



INTERPORTO

DELLA TOSCANA CENTRALE

STUDI A SUPPORTO DELLA PROCEDURA DI VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE CONNESSA AL PROGETTO DI AMPLIAMENTO

Integrazioni in merito alla componente "Ambiente idrico superficiale"

Rel. I.1: Studio specialistico aspetti idraulici

REV.	DATA	Descrizione	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
1	04/08/2017	Prima emissione	A.Gabbrielli	A.Gabbrielli	P. Moschini





INDICE

1. Premessa e articolazione del lavoro	3
2. Modello idrologico-idraulico dello stato attuale	5
2.1 Premessa	5
2.2 Reticolo fognario interferente	6
2.3 Modello geometrico	7
2.3.1 Corsi d'acqua	7
2.3.2 Casse di espansione Torrente Marinella	9
2.3.3 Modello Digitale del Terreno	10
2.4 Modellistica idrologica	13
2.4.1 Introduzione	13
2.4.2 Approccio metodologico	14
2.4.3 Stima degli idrogrammi di piena del Torrente Marinella	15
2.5 Modello idraulico bidimensionale	28
2.5.1 Modellistica monodimensionale Mike Hydro River	28
2.5.2 Modellistica bidimensionale Mike 21	33
2.5.3 Modellistica Mike Flood	36
2.5.4 Specifiche e parametrizzazioni del modello idraulico	36
2.6 Considerazioni e commenti sui risultati del modello idraulico bidimensionale dello stato attuale	43
2.6.1 Criticità idrauliche non correlate con l'area oggetto di ampliamento	43
2.6.2 Aspetti idraulici correlati con l'area oggetto di ampliamento	44
2.7 Modellazione idraulica monodimensionale integrativa per TR30	50
3. Proposta di sistemazione idraulica dell'area oggetto di intervento e modello idrologico- idraulico dello stato di progetto	54
3.1 Premessa	54
3.2 Indicazione dei criteri alla base delle scelte progettuali compiute	55
3.3 Sintesi della proposta di sistemazione idraulica dell'area di ampliamento	56
3.4 Modello idrologico-idraulico dello stato di progetto	57
3.5 Considerazioni sui risultati conseguiti	58



INDICE DELLE TAVOLE ALLEGATE

Tavola I.1 :	Schema del modello idraulico bidimensionale – stato attuale	(Scala 1:5.000)
Tavola I.2 :	Schema del modello idraulico bidimensionale – stato di progetto	(Scala 1:2.000)
Tavola I.3 :	Schema del reticolo idraulico superficiale e del reticolo fognario interferente – stato attuale	(Scala 1:2.000)
Tavola I.4 :	Schema del reticolo idraulico superficiale e del reticolo fognario – stato di progetto	(Scala 1:1.000)
Tavola I.5 :	Aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato attuale	(Scala 1:5.000)
Tavola I.6 :	Aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato di progetto	(Scala 1:5.000)



1. PREMessa E ARTICOLAZIONE DEL LAVORO

Il presente studio è redatto a supporto della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale finalizzata al progetto di ampliamento della società Interporto della Toscana Centrale S.p.A. in un'area nel Comune di Campi Bisenzio adiacente all'attuale area di Interporto.

Questo lavoro si configura come **Studio Specialistico** che intende integrare e chiarire numerosi aspetti legati alla componente **Ambiente Idrico Superficiale** in risposta alle richieste a riguardo degli Enti coinvolti.

Esso accompagna il documento *Integrazioni in merito alla componente "Ambiente Idrico Superficiale"*.

Se quest'ultimo documento ha principalmente ad oggetto le risposte e le integrazioni rispetto ad alcuni pareri relativi agli della **gestione delle acque meteoriche** e della **gestione delle acque nere** (in particolare si fa riferimento ai pareri della C.V.T.I.A., del Settore VIA della Regione Toscana, di Arpat e di Publiacqua SpA), il presente **Studio Specialistico** incentra la propria attenzione principalmente sugli aspetti legati all'**idraulica superficiale**.

In particolare i pareri inerenti aspetti più prettamente idraulici sono i seguenti:

- Regione Toscana (n. 128 del 19/10/2016)
- Genio Civile Valdarno Centrale (22/02/2017)
- Arpat (22/02/2017)
- Autorità di Bacino del Fiume Arno (28/02/2017)
- Comune di Calenzano (n. 5069 del 22/02/2017)
- C.T.V.I.A. (n. 2364 del 24/04/2017).

Il presente lavoro costituisce però anche una base su cui si fondano alcune delle considerazioni contenute nel citato documento *Integrazioni in merito alla componente "Ambiente Idrico Superficiale"*, soprattutto per quanto attiene la ricostruzione del reticolo minore e del sistema fognario a servizio dell'abitato del Rosi, posto a Nord dell'area oggetto di ampliamento.

Tenuto conto che alcuni dei suddetti pareri e contributi istruttori talvolta si sovrappongono o esplicitano in modi differenti le medesime richieste di chiarimento, per quanto riguarda gli aspetti idraulici tali richieste sono state accorpate e sintetizzate in sotto-temi omogenei.

