

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE



DIREZIONE TECNICA

S.O. OPERE CIVILI

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA
RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-ALBACINA

RELAZIONE IDRAULICA

Studio idraulico bidimensionale (2D) del Torrente Giano

SCALA:

-

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

IR0E 00 R 09 RI ID0002 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE DEFINITIVA	C. Cesali	dicembre 2021	F. Cabas	dicembre 2021	C. Urciuoli	dicembre 2021	A. Vittozzi
B	EMISSIONE A SEGUITO MODIFICHE TRACCIATO E OSSERVAZIONI DT RFI	C. Cesali	Luglio 2022	F. Cabas	Luglio 2022	C. Urciuoli	Luglio 2022	Luglio 2022

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

File: IR0E00R09RIID0002001B

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
2.2 OBIETTIVI DELLO STUDIO IDRAULICO.....	8
3. DATI DI BASE.....	10
3.1 RILIEVI TOPOGRAFICI E OPERE DI ATTRAVERSAMENTO ESISTENTI.....	10
4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO BIDIMENSIONALE.....	15
4.1 MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE.....	15
4.2 GEOMETRIA DEL MODELLO	17
4.3 SCABREZZE.....	19
4.4 CONDIZIONI AL CONTORNO.....	19
4.5 SCENARI SIMULATI.....	22
5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE.....	24
5.1 SCENARIO ANTE OPERAM	24
5.2 SCENARIO POST OPERAM.....	26
5.3 SCENARIO ANTE OPERAM CON VIABILITÀ PROVVISORIA NV03A	29
6. VALUTAZIONE DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO	31
7. BIBLIOGRAFIA.....	33

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
	RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA IROE	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B

INDICE DELLE FIGURE

<i>Fig. 1 – Torrente Giano: aree di pericolosità idraulica da P.G.R.A.A.C. (2021).</i>	8
<i>Fig. 2 – Torrente Giano e Fiume Esino: estensione del rilievo Lidar ed ubicazione delle sezioni rilevate in alveo.</i>	11
<i>Fig. 3 – Ponte stradale esistente sul Torrente Giano, in corrispondenza del passaggio a livello alla progressiva Km 229+436.</i>	12
<i>Fig. 4 – Ponte stradale esistente della SS76 sul Torrente Giano, in corrispondenza del passaggio a livello alla progressiva Km 229+436.</i>	12
<i>Fig. 5 – Ponte ferroviario esistente sul Fiume Esino, nei pressi di Albacina.</i>	13
<i>Fig. 6 – Ponte ferroviario esistente sul Torrente Giano, nei pressi di Albacina.</i>	14
<i>Fig. 7 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: estensione del dominio di calcolo e condizioni al contorno.</i>	18
<i>Fig. 8 – Estratto della mesh di calcolo con sovrapposizione del DTM: particolare dell’infittimento.</i>	18
<i>Fig. 9 – Modello numerico 2D: esempio di implementazione delle opere di attraversamento in InfoWorks ICM.</i>	19
<i>Fig. 10 – Fiume Esino e Torrente Giano: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 50$ anni.</i>	20
<i>Fig. 11 – Fiume Esino e Torrente Giano: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 200$ anni.</i>	20
<i>Fig. 12 – Fiume Esino e Torrente Giano: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 500$ anni.</i>	21
<i>Fig. 13 – Nuova viabilità NV03: stralcio della planimetria di progetto.</i>	23
<i>Fig. 14 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, ante operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 1 di 3.</i>	24
<i>Fig. 15 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, ante operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 2 di 3.</i>	24
<i>Fig. 16 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, ante operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 3 di 3.</i>	25
<i>Fig. 17 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, post operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 1 di 3.</i>	27
<i>Fig. 18 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, post operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 2 di 3.</i>	27

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE IDRAULICA</p>	<p>COMMESSA IR0E</p>	<p>LOTTO 00 R 09</p>	<p>CODIFICA RI</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 4 di 33</p>

Fig. 19 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, post operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 3 di 3.....28

Fig. 20 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, per $Tr = 200$ anni, scenario ante operam con viabilità provvisoria NV03 (tratto NV03A).....30

Fig. 21 – Protezione al piede dei muri di sostegno/sottoscarpa in area potenzialmente inondabile: tipologico.....32

Fig. 22 – Protezione delle scarpate dei rilevati in area potenzialmente inondabile: tipologico.....33

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-Albacina*”.

Il presente progetto si basa sullo studio di fattibilità redatto da Rete Ferroviaria Italiana (RFI) nel 2020 e sugli input di base comunicati dalla committenza nei mesi scorsi. L’intervento inizia dal PM228, posto di movimento alla progressiva Km 228+014 della linea storica, e prevede un raddoppio in stretto affiancamento alla linea ferroviaria esistente per circa 4 Km, con un’alternanza di tratti in rilevato e in trincea.

Presso la stazione di Albacina, nella quale viene previsto un nuovo PRG per rispondere alle richieste funzionali della Committenza, verranno realizzati un nuovo sovrappasso, collegamenti pedonali (rampe scale ed ascensori) e nuovi marciapiedi, questi ultimi dotati di nuove pensiline ferroviarie. Nella stazione verranno creati i percorsi tattili e la relativa segnaletica.

Superata Albacina, il tracciato prosegue a semplice binario e si collega con la linea esistente che prosegue, da un lato verso Falconara, e dall’altro verso Macerata/Civitanova Marche. Su tali due rami è previsto soltanto il rifacimento dell’armamento.

Da punto di vista idrologico-idraulico, la tratta ferroviaria in progetto si sviluppa interamente in affiancamento al Torrente Giano (tributario in sinistra idraulica del Fiume Esino), attraversando una serie di corsi d’acqua minori suoi affluenti in sinistra idraulica. Non sono previsti nuovi attraversamenti sul Torrente Giano.

Sulla scorta delle analisi eseguite nell’ambito dello studio idrologico annesso (rif. IR0E00R09RIID0001001), 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 Torrente Giano e alla verifica di compatibilità idraulica della “*nuova*” infrastruttura ferroviaria nel suo complesso, 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, ultimo aggiornamento: Dicembre 2021).

Nella presente relazione è riportata la descrizione dettagliata del processo di implementazione del modello numerico bidimensionale del Torrente Giano (i.e. geometria del modello, scabrezze, condizioni

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA</p>					
<p>RELAZIONE IDRAULICA</p>	<p>COMMESSA IR0E</p>	<p>LOTTO 00 R 09</p>	<p>CODIFICA RI</p>	<p>DOCUMENTO ID0002 001</p>	<p>REV. B</p>	<p>FOGLIO 6 di 33</p>

al contorno, scenari simulati), con estensione da PM228 ad Albacina (fino a dopo la confluenza del Torrente Giano nel Fiume Esino), nonché dei relativi dati di base utilizzati.

Sono discussi i risultati ottenuti nelle due configurazioni geometriche considerate (*ante operam* e *post operam*) e sono descritte le misure/opere di mitigazione/protezione adottate.

Per quanto concerne i modelli idraulici sviluppati per i corsi d'acqua minori, affluenti in sinistra idrografica del Torrente Giano, attraversati dalla linea ferroviaria in progetto, si rimanda alla relazione idraulica IR0E00R09RIID0002002.

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 G.U. n. 28 del 3 febbraio 2017 recante "approvazione del piano di gestione del rischio di alluvioni del distretto idrografico dell'Appennino Centrale" (ultimo aggiornamento: dicembre 2021).

2. INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI DELLO STUDIO

2.1 Pericolosità idraulica nell'area di intervento

La “nuova” tratta ferroviaria *PM228 - Albacina* si sviluppa interamente in affiancamento al Torrente Giano attraversando alcuni corsi d'acqua minori, suoi affluenti. Non sono previsti nuovi attraversamenti sul T. Giano.

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, ultimo aggiornamento: 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).

Come mostrata nella figura seguente, il tracciato ferroviario in progetto non risulta mai direttamente interessato da aree a pericolosità idraulica. Soltanto nel tratto finale (da progr. 2+740 a fine intervento), in corrispondenza della stazione di Albacina, il tracciato ferroviario si sviluppa in adiacenza ad aree di pericolosità idraulica P2.

