo 4.3).

In Figura 1 sono descritti gli idrogrammi adottati, che costituiscono la condizione di contorno di monte per il torrente Erro (curva "E1") ed i suoi due affluenti modellati, Labioso e Giovo (rispettivamente curve "L" e "G") Inoltre, è stato utilizzato un ulteriore idrogramma che descrive il contributo dell'interbacino (curva "E2") lungo l'asta di calcolo.

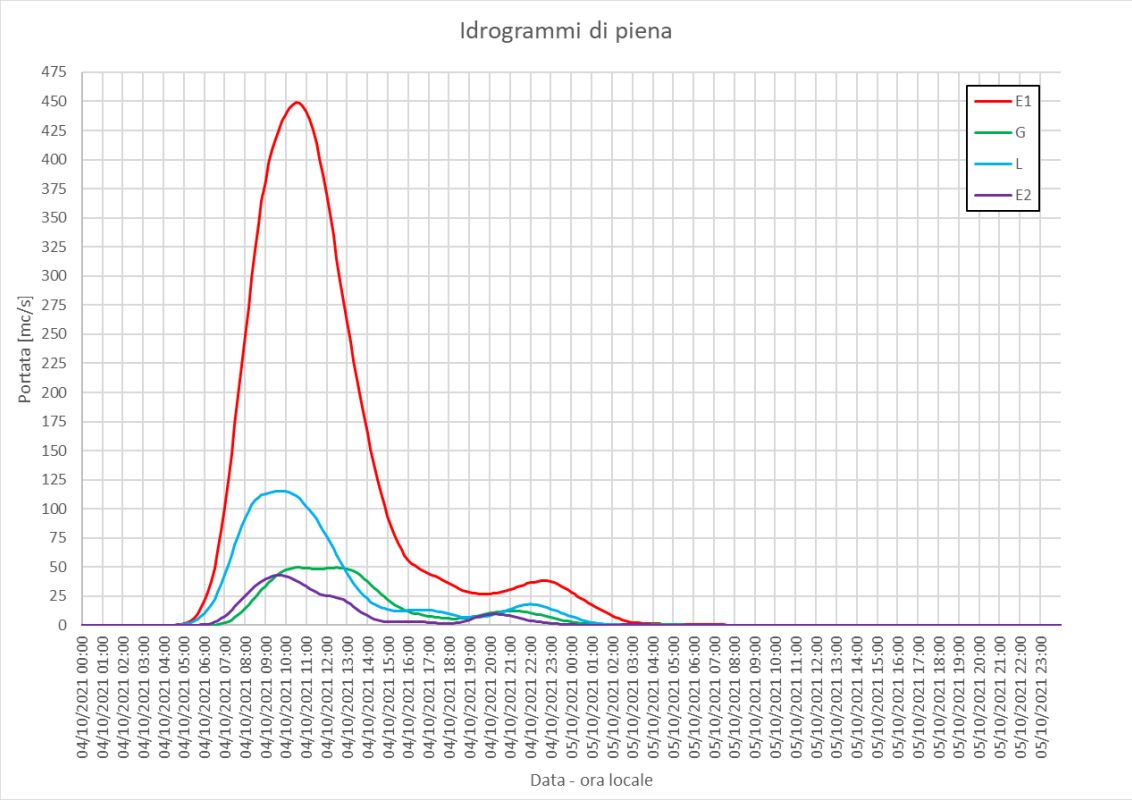


Figura 1 Idrogrammi di piena per i singoli bacini idrologici modellati

Gli idrogrammi sono stati utilizzati per le configurazioni di Lotto 1 e Lotto 1 più Lotto 2, in quanto si tratta di simulazioni di allagamento naturalmente tempo-varianti.

Per la configurazione di sistemazione globale, di riferimento per la progettazione, sono stati invece utilizzati i valori di portata al colmo degli idrogrammi, di seguito riportati in Tabella 1. La simulazione monodimensionale è stata infatti condotta con valori di portata costanti nel tempo.

Tabella 1 Portate al colmo dei diversi bacini idrologici per gli scenari d'evento modellati

Bacino idrologico	E1 Q [m³/s]	G Q [m³/s]	L Q [m³/s]	E2 Q [m³/s]
Configurazione di progetto	450	50	115	43

4.1 Configurazione di sistemazione globale

Di seguito si illustra in dettaglio la schematizzazione monodimensionale adottata. In aggiunta alla descrizione del setup modellistico, si specificano le scelte e le assunzioni che hanno portato a definire alcune caratteristiche specifiche del modello, oltre alle fonti da cui sono state tratte le informazioni associate ai vari aspetti dello stesso.

L'estensione dei tratti analizzati è la stessa dello studio di stato attuale. In particolare:

- il tratto del torrente Erro si estende, indicativamente, da poco a valle dall'attraversamento di Via Ferriera d'Alto fino a valle del civico 4 di Via Acqui, per un'estensione di circa 3.2 km;
- il tratto del rio del Giovo schematizzato con approccio monodimensionale si estende, indicativamente, da valle dall'attraversamento di Via Pianciliegia fino alla confluenza con l'Erro, per un'estensione di circa 160 m;

- il tratto del torrente Labioso schematizzato con approccio monodimensionale si estende, indicativamente, da poco a monte della pista Kart Vittoria fino alla confluenza con l'Erro, per un'estensione di circa 450 m.

Si ripota in Figura 2 l'estensione dei tratti idraulici monodimensionali schematizzati.

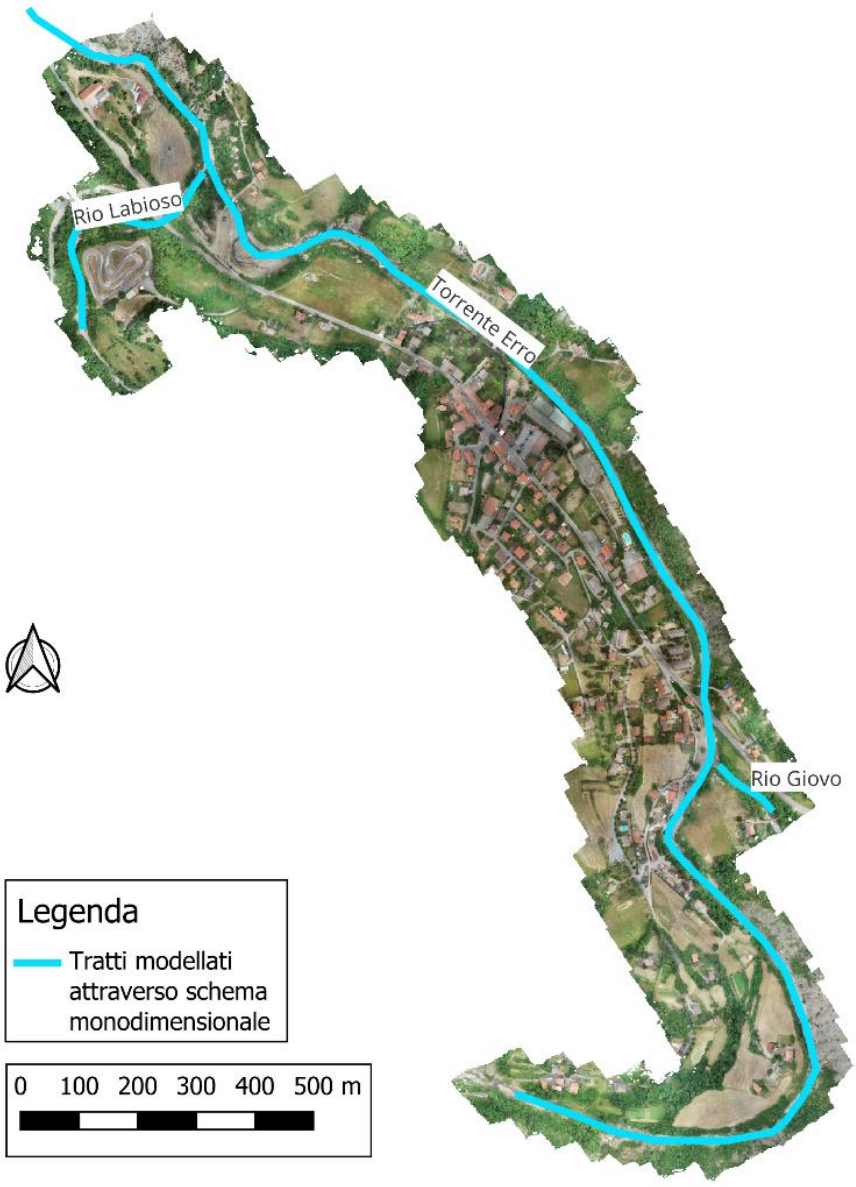


Figura 2 Estensione dei tratti schematizzati con il modello monodimensionale

4.1.1 Geometrie delle sezioni trasversali

La geometria di stato attuale ha costituito la base di partenza per la definizione della geometria di progetto, in termini di larghezze e forma d'alveo, quote di coronamento arginali, pendenze del fondo. Lo schema monodimensionale di stato attuale comprendeva 104 sezioni idrauliche per l'asta del torrente Erro, 5 per quella del rio del Giovo e 16 per quella del torrente Labioso.

Durante la progettazione la nomenclatura delle sezioni è rimasta invariata, mentre ne è stata variata la geometria. Poiché le geometrie di sistemazione sono più regolari, il numero di sezioni

di progetto effettivamente implementate è risultato più basso di quelle di stato attuale, pari a 74 sezioni in totale.



Figura 3 Traccia planimetrica delle sezioni idrauliche di progetto adottate nello studio

In Tabella 2, Tabella 3 e Tabella 4 si riportano tutte le sezioni idrauliche inserite nel modello rispettivamente per il torrente Erro, rio del Giovo e torrente Labioso. Le sezioni con desinenza "-

p" sono sezioni di progetto. Le restanti sono sezioni di stato attuale, inserite a modellazione ma non oggetto di lavorazioni.

Tabella 2 Tabella delle sezioni trasversali di progetto del tratto oggetto di modellazione in MIKE HYDRO del torrente Erro, con indicazione della nomenclatura della sezione e relativa progressiva idraulica

Progr. [m]	SEZ [-]	Progr. [m]	SEZ [-]	Progr. [m]	SEZ [-]
0.00	ERRO-088	1223.83	ERRO-063-p	2368.44	ERRO-028-p
92.62	ERRO-087	1243.01	ERRO-062-p	2498.72	ERRO-024-p
141.25	ERRO-086	1260.13	ERRO-061-p	2515.62	ERRO-023
178.31	ERRO-085-M	1298.65	ERRO-060-P-p	2531.35	ERRO-022
181.58	ERRO-085-V	1340.54	ERRO-058-P-p	2548.36	ERRO-021
235.86	ERRO-084	1352.48	ERRO-057-p	2572.41	ERRO-020
349.12	ERRO-083-p	1388.09	ERRO-056-p	2587.90	ERRO-019
460.96	ERRO-082-p	1454.03	ERRO_54.5-p	2626.80	ERRO-016-P-p
526.62	ERRO-081-p	1589.51	ERRO-051-p	2663.27	ERRO-014-p
596.91	ERRO-080-p	1749.31	ERRO-047-p	2702.05	ERRO-013-p
668.56	ERRO-079	1832.43	ERRO-045-p	2865.97	ERRO-009-p
710.84	ERRO-078	1913.93	ERRO-042-p	2953.12	ERRO-006-p
764.54	ERRO-077	1977.55	ERRO-041-p	2989.09	ERRO-005-p
811.97	ERRO-076	2009.17	ERRO-039.5-p	3034.16	ERRO-004
896.83	ERRO-075	2048.37	ERRO-037-P-p	3081.25	ERRO-003
961.20	ERRO-074-p	2065.47	ERRO-036.5-p	3114.49	ERRO-002
1068.99	ERRO-070-p	2163.06	ERRO-034-p	3142.78	ERRO-001
1107.22	ERRO-068-p	2266.88	ERRO-032-M-p		
1196.11	ERRO-064-p	2273.61	ERRO-032-V-p		

Tabella 3 Tabella delle sezioni trasversali del tratto oggetto di modellazione in MIKE HYDRO del rio del Giovo, con indicazione della nomenclatura della sezione e relativa progressiva idraulica

Progr. [m]	SEZ [-]
0.00	GIO-5
22.42	GIO-4
45.25	GIO-3
76.66	GIO-2
110.55	GIO-1-p

Tabella 4 Tabella delle sezioni trasversali del tratto oggetto di modellazione in MIKE HYDRO del torrente Labioso, con indicazione della nomenclatura della sezione e relativa progressiva idraulica

Progr.	SEZ	Progr.	SEZ

[m]	[-]
0.00	LAB-12
29.18	LAB-11
73.38	LAB-10
123.13	LAB-9
164.57	LAB-8
235.51	LAB-7
295.08	LAB-6-p

[m]	[-]
317.07	LAB-5-M-p
327.06	LAB-5-ponte-p
335.13	LAB-5-V-p
349.75	LAB-4-M-p
355.04	LAB-3-V-p
409.96	LAB-1-p
430.89	LAB-0.5-p

4.1.2 Strutture implementate

Nella configurazione di stato attuale, lungo il tratto fluviale indagato sono presenti cinque attraversamenti interferenti con il deflusso delle acque (pile e spalle in alveo, sezioni di deflusso inferiori rispetto all'alveo a monte e valle, quote di intradosso raggiunte dal livello di piena), oltre a due briglie. Detti elementi sono stati inseriti nel modello di stato attuale come strutture specifiche (*combined structure*, composte da tombinatura (*culvert*) e stramazzo (*weir*) per gli attraversamenti, e *weir* per le briglie), allo scopo di descriverne correttamente l'interazione con il corso d'acqua.

Nello stato di progetto, le strutture che tra queste avevano un effetto negativo dal punto di vista della sicurezza idraulica sono state riviste, tramite demolizione e - non in tutti i casi – ricostruzione, di modo da non risultare più interferenti. Si faccia riferimento anche al Capitolo 3 per la descrizione degli interventi.

Come conseguenza la rappresentazione di queste strutture nel modello idraulico di stato di progetto è quindi cambiata. Di seguito sono elencati i cambiamenti occorsi e la relativa nuova rappresentazione a modello.

Nello stato di progetto, lungo il torrente Erro procedendo da monte verso valle, sono presenti:

- la briglia posta a circa 220 m a valle dall'attraversamento di Via Ferriera d'Alto (rimasta invariata rispetto allo stato attuale);
- il ponte della strada provinciale 542 (rivisto a progetto senza pile e con spalle non interferenti con l'alveo)
- il ponte di Via Pastorino/Via Padre Giuseppe del Buono (rivisto a progetto con allargamento in destra e con spalle non interferenti con l'alveo)

Per i ponti di Via Giovo (ex sez-58-P) e Via dei Martini (ex sez 16-P), come anche per la briglia posta 220 m a valle del ponte di Via Pastorino/Via Padre Giuseppe del Buono. è stata prevista la demolizione senza ricostruzione.

Lungo il tratto modellato del rio del Giovo non sono presenti strutture, mentre lungo il torrente Labioso vi è il ponte della SP 542, per il quale è stato previsto l'allargamento in destra (demolizione e ricostruzione).

L'implementazione delle strutture nello stato di progetto ha riflettuto questa nuova configurazione. In particolare:

- per gli elementi di cui è stata prevista la demolizione senza ricostruzione, non è stato necessario implementare alcun tipo di struttura: sono state invece inserite sezioni trasversali aperte sostitutive;
- il ponte della SP 542 sull'Erro ed il ponte di Via Pastorino/ Via Padre Giuseppe del Buono, riprogettati come non interferenti, sono stati allo stesso modo descritti non come strutture ma come sezioni trasversali aperte, con quote arginali pari alla quota di intradosso;
- il ponte della SP 542 sul Labioso, anche se rivisto correttamente a progetto, si inserisce in un contesto solo parzialmente sistemato, per cui la sua presenza determina comunque un restringimento d'alveo. È stato allora modellato come tombinatura (culvert);
- la briglia posta a circa 220 m a valle dall'attraversamento di Via Ferriera d'Alto è stata modellata con una struttura weir, esattamente come nello stato attuale.

