

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE TECNICA

S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA

RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-CASTELPLANIO

ELABORATI GENERALI

RELAZIONE IDRAULICA

Modello bidimensionale (2D) del Fiume Esino

SCALA:

-

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

IR0F 00 R 09 RI ID0002 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE DEFINITIVA	C. Cesali	ottobre 2021	F. Cabas	ottobre 2021	C. Urciuoli	ottobre 2021	Vittozzi settembre 2022
B	EMISSIONE DEFINITIVA	C. Cesali	novembre 2022	F. Cabas	novembre 2022	C. Urciuoli	novembre 2022	

ITALFERR S.p.A.  
U.O. Opere Civili e gestione delle varianti  
Dot. Ing. Angelo Vittozzi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
N° A20783

File: IR0F00R09RIID0002001B

n. Elab.:

## INDICE

1. PREMESSA .....	5
1.1 RIFERIMENTI NORMATIVI .....	6
2. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO .....	7
2.1 PERICOLOSITÀ IDRAULICA NELL'AREA DI INTERVENTO .....	7
2.1.1. Lotto 1: PM228 – Bivio Nord Albacina, principali interferenze idrauliche .....	8
2.1.2. Lotto 2: Bivio Nord Albacina – Serra San Quirico, principali interferenze idrauliche .....	8
2.1.3. Lotto 3: Serra San Quirico – Castelplanio, principali interferenze idrauliche .....	10
2.2 OBIETTIVI DELLO STUDIO IDRAULICO .....	12
3. DATI DI BASE .....	16
3.1 RILIEVI TOPOGRAFICI E OPERE DI ATTRAVERSAMENTO ESISTENTI .....	16
4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO BIDIMENSIONALE .....	23
4.1 MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE .....	23
4.2 GEOMETRIA DEL MODELLO .....	25
4.3 SCABREZZE .....	28
4.4 CONDIZIONI AL CONTORNO .....	28
4.5 SCENARI SIMULATI .....	30

## INDICE DELLE FIGURE

<i>Fig. 1 – Lotto 1: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019) alla progr. 6+600.</i>	8
<i>Fig. 2 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 0+600 e progr. 3+400.</i>	9
<i>Fig. 3 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 3+000 e progr. 5+000.</i>	10
<i>Fig. 4 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 5+700 e progr. 8+889.</i>	10
<i>Fig. 5 – Lotto 3: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 0+000 e progr. 2+500.</i>	11
<i>Fig. 6 – Lotto 3: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 2+500 e progr. 5+400.</i>	12
<i>Fig. 7 – Fiume Esino: estensione del rilievo Lidar ed ubicazione delle sezioni rilevate in alveo.</i>	16
<i>Fig. 8 – Ponte ferroviario esistente nel tratto fluviale del Fiume Esino tra le confluenze del T. Giano e del T. Sentino (a monte del nuovo attraversamento previsto alla 6+600 circa del lotto 1).</i>	17
<i>Fig. 9 – Ponte ferroviario esistente nel tratto fluviale del Fiume Esino tra le confluenze del T. Giano e del T. Sentino (a valle del nuovo attraversamento previsto alla 6+600 circa del lotto 1).</i>	18
<i>Fig. 10 – Ponte stradale di via San Vittore sul Fiume Esino subito a monte della confluenza del T. Sentino.</i>	18
<i>Fig. 11 – Ponte stradale di via G. Marconi sul Fiume Esino a Camponoecchio, Genga.</i>	19
<i>Fig. 12 – Ponte ferroviario sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Pontechiaradovo.</i>	19
<i>Fig. 13 – Ponte stradale sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Pontechiaradovo (ingresso nella Gola della Rossa).</i>	20
<i>Fig. 14 – Ponte stradale sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Pontechiaradovo (ingresso nella Gola della Rossa).</i>	20
<i>Fig. 15 – Ponte ferroviario sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Gola della Rossa Mineraria.</i>	21
<i>Fig. 16 – Ponte stradale (SS76) sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Gola della Rossa Mineraria.</i>	21
<i>Fig. 17 – Ponte stradale (SS76) sul Fiume Esino nei pressi di Serra San Quirico.</i>	22
<i>Fig. 18 – Ponte stradale (SS76) sul Torrente Esinante nei pressi di Castelplanio.</i>	22
<i>Fig. 19 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: estensione del dominio di calcolo e condizioni al contorno.</i>	26
<i>Fig. 20 – Estratto della mesh di calcolo con sovrapposizione del DTM: particolare dell'infittimento.</i>	27
<i>Fig. 21 – Modello numerico 2D: implementazione delle opere di attraversamento in InfoWorks ICM.</i>	27
<i>Fig. 22 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per <math>Tr = 50</math> anni.</i>	28
<i>Fig. 23 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per <math>Tr = 200</math> anni.</i>	29

	<b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b>					
<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>	COMMESSA IR0F	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B	FOGLIO 4 di 31

*Fig. 24 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per  $Tr = 500$  anni.....29*

*Fig. 25 – Livello idrico (m slm) del Fiume Esino a Camponocchie: modello numerico 2D vs dato registrato. ....31*

## **INDICE DELLE TABELLE**

*Tab. 1 – Classi di pericolosità idraulica (P.G.R.A. - Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale, 2019). ....7*

## 1. **PREMESSA**

Il presente elaborato è parte integrante del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica “*Potenziamento infrastrutturale Orte-Falconara. Raddoppio della tratta PM228-Castelplanio*”.

Tale progetto è suddiviso nei 3 Lotti Funzionali di seguito elencati:

- Lotto 1: da PM228 a Bivio Nord Albacina da progressiva Km 0+00 (Km 228+014 della LS) alla progressiva Km 7+200 di progetto
- Lotto 2: da Bivio Nord Albacina a Serra San Quirico (i) da progressiva Km 0+00 (Km 237+589 della LS) alla progressiva Km 8+889 (Km 246+958 della LS)
- Lotto 3: da Serra San Quirico (e) a Castelplanio (e) da progressiva Km 0+00 a progressiva Km 6+272 (Km 252+578 della LS).

Nel 2003 era stato redatto da ITALFERR Spa il progetto preliminare nell’ambito della Legge Obiettivo che già teneva conto della suddivisione nei 3 Lotti Funzionali sopra descritti. Rispetto al tracciato previsto in tale Progetto, che non ha ricevuto alcuna approvazione da parte degli Enti, il tracciato del PFTE in oggetto è stato attualizzato per tenere conto degli aggiornamenti normativi intersorsi.

Da punto di vista idrologico-idraulico, la tratta ferroviaria in progetto si sviluppa interamente in affiancamento al Fiume Esino, attraversando quest’ultimo in vari punti, lungo il tracciato, in ognuno dei tre lotti previsti. Sulla scorta delle analisi eseguite nell’ambito dello studio idrologico annesso (rif. IR0F00R09RIID0001001), si è proceduto all’implementazione di un modello numerico bidimensionale, 2D (in regime di moto vario), finalizzato alla simulazione del comportamento *ante operam* e *post operam* del Fiume Esino e alla verifica di compatibilità idraulica delle nuove opere di attraversamento, con riferimento alle portate al colmo di piena associate ad un tempo di ritorno di 200 anni e alle aree di pericolosità idraulica riportate nel *PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI* (di recente emanazione) redatto dall’Autorità di Bacino Distrettuale dell’Appennino Centrale - P.G.R.A.A.C. (Il ciclo di pianificazione, agg. Dicembre 2019, Approvazione definitiva: dicembre 2021).

Nella presente relazione è riportata la descrizione dettagliata del processo di implementazione del modello numerico bidimensionale del Fiume Esino (i.e. geometria del modello, scabrezze, condizioni al contorno, scenari simulati), con estensione da PM228 a Castelplanio, nonché dei relativi dati di base utilizzati.

La verifica di compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto sul Fiume Esino, nonché della nuova linea ferroviaria nel suo complesso, unitamente alle valutazioni circa il massimo scalzamento atteso attorno alle pile in alveo (o interessate dalla piena di progetto) e al dimensionamento delle relative opere di protezione al fine di inibire possibili fenomeni di erosione, anche dopo i rimaneggiamenti dovuti alle fasi di realizzazione dei nuovi viadotti, sono riportate nelle relazioni idrauliche specialistiche a corredo degli elaborati dei singoli lotti.

## 1.1 Riferimenti normativi

Il progetto è stato redatto nel rispetto delle seguenti norme:

- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE
- D.Lgs. n. 152/2006 - T.U. Ambiente
- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie"
- Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17 gennaio 2018) e relativa circolare applicativa n.7/2019
- "*Manuale di Progettazione delle Opere Civili*" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI);
- Piano di Assetto Idrogeologico - Regione Marche – Autorità di bacino regionale - Norme di Attuazione
- Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico dei bacini di rilievo regionale – Norme di Attuazione (elaborato d) – DCR n. 116 del 21/01/2004
- *Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale*, adottato il 17 dicembre 2015 con deliberazione n. 6 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Tevere e approvato il 3 marzo 2016, con deliberazione n. 9, dal Comitato Istituzionale ed il 27 ottobre 2016 dal Presidente del Consiglio dei Ministri con DPCM Pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 28 del 3 febbraio 2017 recante "approvazione del piano di gestione del rischio di alluvioni del distretto idrografico dell'Appennino Centrale".