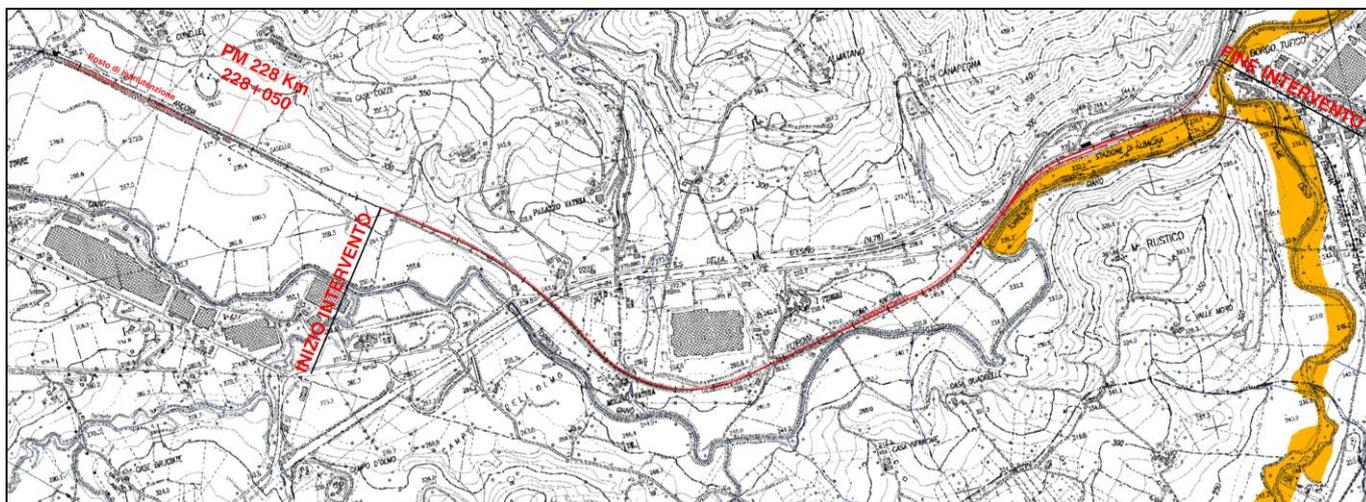


Fig. 1 – Torrente Giano: aree di pericolosità idraulica da P.G.R.A.A.C. (2021).

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., 2021) 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 della linea ferroviaria in progetto nel suo complesso (comprese le opere accessorie quali nuove viabilità, stazione, posti di manutenzione,.....).

Per la sicurezza idraulica della linea ferroviaria, con riferimento alle NTC2018 (e alla circolare applicativa n.7/2019) e al Manuale di progettazione ferroviaria RFI (MdP, rif. *RFIDTCSIPSMAlFS001E*, 2020), nonché alle Norme Tecniche di Attuazione (N.T.A.) della pianificazione di bacino vigente (P.A.I. –

Regione Marche), le verifiche di compatibilità idraulica devono essere condotte per eventi di massima piena caratterizzati da un tempo di ritorno di **200 anni**.

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”* (MdP, rif. *RFIDTCSIPSMAlFS001E*, 2020).

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.....

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA IR0E	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B	FOGLIO 10 di 33

Si è proceduto quindi all'implementazione del modello idraulico, numerico, bidimensionale del Torrente Giano, 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 del tracciato ferroviario di progetto nel suo complesso. Inoltre, i risultati in termini di livelli idrici, in corrispondenza della confluenza dei corsi d'acqua minori attraversati dalla linea ferroviaria in progetto, sono stati considerati nella definizione delle condizioni al contorno nei rispettivi modelli numerici sviluppati (a tal proposito per i corsi d'acqua minori è stato adottato un approccio monodimensionale, in regime di moto permanente, come meglio descritto nella relazione idraulica IR0E00R09RIID0002002).

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 condotta da Italferr;
- rilievo laseraltimetrico (LiDAR), risoluzione 1m x1m, fornito dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

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. 2, 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.

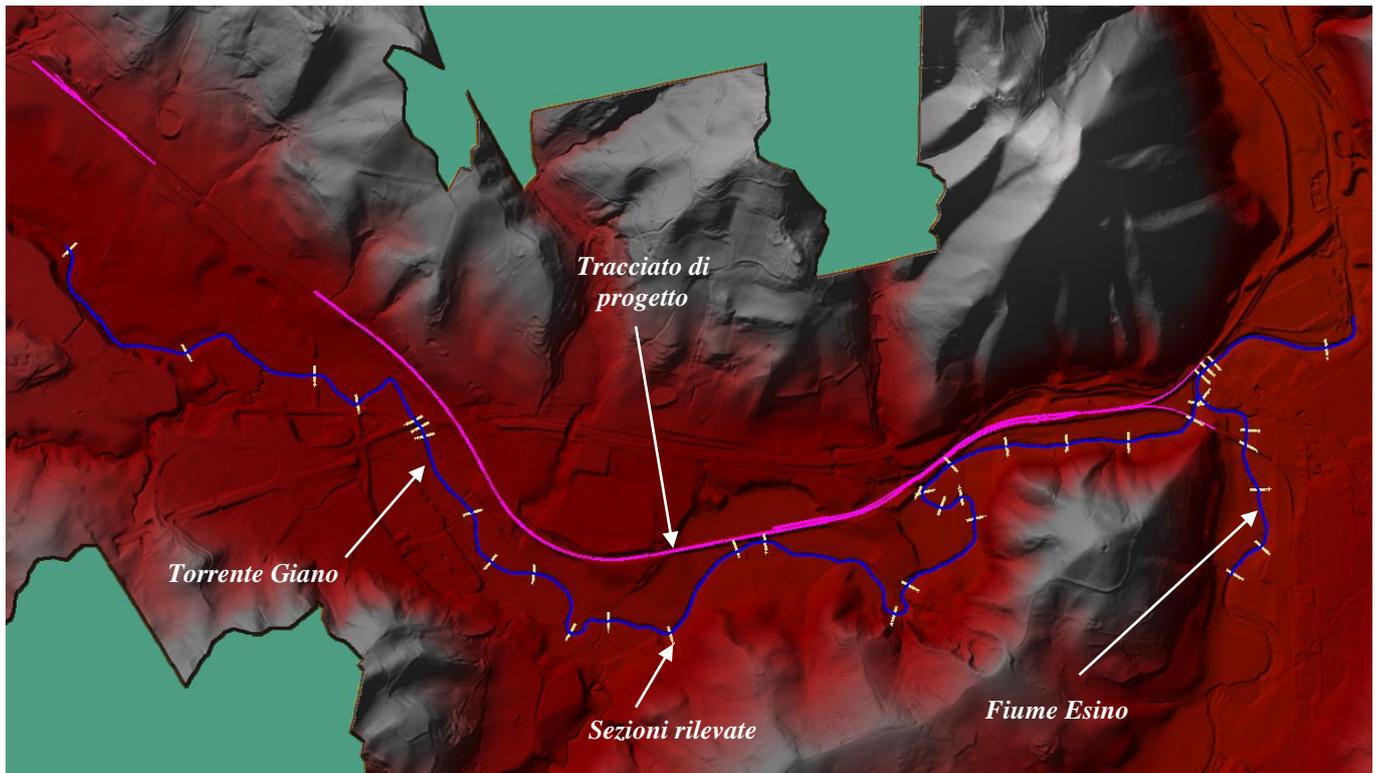


Fig. 2 – Torrente Giano e Fiume Esino: estensione del rilievo Lidar ed ubicazione delle sezioni rilevate in alveo.

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



Fig. 3 – Ponte stradale esistente sul Torrente Giano, in corrispondenza del passaggio a livello alla progressiva Km 229+436.



Fig. 4 – Ponte stradale esistente della SS76 sul Torrente Giano, in corrispondenza del passaggio a livello alla progressiva Km 229+436.



Fig. 5 – Ponte ferroviario esistente sul Fiume Esino, nei pressi di Albacina.



Fig. 6 – Ponte ferroviario esistente sul Torrente Giano, nei pressi di Albacina.

4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO BIDIMENSIONALE

Come anticipato, per la valutazione della compatibilità idraulica della linea ferroviaria in progetto nel suo complesso (che si sviluppa completamente in affiancamento al Torrente Giano), 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 tratti di maggiore vicinanza all'alveo inciso, 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 piano 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, sono stati simulati sia il Torrente Giano che il Fiume Esino, per via della loro confluenza "vicina" all'area di studio. Il Fiume Esino è stato modellato per un tratto di lunghezza pari a 4 km, in corrispondenza della confluenza del Torrente Giano; quest'ultimo è stato modellato per un tratto di 8 km, da PM228 a Albacina. Nella figura seguente è riportata l'estensione del dominio di calcolo (superficie = 1050 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 277000 elementi.

La creazione della mesh è stata sviluppata in modo tale che le dimensioni massime degli elementi non fossero superiori a valori di 75 m² e che le dimensioni minime non fossero inferiori ad un area di 25 m². Gli infittimenti della mesh (alveo e opere esistenti in alveo) sono stati sviluppati imponendo una dimensione massima degli elementi è pari a 25 m² e una dimensione minima di 9 m².