A differenza di quanto fatto nel documento *Integrazioni in merito alla componente "Ambiente Idrico Superficiale"* (avente a tema la **gestione delle acque meteoriche** e la **gestione delle acque nere**), in questo **Studio Specialistico** si è inteso fornire risposte e chiarimenti approfondendo i sotto-temi e non replicando puntualmente ad ogni punto di ogni singolo parere.

Tale approccio è apparso peraltro quasi obbligato, in quanto gli argomenti richiamati nei vari pareri e contributi istruttori risultano comunque strettamente correlati tra loro.

I principali sotto-temi oggetto di approfondimento nel presente **Studio Specialistico** sono i seguenti:

1. Verifica idraulica del **Torrente Marinella** e aspetti ad essa correlati (configurazione arginale, eventuale sormonto arginale, nuovo attraversamento viario etc), sia allo stato attuale che allo stato di progetto;
2. Verifica idraulica della **Gora del Ciliegio** (chiarimenti rispetto alla potenziale interferenza che emerge dagli studi idraulici del Piano Strutturale del Comune di Prato);
3. Verifica idraulica del **Fosso Colatore Dx** e correlazione con il sistema fognario a servizio dell'abitato del Rosi (sia allo stato attuale che allo stato di progetto).



Procedendo nella stesura del presente lavoro ci si è presto resi conto che, pur accorpando gli argomenti in esame nei 3 principali sotto-temi, non saremmo comunque riusciti a fornire un quadro d'insieme chiaro e completo, come invece auspicabile nell'ambito di una procedura di Valutazione di Impatto Ambientale di questo tipo, e come peraltro auspicato, in maniera diretta o indiretta, anche in alcuni dei suddetti pareri e contributi istruttori.

Per questo motivo si è optato per un approccio ancor più coordinato e strutturato al lavoro di predisposizione del documento di integrazioni.

Tutti gli aspetti inerenti l'**idraulica superficiale** (ed in parte anche il sistema fognario) interferente, direttamente o indirettamente, con l'area oggetto di ampliamento, sono trattati all'interno di un **unico complesso di modellistica idraulica bidimensionale del sistema idraulico interferente con l'area oggetto di ampliamento (Torrente Marinella, Gora del Ciliegio, Fosso Colatore Dx e altri fossi minori)**, in cui si fa distinzione esclusivamente tra stato attuale e stato di progetto.

Con questo modello, nel confronto tra i risultati dello scenario attuale e dello scenario di progetto, si intende far emergere in modo chiaro e completo gli elementi di compatibilità idraulica del progetto di ampliamento di Interporto, all'interno dei quali possono trovare risposta tutti i quesiti e le incertezze contenuti nei pareri e nei contributi istruttori.

La presente trattazione si articola quindi in due unici "macro-capitoli", relativi rispettivamente allo **stato attuale** e allo **stato di progetto**.

In conclusione sono comunque estrapolati dal lavoro generale i principali concetti e contenuti, e ricondotti alle specifiche richieste dei pareri.

Prima di avviare l'illustrazione si specifica quanto segue:

- Le valutazioni idrologico-idrauliche del presente lavoro prendono spunto dagli studi precedentemente redatti nell'ambito della presente procedura di Valutazione di Impatto Ambientale, ne confermano alcuni elementi, ne aggiornano o integrano altri;
- La proposta progettuale di sistemazione idraulica dell'area oggetto di ampliamento è in linea generale confermata; sono apportate solo alcune modifiche in miglioramento, frutto dell'acquisizione di ulteriori informazioni circa le condizioni al contorno (in particolare riguardo le caratteristiche della rete fognaria della zona), delle indicazioni ricevute in occasione di incontri tecnici intercorsi in questi mesi con alcuni degli Enti coinvolti e dell'attuazione delle richieste/indicazioni contenute nei pareri, nonché in funzione degli approfondimenti modellistici eseguiti;
- L'illustrazione degli studi compiuti è impostata in modo assai sintetico ed è affidata principalmente agli elaborati grafici e agli allegati idraulici di accompagnamento al presente **Studio Specialistico**; anche nella descrizione delle metodologie di calcolo idrologico o delle teorie di calcolo e funzionamento idraulico del software utilizzato si è proceduto in modo speditivo, al fine di alleggerire la trattazione e focalizzarla sulle questioni "sospese";
- La descrizione di tutto ciò che è confermato rispetto alle precedenti versioni dello studio sull'Ambiente Idrico Superficiale, sia che si tratti di stime idrologiche o di aspetti modellistici o di elementi e schemi progettuali, è soltanto richiamata, e rimandata alla consultazione dei documenti precedentemente redatti.



2. MODELLO IDROLOGICO-IDRAULICO DELLO STATO ATTUALE

2.1 Premessa

Come anticipato, il presente **Studio Specialistico** verte sulla predisposizione di un unico complesso modellistico del sistema idraulico superficiale interferente con l'area oggetto di ampliamento.