In Tabella 5 è riassunto quanto sopra.

Tabella 5 Tabella delle strutture esistenti nello stato attuale, relativi interventi di progetto eseguiti e conseguente modellazione adottata nello stato di progetto.

Descrizione	Corso d'acqua	Progr.	Intervento di progetto	Modellazione adottata a progetto
Briglia 220 m a valle dall'attraversamento di Via Ferriera d'Alto	t. Erro	179.5	nessuno	Weir (briglia), stesse caratteristiche di stato attuale
Ponte SP 542 sull'Erro	t. Erro	1298.65	Ricostruzione senza pile e con spalle non interferenti con l'alveo	Sezione trasversale aperta, con quote arginali pari all'intradosso
Ponte di via Giovo	t. Erro	1340.54	Demolizione senza ricostruzione	Sezione trasversale aperta, d'alveo sistemato
Ponte di Via Pastorino/Via Padre Giuseppe del Buono	t. Erro	2048.37	Ricostruzione con spalle non interferenti con l'alveo	Sezione trasversale aperta, con quote arginali pari all'intradosso
Briglia 220 m a valle del ponte di Via Pastorino/Via Padre Giuseppe del Buono	t. Erro	2266.88	Demolizione senza ricostruzione, riprofilazione fondo alveo	Sezione trasversale aperta, d'alveo sistemato
Ponte SP 542 sul Labioso	t. Labioso	327.02	Ricostruzione con allargamento e innalzamento quota di intradosso	Culvert (tombinatura)

In Tabella 6 e Tabella 7, infine, sono riassunti i manufatti inclusi nel modello di progetto, con le caratteristiche salienti, divisi in manufatti simulati come strutture e come sezioni trasversali aperte.

Tabella 6 Tabella delle sezioni trasversali delle strutture oggetto di modellazione in MIKE HYDRO, con indicazione della nomenclatura della sezione, relativa progressiva idraulica, corso d'acqua, intradosso ed estradosso (ponti) e quota sfioro (briglie)

Descrizione	Corso d'acqua	SEZ [-]	Progr. [-]	Intradosso [m s.l.m.]	Estradosso [m s.l.m.]	Quota sfioro [m s.l.m.]
Briglia a 220 m a valle dall'attraversamento di Via Ferriera d'Alto	t. Erro	ERRO-085-M	179.5	-	-	440.93
Ponte SP 542 sul Labioso	t. Labioso	LAB-5-P	327.02	420.44	421.87	-

Tabella 7 Tabella delle sezioni trasversali delle strutture modellate in MIKE HYDRO come sezioni aperte, con indicazione della nomenclatura della sezione, relativa progressiva idraulica, corso d'acqua, intradosso ed estradosso (ponti) e quota sfioro (briglie)

Descrizione	Corso d'acqua	SEZ [-]	Progr. [-]	Intradosso [m s.l.m.]	Estradosso [m s.l.m.]	Quota sfioro [m s.l.m.]
Ponte SP 542 sull'Erro	t. Erro	ERRO-060-P	1298.65	430.15	431.10	-
Ponte di Via Pastorino/Via Padre Giuseppe del Buono	t. Erro	ERRO-037-P	2048.37	425.47	426.54	-

4.1.3 Condizioni a contorno

Le condizioni al contorno di monte del torrente Erro, rio del Giovo e torrente Labioso derivano dall'adozione del valore di portata al colmo di cui al Capitolo 4, Tabella 1. In particolare:

- condizione a contorno di monte del torrente Erro: portata costante di 450 m^3/s;
- condizione a contorno di monte del rio del Giovo: portata costante di 50 m^3/s;
- condizione a contorno di monte del torrente Labioso: portata costante di 115 m^3/s;

Il contributo di portata rimanente, relativo all'interbacino compreso tra la confluenza Erro-Giovo e la sezione di chiusura del modello, calcolato in 43 m^3/s, è stato applicato come condizione al contorno di portata distribuita nel tratto di competenza.

La condizione di contorno di valle, infine, risulta impostata in prossimità dell'ultima sezione idraulica lungo il torrente Erro, dove è stata imposta una relazione Q/h calcolata a partire dalle portate di moto uniforme, come nello stato attuale.

4.1.4 Scabrezza idraulica

Per la stima del parametro si è fatto riferimento al documento dell'ex-Autorità di Bacino della Regione Liguria denominato "Raccomandazione N°7 - Definizione delle fasce di inondabilità e di riassetto fluviale" nella quale viene lo schema per la scelta del valore massimo del parametro di Gauckler-Strickler riportato in Figura 4. Inoltre, la definizione dei valori ha tenuto conto di quanto definito nel modello di stato attuale.

	Coefficiente di Gaugler-Strickler Ks [$m^{1/3}$ s^{-1}]	Coefficiente di Manning n [$m^{-1/3}$ s]
Tratti montani di corsi d'acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo	25-30	0,040-0,033
Corsi d'acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30-35	0,033-0,029
Tratti urbanizzati di corsi d'acqua naturali con argini cementati e/o platee in buono stato.	35-40	0,029-0,025
Corsi d'acqua con fondo ed argini totalmente cementati in ottimo stato ed assenza di manufatti (tubi, cavi, ecc…) o discontinuità interferenti con le acque.	40-45	0,025-0,022
Tombinature perfettamente lisciate e dotate a monte di dispositivi atti ad assicurare la trattenuta di trasporto solido di fondo ed in sospensione (briglie selettive, vasche di sedimentazione, ecc…)	50-55	0,022-0,018

Figura 4 Valori dei parametri di scabrezza proposti dalla Regione Liguria

Per tener conto dell'elevato trasporto solido che si verifica in corso d'evento e sulla base dei sopralluoghi eseguiti, sono stati attribuiti dei valori di scabrezza più cautelativi e diversificati a seconda dei tratti in esame come di seguito riportato:

- torrente Erro nei tratti non oggetto di interventi (localizzati a monte e valle del centro abitato): 25 $m^{1/3}s^{-1}$;
- torrente Erro nei tratti oggetto di interventi su una sola sponda: 30 $m^{1/3}s^{-1}$;
- torrente Erro nei tratti oggetto di interventi su ambo le sponde: 33 $m^{1/3}s^{-1}$;
- rio del Giovo nel tratto non oggetto di interventi: 27 $m^{1/3}s^{-1}$;
- rio del Giovo alla sezione di confluenza con l'Erro (oggetto di interventi su ambo le sponde): 33 $m^{1/3}s^{-1}$;
- torrente Labioso nel tratto non oggetto di interventi (tratto di monte): 27 $m^{1/3}s^{-1}$;
- torrente Labioso nei tratti oggetto di interventi: 30 $m^{1/3}s^{-1}$.

4.2 Configurazione di Lotto 1

Per quanto concerne la configurazione di Lotto 1, lo schema adottato è un modello accoppiato mono-bidimensionale, descritto nei paragrafi seguenti.

4.2.1 Lotto 1 – modello monodimensionale

Lo schema monodimensionale di Lotto 1 risulta definito dall'unione tra lo schema di stato attuale e quello di progetto nel tratto di competenza per il Lotto 1. In particolare, per il torrente Erro lo schema di progetto è stato adottato dalla sezione ERRO-088 alla sezione ERRO-054.5-p compresa. Inoltre, poiché l'intervento 17 è compreso nel Lotto 1, sono state integrate le sezioni di progetto ERRO-16-p ed ERRO-14-p, mentre sono state eliminate le sezioni di stato attuale dalla 17 alla 19. Su tutto il resto dell'asta dell'Erro sono state adottate le sezioni di stato attuale.

Per il rio del Giovo è stato adottato lo schema di stato di progetto, mentre per il torrente Labioso quello di stato attuale.

Le strutture implementate riflettono quanto espresso sopra, con il ponte della SP 542 sull'Erro modellato come sezione aperta con quote arginali poste all'intradosso, mentre i ponti di Via Giovo e Via dei Martini, demoliti, sono sostituiti da sezioni aperte. Al contrario, il ponte di Via Pastorino, il ponte della SP 542 sul Labioso e la briglia posta 200 m a valle del ponte di Via Pastorino sono modellati come strutture, allo stesso modo di quanto eseguito nel modello di stato attuale. Le scabrezze sono state modificate coerentemente con l'appartenenza di ogni tratto alle zone interessate dalla sistemazione fluviale o meno.

Le condizioni al contorno di monte e di valle sono rimaste invariate rispetto allo stato attuale.

4.2.2 Lotto 1 – modello bidimensionale e accoppiamento modelli

A differenza del modello monodimensionale, quello bidimensionale è stato mantenuto inalterato nel passaggio da stato attuale a stato di progetto, sia in termini di motore di calcolo (MIKE 21 FM), sia di dati in ingresso. Di conseguenza le caratteristiche geometriche ed altimetriche della batimetria, gli elementi "breakline" e "dike", i parametri della maglia di calcolo, i valori di scabrezza, i parametri di viscosità turbolenta, le condizioni al contorno ed il passo temporale di calcolo sono gli stessi dello studio precedente, cui si rimanda per ogni informazione a riguardo.

Allo stesso modo, l'accoppiamento tra i due modelli, che avviene attraverso il modulo MIKE FLOOD e prevede in questo caso la realizzazione degli elementi di collegamento definiti come "lateral link", è stato derivato dal modello di stato attuale senza modifiche, se non per quella intrinseca legata alle nuove quote di sormonto di detti lateral link, in quanto ora nel modello monodimensionale sono previste le quote arginali delle scogliere e muri di progetto, di cui al Lotto 1. In tal senso, lungo le sponde interessate dal Lotto 1 non è prevista esondazione, anche se i lateral link sono mantenuti attivi anche in tali zone.

4.3 Configurazione di Lotto 1 più Lotto 2

Per quanto concerne la configurazione di Lotto 1 più Lotto 2, lo schema adottato è un modello accoppiato mono-bidimensionale.

4.3.1 Lotto 1 più Lotto 2 – modello monodimensionale

Lo schema monodimensionale di Lotto 1 più Lotto 2 risulta dall'aggiornamento del modello di Lotto 1. Le sezioni da ERRO-054 a ERRO-036.5, di stato attuale nella configurazione di Lotto 1, sono state infatti sostituite con le relative sezioni di progetto.

Poiché le sezioni immediatamente a valle del ponte di Via Pastorino (ERRO-37-P-p) presentano una geometria notevolmente più stretta di quella di progetto a monte, nel Lotto 2 sono state previste lavorazioni di sbancamento in destra per allargare l'alveo in dette sezioni di valle (ERRO-034 ed ERRO-035). Questi sbancamenti risulteranno propedeutici alla messa in opera delle scogliere di cui al Lotto 3.

Per il rio del Giovo è stato adottato lo schema di stato di progetto, mentre per il torrente Labioso quello di stato attuale.

Le strutture implementate riflettono quanto espresso sopra, con i ponti della SP 542 sull'Erro e di Via Pastorino modellati come sezione aperta con quote arginali poste all'intradosso, mentre i ponti di Via Giovo e Via dei Martini, demoliti, sono sostituiti da sezioni aperte. Al contrario, il ponte della SP 542 sul Labioso e la briglia posta 200 m a valle del ponte di Via Pastorino sono modellati come strutture, allo stesso modo di quanto eseguito nel modello di stato attuale. Le

scabrezze sono state modificate coerentemente con l'appartenenza di ogni tratto alle zone interessate dalla sistemazione fluviale o meno.

Le condizioni al contorno di monte e di valle sono rimaste invariate rispetto allo stato attuale.

4.3.2 Lotto 1 più Lotto 2 – modello bidimensionale e accoppiamento modelli

A differenza del modello monodimensionale, quello bidimensionale è stato mantenuto inalterato nel passaggio da stato attuale a stato di progetto, sia in termini di motore di calcolo (MIKE 21 FM), sia di dati in ingresso. Di conseguenza le caratteristiche geometriche ed altimetriche della batimetria, gli elementi "breakline" e "dike", i parametri della maglia di calcolo, i valori di scabrezza, i parametri di viscosità turbolenta, le condizioni al contorno ed il passo temporale di calcolo sono gli stessi dello studio precedente, cui si rimanda per ogni informazione a riguardo.

Allo stesso modo, l'accoppiamento tra i due modelli, che avviene attraverso il modulo MIKE FLOOD e prevede in questo caso la realizzazione degli elementi di collegamento definiti come "lateral link", è stato derivato dal modello di stato attuale senza modifiche, se non per quella intrinseca legata alle nuove quote di sormonto di detti lateral link, in quanto ora nel modello monodimensionale sono previste le nuove quote arginali delle scogliere e muri di progetto, di cui al Lotto 1 e Lotto 2. In tal senso, lungo le sponde interessate dai Lotti 1 e 2 non è prevista esondazione, anche se i lateral link sono mantenuti attivi anche in tali zone.

5 Risultati della modellazione

Sulla base delle configurazioni di progetto e delle relative caratteristiche illustrate nei precedenti Capitoli, sono state condotte le simulazioni idrauliche relative agli scenari di Lotto 1, di Lotto1+2 e di sistemazione globale (Lotto1+2+3).

Nel Paragrafo 5.1 vengono illustrate le analisi condotte in solo regime monodimensionale relative alla sistemazione globale, quindi comprendente tutti e tre i lotti previsti.

Nel Paragrafo 5.2 vengono illustrate le analisi condotte con modello accoppiato 1D-2D relative alla sistemazione del Lotto 1, che contempla gli interventi n° 17 (demolizione del ponte di Via Martini ed allargamento) e n° 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 con parte dell'8 (sistemazione da monte fino a valle del ponte di Via Giovo).

Nel Paragrafo 5.3 vengono illustrate le analisi condotte con modello accoppiato 1D-2D relative alla sistemazione dei Lotti 1 e 2, che contemplano, in aggiunta a quelli del Lotto 1, gli interventi n° 8, 9, 16, 10 e 11 (proseguimento della sistemazione da valle del ponte di Via Giovo fino al ponte di Via Pastorino compreso).

5.1 Assetto di sistemazione totale (Lotto 1+2+3)

In questo paragrafo vengono illustrate le analisi condotte per la configurazione di progetto globale, che prevede il completamento di tutti e tre i lotti previsti. La simulazione è stata condotta nel solo regime monodimensionale in quanto la sistemazione stessa impedisce l'esondazione. Le geometrie di progetto e le condizioni al contorno adottate sono descritte al Paragrafo 4.1.

In Tabella 8 sono indicati i risultati della modellazione, per ogni sezione di calcolo, secondo la seguente nomenclatura:

- Progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;

- ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- Quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.l.m.] delle quote d'alveo;
- Argine sinistro e Argine destro: quote di coronamento arginale [m. s.l.m.];
- Y: tirante idrico in [m];
- PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
- V: velocità della corrente in [m/s];
- Fr: numero di Froude [-];
- H: valore del carico totale in [m s.l.m.];
- Franco sponda sinistra e destra: franco residuo rispetto alla quota arginale o di intradosso del ponte, in [m]

Si noti che i franchi in sponda destra e sinistra sono calcolati in tabella secondo le formulazioni di cui sotto, in accordo con le prescrizioni per i franchi di sicurezza desunte dal vigente Piano di Bacino e dalle NTC 2018, Paragrafo "5.1.2.3 – compatibilità idraulica" [dei ponti, ndr]. In particolare, per le sponde, la norma per bacini liguri individua il franco minimo rispetto al pelo libero con un valore compreso nel range 0.5 – 1.0 m, dove la scelta tra i due estremi ricade in valutazioni relative all'entità di trasporto solido e materiale flottante attesi durante l'evento di piena, in funzione quindi delle caratteristiche del bacino. Poiché l'Erro a Pontinvrea si trova in ambiente per lo più naturale, privo di sistemazioni a monte, si è scelto in via cautelativa il valore di 1.0 m. Di conseguenza si ha:

$$Franco\ su\ sponde = Quota\ argine - \max\ (Pelo\ libero + 1\ m\ ;\ Carico\ totale)$$

$$Franco\ per\ ponti = Quota\ intradosso - \max\ (Pelo\ libero + 1.5\ m\ ;\ Carico\ totale)$$

Stando a quanto indicato sopra, un valore maggiore di zero del franco idraulico è da ritenersi adeguato. Le sezioni in cui il valore è negativo sono sezioni di stato attuale in cui non è previsto a progetto alcun intervento. Si tratta in generale di sezioni in cui l'esondazione rimane estremamente localizzata oppure in cui il valore di sponda basso è funzionale alla modellazione (come nel caso della confluenza tra Erro e Labioso).