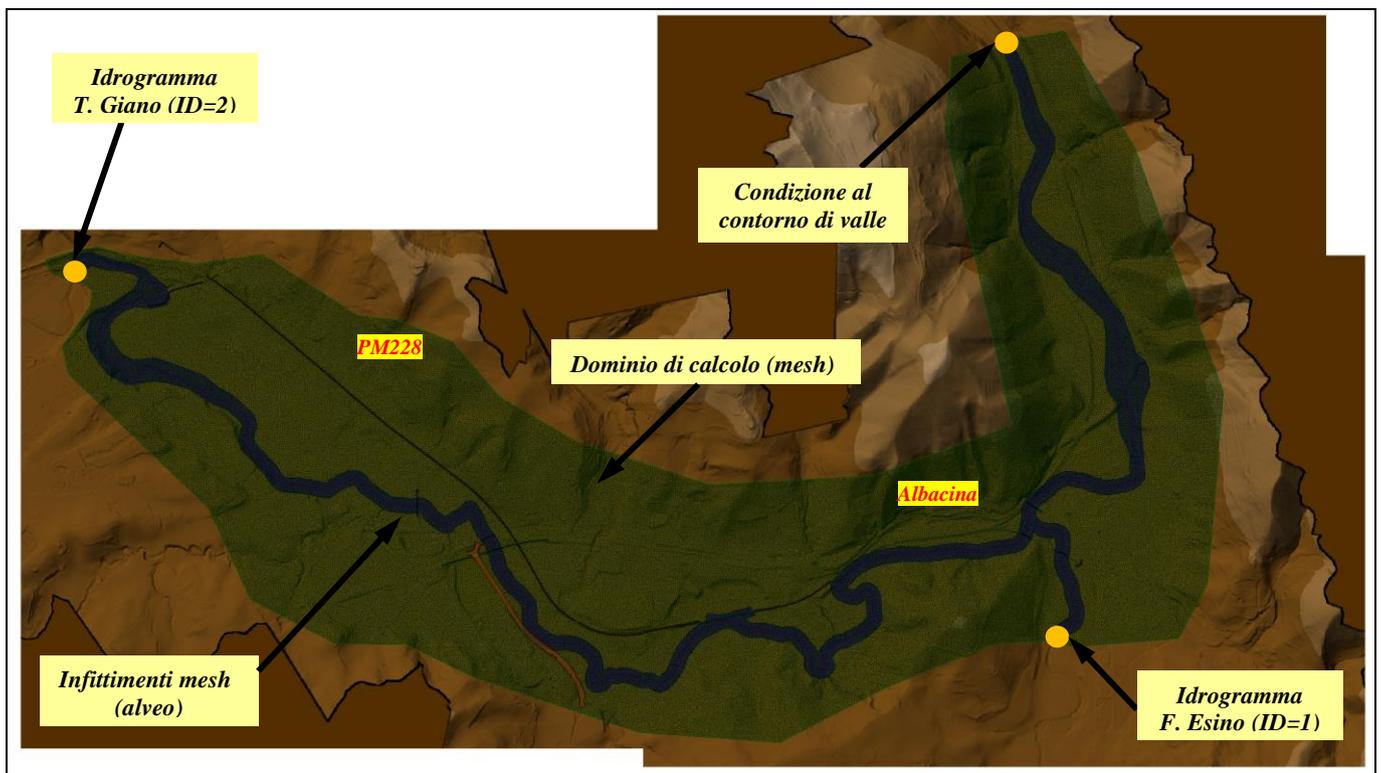


Fig. 7 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: estensione del dominio di calcolo e condizioni al contorno.

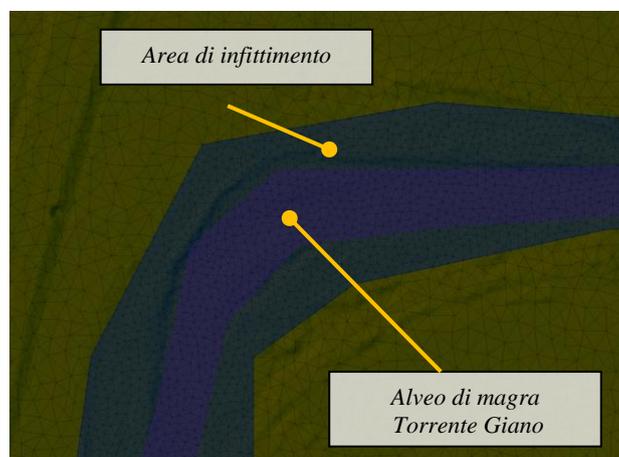


Fig. 8 – Estratto della mesh di calcolo con sovrapposizione del DTM: particolare dell'infittimento.

Le opere di attraversamento esistenti sul Fiume Esino e sul Torrente Giano 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.

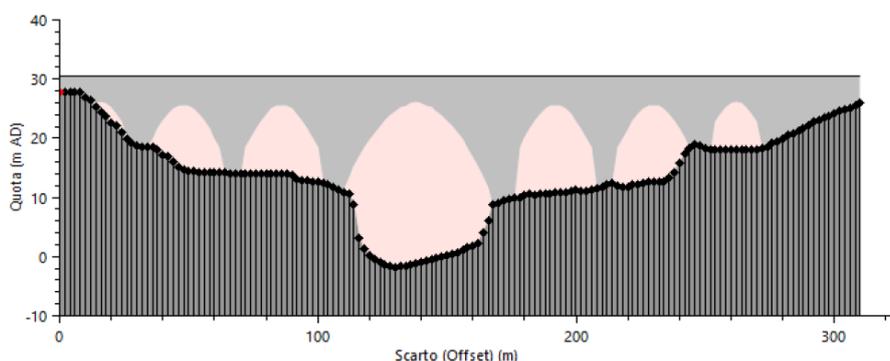


Fig. 9 – Modello numerico 2D: esempio di implementazione delle opere di attraversamento in InfoWorks ICM.

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 IR0E00R09RIID0001001 – *Relazione Idrologica*, 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.

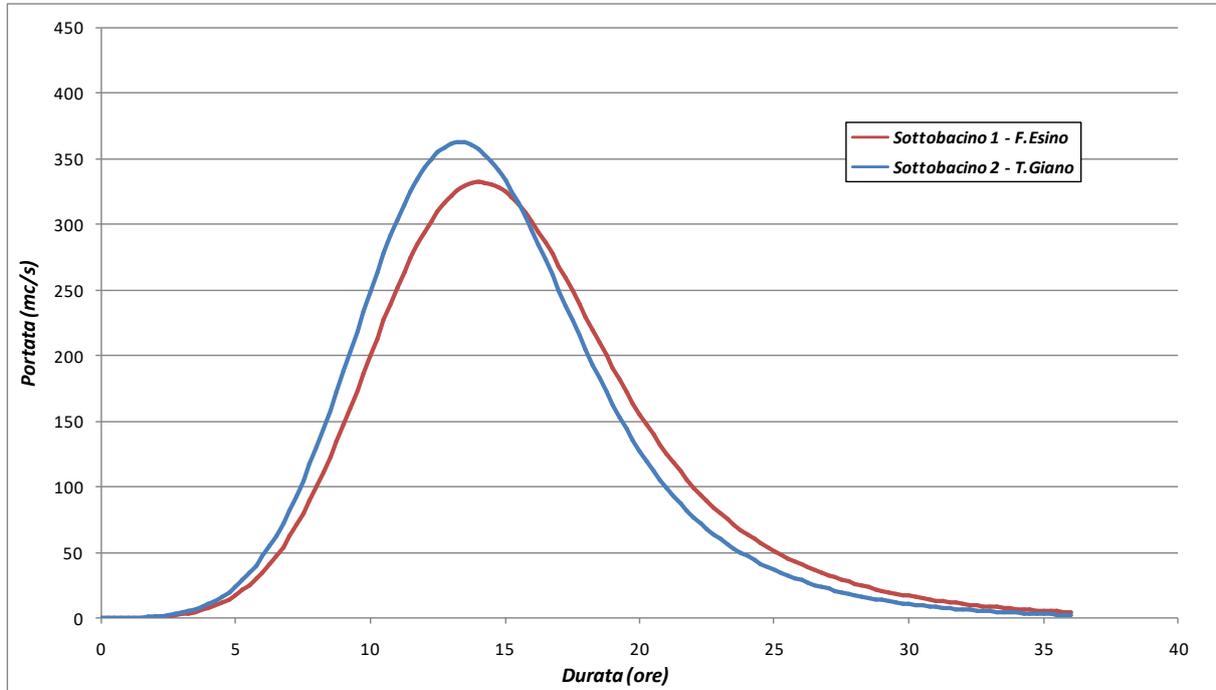


Fig. 10 – Fiume Esino e Torrente Giano: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 50$ anni.