## 2. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

### 2.1 Pericolosità idraulica nell'area di intervento

La “nuova” tratta ferroviaria *PM228 - Castelplanio* si sviluppa interamente in affiancamento al Fiume Esino attraversando quest'ultimo alla progr. 6+600 del Lotto 1 (*PM228 - Bivio Nord Albacina*), alle progr. 1+100, 4+650 e 6+100 del Lotto 2 (*Bivio Nord Albacina – Serra San Quirico*), alle progr. 3+050, 3+600 e 4+150 del Lotto 3 (*Serra San Quirico - Castelplanio*).

Il quadro conoscitivo di riferimento per la caratterizzazione idrologica e idraulica dell'area di intervento, e la definizione delle relative aree di pericolosità/rischio, è attualmente riportato nel Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale – P.G.R.A.A.C. (Il ciclo di pianificazione, agg. dicembre 2019, Approvazione definitiva: dicembre 2021).

In particolare, sono individuate **3 classi di pericolosità idraulica** (*P3 – elevata probabilità, P2 – media probabilità, P1 – scarsa probabilità*).

La classe di pericolosità *P3* (Scenario C - elevata probabilità di alluvioni) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento  $Tr \in 50 - 100$  anni.

La classe di pericolosità *P2* (Scenario B - media probabilità di alluvioni) fa riferimento ad un evento caratterizzato da una probabilità di accadimento  $Tr \in 100 - 200$  anni.

La classe di pericolosità *P1* (Scenario A - scarsa probabilità di alluvioni) fa riferimento ad un evento di piena raro, caratterizzato da un tempo di ritorno  $Tr \in 200 - 500$  anni.

Di seguito, una tabella riepilogativa delle classi di pericolosità idraulica adottate.

<i>Tr (anni)</i>	<i>Pericolosità idraulica</i>
50-100	P3 (elevata)
100-200	P2 (media)
200-500	P1 (bassa)

Tab. 1 – Classi di pericolosità idraulica (P.G.R.A. - Distretto Idrografico dell'Appennino Centrale, 2019).

Con riferimento quindi alle mappe di pericolosità idraulica definite nell'ambito del P.G.R.A., nei paragrafi seguenti, per ognuno dei tre lotti funzionali in cui è suddiviso il presente progetto, si riporta una disamina delle principali interferenze idrauliche.

### 2.1.1. Lotto 1: PM228 – Bivio Nord Albacina, principali interferenze idrauliche

Con riferimento al Lotto 1 (da progr. 0+000 a progr. 7+200), la principale (e unica) interferenza idraulica è rappresentata dall'attraversamento del Fiume Esino alla progr. 6+600 circa (all'uscita dalla lunga galleria Le Cone), in un tratto fluviale caratterizzato da aree a pericolosità idraulica media (P2).

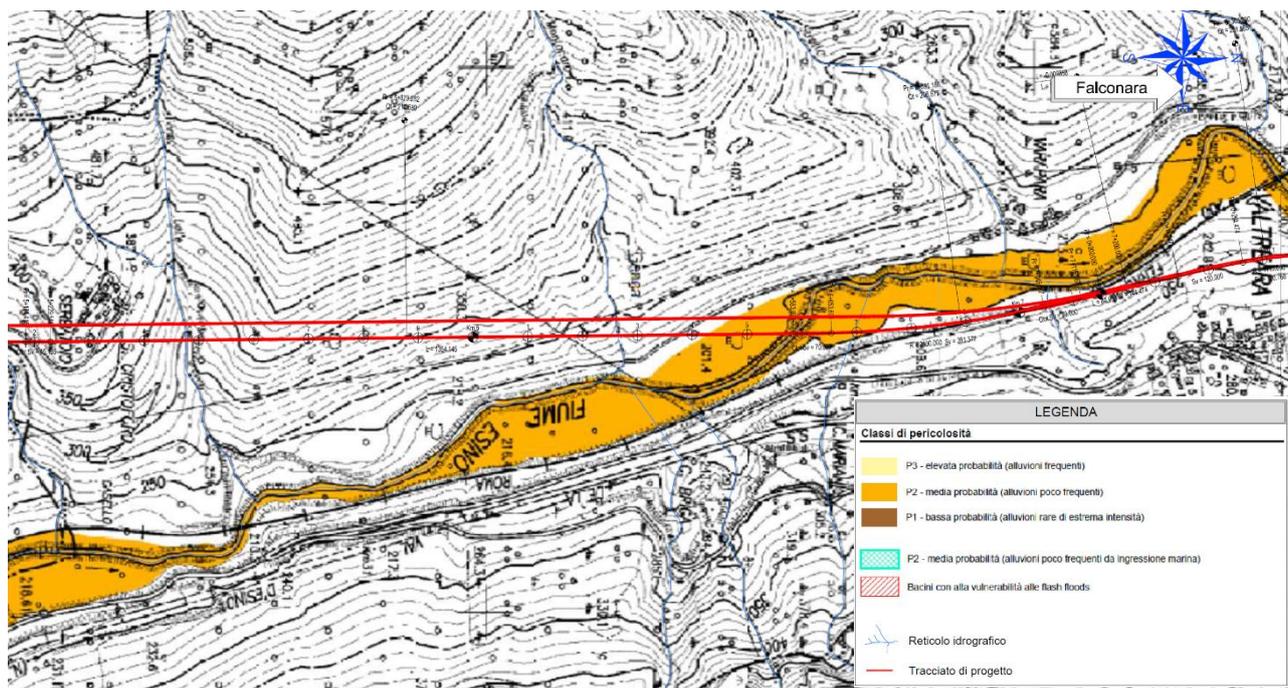


Fig. 1 – Lotto 1: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019) alla progr. 6+600.

### 2.1.2. Lotto 2: Bivio Nord Albacina – Serra San Quirico, principali interferenze idrauliche

Con riferimento al Lotto 2 (da progr. 0+000 a progr. 8+889), le principali criticità e interferenze idrauliche (e/o con aree a pericolosità idraulica) sono rappresentate da:

**RELAZIONE IDRAULICA**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0002 001	B	9 di 31

- attraversamento del Fiume Esino alla prog. 1+100 circa, in un tratto fluviale caratterizzato da aree a pericolosità idraulica media (P2)
- parcheggio a Genga (in cui è prevista la nuova stazione), classificato a pericolosità idraulica media (P2)
- parallelismo/affiancamento stretto con il Fiume Esino (e le sue aree di pericolosità idraulica media, P2) nel tratto tra progr. 2+300 e progr. 2+600 circa

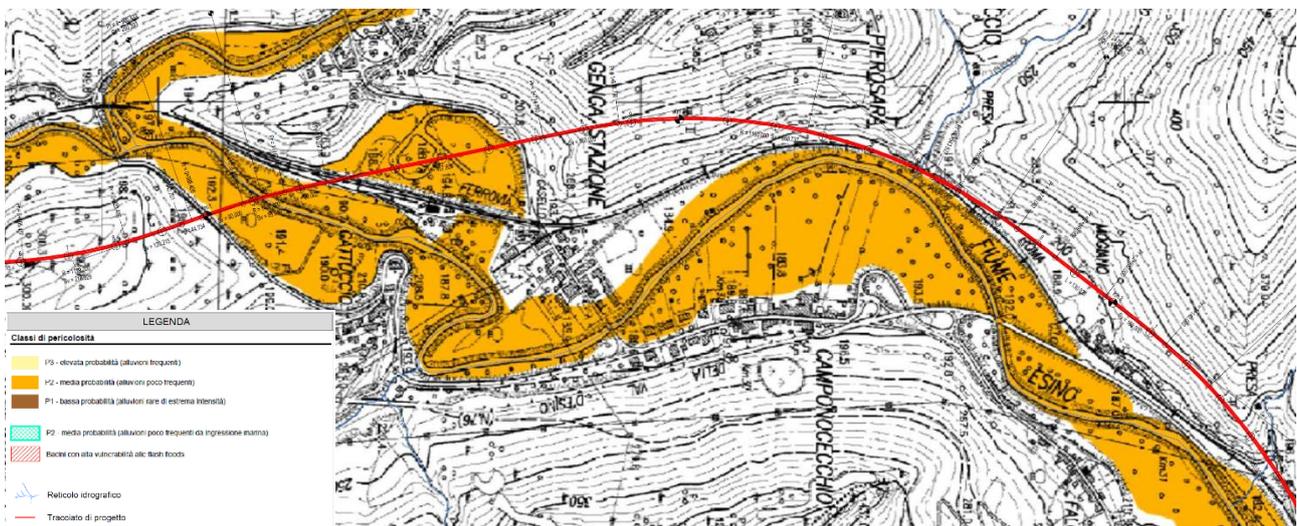


Fig. 2 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 0+600 e progr. 3+400.