Si ricorda che le sezioni con desinenza "-p" sono quelle interessate dagli interventi di progetto.

Tabella 8 – Risultati della modellazione monodimensionale nella configurazione di sistemazione totale

Progr. [m]	SEZ [-]	Quota fondo [m s.l.m.]	Argine sinistro [m s.l.m.]	Argine destro [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]	Franco sponda sinistra [m]	Franco sponda destra [m]
0.00	ERRO-088	442.34	448.91	450.15	445.92	3.58	5.50	1.11	447.46	1.45	2.69
92.62	ERRO-087	440.71	443.03	445.37	444.64	3.93	4.95	0.95	445.88	-2.85	-0.51
141.25	ERRO-086	440.38	445.00	448.11	444.17	3.79	4.50	0.94	445.20	-0.20	2.91
178.31	ERRO-085-M	440.93	443.79	443.37	443.84	2.91	3.80	0.81	444.57	-1.05	-1.47
181.58	ERRO-085-V	437.65	443.68	443.44	441.78	4.13	5.40	0.68	443.27	0.41	0.17
235.86	ERRO-084	437.17	441.58	445.28	441.48	4.31	5.88	1.19	443.24	-1.66	2.04
349.12	ERRO-083-p	436.30	441.50	444.91	439.65	3.35	5.95	1.18	441.46	0.04	3.45
460.96	ERRO-082-p	434.30	439.35	442.75	438.03	3.73	5.00	0.74	439.31	0.05	3.44
526.62	ERRO-081-p	434.04	439.30	442.72	437.61	3.57	5.72	1.19	439.28	0.02	3.44
596.91	ERRO-080-p	431.92	437.77	442.70	436.49	4.57	4.93	0.93	437.72	0.05	4.98
668.56	ERRO-079	431.18	437.96	441.48	435.80	4.62	5.52	1.02	437.35	0.61	4.13
710.84	ERRO-078	430.43	437.28	442.21	435.32	4.89	5.33	0.99	436.77	0.51	5.44
764.54	ERRO-077	429.94	435.97	442.60	434.73	4.79	5.68	1.09	436.37	-0.40	6.23
811.97	ERRO-076	429.59	434.52	438.82	434.10	4.51	5.57	1.05	435.68	-1.16	3.14
896.83	ERRO-075	429.19	433.51	438.38	433.01	3.82	6.74	1.38	435.32	-1.81	3.06
961.20	ERRO-074-p	428.83	434.88	433.70	431.62	2.79	6.36	1.34	433.68	1.20	0.02
1068.99	ERRO-070-p	427.49	433.51	431.80	430.06	2.57	5.74	1.23	431.74	1.77	0.06

Progr. [m]	SEZ [-]	Quota fondo [m s.l.m.]	Argine sinistro [m s.l.m.]	Argine destro [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]	Franco sponda sinistra [m]	Franco sponda destra [m]
1107.22	ERRO-068-p	426.70	431.60	431.60	429.60	2.90	5.71	1.17	431.26	0.34	0.34
1196.11	ERRO-064-p	425.77	430.65	430.65	428.78	3.01	6.00	1.22	430.62	0.03	0.03
1223.83	ERRO-063-p	425.47	430.47	430.47	428.52	3.05	5.83	1.16	430.25	0.22	0.22
1243.01	ERRO-062-p	425.27	430.20	430.20	428.35	3.08	5.99	1.19	430.17	0.03	0.03
1260.13	ERRO-061-p	425.16	429.72	429.72	428.19	3.03	4.65	0.92	429.29	0.43	0.43
1298.65	ERRO-060-P-p	424.77	430.15	430.88	428.00	3.23	4.40	0.85	428.99	0.65	1.38
1340.54	ERRO-058-P-p	423.99	430.92	430.92	427.91	3.92	4.50	0.65	428.94	1.98	1.98
1352.48	ERRO-057-p	424.03	429.53	431.30	427.78	3.75	4.77	0.87	428.94	0.59	2.37
1388.09	ERRO-056-p	423.68	429.18	429.18	427.66	3.98	4.39	0.78	428.64	0.52	0.52
1454.03	ERRO_54.5-p	422.96	429.00	432.67	427.35	4.39	4.77	0.88	428.51	0.50	4.17
1589.51	ERRO-051-p	422.53	428.06	430.33	426.53	4.00	5.48	1.06	428.06	0.00	2.27
1749.31	ERRO-047-p	421.16	426.67	428.53	425.14	3.98	5.19	0.98	426.51	0.16	2.02
1832.43	ERRO-045-p	420.76	426.10	429.55	424.51	3.75	5.57	1.05	426.09	0.01	3.46
1913.93	ERRO-042-p	420.67	425.41	428.50	423.82	3.15	5.58	1.10	425.41	0.00	3.09
1977.55	ERRO-041-p	420.29	425.06	424.75	423.32	3.03	5.26	1.05	424.73	0.33	0.02
2009.17	ERRO-039.5-p	420.12	424.60	425.20	423.09	2.97	5.43	1.09	424.59	0.01	0.61
2048.37	ERRO-037-P-p	419.70	425.47	425.47	422.78	3.08	5.12	1.01	424.12	1.19	1.19
2065.47	ERRO-036.5-p	419.49	424.16	424.16	422.67	3.18	5.03	0.98	423.96	0.20	0.20
2163.06	ERRO-034-p	419.00	423.50	423.50	422.06	3.06	5.21	1.03	423.44	0.06	0.06
2266.88	ERRO-032-M-p	418.45	423.30	422.75	421.32	2.87	6.15	1.15	423.25	0.05	-0.50
2273.61	ERRO-032-V-p	418.45	423.30	423.29	421.26	2.81	6.21	1.28	423.22	0.08	0.07
2368.44	ERRO-028-p	417.13	421.50	425.17	420.08	2.94	4.52	0.91	421.12	0.38	4.05
2498.72	ERRO-024-p	416.87	420.60	420.31	419.26	2.39	5.00	0.86	420.53	0.07	-0.22
2515.62	ERRO-023	416.85	420.68	420.24	419.15	2.30	5.13	1.17	420.49	0.19	-0.25
2531.35	ERRO-022	416.55	420.62	419.93	418.97	2.42	4.63	1.03	420.06	0.56	-0.13
2548.36	ERRO-021	416.06	420.09	419.32	418.82	2.76	4.92	0.97	420.05	0.04	-0.73
2572.41	ERRO-020	415.09	419.52	419.20	418.62	3.53	5.27	1.00	420.04	-0.52	-0.84
2587.90	ERRO-019	414.97	419.59	419.95	418.51	3.53	5.21	1.00	419.89	-0.30	0.06
2626.80	ERRO-016-P-p	414.49	419.65	420.54	418.21	3.72	5.30	0.92	419.64	0.01	0.90
2663.27	ERRO-014-p	414.11	416.47	422.30	417.97	3.85	5.73	1.10	419.64	-3.17	2.66
2702.05	ERRO-013-p	413.12	419.40	421.91	417.62	4.50	5.89	1.08	419.39	0.01	2.52
2865.97	ERRO-009-p	412.46	417.80	419.73	416.17	3.71	5.54	1.08	417.73	0.07	2.00
2953.12	ERRO-006-p	410.40	416.80	421.14	415.42	5.02	5.20	0.80	416.80	0.00	4.34
2989.09	ERRO-005-p	410.35	416.80	421.75	415.21	4.86	5.50	0.95	416.75	0.05	5.00
3034.16	ERRO-004	410.49	417.51	421.11	414.91	4.42	5.45	1.04	416.42	1.09	4.69
3081.25	ERRO-003	409.88	415.61	416.12	414.41	4.53	5.61	1.17	416.01	-0.40	0.11
3114.49	ERRO-002	408.93	415.05	414.43	413.98	5.05	5.30	0.90	415.41	-0.36	-0.98
3142.78	ERRO-001	408.93	414.53	415.87	413.77	4.83	5.60	0.99	415.36	-0.83	0.51
0.00	GIO-5	427.34	432.39	433.10	429.28	1.94	2.75	0.98	429.67	2.11	2.82
22.42	GIO-4	427.23	432.42	432.37	428.99	1.76	2.46	0.82	429.30	2.43	2.38
45.25	GIO-3	427.19	432.00	432.26	428.81	1.62	2.55	0.76	429.14	2.19	2.45
76.66	GIO-2	426.63	430.44	432.13	428.60	1.97	2.65	0.82	428.96	0.84	2.53
110.55	GIO-1-p	425.62	430.47	430.47	428.52	2.90	1.63	0.37	428.65	0.95	0.95
0.00	LAB-12	423.43	429.99	425.45	425.23	1.80	4.89	1.38	426.45	3.54	-1.00
29.18	LAB-11	422.42	429.40	424.30	424.60	2.18	3.80	0.95	425.33	3.80	-1.30
73.38	LAB-10	421.84	429.00	423.84	424.08	2.24	4.89	1.26	425.30	3.70	-1.46
123.13	LAB-9	420.73	428.44	423.42	423.18	2.45	4.65	1.35	424.29	4.15	-0.87
164.57	LAB-8	420.49	428.03	423.19	422.26	1.77	4.54	1.56	423.31	4.72	-0.12
235.51	LAB-7	418.61	425.43	422.63	420.13	1.52	3.64	1.27	420.80	4.30	1.50
295.08	LAB-6-p	417.01	422.74	422.50	419.00	1.99	3.09	0.75	419.49	2.74	2.50
317.07	LAB-5-M-p	416.40	421.27	421.90	419.04	2.64	2.02	0.43	419.25	1.23	1.86
327.06	LAB-5-P-p	416.40	421.00	421.00	419.04	2.64	4.00	1.00	419.25	0.46	0.46
335.13	LAB-5-V-p	416.42	420.00	421.37	418.16	1.73	4.00	1.00	418.97	0.85	2.22
349.75	LAB-4-M-p	416.54	419.92	418.40	418.00	1.46	4.32	1.22	418.96	0.91	-0.60
355.04	LAB-3-V-p	416.16	419.89	417.88	417.93	1.77	3.55	0.95	418.57	0.96	-1.05
409.96	LAB-1-p	414.27	419.57	415.70	417.57	3.30	2.11	0.42	417.79	1.01	-2.87
430.89	LAB-0.5-p	414.25	419.45	414.35	417.62	3.37	1.60	0.30	417.75	0.83	-4.27

I risultati della simulazione idraulica evidenziano come la sistemazione prevista a progetto consenta di migliorare notevolmente il deflusso della piena, permettendone il contenimento

entro la nuova conformazione d'alveo, che ha visto un allargamento generalizzato a circa 30-35 m.

La pendenza dell'alveo è stata mantenuta sostanzialmente inalterata e pari all'1%, andando a produrre numeri di Froude intorno al valore di 1 lungo tutta l'asta. Si instaura quindi una corrente tendenzialmente critica, che esibisce il valor minimo di energia totale possibile.

Dall'analisi delle grandezze idrodinamiche elencate, si possono evincere le seguenti considerazioni:

- i tiranti in alveo presentano valori compresi tra i 3 ed i 5 m lungo tutta l'asta idraulica dell'Erro, mentre sui rii affluenti si hanno valori più contenuti a monte, mentre alla confluenza sono guidati dal rigurgito dell'Erro;
- le velocità risultano mediamente elevate su tutta l'asta, a causa della pendenza media dell'alveo pari all'1 %. Si registrano valori generalmente compresi tra 4 e 6 m/s sull'Erro e sul Labioso di monte, mentre sul Giovo e sul Labioso di valle i valori scendono a 2 -3 m/s.

Per gli attraversamenti, si registrano franchi più che adeguati, come si evince dalla tabella. L'allargamento dell'alveo e l'eliminazione delle pile e/o spalle interferenti permettono di poter mantenere gli attraversamenti con le stesse quote di intradosso attuali, stante il notevole miglioramento delle condizioni di deflusso ottenute.

5.2 Assetto di sistemazione di Lotto 1

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati della modellazione idraulica relativa alla configurazione di Lotto 1. La simulazione è stata condotta nello schema accoppiato mono-bidimensionale, allo scopo di indagare il rischio idraulico residuo al completamento del Lotto 1.

Geometrie e condizioni al contorno sono descritte al Paragrafo 4.2.

Relativamente alla configurazione di progetto di Lotto 1, di seguito si riportano in Figura 5 e Figura 6 la mappa dei massimi tiranti idrici determinati, mentre in Figura 7 e Figura 8 la mappa delle velocità massime occorse.

A titolo di confronto, in coda al paragrafo, si riportano in Figura 9, Figura 10, Figura 11 e Figura 12 le mappe dei massimi tiranti e velocità determinati nella simulazione di stato attuale.

Si rimanda all'Allegato A.1.2 per ciò che concerne le grandezze idrodinamiche in alveo derivanti dalla simulazione dell'evento.