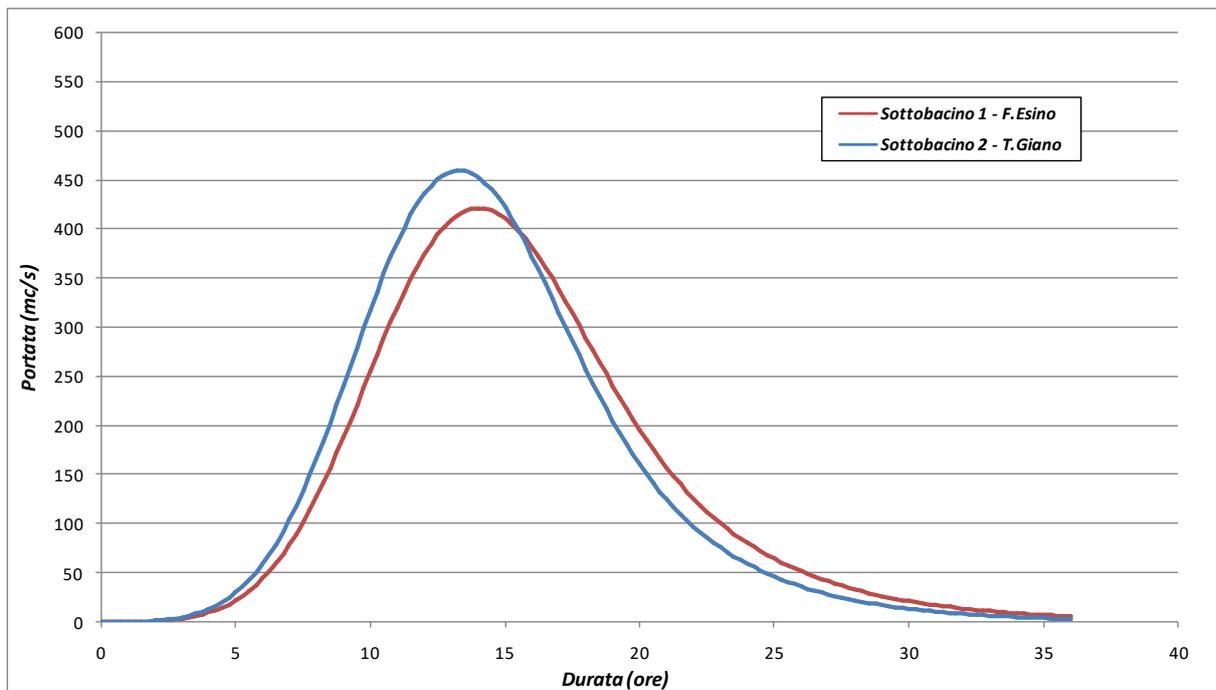


Fig. 11 – Fiume Esino e Torrente Giano: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 200$ anni.

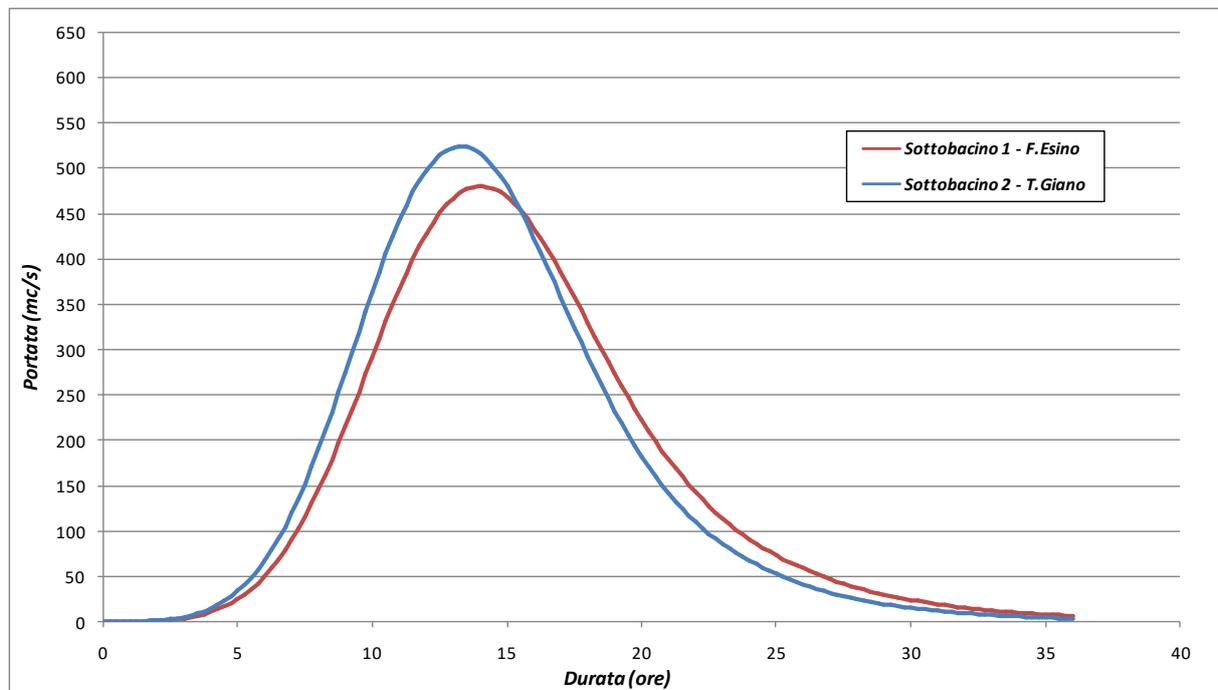


Fig. 12 – Fiume Esino e Torrente Giano: idrogrammi di piena di progetto per $Tr = 500$ anni.

Come anticipato nella relazione idrologica annessa, la simulazione anche della piena del Fiume Esino (concomitante con quella del T. Giano, a parità di tempo di ritorno) è finalizzata principalmente all'instaurare nel modello numerico un livello idrico, sufficientemente cautelativo, alla confluenza del T. Giano, tale da influenzarne la propagazione dell'onda di piena nel tratto fluviale oggetto di studio.

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

	POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE – FALCONARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PM228-ALBACINA PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE IDRAULICA	COMMESSA IR0E	LOTTO 00 R 09	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002 001	REV. B	FOGLIO 22 di 33

4.5 Scenari simulati

Al fine di verificare la compatibilità idraulica dell'infrastruttura ferroviaria in progetto (come da Manuale di Progettazione Ferroviaria RFI, NTC2018 e da NTA della pianificazione di bacino vigente) e di confrontare i risultati ottenuti (in termini di aree potenzialmente inondabili) con le aree di pericolosità idraulica ($P2$, $Tr\ 200$) definite nell'ambito del P.G.R.A.A.C. (2021), in questa fase di progettazione (fattibilità tecnica economica) 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.

Inoltre, è stato simulato un ulteriore scenario relativo alla fase transitoria di realizzazione delle opere in progetto. In particolare, si prevede la realizzazione di una viabilità provvisoria (NV03) che risolve l'interruzione del collegamento attraverso il sottopasso ferroviario SL01 (oggetto di rifacimento) durante le fasi realizzative del raddoppio della linea ferroviaria, garantendo quindi l'accesso al gruppo di case compreso nella zona interclusa tra la ferrovia e il Torrente Giano, in corrispondenza delle progressive di progetto 1+600÷1+700. Tale viabilità provvisoria attraverserà il Torrente Giano e si collegherà alla viabilità di progetto del "Quadrilatero" in corso di realizzazione. Inoltre, si precisa che la viabilità NV03 è suddivisa in due tratti, la NV03A provvisoria e la NV03B che resterà definitiva a valle della realizzazione del sottopasso SL01. Il tratto provvisorio (NV03A), nel quale ricade l'opera di attraversamento del T. Giano (ponte Bailey), avrà una durata di permanenza di circa 6-9 mesi. Tuttavia, poiché interferente con il campo di inondazione del Torrente Giano, si è ritenuto ragionevole verificare la compatibilità idraulica della NV03, ed in particolare del tratto provvisorio NV03A, per una portata al colmo associata ad un tempo di ritorno di 200 anni, al fine di accertare l'assenza di effetti/danni sul territorio provocati dall'opera provvisoria nel caso in cui dovessero verificarsi eventi di piena estremi durante la sua (limitata) permanenza.

Oltre ai due scenari sopra elencati, è stato pertanto simulato lo scenario "*Tr 200 anni – ante operam con viabilità provvisoria NV03A*".