- interferenza con le aree di pericolosità idraulica media P2 del Fiume Esino nel tratto tra prog. 3+800 e prog. 4+100
- attraversamento del Fiume Esino alla prog. 4+650 circa, in un tratto fluviale caratterizzato da aree a pericolosità idraulica media (P2)
- attraversamento del Fiume Esino alla prog. 6+100 circa, in un tratto fluviale non caratterizzato da aree a pericolosità idraulica
- parallelismo/affiancamento stretto con il Fiume Esino (e le sue aree di pericolosità idraulica media, P2) nel tratto tra progr. 7+400 e progr. 8+889, in quel di Serra San Quirico

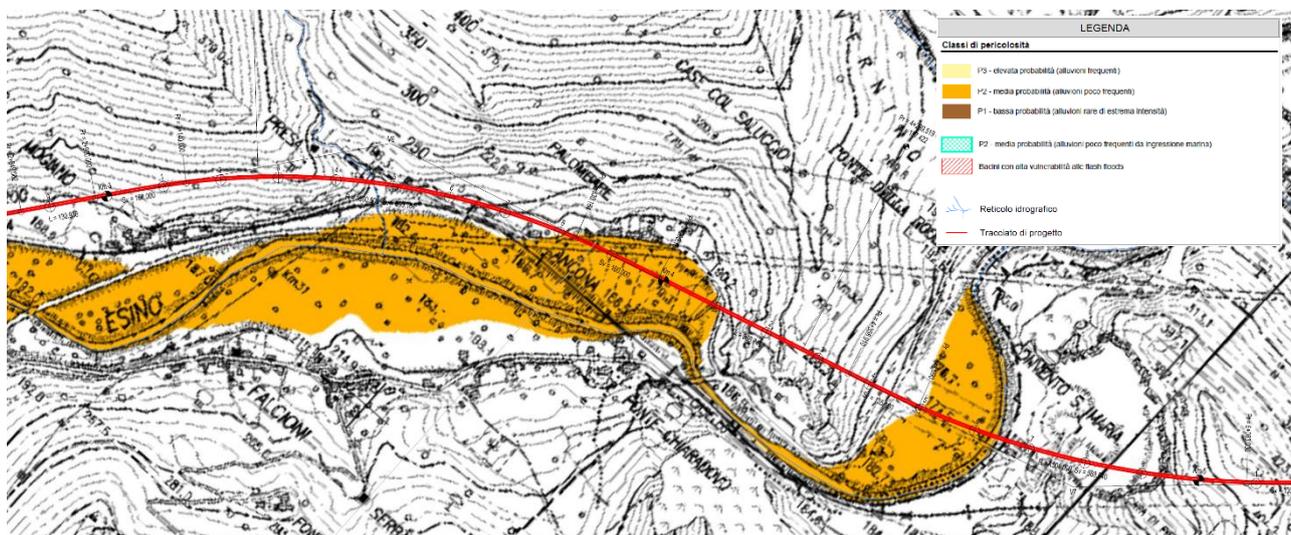


Fig. 3 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 3+000 e progr. 5+000.

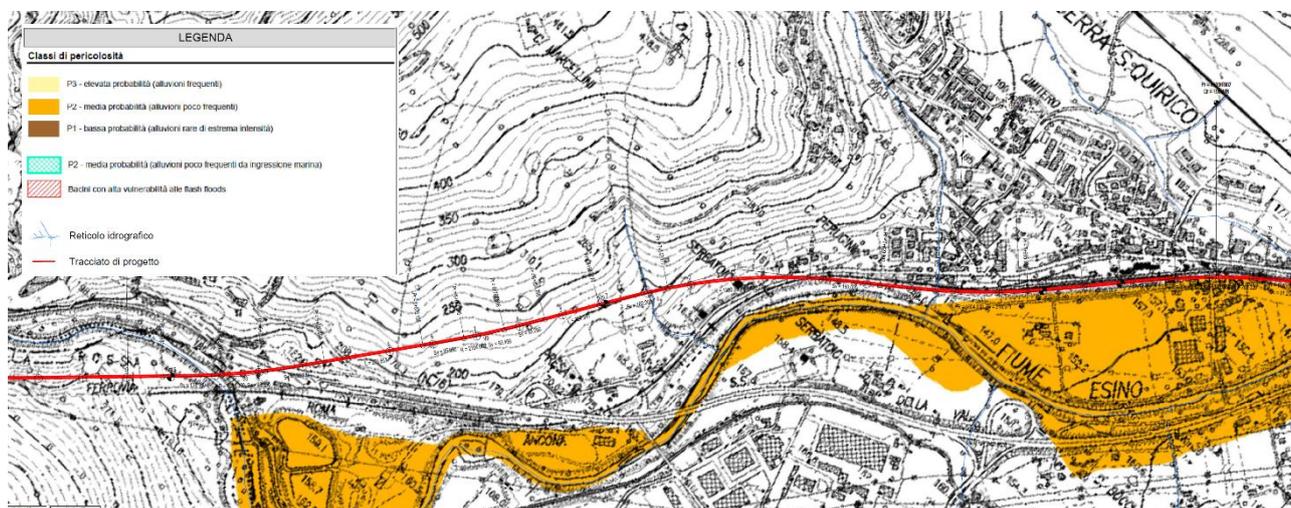


Fig. 4 – Lotto 2: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 5+700 e progr. 8+889.

### 2.1.3. Lotto 3: Serra San Quirico – Castelplanio, principali interferenze idrauliche

Con riferimento al Lotto 3 (da progr. 0+000 a progr. 6+272), le principali criticità e interferenze idrauliche (e/o con aree a pericolosità idraulica) sono rappresentate da:

- parallelismo con il Fiume Esino (e le sue aree di pericolosità idraulica media, P2) nel tratto tra progr. 0+000 e progr. 2+000 (si segnala inoltre anche la presenza dell'interferenza con il Torrente Vallemani alla progr. 1+900 circa, poco prima della sua confluenza nel Fiume Esino)
- attraversamento del Fiume Esino alla progr. 3+050 circa, in un tratto fluviale caratterizzato da aree a pericolosità idraulica media (P2)
- attraversamento del Torrente Esinante (affluente in destra idraulica del Fiume Esino) alla progr. 3+600 circa, in un tratto fluviale caratterizzato da aree a pericolosità idraulica media (P2)
- attraversamento del Fiume Esino alla progr. 4+150 circa, in un tratto fluviale caratterizzato da aree a pericolosità idraulica media (P2)

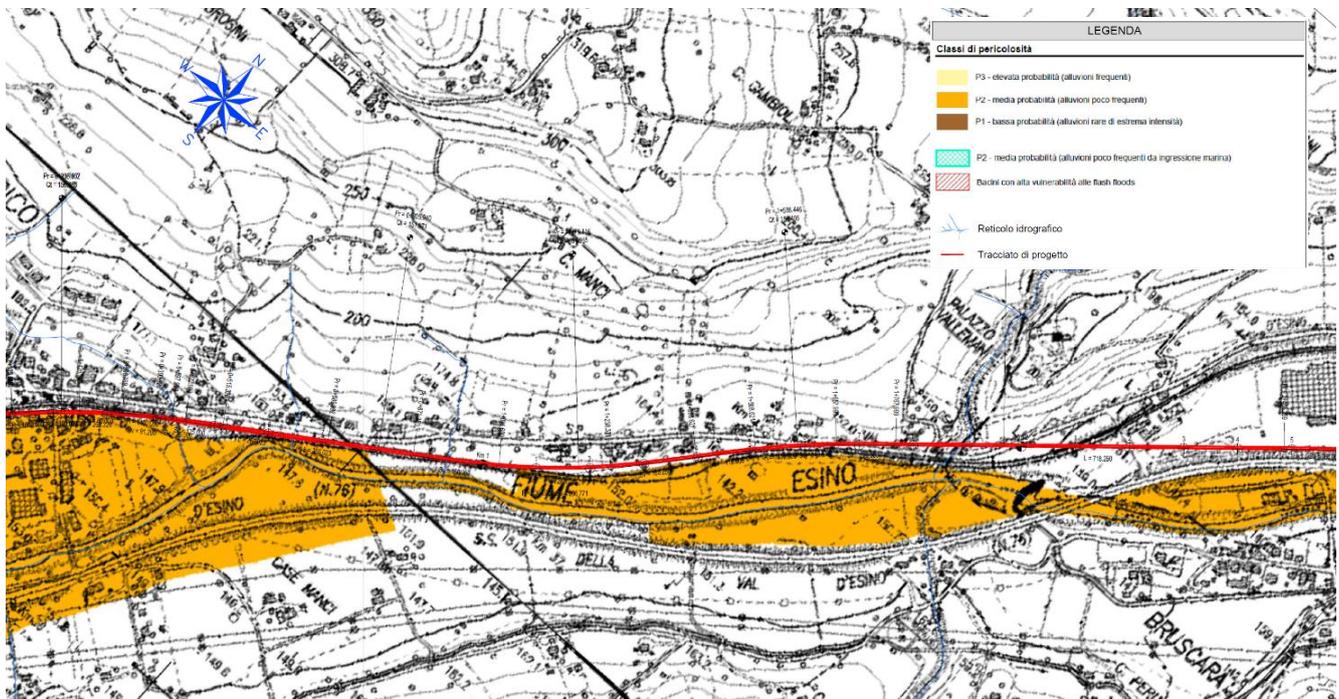


Fig. 5 – Lotto 3: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 0+000 e progr. 2+500.