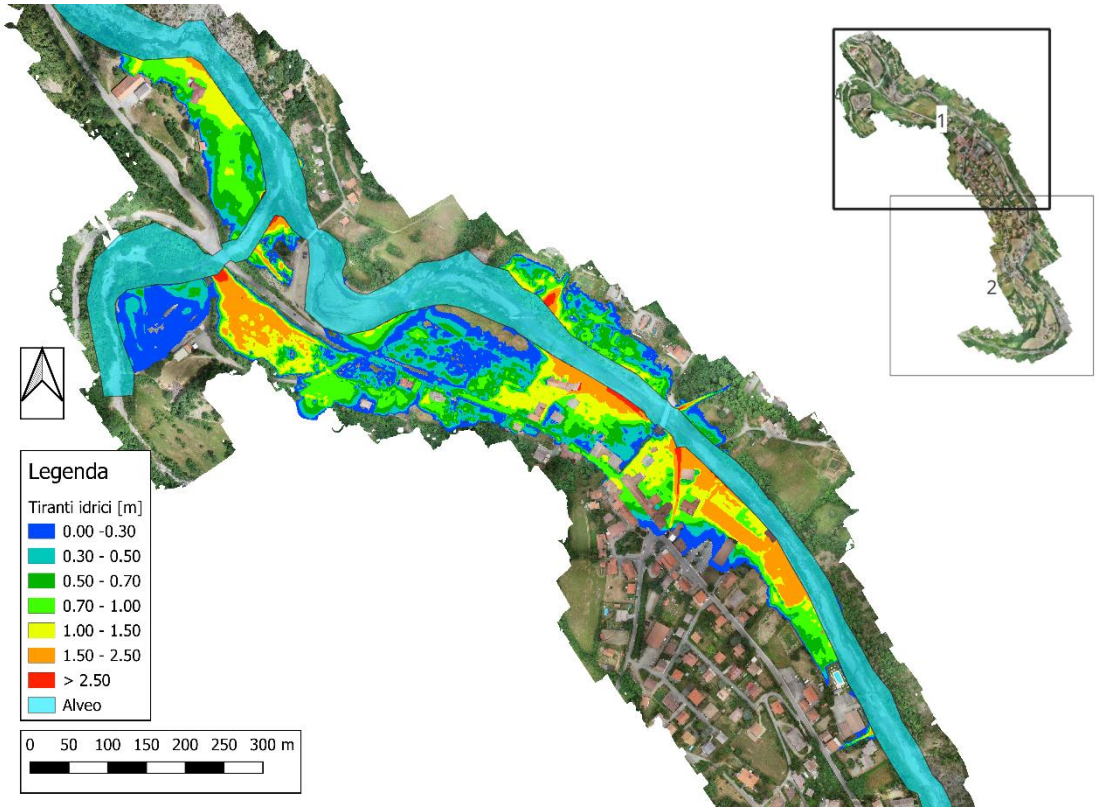


Figura 5 Configurazione di stato di progetto di Lotto 1 – mappa dei massimi tiranti idrici – Squadro 1

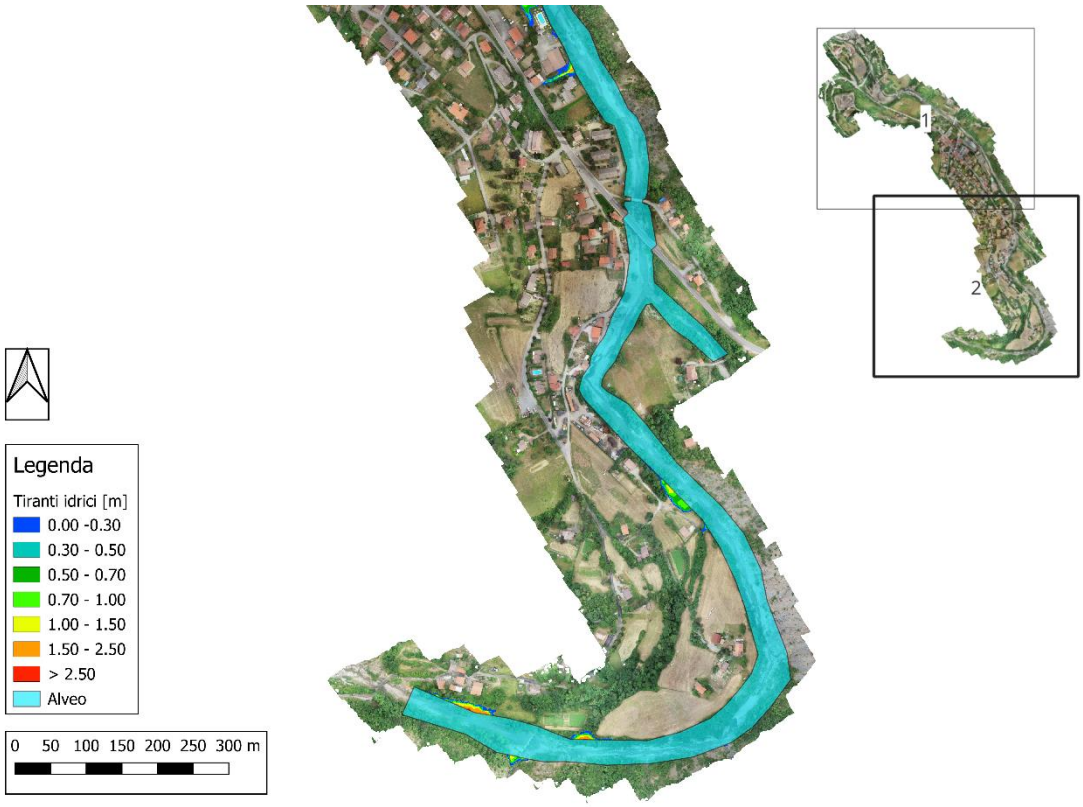


Figura 6 Configurazione di stato di progetto di Lotto 1 – mappa dei massimi tiranti idrici – Squadro 2

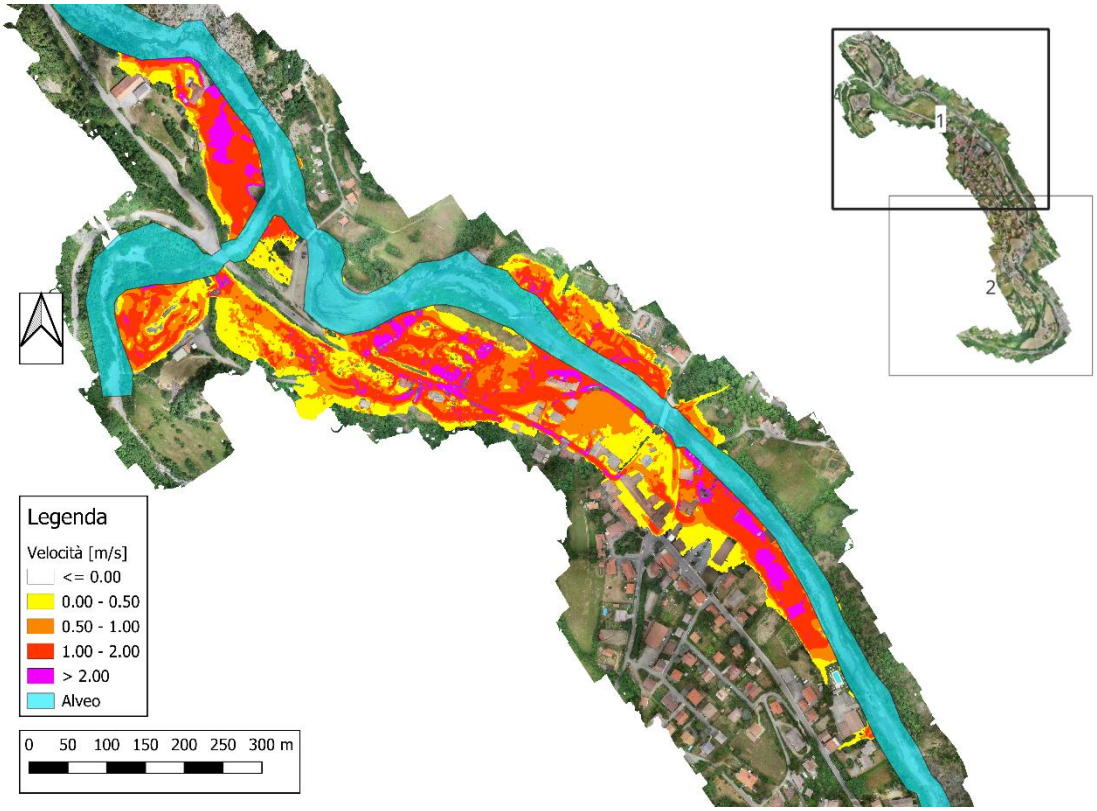


Figura 7 Configurazione di stato di progetto di Lotto 1 – mappa delle velocità massime – Squadro 1

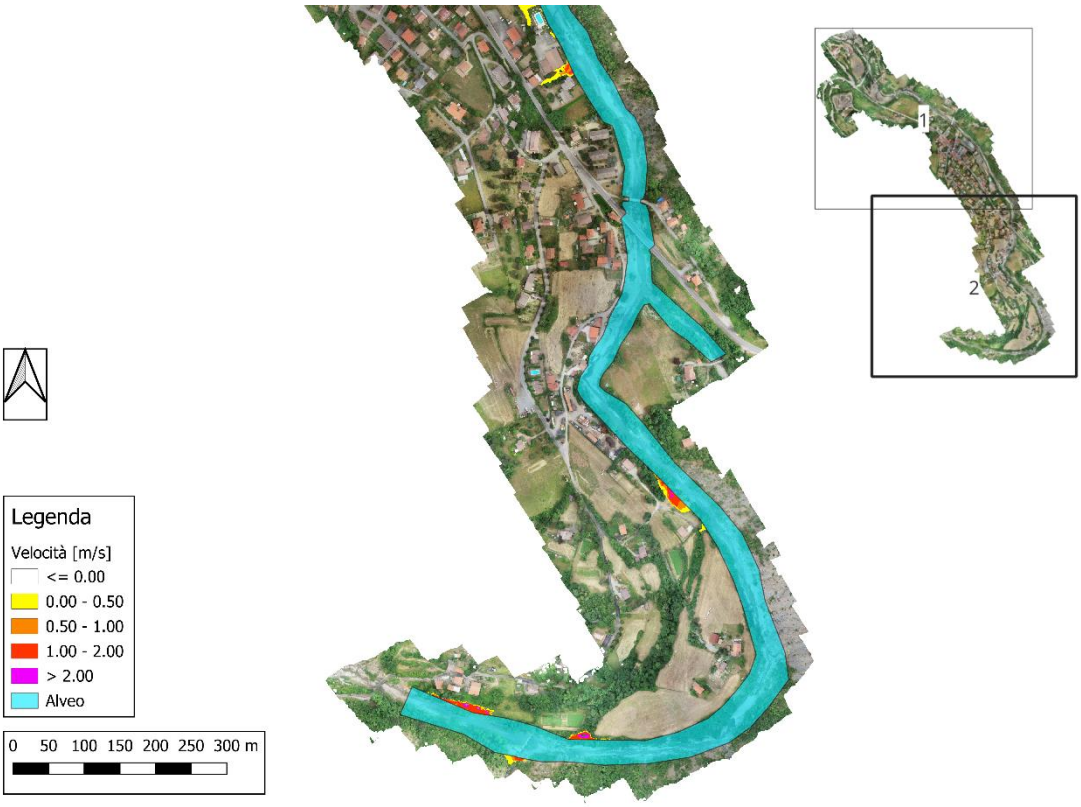


Figura 8 Configurazione di stato di progetto di Lotto 1 – mappa delle velocità massime – Squadro 2

Dall'analisi della simulazione idraulica emerge l'assenza di allagamenti nel tratto di monte (squadro 2), interessato dalle opere di cui al Lotto 1.

L'insieme dei lavori di demolizione dei ponti della SP 542 e del ponte di Via Giovo, con ricostruzione del solo ponte della SP 542, unitamente all'allargamento generale dell'alveo ed alla realizzazione di difese arginali (scogliere e muri) permette un deflusso delle acque esclusivamente in alveo, con la completa esclusione delle esondazioni all'altezza di Via Bigatti. Questo costituisce un miglioramento significativo per la riduzione del rischio idraulico, poiché nella configurazione di stato attuale, soprattutto a causa del restringimento creato dai due ponti, i tiranti si alzavano fino a sormontare il ponte della SP 542 ed a scorrere fuori alveo all'altezza della Strada Provinciale stessa, allagando una considerevole porzione dell'abitato di Pontinvrea, con tiranti compresi tra 0.5 e 1 m e velocità fino a 3 m/s. La zona di Via Bigatti si trovava esposta a rischi ancora maggiori, con tiranti fino a 3 m e velocità pari a circa 2 m/s.

La realizzazione della scogliera in sinistra a valle dell'ex ponte di Via Giovo permette di proteggere inoltre le tre palazzine adiacenti. Le condizioni dell'alveo di stato attuale a valle di queste sistemazioni sono tali per cui per un centinaio di metri non si hanno zone di esondazione.

Tornando a monte, si osserva inoltre come la scogliera, realizzata nei pressi di Via Ferriera d'Alto tra le sezioni da ERRO-83 a ERRO-80, eviti l'instaurarsi di un canale di deflusso in zone coltive, andando ad isolare le abitazioni ivi presenti. Le esondazioni localizzate che si registrano nelle vicinanze, sempre in sponda sinistra, sono legate a irregolarità dell'alveo in punti in cui non sono stati previsti interventi.

A valle delle aree interessate dai lavori di cui al Lotto 1, si registrano naturalmente esondazioni diffuse, sulla falsa riga di quanto avviene nello stato attuale, senza alcun aggravio delle condizioni di pericolosità dovute alla maggior portata inalveata a monte.

Dal confronto tra le mappe di Lotto 1 e di stato attuale, infatti, emerge che:

- la SP 542 nel tratto urbano non viene interessata dagli allagamenti, come anche le abitazioni adiacenti, fino all'altezza della piscina comunale, per cui si ottiene una significativa riduzione delle aree allagate;
- poiché gran parte delle acque esondate da monte nella configurazione di stato attuale rientravano in alveo prima della piscina comunale, le caratteristiche di tiranti e velocità nelle aree allagate a valle (campi sportivi, centro urbano, campi a valle, confluenza con il Labioso) risultano del tutto simili a quello dello stato attuale, con variazioni del tutto trascurabili (< 1 cm);
- la demolizione del ponte di Via dei Martini, insieme all'allargamento d'alveo in sinistra, determinano l'eliminazione di un collo di bottiglia che ha l'effetto di diminuire sensibilmente le caratteristiche dell'allagamento nelle aree limitrofe, e soprattutto di permettere un deflusso migliore delle acque in alveo, unitamente ad una diminuzione delle velocità da 6 a 4 m/s.

Si può quindi affermare che la configurazione di Lotto 1 protegge efficacemente il tessuto urbano nelle zone direttamente protette dalle opere, mentre a valle non produce peggioramenti del rischio idraulico, in quanto i risultati della simulazione risultano del tutto comparabili a quelli della simulazione di stato attuale. Si registrano inoltre sensibili miglioramenti nella zona della confluenza con il Labioso, dove però i vantaggi della demolizione del ponte di Via dei Martini sono, in questa fase di Lotto 1, relativi più alle condizioni di deflusso in alveo, che non all'entità degli allagamenti (determinati soprattutto da monte).

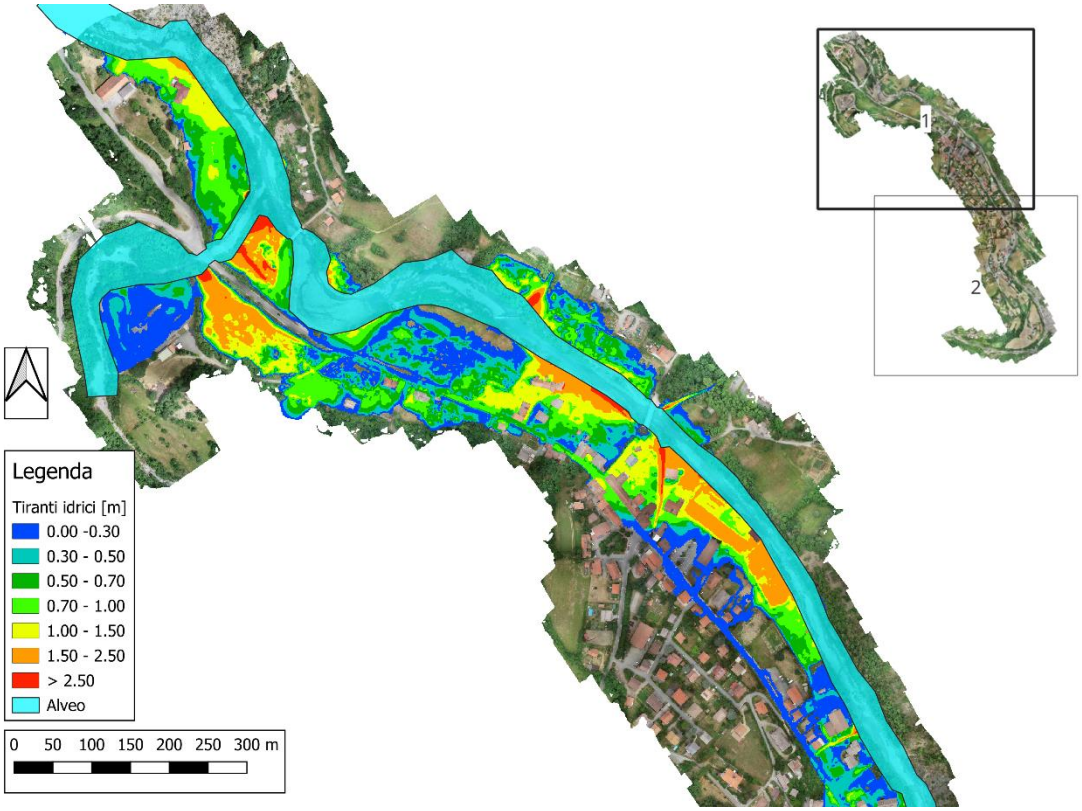


Figura 9 Evento del 04/10/2021 nell'assetto geometrico di stato attuale – mappa dei massimi tiranti idrici – Squadro 1