Tale modello idrologico-idraulico è di tipo bidimensionale, ovvero tende a riprodurre le dinamiche d'alveo dei tratti fluviali di interesse in moto vario monodimensionale e le dinamiche di esondazione e propagazione sul territorio circostante in modo bidimensionale mediante l'accoppiamento delle aste ad un modello digitale del terreno a maglia quadrata.

La costruzione del modello bidimensionale relativo allo stato attuale ha richiesto l'espletamento di una serie di passaggi preliminari finalizzati all'acquisizione ed elaborazione di tutte le informazioni, geometriche ed idrologiche, necessarie.

Avendo il modello ad oggetto un territorio attraversato sia dal reticolo idraulico di "acque alte" che dal reticolo di "acque basse" (per giunta quest'ultimo strettamente correlato con il reticolo fognario), si è reso necessario acquisire e implementare non solo le conoscenze geometriche ed idrologiche del reticolo superficiale ma anche quelle del reticolo fognario, con particolare riferimento al reticolo a servizio della zona del Rosi.

In sintesi, i passaggi preliminari svolti per la composizione del modello idraulico relativo allo stato attuale sono i seguenti:

- Acquisizione dei dati circa lo sviluppo del **reticolo fognario interferente** con l'area oggetto di ampliamento;
- Acquisizione dei dati topografici del territorio in esame e dei rilievi geometrici dei corsi d'acqua studiati, compresa effettuazione di numerosi sopralluoghi, finalizzati alla costruzione del **modello geometrico**;
- Verifica di congruità della **modellistica idrologica** alla base degli studi precedenti (alla luce delle accresciute conoscenze del reticolo superficiale e fognario) e parziale revisione della medesima.

Una volta eseguiti questi passaggi preliminari, di seguito illustrati in singoli paragrafi, si è passati alla costruzione del **modello idraulico bidimensionale**.

E' stato utilizzato il software Mike Flood by DHI (release 2016), che accoppia la modellistica d'alveo di Mike Hydro River con la pura modellistica bidimensionale di Mike 21.

Le principali caratteristiche del modello bidimensionale e delle relative parametrizzazioni, nonché i principi teorici di risoluzione delle equazioni del moto, sono descritti in apposito paragrafo.

In conclusione del presente capitolo sulla modellistica dello stato attuale è fornito un quadro di **considerazioni e commenti**, all'interno dei quali già trovano risposta alcuni quesiti posti nei pareri degli Enti coinvolti; avvalendoci degli elaborati grafici opportunamente predisposti e dei risultati del modello, sono individuate le principali criticità del sistema studiato, e le eventuali interferenze con l'area oggetto di intervento.



2.2 Reticolo fognario interferente

Le questioni ed i dubbi relativi allo sviluppo della rete fognaria della zona del Rosi interferente con l'ampliamento in progetto trova spazio in numerose richieste di chiarimenti.

L'abitato del Rosi è notoriamente caratterizzato da difficoltà di deflusso superficiale e fognario, con frequenti episodi di ristagni localizzati.

La conoscenza della reale articolazione del sistema fognario rappresenta un aspetto fondamentale non soltanto per la valutazione delle interferenze del progetto nella **gestione delle acque meteoriche e delle acque nere** (argomenti trattati nel documento *Integrazioni in merito alla componente "Ambiente Idrico Superficiale"*), ma anche in relazione all'**idraulica superficiale**.

Per questo motivo, attraverso numerose verifiche sul posto, ricostruzioni cartografiche e soprattutto la collaborazione di Publiacqua S.p.A., è stato ricostruito sommariamente, ma in modo fedele, lo schema fognario dell'abitato del Rosi.

Tale schema fognario, unitamente ad altre informazioni relative a sottoservizi e reticolo idraulico minore, è riportato nella **Tavola I.3 – schema del reticolo idraulico superficiale e del reticolo fognario interferente – stato attuale**.

L'abitato del Rosi è servito da un sistema fognario di tipo misto, avente collettore principale lungo Via Cellere, con recapito finale il depuratore di San Colombano (Comune di Lastra a Signa, Firenze, sinistra idraulica del Fiume Arno).

Il collettore principale è realizzato in PVC e presenta un diametro pari a 600 mm; ad esso sono collegati i tratti fognari della zona del Rosi, su entrambi i lati di Via Cellere, nonché una porzione urbana posta a monte della linea ferroviaria. Tali tratti fognari servono sia l'edificato storico del Rosi che quello più recente.

Alla rete fognaria confluiscono, direttamente o attraverso la rete stradale, anche le acque meteoriche della zona del Rosi; se per le acque nere il bacino afferente al collettore principale è tutto quello posto a cavallo di Via Cellere (tra Via del Mandorlo ed il T. Marinella, oltre alla porzione a monte della ferrovia), per le acque piovane il bacino di riferimento è più piccolo, limitandosi a quello posto tra Via Cellere ed il T. Marinella (oltre a quello a monte della ferrovia).

La rete stradale di raccolta delle acque meteoriche termina indicativamente all'altezza dell'intersezione tra Via Cellere e Via degli Etruschi, ove si immette nel collettore principale di diametro 600 mm.