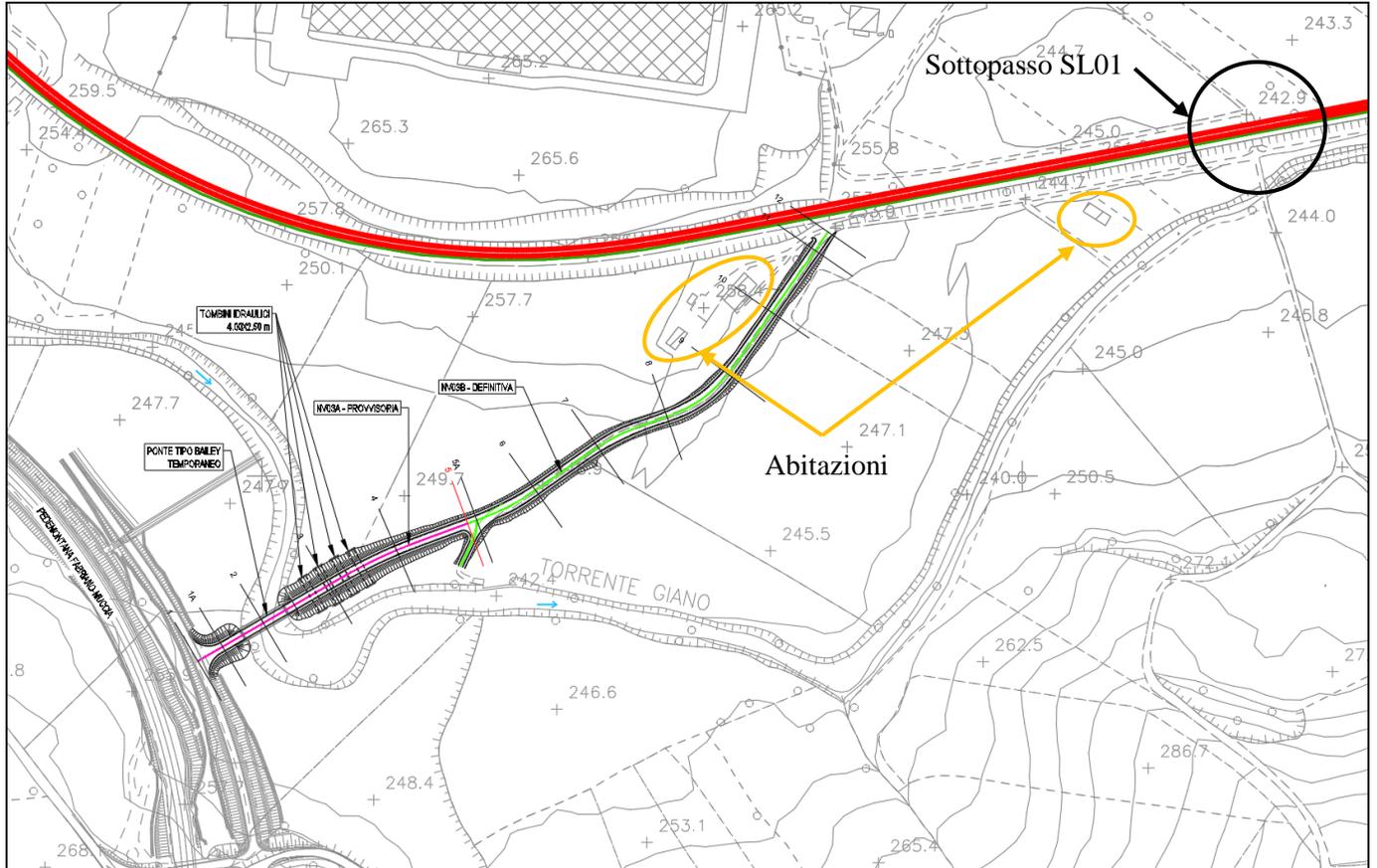


Fig. 13 – Nuova viabilità NV03: stralcio della planimetria di progetto.

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE

5.1 Scenario ante operam

Di seguito, si riportano i risultati in termini di aree di potenzialmente inondabili ($Tr = 200$ anni), lungo l'intero sviluppo del tracciato di progetto, nello scenario "ante operam".

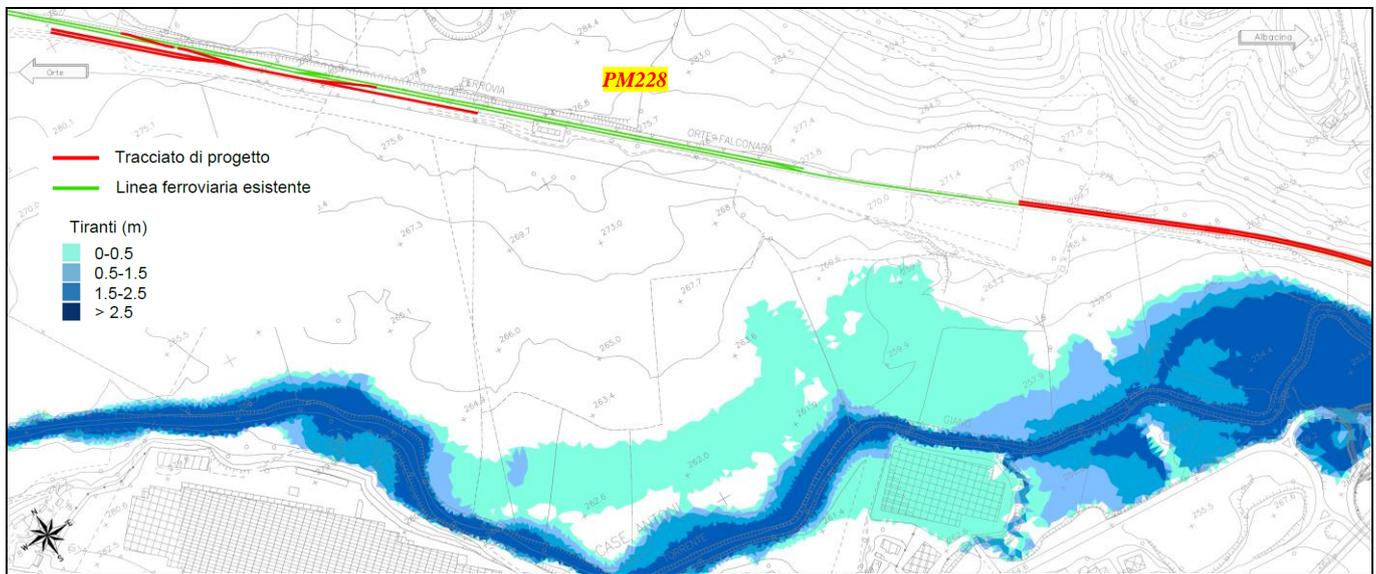


Fig. 14 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, ante operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 1 di 3.

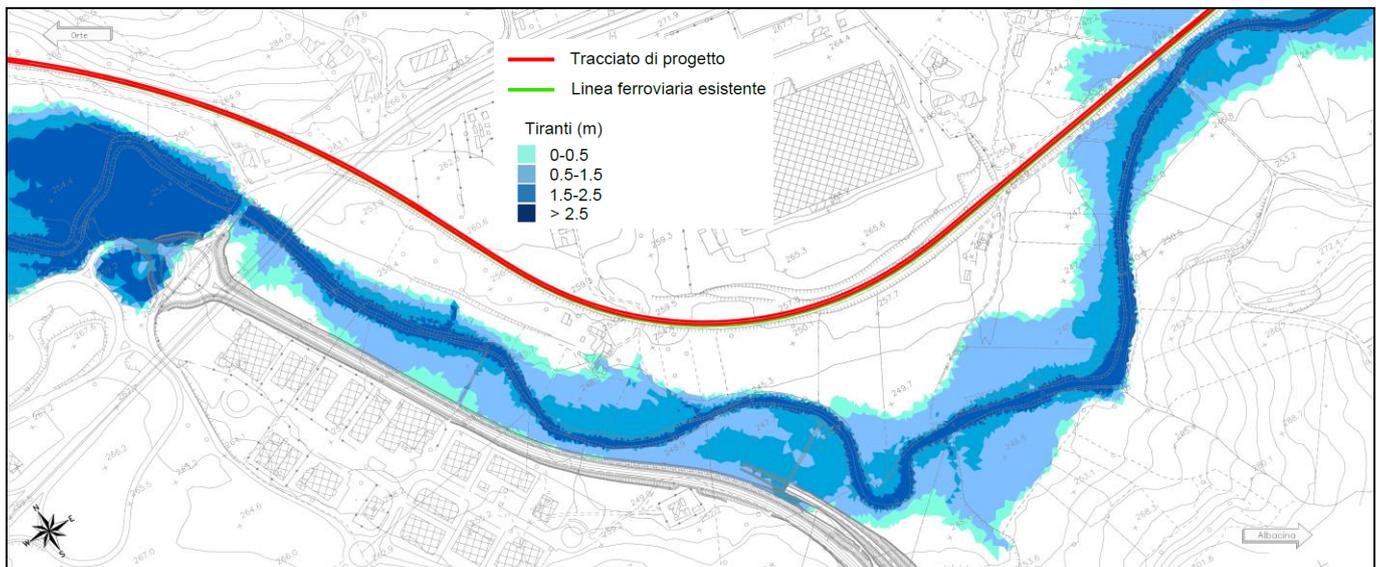


Fig. 15 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, ante operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 2 di 3.