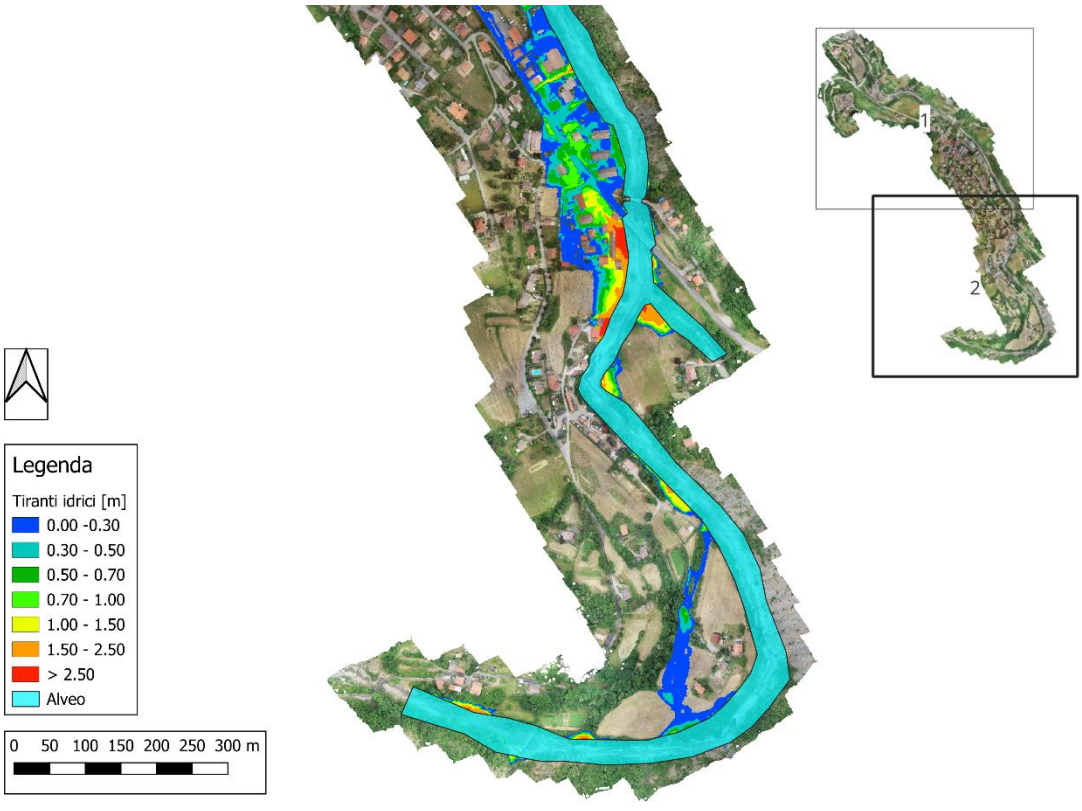


Figura 10 Evento del 04/10/2021 nell'assetto geometrico di stato attuale – mappa dei massimi tiranti idrici – Squadro 2

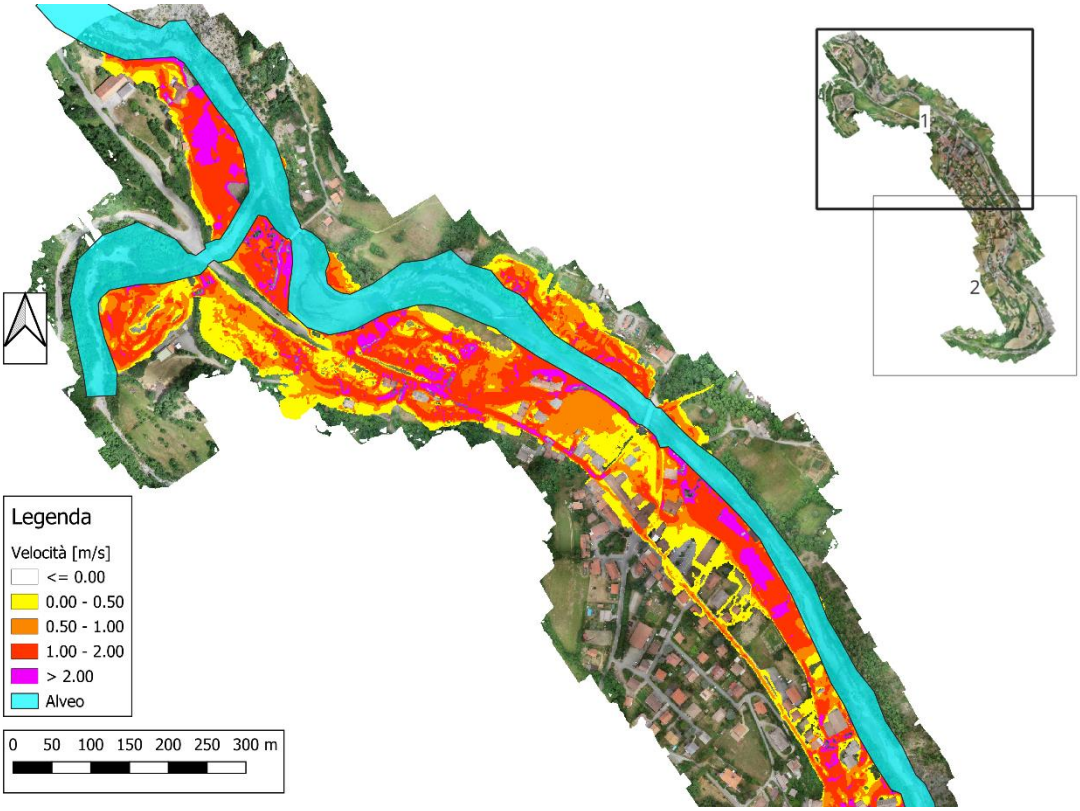


Figura 11 Evento del 04/10/2021 nell'assetto geometrico di stato attuale – mappa delle velocità massime – Squadro 1

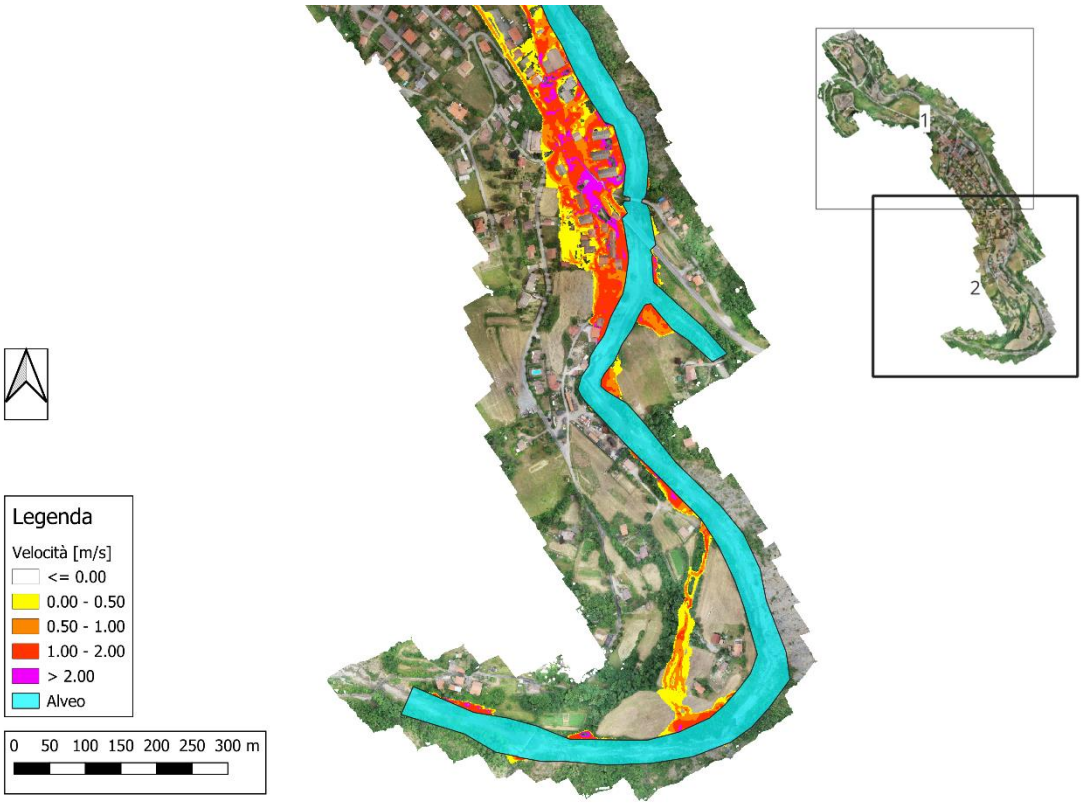


Figura 12 Evento del 04/10/2021 nell'assetto geometrico di stato attuale – mappa delle velocità massime – Squadro 2

5.3 Assetto di sistemazione di Lotto 1 più Lotto 2

In questo paragrafo vengono illustrati i risultati della modellazione idraulica relativa alla configurazione di Lotto 1 e Lotto 2. La simulazione è stata condotta nello schema accoppiato mono-bidimensionale, allo scopo di indagare il rischio idraulico residuo al completamento dei primi due lotti (su tre totali previsti).

Geometrie e condizioni al contorno sono descritte al Paragrafo 4.3.

Relativamente alla configurazione di progetto di Lotto 1 e 2, di seguito si riportano in Figura 13 e Figura 14 la mappa dei massimi tiranti idrici determinati, mentre in Figura 15 e Figura 16 la mappa delle velocità massime occorse.

Per il confronto con lo stato attuale, si faccia riferimento alle relative mappe dei massimi tiranti e velocità riportate in Figura 9, Figura 10, Figura 11 e Figura 12.

Si rimanda all'Allegato A.1.3 per ciò che concerne le grandezze idrodinamiche in alveo derivanti dalla simulazione dell'evento.

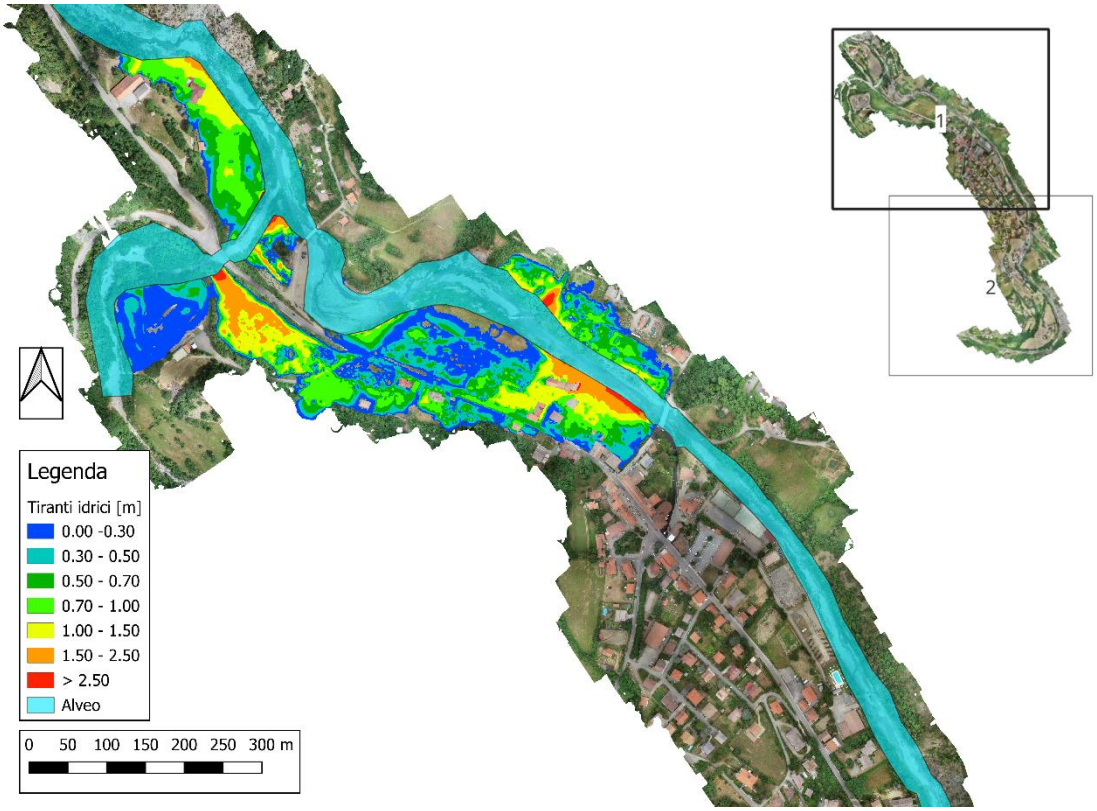


Figura 13 Configurazione di stato di progetto di Lotto 1 più Lotto 2 – mappa dei massimi tiranti idrici – Squadro 1

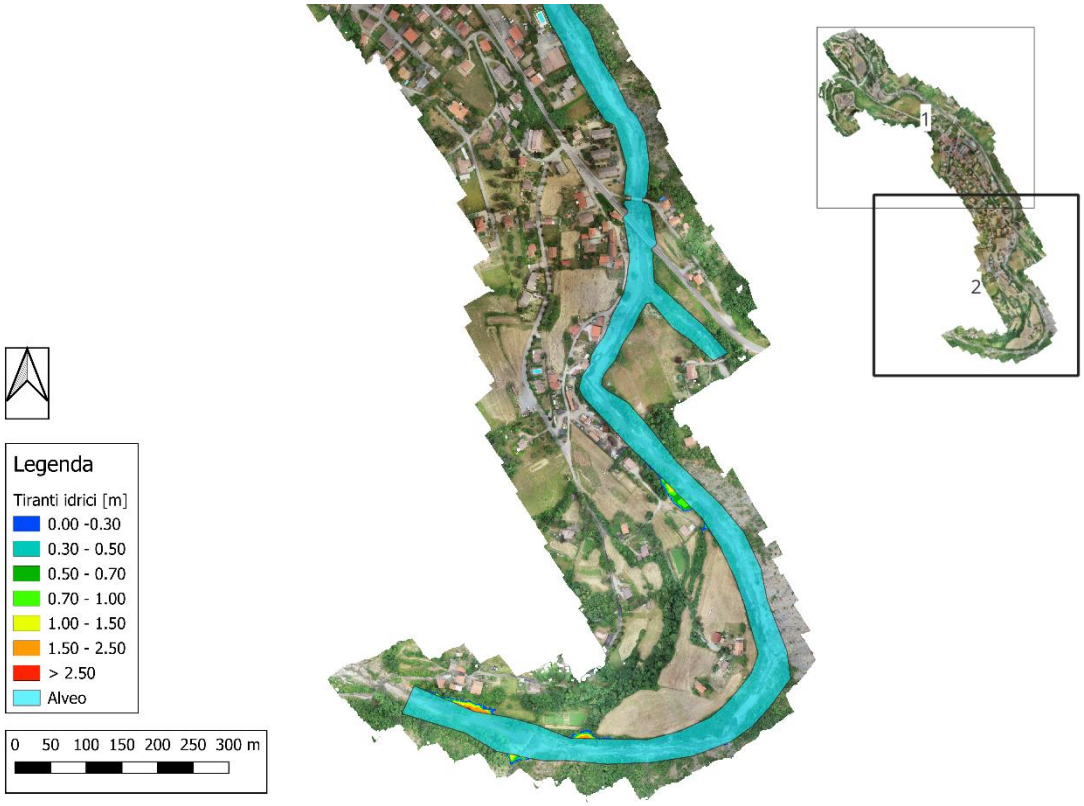


Figura 14 Configurazione di stato di progetto di Lotto 1 più Lotto 2 – mappa dei massimi tiranti idrici – Squadro 2