Dall'abitato del Rosi, all'altezza della recente lottizzazione residenziale di Via degli Etruschi, si immette a cielo aperto un collettore fognario proveniente da monte che dà origine al corso d'acqua indicato come **Fosso Colatore Dx**, rientrante nel reticolo di gestione L.R. 79/2012, che scorre verso Sud-Ovest attraversando l'area agricola in cui è previsto l'ampliamento di Interporto.

Tale collettore, di diametro pari a 1000 mm, rappresenta lo **scolmatore del sistema fognario del Rosi**, come indicato dal Gestore e rappresentato sulle planimetrie fornite.

Tale scolmatore entra indicativamente in funzione al raggiungimento della portata "Q3", tre volte superiore alla portata di progetto del collettore fognario di Via Cellere.

Pertanto le acque in uscita dal collettore risultano acque già diluite e compatibili per lo scarico nel reticolo idraulico superficiale.

Nell'ottica della sistemazione idraulica di progetto per la risoluzione delle interferenze, tali informazioni circa l'articolazione del sistema fognario e la natura e la provenienza delle acque afferenti al Fosso Colatore Dx sono risultate assai importanti, e hanno comportato una modifica della proposta progettuale, in ottemperanza alle richieste del Gestore e compatibile con le richieste degli altri Enti.



2.3 Modello geometrico

Il modello idraulico bidimensionale del reticolo interferente con l'area oggetto di ampliamento è fondato su un modello geometrico di estremo dettaglio.

Di seguito sono identificati e descritti i principali elementi geometrici costituenti il modello idraulico bidimensionale.

2.3.1 Corsi d'acqua

Come anticipato, la modellistica idrologico-idraulica di cui al presente **Studio Specialistico** abbraccia una serie di corsi d'acqua ed un territorio molto ampio, allo scopo di fornire un quadro coordinato delle problematiche idrauliche della zona e, in particolare, dell'area interessata dal progetto di ampliamento.

I corsi d'acqua studiati sono i seguenti:

- **Torrente Marinella**
- **Fosso Montisi** (o Fosso Le Pagnelle, principale affluente del T. Marinella)
- **Gora del Ciliegio**
- **Fosso del Pantano**
- **Fosso di Collegamento Pantano – Colatore Sx** (canale di gronda dell'asse viario Mezzana-Perfetti Ricasoli)
- **Fosso Colatore Dx**

Il Torrente Marinella è il corso d'acqua principale della zona, che nasce dai rilievi della Calvana e scorre in direzione NE-SO attraversando la piana posta tra Calenzano, Prato e Campi Bisenzio, fino alla confluenza nel Fiume Bisenzio.

Lungo il tratto di monte del corso d'acqua sono presenti in destra idraulica una cassa di espansione (Pizzidimonte), suddivisa in 3 distinti settori, e in sinistra un'area di laminazione "controllata" (Le Pagnelle).

Il principale affluente del Torrente Marinella è il Fosso Montisi (o Le Pagnelle), lungo il quale è realizzata l'area di laminazione suddetta; tale corso d'acqua si immette nel T. Marinella poco a monte della Via Pratese e della ferrovia.

Il bacino del Torrente Marinella si chiude, di fatto, alla confluenza con il Fosso Montisi, in quanto da lì in poi non riceve più alcun contributo fino allo sbocco nel Bisenzio, attraversando la piana in modo "pensile".

Il bacino di monte del Torrente Marinella è pari a circa 9 kmq, che sommati ai circa 2 kmq del Fosso Montisi individuano complessivamente un bacino appena superiore agli 11 kmq.

La Gora del Ciliegio è un corso d'acqua che nasce sempre dai rilievi della Calvana ed avente un bacino complessivo di circa 3.3 kmq (valutato alla sezione di chiusura in corrispondenza dell'attraversamento della Mezzana-Perfetti Ricasoli), che confluisce nel Fiume Bisenzio.

Esso per buona parte si sviluppa a monte delle ferrovia, in zona La Querce, nel Comune di Prato; il corso d'acqua però risulta ben presto tombato e quindi riceve le acque dell'abitato circostante soltanto attraverso la rete stradale delle acque meteoriche (con dinamiche e modalità non note); esso torna a cielo aperto a valle dell'area di Interporto, oltre 800 m più a valle, ricevendo le acque di buona parte del reticolo superficiale minore e reticolo fognario meteorico del territorio posto a cavallo della linea ferroviaria (compresa la zona di Interporto); la centralità di questo corso d'acqua nello smaltimento delle acque piovane della zona è stata confermata anche dai tecnici del Gestore.



Tra la Gora del Ciliegio ed il Torrente Marinella scorrono il Fosso del Pantano ed il Fosso Colatore Dx, che, a differenza dei precedenti, appartengono al reticolo di acque basse della Piana.

Tali corsi d'acqua ricevono di fatto gli scarichi le acque piovane, o gli scolmi fognari, delle zone del Rosi e di parte dell'attuale area di Interporto.