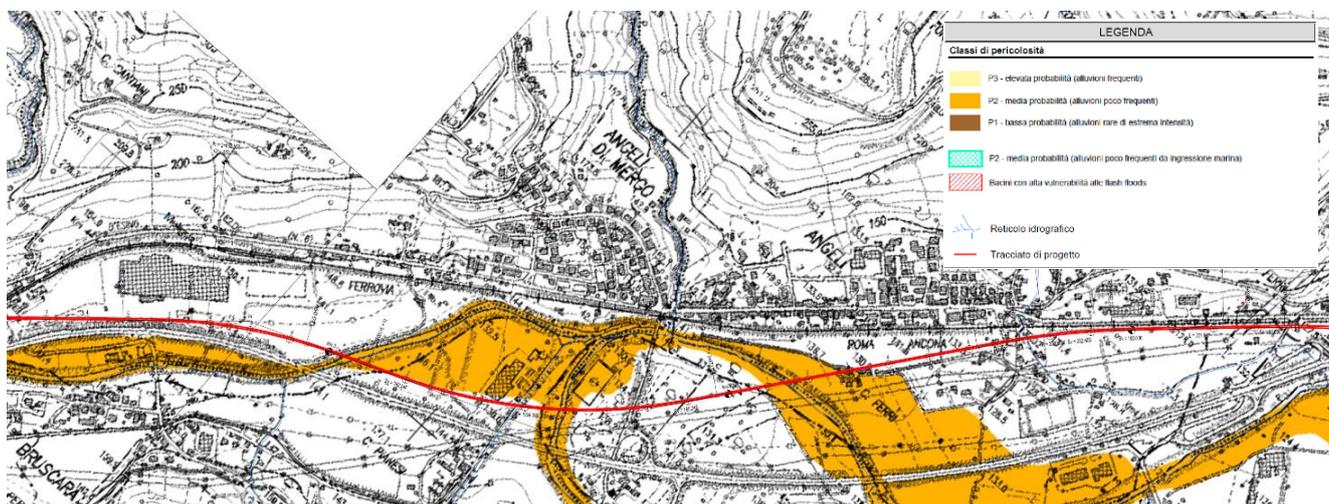


Fig. 6 – Lotto 3: pericolosità idraulica da P.G.R.A. (2019), tra progr. 2+500 e progr. 5+400.

Si è operato quindi in conformità alle Norme Tecniche di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico – P.A.I. Regione Marche (normativa comunque rimasta in vigore e di riferimento nell’ambito della pianificazione di bacino, a seguito anche dell’emanazione del P.G.R.A.A.C.) sviluppando uno studio di compatibilità idraulica in cui si è dimostrata la coerenza delle opere in progetto con quanto proposto nella pianificazione di bacino ed in particolare che gli “interventi previsti rispettino il vincolo di non aumentare il livello di pericolosità e di rischio esistente e di non precludere la possibilità di eliminare o ridurre le condizioni di pericolosità e rischio mediante azioni future”.

## 2.2 Obiettivi dello studio idraulico

In ragione dello scenario di pericolosità idraulica esistente nell’area di intervento precedentemente descritto, si rende necessario quindi uno studio idraulico di dettaglio, atto a verificare quanto definito nell’ambito della pianificazione di bacino vigente (P.A.I. – Regione Marche; P.G.R.A.A.C. – Il ciclo) e a valutare la compatibilità idraulica delle nuove opere di attraversamento e della linea ferroviaria in progetto nel suo complesso.

Per la sicurezza idraulica della linea, le opere d’arte di attraversamento in progetto, nonché l’intera linea ferroviaria, devono osservare le prescrizioni delle NTC2018, ed in particolare della circolare applicativa n.7/2019, del Manuale di progettazione ferroviaria RFI (MdP, rif. *RFIDTCSIPSMAlFS001E*, 2020) e delle

Norme Tecniche di Attuazione (N.T.A.) della pianificazione di bacino vigente (P.A.I. – Regione Marche – ultimo aggiornamento 2016).

In sintesi, con riferimento al MdP RFI, le opere idrauliche principali di attraversamento devono essere verificate per eventi di massima piena caratterizzati da un tempo di ritorno di **200 anni**. Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena, si specifica quanto segue:

- ✓ il franco idraulico tra la quota di intradosso del manufatto ed il livello idrico corrispondente alla piena di progetto ( $Tr = 200$  anni) non deve essere inferiore a 1.50 m nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento;
- ✓ il franco minimo tra la quota di intradosso del manufatto e la quota di carico idraulico totale ( $Tr = 200$  anni) deve essere almeno pari a 50 cm.

Inoltre, nel caso di rilevati vulnerabili per esondazione di corsi d'acqua, *“dovrà essere garantito un franco non inferiore a 1 m tra la quota della piattaforma ferroviaria (piano di regolamento) e la massima altezza raggiungibile dalla quota di massima piena di progetto; le scarpate dovranno essere protette da apposite opere di difesa progettate sulla base dei parametri indicati nei piani di bacino o negli studi idraulici di progetto.”*

Con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), l'opera di attraversamento fluviale deve rispondere ai seguenti requisiti:

*“..... Deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno  $Tr$  pari a 200 anni ( $Tr=200$ ).....Il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati la sezione del corso d'acqua interessata dalla piena di progetto e, se arginata, i corpi arginali. Qualora fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce netta minima tra pile contigue, o fra pila e spalla del ponte, non deve essere inferiore a 40 m misurati ortogonalmente al filone principale della corrente. Nel caso di pile e/o spalle in alveo, cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni in corrispondenza delle fondazioni e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle tenuto anche conto del materiale galleggiante che il corso d'acqua può trasportare. In tali situazioni, una stima anche speditiva dello scalzamento è da sviluppare fin dai primi livelli di progettazione. Il franco idraulico, definito come la distanza fra la quota liquida di progetto immediatamente a monte del ponte e l'intradosso delle strutture,*

*è da assumersi non inferiore a 1,50 m, e comunque dovrà essere scelto tenendo conto di considerazioni e previsioni sul trasporto solido di fondo e sul trasporto di materiale galleggiante, garantendo una adeguata distanza fra l'intradosso delle strutture e il fondo alveo. Quando l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m."*

Nella relativa circolare applicativa n.7 del 21 gennaio 2019, si asserisce inoltre:

*"Quando, per caratteristiche del territorio e del corso d'acqua, si possa verificare nella sezione oggetto dell'attraversamento il transito di tronchi di rilevanti dimensioni, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia indicativamente non inferiore a 6÷7 m. Nel caso di corsi di acqua arginati, la quota di sottotrave sarà comunque non inferiore alla quota della sommità arginale per l'intera luce. Per tutti gli attraversamenti è opportuno che sia garantito il transito dei mezzi di manutenzione delle sponde e/o delle arginature."*

Con riferimento alle N.T.A. del P.A.I. – Regione Marche (2004):

- Piano di Assetto Idrogeologico - Regione Marche – Autorità di bacino regionale - Norme di Attuazione

*Articolo 9 "Disciplina relativa alle aree inondabili"*

.....

*2. Nelle aree inondabili sono consentiti:*

*.....d) la realizzazione di nuove infrastrutture pubbliche o di interesse pubblico, nonché l'ampliamento o la ristrutturazione delle esistenti, purchè compatibili con la pericolosità idraulica della zona.....*

- Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico dei bacini di rilievo regionale – Norme di Attuazione (elaborato d) – DCR n. 116 del 21/01/2004

*Articolo 9 "Disciplina delle aree inondabili"*

.....

*i) realizzazione ed ampliamento di infrastrutture tecnologiche o viarie, pubbliche o di interesse pubblico, nonché delle relative strutture accessorie; tali opere, di cui il soggetto attuatore dà comunque preventiva*

*comunicazione all’Autorità di bacino contestualmente alla richiesta del parere previsto nella presente lettera, sono condizionate ad uno studio da parte del soggetto attuatore in cui siano valutate eventuali soluzioni alternative, la sostenibilità economica e la compatibilità con la pericolosità delle aree, previo parere vincolante della Autorità idraulica competente che nelle more di specifica direttiva da parte dell’Autorità può sottoporre alla stessa l’istanza.....*

Si è proceduto quindi all’implementazione del modello idraulico, numerico, bidimensionale del Fiume Esino, finalizzato alla simulazione della propagazione dell’onda di piena associata ad un tempo di ritorno di progetto di **200 anni**, propedeutica alla verifica di compatibilità idraulica delle nuove opere di attraversamento e del tracciato ferroviario di progetto nel suo complesso.

E’ simulata anche la propagazione delle piene del Fiume Esino associate ai tempi di ritorno di 50 e 500 anni, come da pericolosità idraulica definita nell’ambito della pianificazione di bacino vigente.