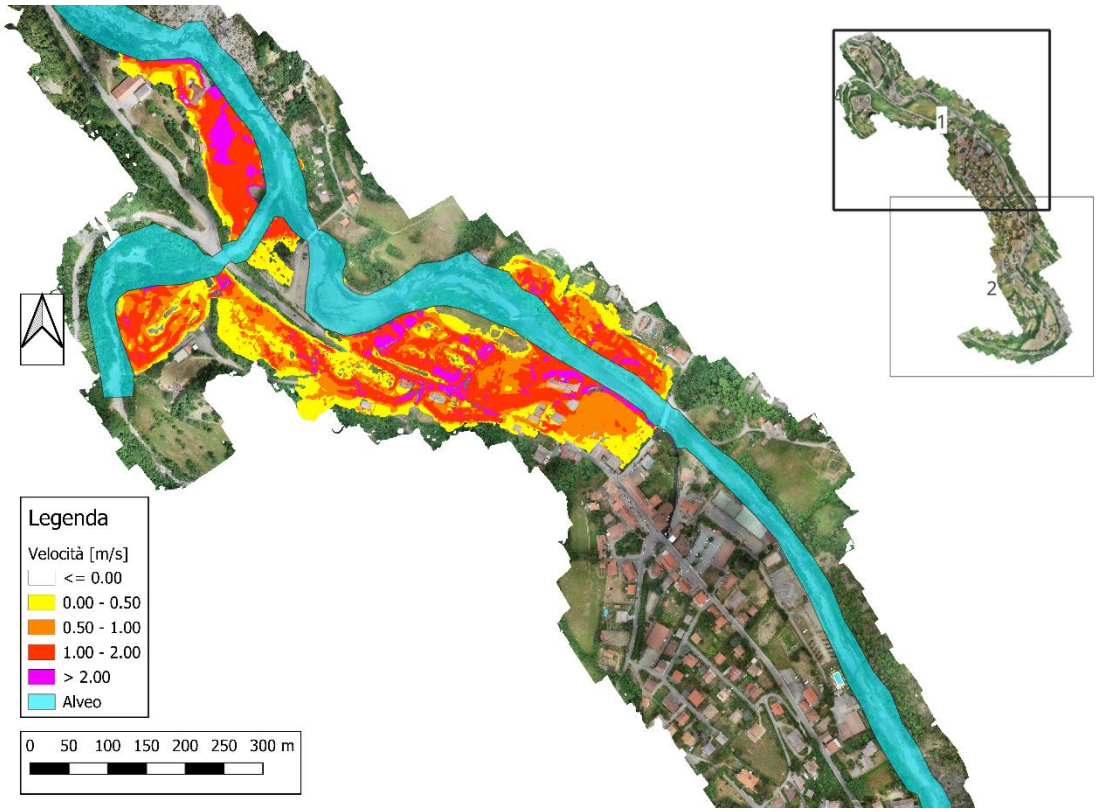


Figura 15 Configurazione di stato di progetto di Lotto 1 più Lotto 2 – mappa delle velocità massime – Squadro 1

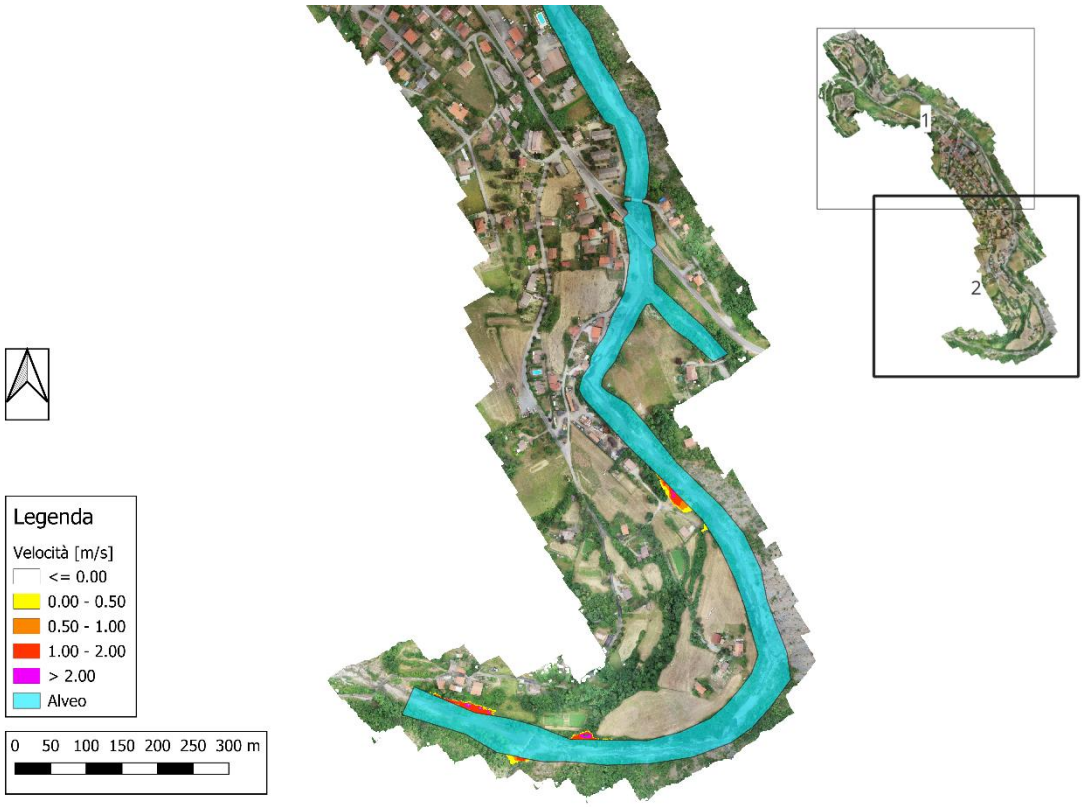


Figura 16 Configurazione di stato di progetto di Lotto 1 più Lotto 2 – mappa delle velocità massime – Squadro 2

L'esecuzione degli interventi del Lotto 2, unitamente a quelli già realizzati nel Lotto 1, permette di mettere in sicurezza la maggior parte dell'abitato di Pontinvrea. Dall'analisi delle mappe emerge infatti che gli allagamenti risultano concentrati a valle del ponte di Via Pastorino. In tal senso, l'esecuzione del Lotto 2 permette di salvaguardare in destra Via Cascinetta, in sinistra la zona dei campi sportivi e la parte centrale dell'abitato di Pontinvrea, comprese le zone dell'incrocio con la strada per Montenotte e Via Pastorino, mentre risultano ancora vulnerabili le abitazioni di Via Padre Giuseppe del Buono, sita in destra idraulica, e di Via Case Sottane e Via Cavallero (già SP 542), poste in sinistra idraulica. Più a valle, rimangono esposte ad allagamento le zone prative, la SP 542, la pista da kart, le abitazioni di Via Acqui ai civici 1 e 2. Gli interventi di cui al Lotto 3 permetteranno di mettere in sicurezza tutte queste zone, fatta eccezione per la pista da Kart sul Labioso, non oggetto di questo studio.

Dal punto di vista delle grandezze idrodinamiche, nelle aree allagate a valle, dove non vengono eseguiti interventi, non si riscontrano variazioni significative, né in termini di tiranti, né di velocità. Ciò permette di affermare che gli interventi di cui ai Lotti 1 e 2 permettono di mettere in sicurezza le zone direttamente protette dagli interventi, senza aggravare la situazione a valle.

6 Conclusioni

La presente relazione tecnica fa riferimento all'insieme delle attività svolte da DHI S.r.l. nell'ambito dell'affidamento del servizio di consulenza denominato "Studio idrogeologico e idraulico, progetto di fattibilità tecnico ed economica delle opere di sistemazione idraulica lungo il t. Erro dalla località Badia fino a Valle della confluenza del t. Labioso" per ciò che concerne l'analisi idraulica dello stato di progetto.

Come riportato in premessa, lo studio idrologico ed idraulico condotto precedentemente da DHI S.r.l. ha permesso di confermare il valore di portata di 500 m^3/s transitata nell'alveo del torrente Erro durante l'evento del 04/10/2021. Tale valore, insieme al relativo idrogramma, è stato indicato da Regione Liguria come valore da assumere per la progettazione delle opere di sistemazione idraulica, in attesa di un futuro aggiornamento del Piano di Bacino.

Come base modellistica è stato adottato il modello di stato attuale di cui allo studio su indicato, costituito da uno schema accoppiato tra modello monodimensionale in alveo e bidimensionale sulle aree allagabili.

La progettazione è stata condotta, su queste premesse, con processo iterativo insieme ai progettisti, allo scopo di individuare le caratteristiche geometriche dell'alveo e delle nuove strutture necessarie a garantire il deflusso in alveo della portata di piena di progetto con adeguato franco idraulico. Il modello idraulico di progetto è stato implementato secondo il solo schema monodimensionale, in quanto la sistemazione stessa non prevede esondazioni, il che rende superflua l'adozione del modello accoppiato. Gli interventi di progetto hanno interessato tutta l'asta urbana del torrente Erro, limitate porzioni dello stesso fuori dall'abitato, ed il tratto finale degli affluenti rio del Giovo e torrente Labioso.

Stante l'elevato onere economico stimato delle opere individuate, si è proceduto ad una lottizzazione delle stesse, ottenendo tre diversi lotti, definiti in ordine di priorità dal numero 1 a 3. Allo scopo di indagare il rischio idraulico residuo a valle della realizzazione di ogni lotto, oltre che la correttezza tecnica della suddivisione, sono state condotte due simulazioni con schema accoppiato 1D+2D delle configurazioni di Lotto 1 e Lotto 1 più Lotto 2.

L'insieme delle modellazioni eseguite ha confermato la correttezza della progettazione. La sistemazione globale del corso d'acqua, che prevede demolizione e ricostruzione dei ponti interferenti insieme alla regolarizzazione dell'alveo ed al corretto dimensionamento delle quote arginali, permette di incrementare la capacità ricettiva dell'alveo fino al valore di progetto, con adeguato franco idraulico.

Le modellazioni di Lotto 1 e Lotto 1 più Lotto 2 hanno invece permesso di appurare che la progressiva realizzazione degli interventi permette di mettere in sicurezza porzioni del territorio senza aumentare il rischio in quelle adiacenti, in quanto le caratteristiche dell'esondazione in tali tratti rimangono sostanzialmente inalterate.

In conclusione, la progettazione preliminare delle opere di sistemazione idraulica viene giudicata corretta e adeguata alle prescrizioni di normativa.

ALLEGATI

ALLEGATO A

Tabelle delle grandezze idrodinamiche in alveo

A.1 Scenari idrodinamici

Nel presente allegato si riportano le tabelle relative ai valori idrodinamici in alveo per tutti i tratti considerati. Le tabelle riportano le seguenti informazioni:

- Progressiva: valore di posizionamento della sezione trasversale, come distanza progressiva in [m] a partire dall'inizio del tratto;
- ID sezione: identificativo della sezione trasversale;
- Quota fondo: minimo livello altimetrico [m s.l.m.] delle quote d'alveo;
- Y: tirante idrico in [m];
- PL: livello del pelo libero in [m s.l.m.];
- V: velocità della corrente in [m/s];
- Fr: numero di Froude [-];
- H: valore del carico totale in [m s.l.m.].

A.1.1 Assetto di sistemazione totale (Lotto 1 + 2 + 3)

In questo paragrafo si riportano i risultati idrodinamici in alveo derivanti dalla simulazione monodimensionale di sistemazione totale.

Progr. [m]	SEZ [-]	Linea di fondo [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]
0.00	ERRO-088	442.34	445.92	3.58	5.50	1.11	447.46
92.62	ERRO-087	440.71	444.64	3.93	4.95	0.95	445.88
141.25	ERRO-086	440.38	444.17	3.79	4.50	0.94	445.20
178.31	ERRO-085-M	440.93	443.84	2.91	3.80	0.81	444.57
181.58	ERRO-085-V	437.65	441.78	4.13	5.40	0.68	443.27
235.86	ERRO-084	437.17	441.48	4.31	5.88	1.19	443.24
349.12	ERRO-083-p	436.30	439.65	3.35	5.95	1.18	441.46
460.96	ERRO-082-p	434.30	438.03	3.73	5.00	0.74	439.31
526.62	ERRO-081-p	434.04	437.61	3.57	5.72	1.19	439.28
596.91	ERRO-080-p	431.92	436.49	4.57	4.93	0.93	437.72
668.56	ERRO-079	431.18	435.80	4.62	5.52	1.02	437.35
710.84	ERRO-078	430.43	435.32	4.89	5.33	0.99	436.77
764.54	ERRO-077	429.94	434.73	4.79	5.68	1.09	436.37
811.97	ERRO-076	429.59	434.10	4.51	5.57	1.05	435.68
896.83	ERRO-075	429.19	433.01	3.82	6.74	1.38	435.32
961.20	ERRO-074-p	428.83	431.62	2.79	6.36	1.34	433.68
1068.99	ERRO-070-p	427.49	430.06	2.57	5.74	1.23	431.74
1107.22	ERRO-068-p	426.70	429.60	2.90	5.71	1.17	431.26
1196.11	ERRO-064-p	425.77	428.78	3.01	6.00	1.22	430.62
1223.83	ERRO-063-p	425.47	428.52	3.05	5.83	1.16	430.25
1243.01	ERRO-062-p	425.27	428.35	3.08	5.99	1.19	430.17
1260.13	ERRO-061-p	425.16	428.19	3.03	4.65	0.92	429.29
1298.65	ERRO-060-Ponte-p	424.77	428.00	3.23	4.40	0.85	428.99
1340.54	ERRO-058-P-p	423.99	427.91	3.92	4.50	0.65	428.94
1352.48	ERRO-057-p	424.03	427.78	3.75	4.77	0.87	428.94
1388.09	ERRO-056-p	423.68	427.66	3.98	4.39	0.78	428.64
1454.03	ERRO_54.5-p	422.96	427.35	4.39	4.77	0.88	428.51
1589.51	ERRO-051-p	422.53	426.53	4.00	5.48	1.06	428.06
1749.31	ERRO-047-p	421.16	425.14	3.98	5.19	0.98	426.51
1832.43	ERRO-045-p	420.76	424.51	3.75	5.57	1.05	426.09
1913.93	ERRO-042-p	420.67	423.82	3.15	5.58	1.10	425.41
1977.55	ERRO-041-p	420.29	423.32	3.03	5.26	1.05	424.73
2009.17	ERRO-039.5-p	420.12	423.09	2.97	5.43	1.09	424.59