Essi hanno aste piuttosto brevi che vengono intercettate dal cosiddetto Fosso di Collegamento Pantano-Colatore Sx, che coincide con il canale di gronda della Mezzana-Perfetti Ricasoli.

Questo fosso di collegamento, parallelo alla strada, scorre in direzione NO-SE e sottopassa il Torrente Marinella mediante un attraversamento sifonato, per poi immettersi nel Fosso Colatore Sx.

I tratti studiati dei suddetti corsi d'acqua sono rappresentati nell'allegata **Tavola I.1 – schema del modello bidimensionale stato attuale**, in cui sono anche riportate le sezioni idrauliche utilizzate nel modello geometrico.

La seguente tabella riporta, per ciascun corso d'acqua, la lunghezza del tratto modellato, il numero delle sezioni di cui si compone ed il numero degli attraversamenti e/o tratti tombati che ne caratterizzano il percorso.

CORSO D'ACQUA	LUNGHEZZA ASTA (m)	N. SEZIONI	N. ATTRAVERSAMENTI o TRATTI TOMBATI
Torrente Marinella	4590.27	79	9
Fosso Montisi	1430.42	43	10
Gora del Ciliegio	1544.40	13	3
Fosso di Collegamento Pantano-Colatore Sx	968.02	16	3
Fosso del Pantano	742.51	11	4
Fosso Colatore Dx	912.37	19	3

Tab. 1 – Sintesi caratteristiche corsi d'acqua studiati

Tutti i corsi d'acqua di cui sopra sono stati ricostruiti ed introdotti nel modello idraulico.

Sono stati inseriti anche tutti gli attraversamenti indicati; fanno eccezione gli attraversamenti relativi al Fosso Montisi (ne è stato inserito solo uno, quello più a valle), per i quali né si disponeva di rilievi adeguati né si è ritenuto fossero significativi ai fini delle dinamiche di esondazione, in quanto le esigue dimensioni dell'alveo già determinano di per sé la quasi totale fuoriuscita dei volumi in transito. Sono stati omessi anche gli attraversamenti del Torrente Marinella non interferenti con le dinamiche d'alveo perché aventi luce libera molto più ampia della superficie bagnata della sezione (ad esempio l'attraversamento della Mezzana-Perfetti Ricasoli).

Le sezioni idrauliche utilizzate provengono da rilievi piuttosto recenti ed affidabili.

Sono stati utilizzati i rilievi sul Torrente Marinella e Fosso Montisi forniti dal Consorzio di Bonifica Medio Valdarno e relativi all'anno 2014 per il tratto a monte di Via Pratese (compresa una porzione del Fosso Montisi) e all'anno 2007 per il tratto da Via Pratese al Fiume Bisenzio.

Sono stati utilizzati i rilievi aggiornati forniti da Interporto per n. 2 sezioni del Torrente Marinella (sezioni n. 15 e n. 16, rilevate nel Novembre 2016), ed i rilievi sempre di Interporto relativi al reticolo di acque basse della zona (Gora del Ciliegio, Fosso di Collegamento Pantano-Colatore Sx, Fosso del Pantano e Fosso Colatore Dx).



Per quanto riguarda la sezione del lungo tombamento della Gora del Ciliegio si è fatto riferimento alla sezione utilizzata nello studio idraulico di supporto al Piano Strutturale del Comune di Prato (2010).

Le sezioni idrauliche disponibili lungo i tratti studiati sono state raccordate ed infittite mediante tracciamento di sezioni intermedie a partire dal rilievo LIDAR (Regione Toscana, 2008); si è infatti ritenuto più appropriato, all'interno di un modello bidimensionale fondato sul D.T.M. del LIDAR, tracciare nuove sezioni partendo da questa base topografica piuttosto che compiere banali interpolazioni tra due sezioni rilevate.

Anche per gli attraversamenti di cui non si disponeva della geometria è stata fatta un'operazione di "cucitura" inserendo elementi scatolari o circolari misurati "a mano" durante appositi sopralluoghi, per dare continuità e completezza alle aste fluviali modellate.

L'insieme delle informazioni geometriche acquisite e rielaborate è mostrato, come anticipato, nella **Tavola I.1 – schema del modello bidimensionale stato attuale**.

2.3.2 Casse di espansione Torrente Marinella

Uno dei principali motivi per cui si è inteso predisporre un modello idraulico assai più esteso dello stretto ambito di effettivo interesse è quello di poter valutare in maniera più appropriata l'effettivo funzionamento delle casse di espansione del Torrente Marinella, ovvero le casse di Pizzidimonte (3 settori) in destra idraulica e l'area di esondazione delle Pagnelle in sinistra idraulica (per la sua conformazione non appare appropriato definire quest'ultima come vera e propria cassa di espansione).

Tali casse, secondo il progetto esecutivo redatto dal Genio Civile di Prato di fine anni '90, dovrebbero garantire la laminazione delle piene duecentennali del Torrente Marinella con abbattimento del picco di piena all'altezza del sottopasso ferroviario fino a circa 50 mc/s.