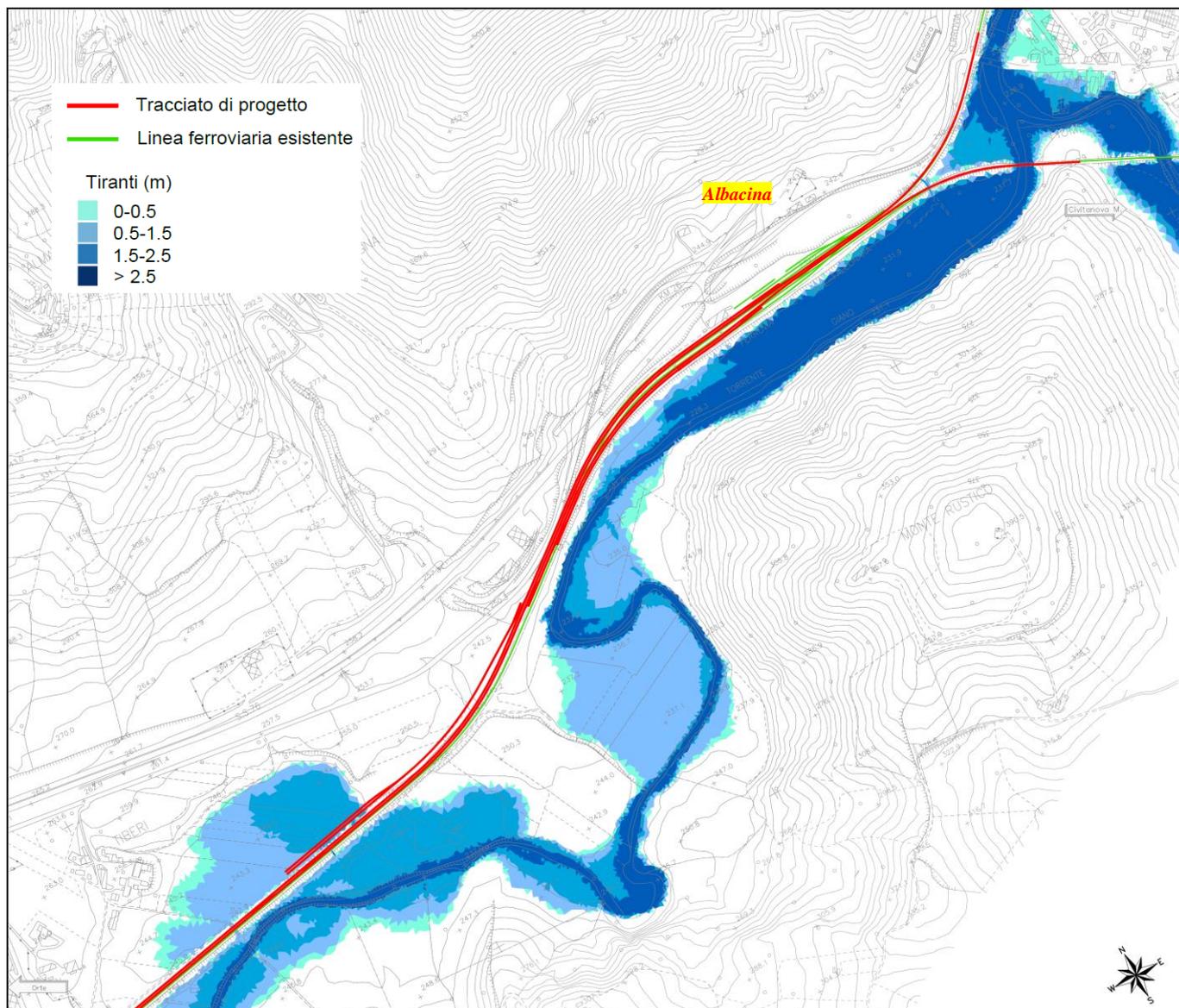


Fig. 16 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, ante operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 3 di 3.

Laddove definite, i risultati numerici riproducono le aree di pericolosità idraulica P2 del PGRAAC (2021), in particolare in quel di Albacina.

Il tracciato di progetto inoltre risulta essere interessato dalle esondazioni del Torrente Giano anche nel tratto compreso tra le progressive 1+900 e 2+380 circa.

In tale tratto, la linea ferroviaria esistente non è soggetta a sormonto, ma il sottopasso esistente alla progr. 230+760 LS (o progr. 2+050 di progetto) e il tombino di drenaggio alla progr. 230+960 LS (o progr. 2+250 di progetto) costituiscono delle vie preferenziale per le acque esondate che, defluendo al loro interno, inondano le aree dalla parte opposta del Torrente Giano (rispetto alla linea ferroviaria).

Lungo il rimanente sviluppo, il tracciato di progetto non è interessato dalle esondazioni.

5.2 Scenario post operam

La configurazione di progetto è rappresentata dai seguenti interventi:

- nuovo posto di manutenzione PM228 e relativa nuova viabilità di accesso (NVP01)
- nuovo posto di manutenzione di Albacina (alla progr. 2+380 circa) e relativa nuova viabilità di accesso (NVP02)
- nuove viabilità NV01 e NV02
- raddoppio ferroviario (con ampliamento della sede dal lato opposto del T. Giano)
- rifacimento del sottopasso (SL01) alla progr. 230+760 LS (o progr. 2+050 di progetto)
- opere presso la nuova stazione di Albacina (sovrappasso, marciapiedi,.....)
- tratto definitivo (NV03B) della nuova viabilità NV03

Tali interventi (e in particolare quelli potenzialmente interferenti con le aree di esondazione del T. Giano determinate nello scenario *ante operam*) sono stati implementati nel modello numerico 2D.

Di seguito, si riportano dunque i risultati in termini di aree di potenzialmente inondabili ($Tr = 200$ anni), lungo l'intero sviluppo del tracciato di progetto, nello scenario "*post operam*".



Fig. 17 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, post operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 1 di 3.

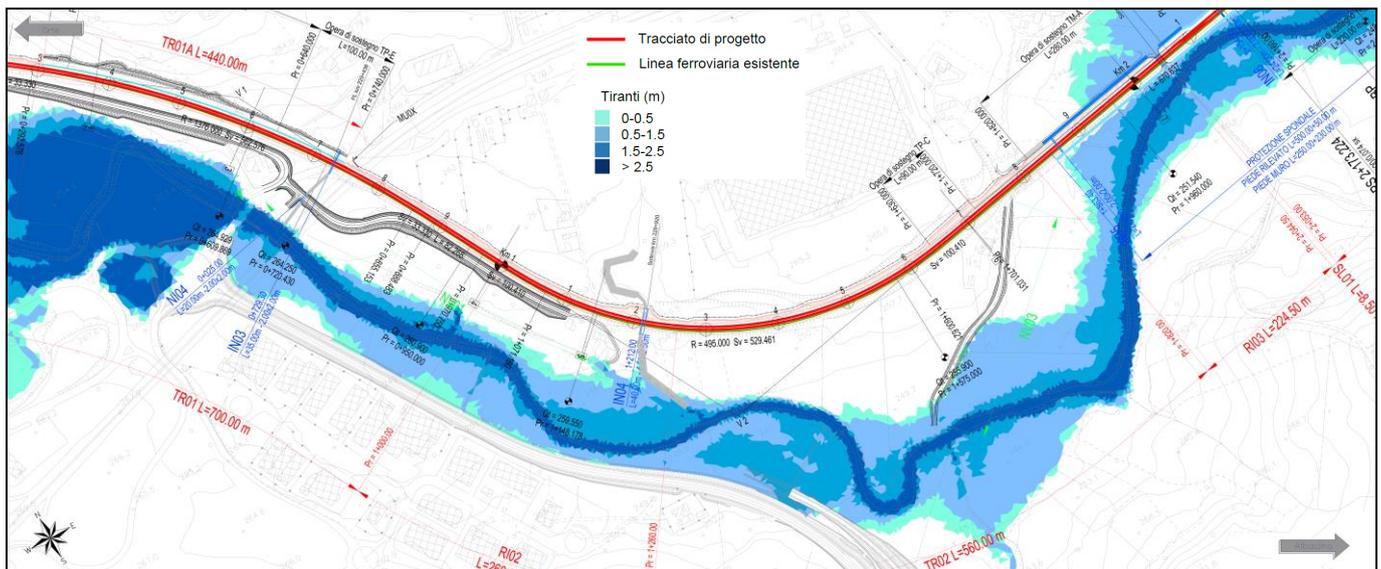


Fig. 18 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, post operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 2 di 3.