Progr. [m]	SEZ [-]	Linea di fondo [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]
2048.37	ERRO-037-Ponte-p	419.70	422.78	3.08	5.12	1.01	424.12
2065.47	ERRO-036.5-p	419.49	422.67	3.18	5.03	0.98	423.96
2163.06	ERRO-034-p	419.00	422.06	3.06	5.21	1.03	423.44
2266.88	ERRO-032-M-p	418.45	421.32	2.87	6.15	1.15	423.25
2273.61	ERRO-032-V-p	418.45	421.26	2.81	6.21	1.28	423.22
2368.44	ERRO-028-p	417.13	420.08	2.94	4.52	0.91	421.12
2498.72	ERRO-024-p	416.87	419.26	2.39	5.00	0.86	420.53
2515.62	ERRO-023	416.85	419.15	2.30	5.13	1.17	420.49
2531.35	ERRO-022	416.55	418.97	2.42	4.63	1.03	420.06
2548.36	ERRO-021	416.06	418.82	2.76	4.92	0.97	420.05
2572.41	ERRO-020	415.09	418.62	3.53	5.27	1.00	420.04
2587.90	ERRO-019	414.97	418.51	3.53	5.21	1.00	419.89
2626.80	ERRO-016-P-p	414.49	418.21	3.72	5.30	0.92	419.64
2663.27	ERRO-014-p	414.11	417.97	3.85	5.73	1.10	419.64
2702.05	ERRO-013-p	413.12	417.62	4.50	5.89	1.08	419.39
2865.97	ERRO-009-p	412.46	416.17	3.71	5.54	1.08	417.73
2953.12	ERRO-006-p	410.40	415.42	5.02	5.20	0.80	416.80
2989.09	ERRO-005-p	410.35	415.21	4.86	5.50	0.95	416.75
3034.16	ERRO-004	410.49	414.91	4.42	5.45	1.04	416.42
3081.25	ERRO-003	409.88	414.41	4.53	5.61	1.17	416.01
3114.49	ERRO-002	408.93	413.98	5.05	5.30	0.90	415.41
3142.78	ERRO-001	408.93	413.77	4.83	5.60	0.99	415.36
0.00	GIO-5	427.34	429.28	1.94	2.75	0.98	429.67
22.42	GIO-4	427.23	428.99	1.76	2.46	0.82	429.30
45.25	GIO-3	427.19	428.81	1.62	2.55	0.76	429.14
76.66	GIO-2	426.63	428.60	1.97	2.65	0.82	428.96
110.55	GIO-1-p	425.62	428.52	2.90	1.63	0.37	428.65
0.00	LAB-12	423.43	425.23	1.80	4.89	1.38	426.45
29.18	LAB-11	422.42	424.60	2.18	3.80	0.95	425.33
73.38	LAB-10	421.84	424.08	2.24	4.89	1.26	425.30
123.13	LAB-9	420.73	423.18	2.45	4.65	1.35	424.29
164.57	LAB-8	420.49	422.26	1.77	4.54	1.56	423.31
235.51	LAB-7	418.61	420.13	1.52	3.64	1.27	420.80
295.08	LAB-6-p	417.01	419.00	1.99	3.09	0.75	419.49
317.07	LAB-5-M-p	416.40	419.04	2.64	2.02	0.43	419.25
335.13	LAB-5-V-p	416.42	418.16	1.73	4.00	1.00	418.97
349.75	LAB-4-M-p	416.54	418.00	1.46	4.32	1.22	418.96
355.04	LAB-3-V-p	416.16	417.93	1.77	3.55	0.95	418.57
409.96	LAB-1-p	414.27	417.57	3.30	2.11	0.42	417.79
430.89	LAB-0.5-p	414.25	417.62	3.37	1.60	0.30	417.75

A.1.2 Assetto di sistemazione di Lotto 1

In questo paragrafo si riportano i risultati idrodinamici in alveo derivanti dalla simulazione accoppiata mono-bidimensionale di sistemazione di Lotto 1.

Progr. [m]	SEZ [-]	Linea di fondo [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]
0.00	ERRO-088	442.34	445.91	3.57	5.49	1.11	447.45
92.62	ERRO-087	440.71	444.64	3.93	4.92	0.94	445.87
141.25	ERRO-086	440.38	444.17	3.79	4.48	0.94	445.19
178.31	ERRO-085-M	440.93	443.83	2.90	3.78	0.91	444.56
181.58	ERRO-085-V	437.65	441.78	4.13	5.40	0.72	443.27
235.86	ERRO-084	437.17	441.47	4.30	5.90	1.19	443.25
349.12	ERRO-083-p	436.30	439.65	3.35	5.95	1.18	441.45
460.96	ERRO-082-p	434.30	438.03	3.73	5.00	0.74	439.30
526.62	ERRO-081-p	434.04	437.61	3.57	5.73	1.31	439.28
596.91	ERRO-080-p	431.92	436.48	4.56	4.93	0.93	437.72
668.56	ERRO-079	431.18	435.79	4.61	5.53	1.02	437.35
710.84	ERRO-078	430.43	435.31	4.88	5.34	1.00	436.77

Progr. [m]	SEZ [-]	Linea di fondo [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]
764.54	ERRO-077	429.94	434.72	4.77	5.70	1.10	436.37
811.97	ERRO-076	429.59	434.08	4.49	5.55	1.05	435.65
896.83	ERRO-075	429.19	433.02	3.83	6.64	1.36	435.26
961.20	ERRO-074-p	428.83	431.65	2.82	6.29	1.32	433.67
1068.99	ERRO-070-p	427.49	430.15	2.66	5.53	1.25	431.71
1107.22	ERRO-068-p	426.70	429.74	3.04	5.42	1.13	431.24
1196.11	ERRO-064-p	425.77	429.05	3.28	5.46	1.20	430.57
1223.83	ERRO-063-p-interp	425.47	428.86	3.39	5.21	1.12	430.24
1243.01	ERRO-062-p	425.27	428.74	3.47	5.26	1.17	430.15
1260.13	ERRO-061-p	425.16	428.64	3.48	4.05	0.98	429.47
1298.65	ERRO-060-Ponte-p	424.77	428.55	3.78	3.76	1.11	429.27
1340.54	ERRO-058-P-p	423.99	428.57	4.58	3.60	0.52	429.23
1352.48	ERRO-057-p	424.03	428.39	4.36	4.04	0.88	429.22
1388.09	ERRO-056-p	423.68	428.37	4.69	4.00	0.63	429.19
1454.03	ERRO_54.5-p	422.96	428.18	5.22	4.40	0.72	429.17
1467.77	ERRO-054	422.91	428.02	5.11	4.69	0.83	429.14
1507.38	ERRO-053	422.75	427.82	5.07	4.53	0.77	428.87
1547.70	ERRO-052	422.75	427.73	4.98	4.50	0.70	428.76
1589.51	ERRO-051	422.50	427.45	4.95	5.05	0.89	428.75
1624.45	ERRO-050	422.24	427.25	5.01	4.74	0.83	428.40
1671.42	ERRO-049	421.86	426.98	5.12	4.65	0.84	428.08
1699.73	ERRO-048	421.95	426.76	4.81	4.91	0.87	427.99
1749.31	ERRO-047	421.90	426.49	4.59	4.25	1.08	427.42
1794.06	ERRO-046	421.05	426.19	5.14	4.47	0.94	427.21
1827.55	ERRO-045.5	420.79	425.97	5.18	4.80	0.76	427.14
1832.43	ERRO-045	420.76	425.89	5.13	4.87	0.83	427.10
1873.79	ERRO-044	420.68	425.62	4.94	4.99	0.88	426.89
1878.52	ERRO-043	420.64	425.65	5.01	4.40	0.75	426.64
1913.93	ERRO-042	420.65	425.53	4.88	3.98	0.74	426.34
1944.32	ERRO-041.5	420.66	425.37	4.70	4.07	0.71	426.21
1977.55	ERRO-041	420.30	425.13	4.83	4.40	0.73	426.12
2002.17	ERRO-040	420.19	424.92	4.73	4.83	0.84	426.11
2009.17	ERRO-039.5	420.12	425.04	4.92	3.80	0.74	425.77
2023.11	ERRO-039	420.11	424.87	4.76	4.17	0.73	425.76
2031.76	ERRO-038	420.00	424.84	4.84	4.23	0.71	425.75
2042.22	ERRO-037-M	420.11	424.81	4.70	4.30	0.68	425.75
2053.06	ERRO-037-V	419.95	424.78	4.82	4.30	0.65	425.72
2065.47	ERRO-036.5	419.98	424.63	4.65	4.60	0.78	425.71
2072.84	ERRO-036	419.92	424.55	4.63	4.74	0.84	425.70
2108.56	ERRO-035	419.57	424.33	4.76	4.41	0.76	425.32
2163.06	ERRO-034	419.38	423.96	4.58	4.37	0.75	424.94
2208.44	ERRO-033	418.63	423.77	5.14	3.94	0.71	424.56
2266.88	ERRO-032-M	419.66	423.58	3.92	3.37	1.49	424.16
2273.61	ERRO-032-V	418.45	422.42	3.97	4.41	0.86	423.41
2295.44	ERRO-031	418.34	422.28	3.94	3.96	0.85	423.08
2322.87	ERRO-030	418.18	422.06	3.88	4.10	1.16	422.92
2349.92	ERRO-029	417.48	421.78	4.30	4.70	1.12	422.90
2368.44	ERRO-028	417.13	421.61	4.48	5.00	0.97	422.88
2392.49	ERRO-027	416.35	421.40	5.05	5.39	1.11	422.88
2418.53	ERRO-026	417.07	421.02	3.95	5.58	1.22	422.61
2463.10	ERRO-025	416.56	420.25	3.69	5.29	1.06	421.68
2498.72	ERRO-024	417.03	419.78	2.75	4.89	1.18	421.00
2515.62	ERRO-023	416.85	419.56	2.71	4.06	1.04	420.40
2531.35	ERRO-022	416.55	419.48	2.93	3.55	1.05	420.13
2548.36	ERRO-021	416.06	419.41	3.35	3.50	1.20	420.03
2572.41	ERRO-020	415.09	419.15	4.06	4.14	0.89	420.02
2587.90	ERRO-019	414.97	419.08	4.10	4.06	0.89	419.92
2626.80	ERRO-016-P-p	414.49	418.88	4.39	3.99	0.68	419.69
2663.27	ERRO-014-p	414.11	418.61	4.50	4.40	0.77	419.59
2702.05	ERRO-013	411.97	418.51	6.54	4.50	0.81	419.55
2750.02	ERRO-012	413.16	418.15	4.99	5.17	1.01	419.51
2786.39	ERRO-011	412.52	417.75	5.23	5.86	1.10	419.49
2822.84	ERRO-010	412.53	417.29	4.76	5.52	1.05	418.85
2865.97	ERRO-009	412.45	416.78	4.33	5.73	1.31	418.46

Progr. [m]	SEZ [-]	Linea di fondo [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]
2900.51	ERRO-008	411.49	416.27	4.78	6.35	1.23	418.33
2924.86	ERRO-007	410.36	415.93	5.57	5.40	0.68	417.42
2953.12	ERRO-006	410.40	415.77	5.37	5.64	0.99	417.39
2989.09	ERRO-005	410.68	415.41	4.73	5.00	0.92	416.68
3034.16	ERRO-004	410.49	414.97	4.48	5.24	0.99	416.37
3081.25	ERRO-003	409.88	414.44	4.56	5.45	1.31	415.96
3114.49	ERRO-002	408.93	413.97	5.04	5.13	0.88	415.31
3142.78	ERRO-001	408.93	413.73	4.80	5.57	1.09	415.31
0.00	GIO-5	427.34	429.33	1.99	2.86	1.07	429.74
22.42	GIO-4	427.23	429.10	1.87	3.30	0.99	429.66
45.25	GIO-3	427.19	428.98	1.79	3.60	1.00	429.64
76.66	GIO-2	426.63	428.86	2.23	3.85	2.07	429.61
110.55	GIO-1-p	425.62	428.86	3.24	2.39	0.76	429.15
0.00	LAB-12	423.43	425.21	1.78	4.96	1.40	426.47
29.18	LAB-11	422.42	424.55	2.13	3.50	0.98	425.17
73.38	LAB-10	421.84	424.01	2.17	4.76	1.25	425.17
123.13	LAB-9	420.73	423.14	2.41	4.35	1.27	424.10
164.57	LAB-8	420.49	422.26	1.77	4.18	1.44	423.15
235.51	LAB-7	418.61	420.41	1.80	2.79	1.25	420.80
295.08	LAB-6	417.01	419.85	2.84	3.49	1.38	420.47
308.00	LAB-5.5	416.58	419.93	3.35	1.79	0.69	420.09
317.07	LAB-5-M	416.58	419.85	3.27	2.12	0.70	420.08
335.13	LAB-5-V	416.55	418.83	2.27	3.82	1.02	419.57
349.75	LAB-4-M	416.52	418.74	2.22	3.75	1.45	419.45
355.04	LAB-3-V	416.16	418.71	2.55	3.74	1.41	419.43
374.41	LAB-2	415.36	418.54	3.18	3.84	1.21	419.29
409.96	LAB-1	414.38	418.56	4.18	2.63	1.13	418.91
430.89	LAB-0.5	414.25	418.51	4.26	2.58	1.13	418.85

A.1.3 Assetto di sistemazione di Lotto 1 e Lotto 2

In questo paragrafo si riportano i risultati idrodinamici in alveo derivanti dalla simulazione accoppiata mono-bidimensionale di sistemazione di Lotto 1 e Lotto 2.

Progr. [m]	SEZ [-]	Linea di fondo [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]
0.00	ERRO-088	442.34	445.92	3.58	5.47	1.11	447.45
92.62	ERRO-087	440.71	444.65	3.94	4.89	0.93	445.87
141.25	ERRO-086	440.38	444.20	3.82	4.41	0.92	445.19
178.31	ERRO-085-M	440.93	443.89	2.96	3.68	0.89	444.59
181.58	ERRO-085-V	437.65	441.78	4.13	5.40	0.72	443.27
235.86	ERRO-084	437.17	441.47	4.30	5.90	1.19	443.25
349.12	ERRO-083-p	436.30	439.65	3.35	5.95	1.18	441.45
460.96	ERRO-082-p	434.30	438.03	3.73	5.00	0.74	439.30
526.62	ERRO-081-p	434.04	437.61	3.57	5.73	1.31	439.28
596.91	ERRO-080-p	431.92	436.48	4.56	4.94	0.93	437.72
668.56	ERRO-079	431.18	435.79	4.61	5.53	1.02	437.35
710.84	ERRO-078	430.43	435.31	4.88	5.35	1.00	436.77
764.54	ERRO-077	429.94	434.71	4.77	5.71	1.10	436.37
811.97	ERRO-076	429.59	434.07	4.48	5.55	1.05	435.65
896.83	ERRO-075	429.19	433.01	3.82	6.66	1.37	435.27
961.20	ERRO-074-p	428.83	431.62	2.79	6.36	1.33	433.68
1068.99	ERRO-070-p	427.49	430.07	2.58	5.72	1.26	431.74
1107.22	ERRO-068-p	426.70	429.61	2.91	5.68	1.17	431.25
1196.11	ERRO-064-p	425.77	428.81	3.04	5.94	1.25	430.61
1223.83	ERRO-063-p-interp	425.47	428.55	3.08	5.76	1.18	430.24
1243.01	ERRO-062-p	425.27	428.39	3.12	5.90	1.23	430.16
1260.13	ERRO-061-p	425.16	428.24	3.08	4.57	1.00	429.31
1298.65	ERRO-060-P-p	424.77	428.07	3.30	4.31	1.11	429.01