Tale previsione "ufficiale", acquisita come input idrologico del modello idraulico redatto nelle versioni precedenti del presente lavoro, è stata verificata rappresentando accuratamente le opere idrauliche all'interno del modello geometrico.

Per fare ciò sono stati utilizzati i dati del rilievo topografico del Consorzio di Bonifica Medio Valdarno dell'anno 2014; attraverso una serie di sopralluoghi sul posto è stata riscontrata piena coerenza tra il rilievo e lo stato di fatto delle casse di espansione.

Nel modello geometrico sono quindi stati introdotti tutti gli organi idraulici che caratterizzano tali opere, ovvero, l'opera di presa e di restituzione del Settore 1, le 2 opere di presa e l'opera di restituzione del Settore ed il collegamento idraulico tra il Settore 2 ed il Settore 3 (per quanto riguarda la cassa di Pizzidimonte) e l'argine di contenimento dell'area di espansione delle Pagnelle.

Trattandosi di opere risalenti ad alcuni orsono, il modello digitale del terreno utilizzato nel modello 2D, ovvero il rilievo LIDAR del 2008 (vedi paragrafo seguente), risulta rappresentare correttamente le arginature di cassa e la morfologia del piano campagna al loro interno, pertanto per le opere di regolazione idraulica si è fatto riferimento al rilievo del Consorzio di Bonifica e per le opere di contenimento ai dati del LIDAR.

La planimetria delle casse di espansione è stata sovrapposta alla base cartografica di riferimento (C.T.R. in scala 1:2.000), risalente agli anni 1998-2001, e quindi non propriamente aggiornata.

Le casse di espansione sono quindi rappresentate graficamente in tutti gli elaborati allegati al presente lavoro, come la **Tavola I.1 – schema del modello bidimensionale stato attuale**.



2.3.3 Modello Digitale del Terreno

Come anticipato, il Modello Digitale del Terreno sul quale è fondata la topografia (o batimetria) del modello idraulico bidimensionale è costituito dal rilievo LIDAR, che copre interamente l'area di lavoro, come mostra la successiva **Fig. 1**.

Per garantire un'adeguata rappresentazione dei fenomeni esondativi il rilievo LIDAR non è stato "ricampionato", bensì **è stata utilizzata la griglia originale a maglia 1 mt x 1 mt**.

Questo grado di discretizzazione spaziale rappresenta ad oggi il massimo livello di dettaglio raggiungibile nella rappresentazione del territorio con una maglia quadrata.

Considerato oltretutto che il LIDAR risale al 2008, si è riscontrato come il territorio abbia subito negli ultimi anni alcune trasformazioni.

E' stato quindi eseguito un sommario aggiornamento della base 2D per quanto riguarda i nuovi edifici.

Essendo piuttosto articolato il reticolo idraulico modellato (aste dei corsi d'acqua di cui al precedente Par. 2.3.1), ma ben più esteso il territorio rappresentato nel modello bidimensionale, sono stati compiuti anche aggiornamenti localizzati di alcuni corsi d'acqua non modellati o in tratti a valle di aste modellate; tali aggiornamenti si riferiscono principalmente all'introduzione sommaria degli attraversamenti, in modo da dare continuità al deflusso (almeno per un tratto significativo a valle dell'area di interesse) del modello bidimensionale, come ad esempio per il Fosso Colatore Sx e per il tratto della Gora del Ciliegio a valle dell'asse viario Mezzana-Perfetti Ricasoli.

Complessivamente l'**area di lavoro del modello bidimensionale ha una superficie pari a circa 6.3 kmq**, e coinvolge tutta la valle del Torrente Marinella e un'ampia porzione della Piana tra Calenzano, Prato e Campi Bisenzio, fino al Fiume Bisenzio.