### 3. DATI DI BASE

#### 3.1 Rilievi topografici e opere di attraversamento esistenti

I dati topografici a disposizione per l'implementazione del modello numerico 2D sono i seguenti:

- sezioni trasversali dell'alveo e rilievo delle opere di attraversamento esistenti sul F. Esino, ottenute da apposita campagna topografica (2021) condotta da Italferr;

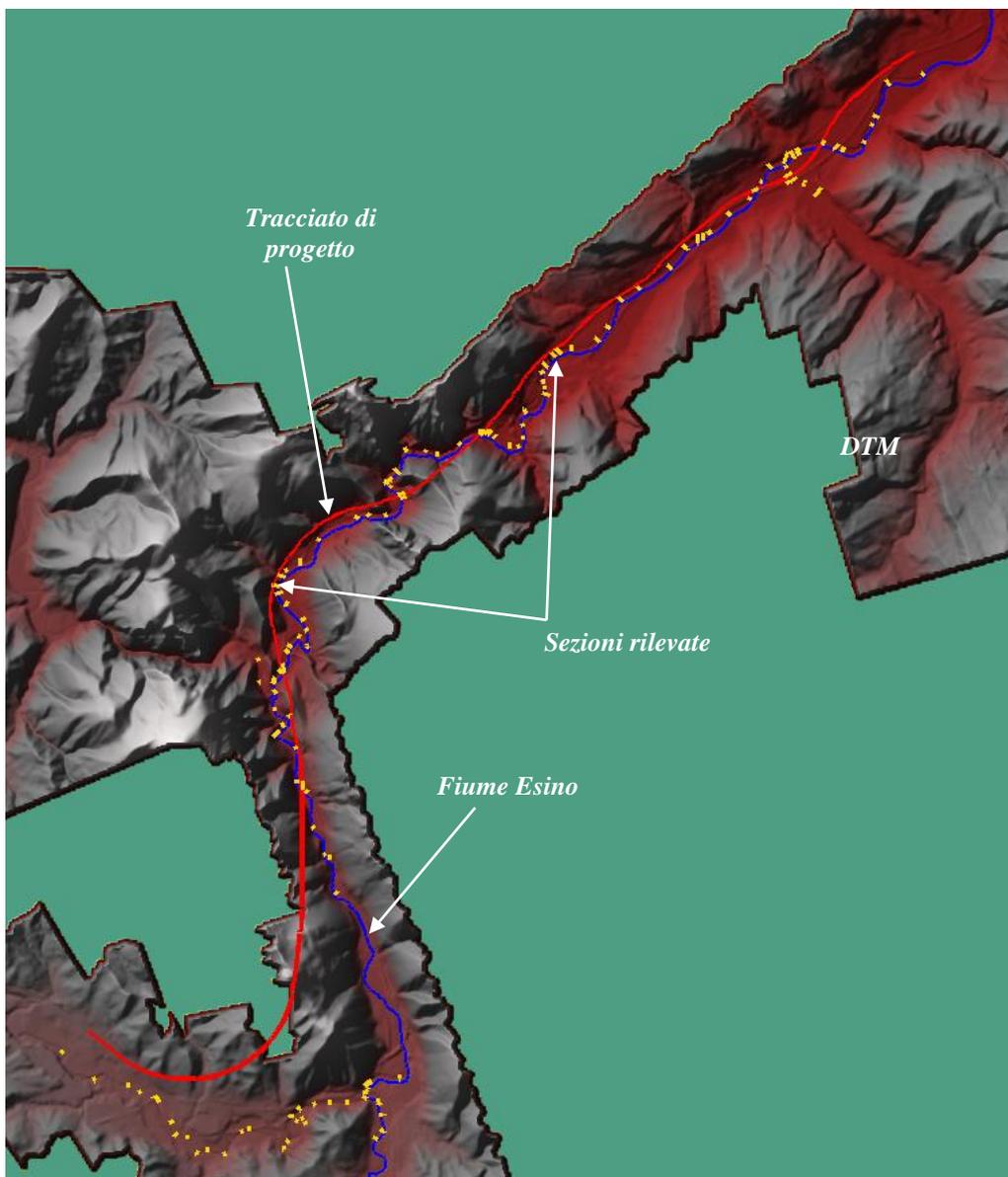


Fig. 7 – Fiume Esino: estensione del rilievo Lidar ed ubicazione delle sezioni rilevate in alveo.

- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 1m x1m, fornito dal Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare;
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 50 punti a m<sup>2</sup>, realizzato da ITALFERR (2022).

Il confronto tra le diverse informazioni topografiche ed in particolare tra le sezioni trasversali ottenute dal rilievo topografico e il rilievo LiDAR ha evidenziato un’ottima corrispondenza sia per quanto riguarda le aree golenali ed esterne all’ambito fluviale che per l’alveo inciso.

Questo ha permesso, nell’implementazione del modello idraulico, di utilizzare le due informazioni topografiche in maniera complementare.

In Fig. 7, è mostrata l’estensione del rilievo Lidar considerato e l’ubicazione delle sezioni rilevate in alveo sulla base delle quali è stato poi ricostruito il DTM (*Digital Terrain Model*) di riferimento per il modello numerico 2D implementato.

Di seguito, si riportano anche le foto di alcuni dei ponti esistenti “rilevati” sul F. Esino, e implementati/considerati nel modello numerico 2D.



Fig. 8 – Ponte ferroviario esistente nel tratto fluviale del Fiume Esino tra le confluenze del T. Giano e del T. Sentino (a monte del nuovo attraversamento previsto alla 6+600 circa del lotto 1).



*Fig. 9 – Ponte ferroviario esistente nel tratto fluviale del Fiume Esino tra le confluenze del T. Giano e del T. Sentino (a valle del nuovo attraversamento previsto alla 6+600 circa del lotto 1).*



*Fig. 10 – Ponte stradale di via San Vittore sul Fiume Esino subito a monte della confluenza del T. Sentino.*



Fig. 11 – Ponte stradale di via G. Marconi sul Fiume Esino a Camponocecchio, Genga.



Fig. 12 – Ponte ferroviario sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Pontechiaradovo.



Fig. 13 – Ponte stradale sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Pontechiaradovo (ingresso nella Gola della Rossa).



Fig. 14 – Ponte stradale sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Pontechiaradovo (ingresso nella Gola della Rossa).



Fig. 15 – Ponte ferroviario sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Gola della Rossa Mineraria.



Fig. 16 – Ponte stradale (SS76) sul Fiume Esino nei pressi della frazione di Gola della Rossa Mineraria.



Fig. 17 – Ponte stradale (SS76) sul Fiume Esino nei pressi di Serra San Quirico.



Fig. 18 – Ponte stradale (SS76) sul Torrente Esinante nei pressi di Castelplanio.

#### 4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO BIDIMENSIONALE

Come anticipato, per la valutazione della compatibilità idraulica della linea ferroviaria in progetto e delle nuove opere di attraversamento previste sul F. Esino, si è proceduto all'implementazione di un modello numerico bidimensionale in regime di moto vario del corso d'acqua finalizzato alla determinazione *i)* delle aree potenzialmente inondabili e *ii)* dei livelli idrici in corrispondenza dei nuovi viadotti, sia nella configurazione *attuale* che *post operam* (o di progetto).

Il codice di calcolo utilizzato è *InfoWorks ICM 9.0*, sviluppato dalla software house Innovyze con sede a Wallingford nel Regno Unito (UK).

##### 4.1 Modellazione bidimensionale

La modellazione bidimensionale di un corso d'acqua permette di rappresentare con accuratezza la propagazione delle onde di piena nell'asta fluviale e nelle aree ripariali attigue con la riuscendo a modellare il comportamento della corrente in prossimità di bruschi restringimenti/allargamenti e forti curvature; è possibile inoltre rappresentare con un elevato grado di dettaglio la propagazione del moto in prossimità di attraversamenti o di eventuali interferenze presenti lungo lo sviluppo del tratto fluviale verso valle. Allo stesso tempo la rappresentazione in termini bidimensionali del campo di velocità consente di analizzare l'evoluzione degli allagamenti indotti dal propagarsi delle onde di piena all'interno dell'area esaminata. Il software impiegato è in grado di contenere all'interno dello stesso modello numerico elementi di tipo bidimensionale e monodimensionale. Il modello numerico utilizzato risolve le equazioni in condizioni di moto vario. Per valutare il campo di moto, il modello numerico implementato in InfoWorks ICM è basato sulla procedura proposta da *Alcrudo and Mullet-Marti (2005)*, *Urban inundation models based upon the Shallow Water Equations*. La rappresentazione bidimensionale del moto si basa sulla risoluzione delle shallow water equations (o SWE). Le ipotesi alla base per la soluzione delle SWE sono che il flusso sia orizzontale e che la variazione della velocità nella verticale rispetto alla direzione del moto sia trascurabile. Inoltre, le equazioni sono sviluppate accettando a priori l'ipotesi di idrostaticità del gradiente delle pressioni lungo la direzione verticale. La formulazione delle SWE utilizzate nel software InfoWorks ICM è riassunta di seguito:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = q_{1D}$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1d}$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1d}$$