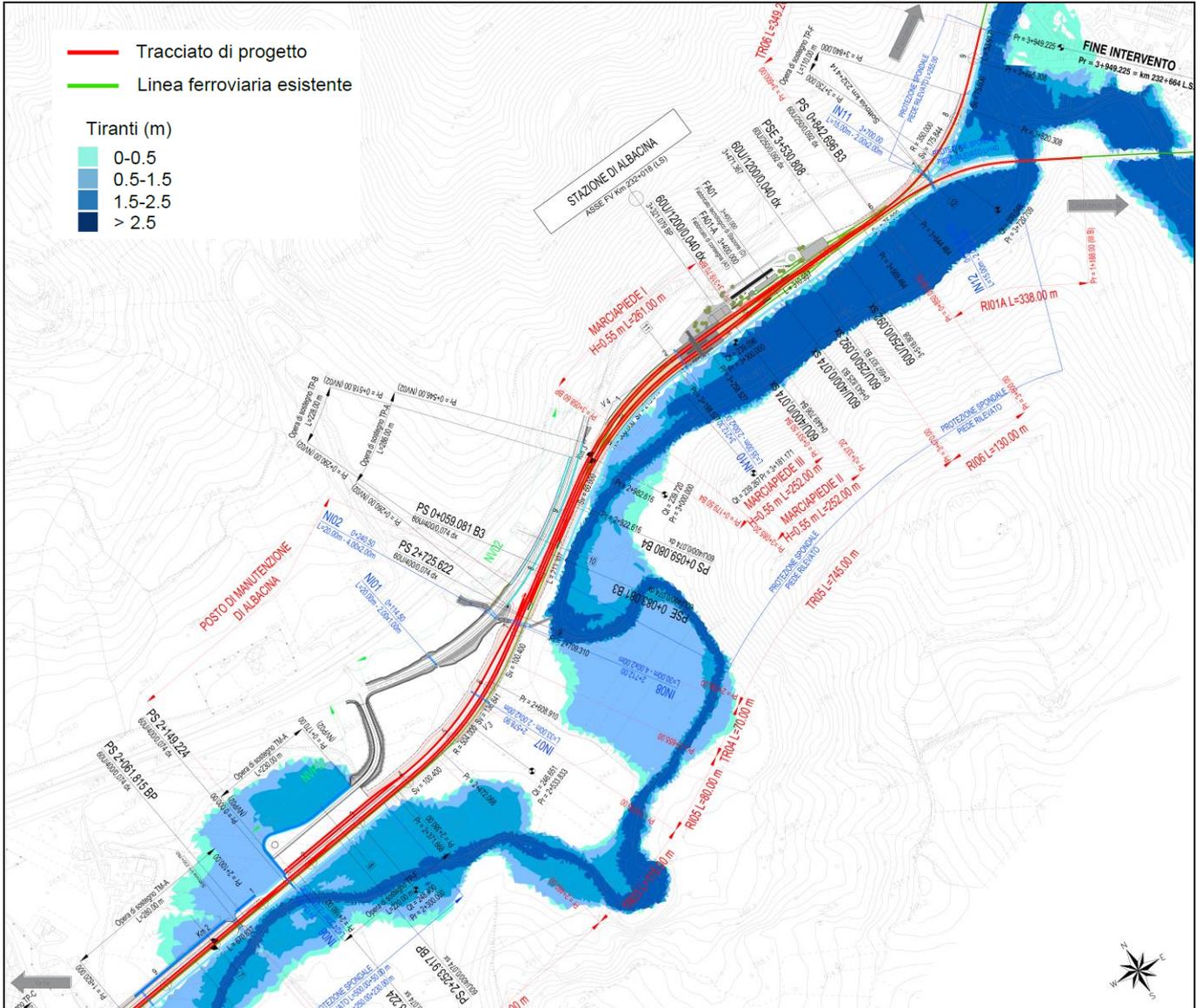


Fig. 19 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, post operam, per $Tr = 200$ anni, tav. 3 di 3.

Non si osservano variazioni sostanziali in termini di livelli idrici e di aree di esondazione rispetto alla configurazione “ante operam”. Il nuovo posto di manutenzione di Albacina (alla progr. 2+380 circa), interessato dalle acque esondate, è collocato ad una quota minima pari a quella dell’attuale linea ferroviaria e di progetto, e comunque superiore ai livelli idrici che si instaurano nelle aree limitrofe, che non vengono di fatto alterati dalla presenza del posto di manutenzione stesso.

E' rispettata ovunque la prescrizione di “*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*”. Inoltre, per i rilevati vulnerabili per le esondazioni del T. Giano, si prevede la posa in opera di adeguate protezioni delle scarpate e del piede dei muri di sostegno o sottoscarpa.

Il sottopasso esistente SL01, oggetto di rifacimento (progr. 2+050) continua ad essere interessato dalle acque esondate del T. Giano, come già nello stato ante operam. Si dovranno/potranno prevedere (come meglio definito nelle successive fasi progettuali) opere di presidio quali allarmi, semafori, barriere (sistemi di allertamento) al fine di impedirne l'accesso in caso di eventi di piena estremi.

Anche il tombino di drenaggio IN06 alla pk 2+250 (o pk 230+960 della linea storica) continua a costituire una via preferenziale per le acque esondate che, defluendo al suo interno, inondano le aree dalla parte opposta del Torrente Giano. Con riferimento all'esondazione del Torrente Giano per l'evento di piena associato ad un tempo di ritorno di 200 anni, il tombino IN06 in progetto (dimensioni 2m x 2m, pk 2+250) è soggetto all'imbocco lato fiume ad un tirante massimo di 1.30 m. Anche in tale scenario, il funzionamento del tombino risulta essere a pelo libero.

Per maggiori dettagli circa i risultati delle simulazioni numeriche condotte negli scenari ante e post operam, si rimanda agli elaborati grafici annessi alla presente relazione (IR0E00R09P6ID0002001÷8; IR0E00R09WZID0002001; IR0E00R09FZID0002001).

5.3 Scenario ante operam con viabilità provvisoria NV03A

Come anticipato, si è proceduto alla simulazione numerica della propagazione della piena con $Tr = 200$ anni del Torrente Giano anche in presenza della viabilità NV03, in particolare del tratto provvisorio NV03A nel quale ricade anche l'attraversamento del corso d'acqua.

La configurazione geometrica simulata in tal caso è costituita da:

- stato dei luoghi attuale (*ante operam* rispetto al progetto di raddoppio ferroviario)
- tratto provvisorio (NV03A) della nuova viabilità NV03
- tratto definitivo (NV03B) della nuova viabilità NV03

Di seguito, si riportano dunque i risultati in termini di aree di potenzialmente inondabili ($Tr = 200$ anni), in corrispondenza della NV03.

Nello specifico, la nuova viabilità, ed in particolare il tratto provvisorio NV03, provoca un innalzamento dei livelli idrici ed un conseguente aumento dell'estensione delle aree di esondazione con $Tr = 200$ anni (soprattutto a monte della nuova viabilità, in sinistra idraulica), tuttavia in aree già in parte destinate all'espansione delle piene del Torrente Giano (come determinato nelle simulazioni numeriche dello scenario "ante operam") e comunque non sensibili ovvero senza elementi/beni esposti (e.g. abitazioni, infrastrutture,...).

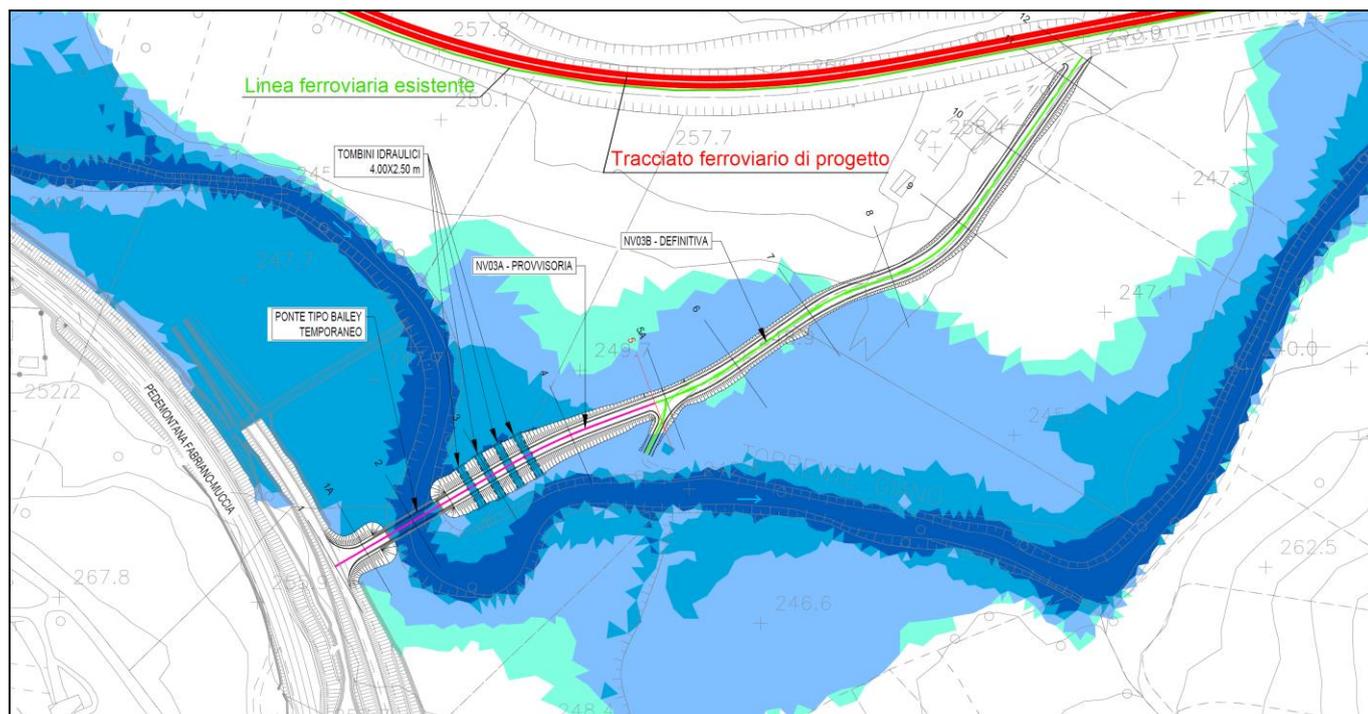


Fig. 20 – Modello numerico 2D del Torrente Giano: aree potenzialmente inondabili, per $Tr = 200$ anni, scenario ante operam con viabilità provvisoria NV03 (tratto NV03A).

Al fine di ridurre l'incremento dei livelli idrici, si prevede la posa in opera di 4 tombini di trasparenza nel rilevato stradale nel tratto NV03A. In corrispondenza dell'attraversamento del Torrente Giano, realizzato con un ponte Bailey, il franco idraulico ($Tr200$) si attesta a 1,5 m. Per maggiori dettagli, si rimanda all'elaborato grafico annesso IR0E00R09P7ID0002001.

6. VALUTAZIONE DI COMPATIBILITA' IDRAULICA DELLE OPERE IN PROGETTO

Lo studio di compatibilità idraulica è stato redatto secondo quanto previsto dalla Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) della Regione Marche, nonché dalle normative nazionali di riferimento. La linea ferroviaria in progetto si sviluppa completamente in affiancamento al Torrente Giano, attraversando una serie di corsi d'acqua minori suoi affluenti. Non sono previsti nuovi attraversamenti sul T. Giano.