Progr. [m]	SEZ [-]	Linea di fondo [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]
1340.54	ERRO-058-P-p	423.99	428.00	4.01	4.40	0.63	428.99
1352.48	ERRO-057-p	424.03	427.85	3.82	4.66	0.90	428.96
1388.09	ERRO-056-p	423.68	427.75	4.07	4.27	0.75	428.68
1454.03	ERRO_54.5-p	422.96	427.46	4.50	4.61	0.88	428.54
1589.51	ERRO-051-p	422.53	426.71	4.18	5.17	1.06	428.07
1749.31	ERRO-047-p	421.16	425.56	4.40	4.56	0.83	426.62
1832.43	ERRO-045-p	420.76	425.11	4.35	4.72	0.84	426.25
1913.93	ERRO-042-p	420.67	424.80	4.13	4.20	0.77	425.70
1977.55	ERRO-041-p	420.29	424.72	4.43	3.60	0.69	425.38
2009.17	ERRO-039.5-p	420.12	424.66	4.54	3.54	0.77	425.30
2048.37	ERRO-037-P-p	419.70	424.67	4.97	3.17	0.52	425.18
2065.47	ERRO-036.5-p	419.49	424.73	5.24	2.90	0.45	425.16
2072.84	ERRO-036-p	419.48	424.66	5.18	3.06	0.47	425.14
2108.56	ERRO-035-p	419.45	424.36	4.91	3.90	0.62	425.14
2163.06	ERRO-034	419.38	423.98	4.60	4.40	0.76	424.97
2208.44	ERRO-033	418.63	423.79	5.16	3.97	0.71	424.59
2266.88	ERRO-032-M	419.66	423.60	3.94	3.37	1.74	424.18
2273.61	ERRO-032-V	418.45	422.44	3.99	4.43	0.86	423.43
2295.44	ERRO-031	418.34	422.30	3.96	3.98	0.85	423.10
2322.87	ERRO-030	418.18	422.08	3.89	4.00	1.25	422.89
2349.92	ERRO-029	417.48	421.79	4.31	4.60	1.12	422.87
2368.44	ERRO-028	417.13	421.62	4.49	4.90	0.97	422.85
2392.49	ERRO-027	416.35	421.41	5.06	5.30	1.11	422.84
2418.53	ERRO-026	417.07	421.03	3.96	5.61	1.22	422.64
2463.10	ERRO-025	416.56	420.26	3.70	5.32	1.06	421.70
2498.72	ERRO-024	417.03	419.79	2.76	4.91	1.18	421.02
2515.62	ERRO-023	416.85	419.56	2.71	4.07	1.04	420.41
2531.35	ERRO-022	416.55	419.49	2.94	3.56	1.05	420.13
2548.36	ERRO-021	416.06	419.41	3.35	3.60	1.20	420.08
2572.41	ERRO-020	415.09	419.15	4.06	4.15	0.89	420.03
2587.90	ERRO-019	414.97	419.08	4.11	4.07	0.88	419.92
2626.80	ERRO-016-P-p	414.49	418.88	4.39	4.00	0.69	419.70
2663.27	ERRO-014-p	414.11	418.62	4.51	4.40	0.77	419.60
2702.05	ERRO-013	411.97	418.51	6.54	4.50	0.81	419.55
2750.02	ERRO-012	413.16	418.15	4.99	5.17	1.01	419.52
2786.39	ERRO-011	412.52	417.75	5.23	5.86	1.10	419.50
2822.84	ERRO-010	412.53	417.30	4.77	5.53	1.05	418.85
2865.97	ERRO-009	412.45	416.79	4.34	5.73	1.31	418.46
2900.51	ERRO-008	411.49	416.27	4.78	6.36	1.23	418.33
2924.86	ERRO-007	410.36	415.93	5.57	5.40	0.68	417.42
2953.12	ERRO-006	410.40	415.78	5.38	5.65	0.99	417.40
2989.09	ERRO-005	410.68	415.41	4.73	5.00	0.92	416.69
3034.16	ERRO-004	410.49	414.98	4.49	5.24	0.99	416.38
3081.25	ERRO-003	409.88	414.45	4.57	5.45	1.31	415.96
3114.49	ERRO-002	408.93	413.97	5.04	5.20	0.89	415.35
3142.78	ERRO-001	408.93	413.73	4.80	5.57	1.09	415.31
0.00	GIO-5	427.34	429.29	1.95	2.88	1.07	429.71
22.42	GIO-4	427.23	429.00	1.77	2.90	1.00	429.43
45.25	GIO-3	427.19	428.82	1.63	3.45	1.01	429.43
76.66	GIO-2	426.63	428.62	1.99	3.95	2.07	429.42
110.55	GIO-1-p	425.62	428.55	2.93	2.54	0.78	428.88
0.00	LAB-12	423.43	425.21	1.78	4.96	1.40	426.47
29.18	LAB-11	422.42	424.55	2.13	3.50	0.98	425.17
73.38	LAB-10	421.84	424.01	2.17	4.76	1.25	425.17
123.13	LAB-9	420.73	423.14	2.41	4.35	1.27	424.10
164.57	LAB-8	420.49	422.26	1.77	4.17	1.44	423.15
235.51	LAB-7	418.61	420.40	1.79	2.79	1.25	420.80
295.08	LAB-6	417.01	419.84	2.83	3.49	1.38	420.46
308.00	LAB-5.5	416.58	419.92	3.34	1.79	0.69	420.08
317.07	LAB-5-M	416.58	419.84	3.26	2.12	0.70	420.07
335.13	LAB-5-V	416.55	418.82	2.27	3.82	1.02	419.57
349.75	LAB-4-M	416.52	418.74	2.22	3.75	1.45	419.45
355.04	LAB-3-V	416.16	418.71	2.55	3.74	1.41	419.43
374.41	LAB-2	415.36	418.54	3.18	3.84	1.21	419.29

Progr. [m]	SEZ [-]	Linea di fondo [m s.l.m.]	P.L. [m s.l.m.]	Y [m]	V [m/s]	Fr [-]	H [m s.l.m.]
409.96	LAB-1	414.38	418.55	4.17	2.63	1.13	418.90
430.89	LAB-0.5	414.25	418.51	4.26	2.58	1.13	418.85

ALLEGATO B

Codice di calcolo MIKE by DHI

MIKE HYDRO RIVER

B.1 PREMESSA

MIKE HYDRO River è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. MIKE HYDRO River, che si presenta come il diretto successore del conosciuto MIKE11, sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

La grande flessibilità del codice di calcolo permette di integrare, attraverso specifici moduli, le applicazioni idrodinamiche con fenomeni idrologici, trasporto solido, advezione-dispersione, qualità delle acque, ecologia, rendendo MIKE HYDRO River uno strumento indispensabile per affrontare e risolvere molteplici problemi d'ingegneria fluviale quali, ad esempio:

- studi di idraulica fluviale e di propagazione dell'onda di piena;
- studi di idrologia e idrogeologia;
- supporto alla progettazione e gestione di opere idrauliche;
- analisi della rottura dighe;
- analisi del trasposto solido e morfologia fluviale;
- modelli di previsione in tempo reale e di supporto decisionale;
- analisi dei fenomeni di intrusione del cuneo salino in fiumi ed estuari;
- studi di valutazione della qualità delle acque sia superficiali che sotterranee;
- analisi dello stato ecologico dei corsi d'acqua.

MIKE HYDRO River è costituito dai seguenti moduli:

- HD (idrodinamico): simulazione del flusso in canali a pelo libero, costituisce la base per ulteriori moduli aggiuntivi;
- RR (afflussi-deflussi): modulo che consente, partendo dai dati meteorologici (pioggia, temperature, evapotraspirazione, ecc…), su bacini naturali o artificiali, di ricostruire attraverso l'utilizzo di modelli idrologici (NAM, UHM, Drift, ecc…) le portate idriche in assegnate sezioni di calcolo;
- AD (advezione-dispersione): simulazione del processo di advezione e dispersione di una sostanza in soluzione o in sospensione di qualsiasi natura nel corpo idrico, eventualmente caratterizzata da una cinetica di decadimento lineare;
- ECOLab (ecologico): simulazione di una serie di processi qualitativi, tra i quali il ciclo BOD-DO con nitrificazione-denitrificazione, il ciclo del fosforo, l'eutrofizzazione, il trasporto di metalli pesanti ecc.;
- ST (trasporto sedimenti): simulazione del trasporto solido di materiale non coesivo, in modalità disaccoppiata (senza variazione della geometria del fondo alveo) o accoppiata

(calcolo delle trasformazioni morfologiche). Questo modulo è attivabile utilizzando l'interfaccia di MIKE11 classic.

- DA (previsioni in tempo reale): il modulo consente, assimilando i dati misurati in tempo reale su un bacino e/o corso d'acqua, di correggere la simulazione idrodinamica al fine di garantire una affidabilità massima sulla previsione di un evento di piena.

Particolarmente efficace risulta la possibilità di poter integrare il codice MIKE HYDRO River, con altri codici di calcolo della famiglia MIKE quali: MIKE 21 (MIKE FLOOD), per simulare in maniera combinata fenomeni 1D e 2D; MIKE SHE, per la modellazione di corpi idrici superficiali e sotterranei; WEST, per simulare in dettaglio i processi nell'impianto di trattamento ed il relativo impatto sul corso d'acqua recettore; MOUSE (MIKE URBAN FLOOD), simula le interferenze tra il corso d'acqua e la rete di drenaggio.

Di seguito si descrive il codice MIKE HYDRO River HD.

B.2 MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il "cuore" del codice di calcolo MIKE HYDRO River ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso quasi - bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e confluenze).

L'adozione del programma di simulazione MIKE HYDRO River consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

B.3 DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

- Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
- Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.
- Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

B.4 EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE HYDRO River risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha \frac{Q^2}{A}\right) + gA\frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha \frac{Q^2}{A}\right) + gA\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0$$

dove:

A = area della sezione bagnata (m2);

C = coefficiente di attrito di Chezy (m1/2 s-1);

g = accelerazione di gravità (m s-2);

h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);

Q = portata (m3/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m2 s-1).

B.5 SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

B.6 APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare, nelle equazioni generali di De Saint Venant, tutti i termini legati alla quantità di moto:

$$gA\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\partial h/\partial x$. Per ragioni di stabilità questo termine viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

B.7 DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate, di seguito elencate.

B.7.1 Stramazzo a larga soglia (weir)

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

B.7.2 Tombino (culvert)

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

B.7.3 Ponte (bridge)

In MIKE HYDRO River possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare, sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

B.7.4 Pompa (pump)

In MIKE HYDRO River una pompa viene descritta specificandone le modalità operative, ossia se lavora a portata costante o seguendo una propria curva caratteristica.

B.7.5 Relazione Q = A(Zj1). Zj2 (control)

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

B.7.6 Struttura mobile (gate)

È possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

B.8 RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE HYDRO River consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{C^2AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{M^2AR^{4/3}}$$

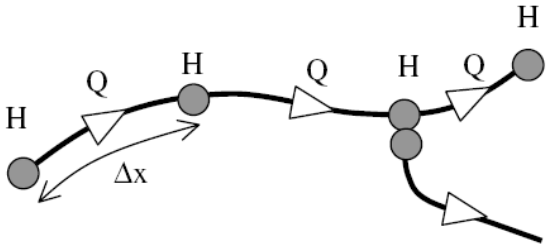
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a 1/n, essendo n il coefficiente di Manning.

B.9 CONDIZIONI INIZIALI

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

B.10 METODO DI SOLUZIONE

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).



La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

B.11 CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE HYDRO River le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

B.12 DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perché questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d} + V}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

Cr = numero di Courant;

d = altezza d'acqua media;

V = velocità media della corrente;

g = accelerazione di gravità;

Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente (Fr<1), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

V *Dt < Dx

dove V è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Dt, Dx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Dt che Dx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello MIKE HYDRO River genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la distanza tra due sezioni sia maggiore di Dx, vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro Dx o meno.

ALLEGATO C

Codice di calcolo MIKE by DHI

MIKE 21 HD

C.1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore. I principali campi di applicazione sono:

- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi;
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- CLASSIC GRID (Griglia classica singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- MULTIPLE GRID (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- FLEXIBLE MESH (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- CURVILINEAR (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

In campo fluviale MIKE 21 può essere utilizzato in modo integrato con altri codici di calcolo del DHI, in particolare:

- MIKE 11, grazie al modulo MIKE FLOOD, che consente di condurre simulazioni idrodinamiche accoppiando gli approcci 1d e 2d in modo totalmente integrato;
- MIKE URBAN CS per la simulazione di allagamenti in ambito urbano dalla rete di drenaggio.

In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l'utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le

correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Di seguito si descrive il modulo MIKE 21 HD Classical Grid.

C.2 MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Come menzionato in precedenza, i risultati di una simulazione MIKE 21 HD possono essere usati come input per la simulazione di fenomeni fisici strettamente dipendenti dagli aspetti idrodinamici:

- trasporto di sostanze disciolte/sospese in acqua, modulo AD e modulo "Mud Transport";
- trasporto solido di materiale non coesivo, modulo ST;
- qualità delle acque ed idroecologia, modulo ECO Lab.

Infine, per quanto riguarda le analisi dei fenomeni di esondazione, MIKE 21 può essere accoppiato in modo dinamico attraverso l'interfaccia MIKE FLOOD al codice monodimensionale MIKE 11, per la simulazione degli alvei e dei canali, ed al codice MIKE URBAN, per la simulazione delle reti di drenaggio e collettamento urbano, schematizzando il dominio di calcolo in modo integrato 1D/2D.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St. Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St. Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial q}{\partial y}=0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial x}+\frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{yy}\right)\right]-\Omega q-fVV_x$$
$$+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial x}p_a+\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right)=0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{pq}{h}\right)+gh\frac{\partial \zeta}{\partial y}+\frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2h^2}-\frac{1}{\rho_w}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(h\tau_{yy}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\tau_{xy}\right)\right]-\Omega p-fVV_y$$
$$+\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial y}p_a+\frac{1}{\rho_w}\left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}\right)=0$$

nelle quali:

h(x,y,t) = profondità dell'acqua;

ζ (x,y,t) = quota del pelo libero;

p,q(x,y,t) = portate unitarie nelle direzioni x e y;

C(x,y) = coefficiente di scabrezza di Chezy;

G = accelerazione di gravità;

f(V) = fattore d'attrito del vento;

V,Vx,Vy(x,y,t) =velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

Ω (x,y) = parametro di Coriolis;

pa (x,y,t) = pressione atmosferica;

ρw = densità dell'acqua;

x,y = coordinate spaziali;

t = tempo;

τxx, τxy, τyy = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

Sxx,Sxy,Syy = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y. La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(E\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(E\frac{\partial p}{\partial y}\right)$$ (nella direzione x);

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hE\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hE\frac{\partial u}{\partial y}\right)$$ (nella direzione x);

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E=c_S^2\Delta^2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e cs è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(hE\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{2}hE\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right)$$

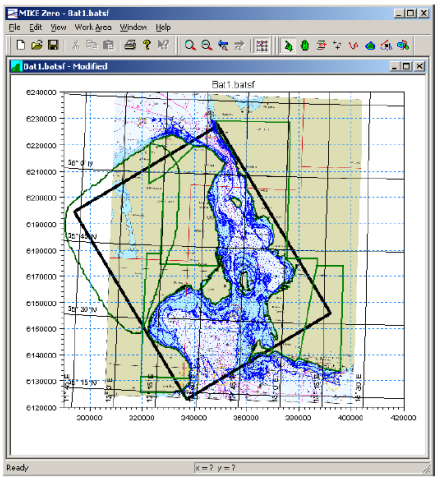
La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria (m3/s/m) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

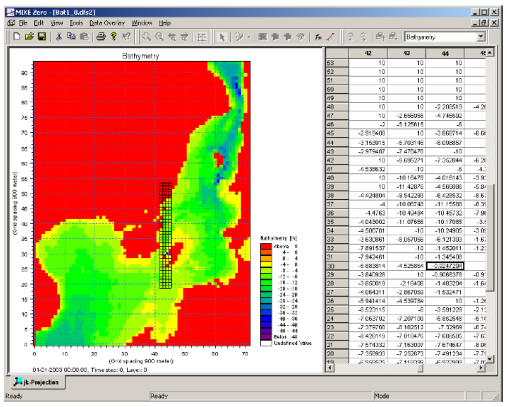
La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni plano-altimetriche della batimetria.

Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione “griglia multipla-nested grid”, che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

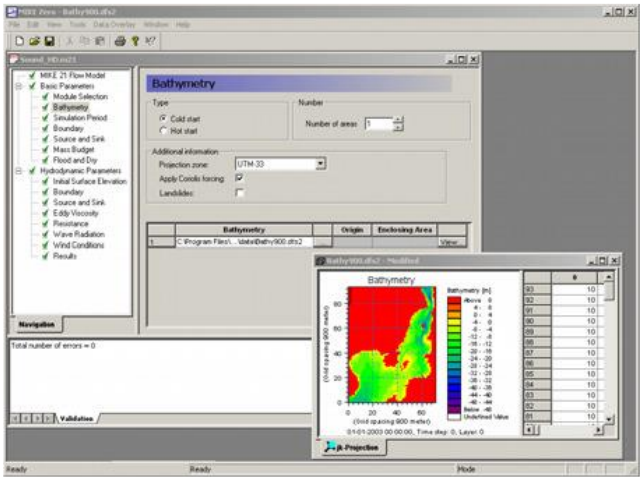
Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).





Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).



I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L’utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l’intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio, per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