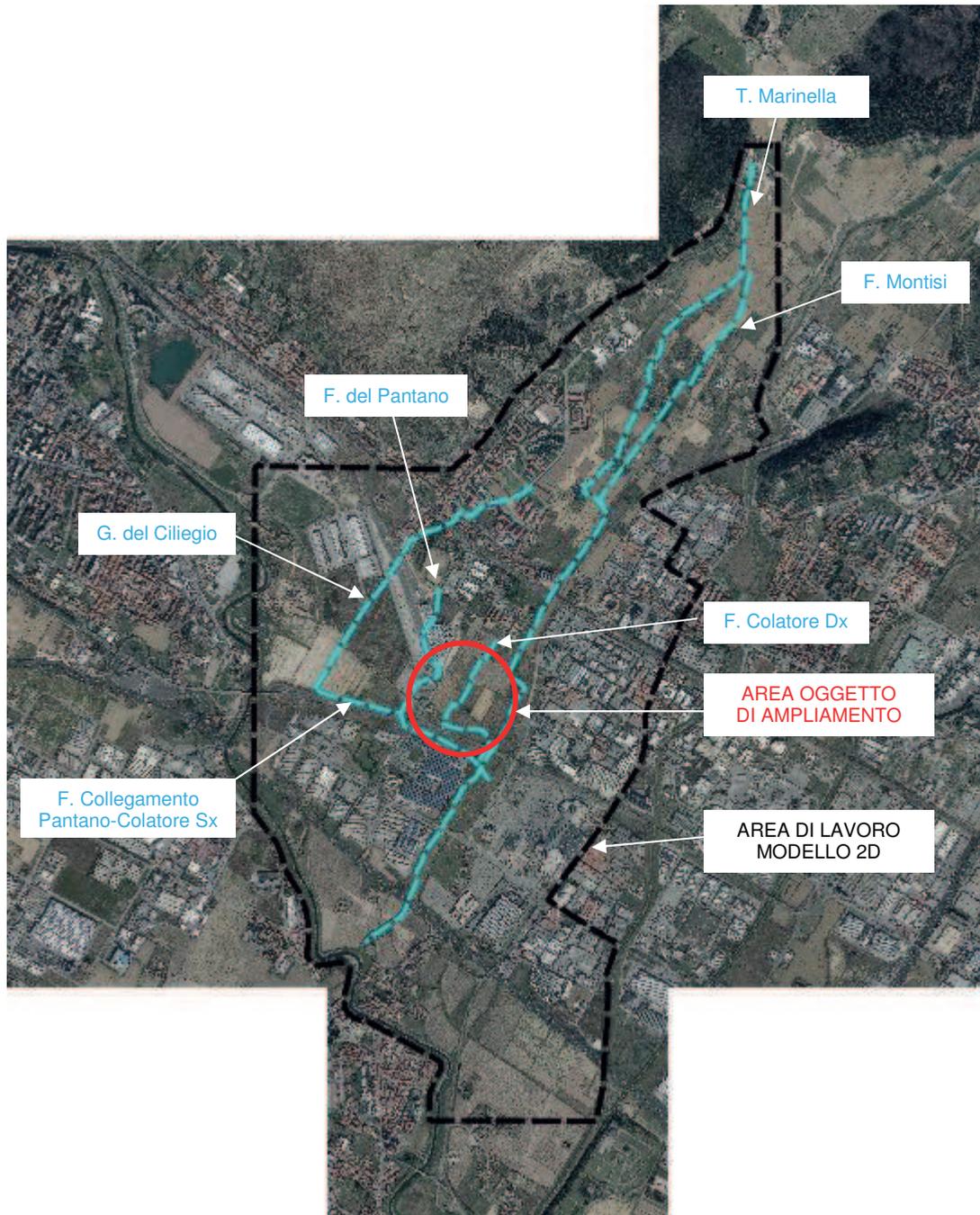


Fig. 1 – Area di lavoro modello 2D su foto aerea, con corsi d'acqua modellati



La seguente figura mostra un estratto del D.T.M. da rilievo LIDAR sull'area di lavoro, in scala cromatica.



Fig. 2 – Area di lavoro modello 2D su base topografica LIDAR con corsi d'acqua modellati



2.4 Modellistica idrologica

2.4.1 Introduzione

Dal punto di vista idrologico i corsi d'acqua oggetto di studio sono stati adeguatamente trattati nelle versioni precedenti del lavoro; non sono infatti emerse particolari richieste di chiarimento relativamente alle stime degli idrogrammi di piena.

Pertanto la precedente modellistica idrologica è sostanzialmente confermata anche come base del nuovo modello idraulico bidimensionale.

Si è ritenuto di dover aggiornare esclusivamente la stima degli idrogrammi di piena del Torrente Marinella in considerazione del fatto che la durata di precipitazione originariamente considerata come critica (durata pari a 60 minuti) appare leggermente breve rispetto alle dimensioni complessive del bacino idrografico del Marinella (circa 11 kmq), anche nel confronto con la durata critica della Gora del Ciliegio (precedentemente stimata in 44 minuti), avente un bacino oltre 3 volte inferiore (superficie pari a circa 3.3 kmq).

Oltretutto, nell'ottica di voler verificare il funzionamento delle casse di espansione di monte, si è ritenuto utile valutare anche durate di pioggia, e quindi idrogrammi, più lunghi.

Per questi motivi si è proceduto ad una revisione della stima delle portate di piena del Torrente Marinella, rispetto al suo bacino di monte (con sezione di chiusura alla confluenza con il Fosso Montisi) e al suo bacino di valle (corrispondente al bacino del Fosso Montisi stesso).

Si sottolinea innanzitutto che l'evento meteorico di riferimento per il modello idraulico del Torrente Marinella e di tutti gli altri corsi d'acqua interferenti con l'area oggetto di ampliamento è l'**evento di piena con tempo di ritorno duecentennale**, in analogia con le precedenti versioni del lavoro.

Per tutti gli altri corsi d'acqua, come detto, sono stati riutilizzati gli idrogrammi precedentemente calcolati in quanto risultano sostanzialmente coerenti, anche a livello di bacini di riferimento, con le ulteriori informazioni acquisite relativamente al reticolo idraulico minore e alla sua interazione con il reticolo fognario.