I risultati delle simulazioni numeriche, condotte secondo un modello bidimensionale in regime di moto vario, riproducono le aree di pericolosità idraulica P2 del PGRAAC (2021), laddove definite, in particolare in quel di Albacina. Il tracciato di progetto inoltre risulta essere interessato dalle esondazioni del Torrente Giano anche nel tratto compreso tra le progressive 1+900 e 2+380 circa.

Tale situazione non è individuata nelle mappe di pericolosità idraulica del PGRAAC (2021). In tali aree, dalla parte opposta del Torrente Giano, sarà collocato il futuro nuovo posto di manutenzione di Albacina, che avrà una quota di imposta minima almeno pari a +246.00 m slm (+1.5 m rispetto ai livelli idrici circostanti che raggiungono quota +244.50 m slm). La propagazione della piena TR200 del Torrente Giano non risente dell'occupazione parziale di tali aree di espansione da parte del nuovo posto di manutenzione di Albacina.

Il tratto definitivo della nuova viabilità NV03 (NV03B), sviluppandosi marginalmente alle aree di esondazione Tr200 del T. Giano, non ne influenza la propagazione delle piene.

E' rispettata ovunque la prescrizione di *“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”*. Inoltre, per i rilevati vulnerabili per le esondazioni del T. Giano, si prevede la posa in opera di adeguate protezioni delle scarpate e del piede dei muri di sostegno o sottoscarpa (secondo i tipologici mostrati nelle figure seguenti).

Le velocità massime della corrente in corrispondenza dei rilevati soggetti ad esondazione ($T_r = 200$ anni) si attestano a 2 m/s. Con riferimento alla tabella seguente, tratta dal manuale *HEC 11 – Design of Rip rap Revetment*, per tali velocità e per la pendenza delle scarpate dei rilevati ferroviari in progetto (2/3), nonché per la tipologia di materiali impiegati per la loro realizzazione, i materassi tipo Reno (con spessore pari a 30 cm) previsti in progetto risultano essere adeguati.

Bank Soil Type	Maximum Velocity (m/sec)	Bank Slope	Min. Required Mattress Thickness (mm)
Clays, heavy cohesive soils	3.048	< 3V:1H	228.6
	3.962-4.877	< 2V:1H	304.8
	any	< 2V:1H	> 457.2
Silts, fine sands	3.048	< 2V:1H	304.8
Shingle with gravel	4.877	< 3V:1H	228.6
	6.096	< 2V:1H	304.8
	any	< 2V:1H	> 457.2

In definitiva, è dimostrata la compatibilità idraulica dell'infrastruttura ferroviaria in progetto, nonché delle opere annesse (i.e. fabbricati, nuove viabilità, posti di manutenzione,...), in termini sia di franco di sicurezza sia di possibile interferenza con le aree potenzialmente inondabili del Torrente Giano.

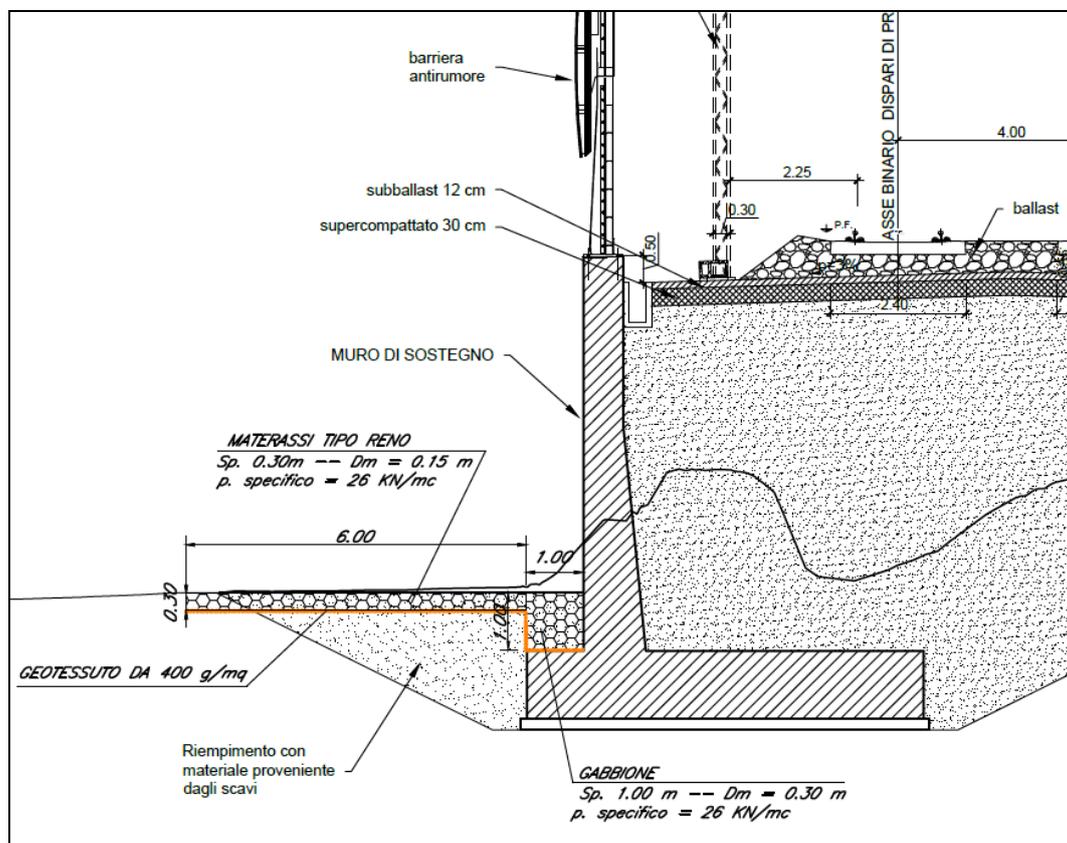


Fig. 21 – Protezione al piede dei muri di sostegno/sottoscarpa in area potenzialmente inondabile: tipologico.

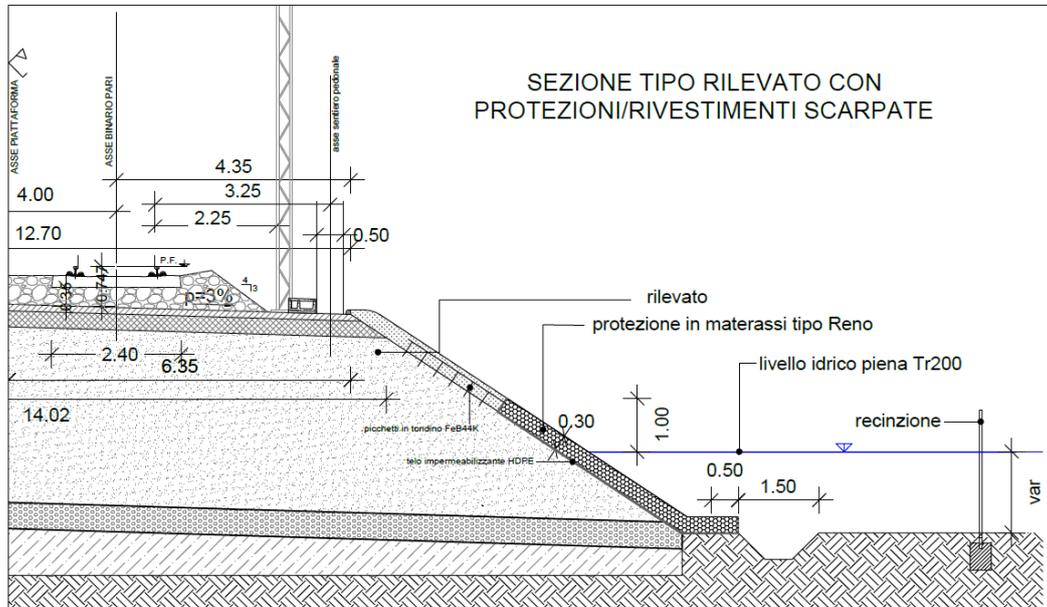


Fig. 22 – Protezione delle scarpate dei rilevati in area potenzialmente inondabile: tipologico.

7. BIBLIOGRAFIA

Da Deppo L., Datei C., Fognature, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2005.

Da Deppo L., Datei C., Salandin P., Sistemazione dei corsi d'acqua, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 2004.

Ferro V., *La sistemazione dei bacini idrografici*, McGraw-Hill, Milano, 2006.

Ghetti A., *Idraulica*, Edizioni Libreria Cortina, Padova, 1996.

Lo Bosco D., Leonardi G., Scopelliti F., *Il dimensionamento delle opere idrauliche a difesa del corpo stradale*, Quaderno di Dipartimento - Serie Didattica, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, 2002.

Maione U., *Appunti di idrologia 3. Le piene fluviali*, La Goliardica Pavese, 1977

Marani M., *Processi e modelli dell'Idrometeorologia*, Dispense, 2005.

Ven Te Chow, *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, USA, 1959.