I termini citati rappresentano rispettivamente:  $h$ , il tirante idrico della corrente;  $u$  e  $v$ , rispettivamente le componenti della velocità lungo le direzioni  $x$  ed  $y$ ;  $t$ , il tempo;  $g$ , l'accelerazione di gravità;  $S_{0,x}, S_{0,y}$  le componenti dovute alle tensioni tangenziali al fondo, rispettivamente in direzione  $x$  e  $y$ ;  $S_{f,x}, S_{f,y}$ , le componenti dovute alla pendenza del fondo, rispettivamente in direzione  $x$  e  $y$ ;  $q_{1D}$ , la portata immessa per unità di superficie;  $u_{1d}$  e  $v_{1d}$ , le componenti di velocità relative alla portata immessa rispettivamente in direzione  $x$  e  $y$ . Il contributo degli effetti turbolenti viene considerato limitatamente alla turbolenza localizzata alla parete (wall friction), mentre gli effetti turbolenti legati alle fluttuazioni di velocità nelle regioni più interne del fluido vengono trascurate. In genere si ingloba quest'ultimo effetto dissipativo nel termine che rappresenta la dissipazione localizzazione alla parete. La formulazione conservativa delle SWE è essenziale al fine di preservare la massa e la quantità di moto. Questo tipo di formulazione permette di rappresentare le discontinuità nel flusso e i cambiamenti tra moto gradualmente e rapidamente vario (*gradually varied flow* e *rapidly varied flow*). Le SWE, applicate in forma conservativa, sono discretizzate usando lo schema esplicito di primo ordine ai volumi finiti. Gli schemi ai volumi finiti utilizzano volumi di controllo per rappresentare le aree di interesse. Il dominio di calcolo è suddiviso in forme geometriche in grado di interpretare le caratteristiche peculiari del campo di moto stesso sulle quali vengono integrate le SWE. Lo schema che risolve le SWE è basato sullo schema numerico di Gudonov con i flussi numerici attraverso i contorni dei volumi di controllo calcolati. La metodologia secondo i volumi finiti è considerata essere vantaggiosa in termini di flessibilità della geometria e semplicità concettuale. Per ciascun elemento di calcolo il timestep richiesto è calcolato utilizzando le condizioni di Courant-Friedrichs-Lewy al fine di raggiungere la stabilità numerica. La formulazione della condizione di Courant-Friedrichs-Lewy è la seguente:

$$c \frac{\Delta x}{\Delta t} \leq 1$$

dove:  $c$  è il numero di Courant (il valore di default è 0.95). Inoltre, InfoWorks ICM utilizza mesh non strutturate per rappresentare il dominio di calcolo bidimensionale.

## 4.2 Geometria del modello

Le caratteristiche geometriche dell'area di interesse (in seguito definita dominio di calcolo) sono riportate all'interno del modello idraulico tramite una discretizzazione del territorio attraverso elementi generalmente poligonali, nota come mesh. La mesh di calcolo possiede una risoluzione variabile spazialmente tale per cui l'andamento plano altimetrico del territorio è riprodotto con un livello di accuratezza adeguato a rappresentare il corso d'acqua, alvei e golene, sia i canali secondari e le aree ripariali potenzialmente allagabili.

In particolare, è stato modellato/simulato il Fiume Esino per un tratto di lunghezza totale pari a circa 30 km, da PM228 a Castelplanio. Nella figura seguente è riportata l'estensione del dominio di calcolo (superficie = 2810 ha circa).

La geometria del modello è stata implementata utilizzando i dati LIDAR disponibili per l'area in esame e da rilievo topografico, precedentemente descritti. In particolare:

- per la modellazione dell'alveo inciso si è fatto riferimento a sezioni di rilievo topografico;
- le caratteristiche topografiche della rete di calcolo 2D sono state desunte dal modello digitale del terreno ricostruito sulla base del Lidar a maglia 1m x 1m fornito dal Ministero dell'Ambiente, verificando la congruenza tra i rilievi celerimetrici disponibili ed il DTM medesimo.

La rete di calcolo bidimensionale interessa sia l'alveo inciso sia le aree golenali di espansione esterne; questa è stata definita utilizzando le opzioni di discretizzazione automatica del dominio di calcolo presenti in InfoWorks ICM, definendo opportune aree di infittimento della maglia in corrispondenza di elementi morfologicamente ed idraulicamente significativi, quali strade, corsi d'acqua, rilevati, etc.

La mesh di calcolo è costituita da circa 744000 elementi. La creazione della mesh è stata sviluppata in modo tale che le dimensioni massime degli elementi non fossero superiori a valori di 100 m<sup>2</sup> e che le dimensioni minime non fossero inferiori ad un area di 25 m<sup>2</sup>.

Gli infittimenti della mesh (alveo e opere esistenti in alveo) sono stati sviluppati imponendo una dimensione massima degli elementi è pari a 25 m<sup>2</sup> e una dimensione minima di 9 m<sup>2</sup>.

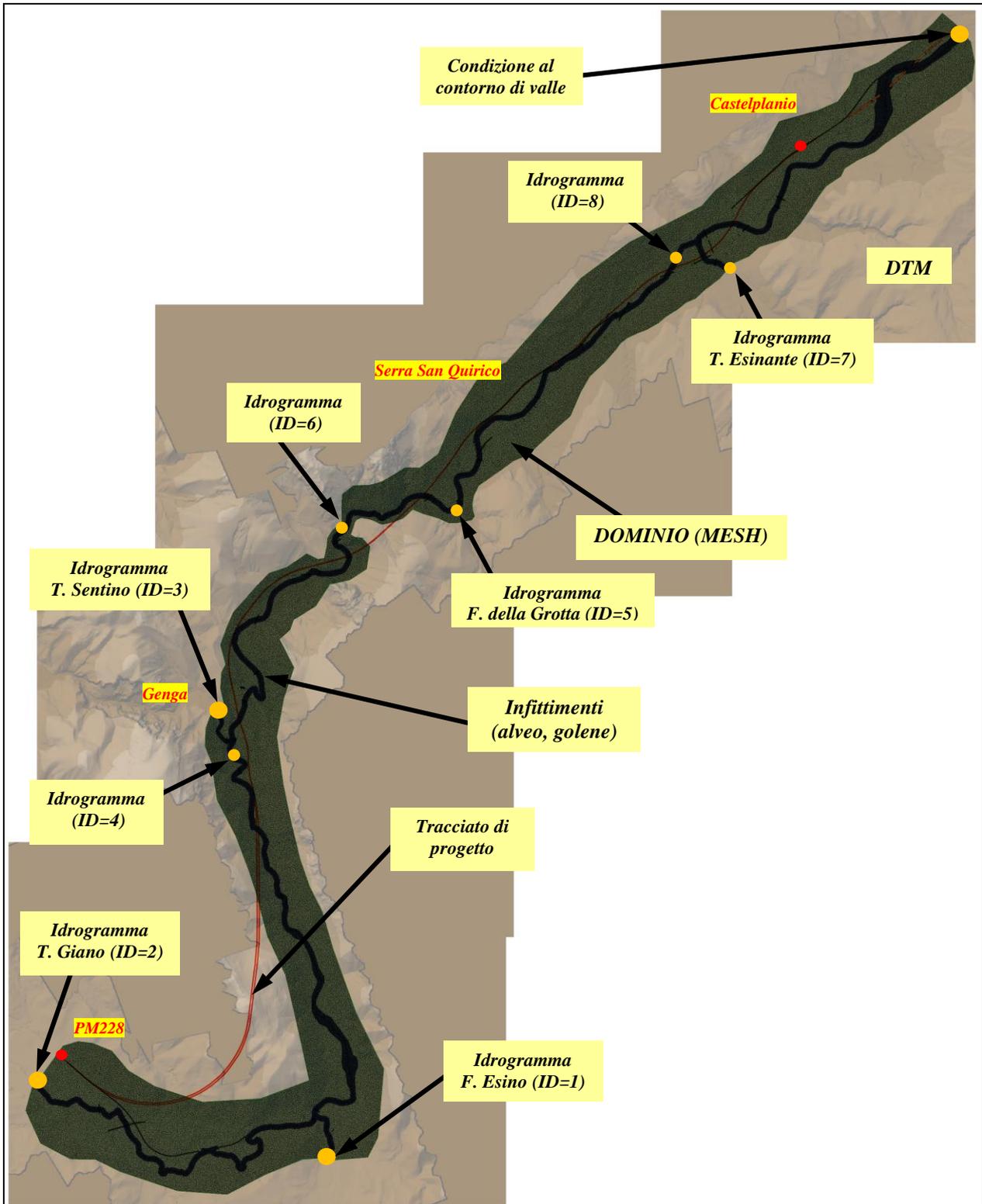


Fig. 19 – Modello numerico 2D del Fiume Esino: estensione del dominio di calcolo e condizioni al contorno.

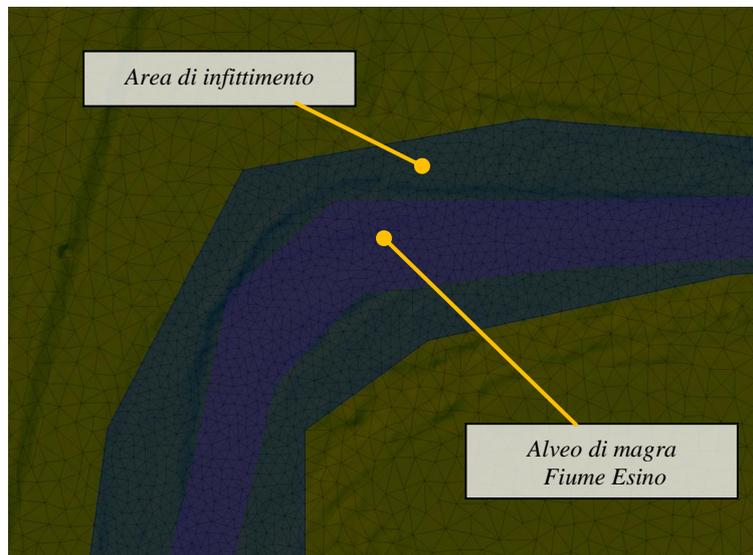


Fig. 20 – Estratto della mesh di calcolo con sovrapposizione del DTM: particolare dell'infittimento.

In ragione della loro elevazione, le opere di attraversamento in progetto sono state implementate nel modello 2D inserendo soltanto le pile (senza impalcati), tramite opportuni poligoni vuoti. Le opere di attraversamento esistenti sul Fiume Esino sono state invece implementate tramite appositi elementi disponibili nel software di calcolo (InfoWorks ICM 9.0). Nello specifico, la riproduzione di un ponte è ottenuta mediante due tipologie di “linea”: 1) Struttura lineare 2D Base (per rappresentare la sezione d'alveo di attraversamento); 2) Struttura lineare – Ponte 2D (per rappresentare l'impalcato e le luci). Mediante la prima linea, viene estratta dal DTM di base la sezione d'alveo in corrispondenza del ponte/viadotto; tramite la seconda linea, viene definita la struttura (impalcato, campate/pile) dell'opera di attraversamento.

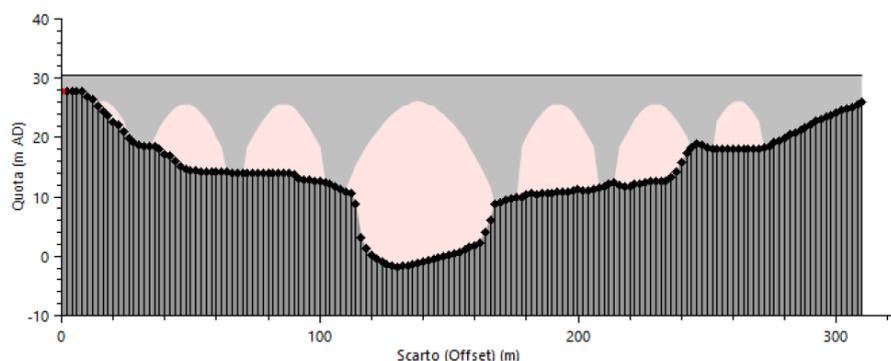


Fig. 21 – Modello numerico 2D: implementazione delle opere di attraversamento in InfoWorks ICM.

### 4.3 Scabrezze

I coefficienti di scabrezza  $n$  di Manning sono stati fissati tramite calibrazione idraulica dei modelli stessi partendo da valori di letteratura. In particolare, in accordo anche alle analisi effettuate nell'ambito degli studi idraulici disponibili sul territorio (i.e. Provincia Ancona; Consorzio di Bonifica delle Marche), per l'alveo e le golene è stato assunto  $n = 0.04$  ( $s/ m^{1/3}$ ); il coefficiente di scabrezza per le aree esterne, potenzialmente inondabili, è stato assegnato pari a  $n = 0.06$  ( $s/ m^{1/3}$ ).

### 4.4 Condizioni al contorno

Gli idrogrammi di riferimento sono quelli ricavati nello studio idrologico, elaborato IR0F00R09RIID0001001 – *Relazione Idrologica: studio idrologico del Bacino del Fiume Esino*, al quale si rimanda. Nelle figure seguenti sono riportati gli idrogrammi di piena del Fiume Esino utilizzati come condizione al contorno di monte del modello numerico idraulico 2D.

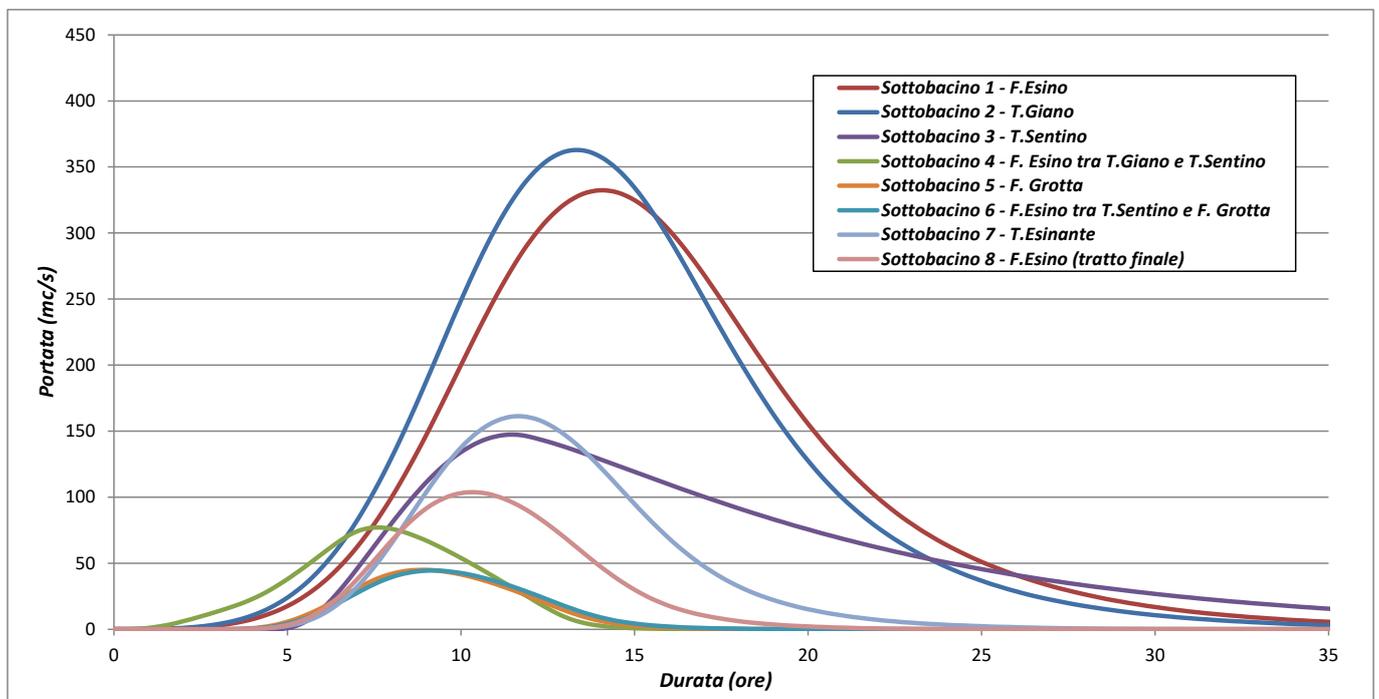


Fig. 22 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per  $Tr = 50$  anni.

**RELAZIONE IDRAULICA**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IR0F	00 R 09	RI	ID0002 001	B	29 di 31

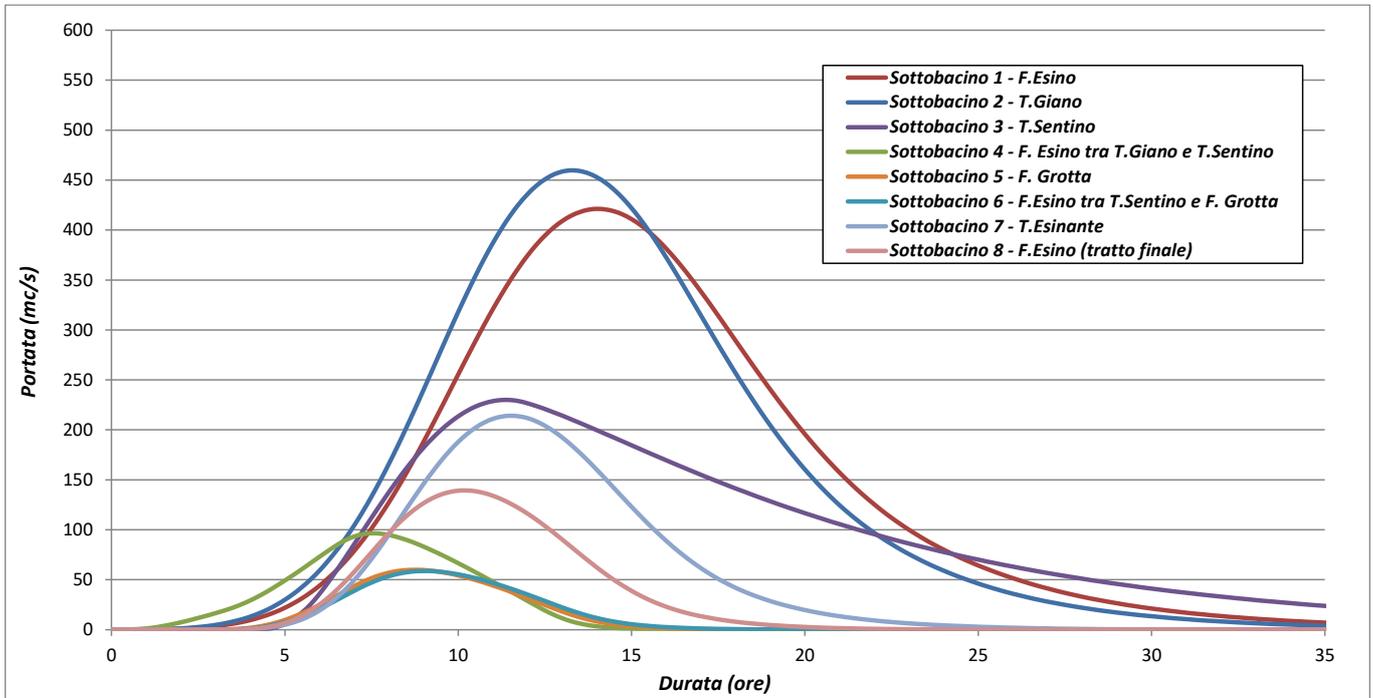


Fig. 23 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per  $Tr = 200$  anni.

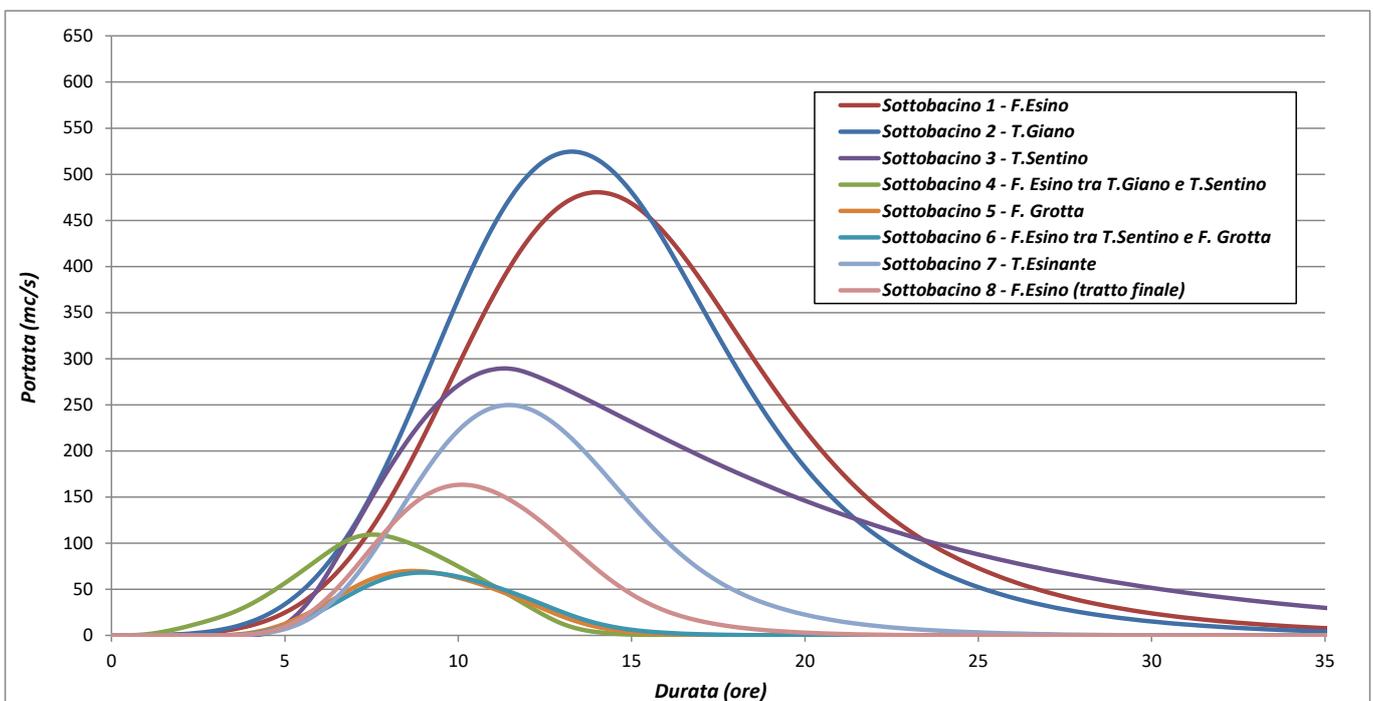


Fig. 24 – Fiume Esino: idrogrammi di piena di progetto per  $Tr = 500$  anni.

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p><b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-CASTELPLANIO PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</b></p>					
<p><b>RELAZIONE IDRAULICA</b></p>	<p>COMMESSA IR0F</p>	<p>LOTTO 00 R 09</p>	<p>CODIFICA RI</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 30 di 31</p>

Per quanto riguarda la condizione al contorno di valle, è stato imposto un livello idrico di moto uniforme (*Normal Depth*), in ragione della sufficiente estensione del modello a valle dell'intervento in progetto.

#### 4.5 Scenari simulati

Al fine di verificare la compatibilità idraulica delle opere di attraversamento in progetto (come da Manuale di Progettazione Ferroviaria RFI, NTC2018 e NTA del P.A.I. - Regione Marche) e di confrontare i risultati ottenuti (in termini di aree potenzialmente inondabili) con le aree di pericolosità idraulica (i.e. *P2, Tr 200*) definite nell'ambito del P.G.R.A.A.C. (2019), sono stati simulati i seguenti scenari riferiti alle configurazioni geometriche:

- *ante operam – Tr = 200 anni*: si intende la geometria ottenuta dal modello del terreno nello stato di fatto;
- *post operam – Tr = 200 anni*: si intende la geometria ottenuta dall'inserimento delle opere in progetto che possono modificare l'attuale espansione delle piene, nonché di interventi di risoluzione di eventuali criticità di natura idraulica.

Si è proceduto anche alla simulazione dell'evento del 10-13 novembre 2013, descritto nello studio idrologico annesso, al fine di verificare l'adeguatezza dei valori di scabrezza assunti (sopra definiti) confrontando i livelli idrici ottenuti dal modello idraulico 2D con i livelli idrometrici misurati/registrati presso gli idrometri di riferimento.

Nello specifico, è noto il livello idrometrico massimo presso la stazione di Camponocchie (unico disponibile, misurato) raggiunto durante l'evento del 2013, ossia +6.0 m da cui, a fronte di uno zero idrometrico di +181.51 m slm, una quota assoluta di +187.51 m slm.

Nella figura seguente è mostrata l'evoluzione del livello idrico (in m slm) estratta dal modello 2D in corrispondenza della sezione presso l'idrometro di Camponocchie.

Si osserva una buona corrispondenza tra risultati numerici e dato registrato.

I risultati della simulazione numerica degli scenari sopra definiti sono descritti e argomentati in dettaglio, per ogni lotto funzionale in cui è suddiviso il progetto, nelle relazioni idrauliche specialistiche dedicate ai singoli lotti alle quali si rimanda per maggiori approfondimenti.

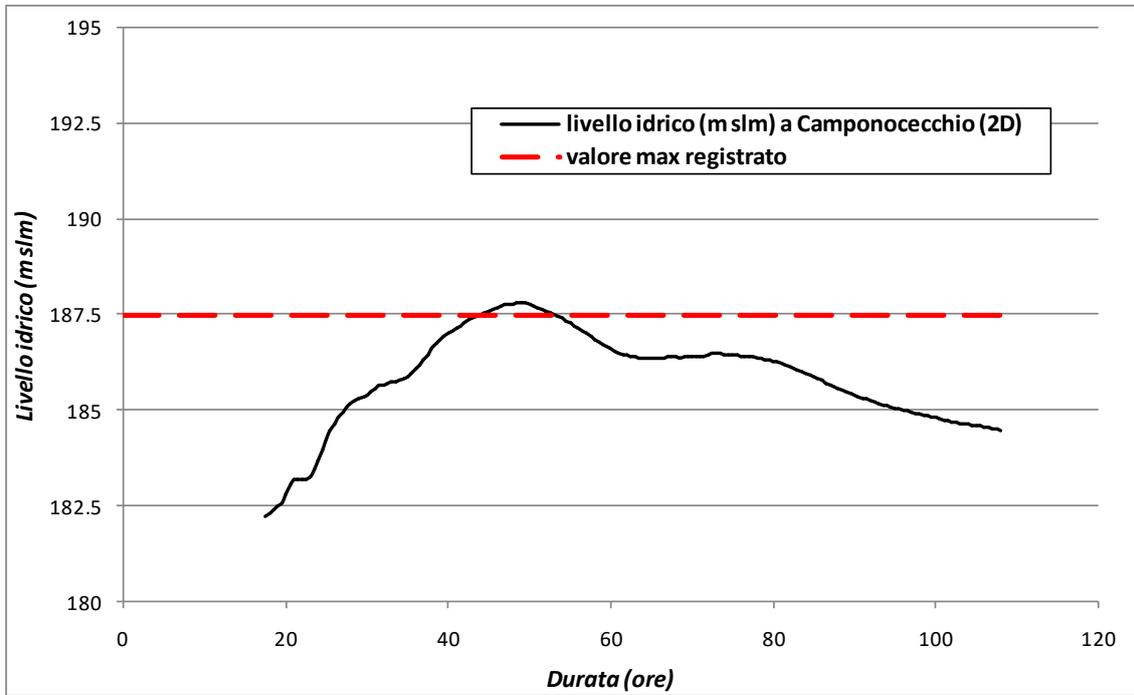


Fig. 25 – Livello idrico (m slm) del Fiume Esino a Camponocchie: modello numerico 2D vs dato registrato.