L'introduzione di tali idrogrammi all'interno del modello idraulico bidimensionale è stata oggetto di attenta valutazione; alcuni idrogrammi sono stati inseriti in modo puntuale, altri in modo distribuito lungo le aste studiate, ed alcuni di essi sono stati "spezzati" proporzionalmente agli effettivi sottobacini di riferimento.

Nella **Tavola I.1 – schema del modello bidimensionale stato attuale** è rappresentato uno schema a blocchi della distribuzione degli input idrologici all'interno del modello idraulico bidimensionale relativo allo stato attuale.

Dal punto di vista degli input idrologici, il modello idraulico bidimensionale compie una "forzatura" volontaria e cautelativa: **a ciascun corso d'acqua studiato è applicato l'idrogramma duecentennale relativo alla propria durata critica di precipitazione.**

Ciò significa che si è simulata la contemporaneità degli eventi critici di tutto il sistema idraulico in esame.

Tale sovrapposizione di eventi meteorici critici risulta pienamente sostenibile dal punto di vista dell'efficacia del modello, e neanche troppo improbabile, in quanto gli eventi di piena del reticolo minore (compresa Gora del Ciliegio) hanno durate critiche analoghe o dello stesso ordine di grandezza, mentre il Torrente Marinella, come illustrato in seguito, presenta una durata critica di precipitazione maggiore nonché una differente dinamica d'alveo (anche per la presenza delle casse di espansione di monte), tanto da manifestarsi con allagamenti sul territorio una volta che gli effetti esondativi dei corsi d'acqua minori risultano per buona parte già dissipati.



Per quanto detto, nel presente paragrafo di modellistica idrologica si procede con l'illustrazione dell'approccio metodologico adottato e nella stima degli idrogrammi di piena aggiornati del Torrente Marinella per il tempo di ritorno pari a 200 anni.

2.4.2 Approccio metodologico

La revisione del calcolo delle portate di piena del Torrente Marinella e del suo affluente Fosso Montisi è stata condotta in modo leggermente diverso da quanto fatto nei lavori che hanno preceduto.

L'approccio utilizzato è di ampia diffusione, e coerente con la metodologia alla base dell'ex Piano di Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno, ora Piano di Gestione del Rischio Alluvioni.

La stima degli idrogrammi è compiuta riproducendo lo schema di calcolo del modello concettuale di piena ALTO (ALLuvioni in TOscana, Regione Toscana, 2000), in cui tutti i parametri, geomorfologici e pluviometrici, sono stati valutati rispetto alle più recenti informazioni e database disponibili.

Si sottolinea che del modello ALTO è esclusivamente ripresa la metodologia, come di seguito; i calcoli analitici per pervenire alla stima degli idrogrammi di piena desiderati sono stati condotti mediante fogli di calcolo in ambiente Excel realizzati *ad hoc*, superando l'utilizzo di detto software come "calcolatore", ed anche alcuni "vizi" in esso contenuti.

L'approccio metodologico è però il medesimo, e si basa sulla trasformazione afflussi-deflussi ottenuta tramite la teoria dell'Idrogramma Istantaneo Unitario o IUH, i cui parametri vengono determinati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del bacino, ottenendo il cosiddetto Idrogramma Unitario Geomorfologico o GIUH.

L'input meteorico è schematizzato mediante uno "ietogramma sintetico" la cui frequenza viene stimata a partire dalle curve di possibilità pluviometrica in forma binomia, i cui parametri aggiornati sono forniti dalla Regione Toscana ("Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme", Regione Toscana 2014).

Il modello di trasferimento adottato è quello dell'idrogramma unitario di Nash del tipo $I(n,k)$, dove n e k rappresentano rispettivamente i parametri di forma e di scala, e che ha la seguente espressione:

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\frac{t}{k}} \quad (1)$$

in cui i parametri n e k , i quali hanno le seguenti formulazioni:

$$n = 3.29 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)^{0.78} R_l^{0.07} \quad (2)$$

$$k = 0.7 \left[\frac{R_a}{R_b R_l}\right]^{0.48} \frac{L_c}{v} \quad (3)$$

dipendono a loro volta da:

R_b rapporto di biforcazione
 R_a rapporto di area



R_l	rapporto di lunghezza
L_c	lunghezza del canale principale
v	fattore cinematico legato alla velocità della piena.

I parametri geomorfologici R , rapporti di Horton, possono essere calcolati sulla base della gerarchizzazione del reticolo idrografico proposta da Strahler.

La valutazione del contributo netto di pioggia alla formazione del deflusso sul reticolo necessita della stima di ulteriori due parametri che tengano conto delle perdite di infiltrazione; si tratta dell'assorbimento completo della precipitazione durante le prime fasi dell'evento meteorico, I_a [mm], e dell'infiltrazione costante a saturazione, K_s [mm/h].

Il legame tra questi due parametri è il seguente:

$$I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau \quad (4)$$

dove, per $t < t_a$

$$P_n(t) = 0 \text{ e } I_a(t) = I_a$$

mentre per $t \geq t_a$

$$P_n(t) = P(t) - K_s.$$

Su questa procedura poggiano le nuove elaborazioni idrologiche finalizzate alla revisione dei precedenti idrogrammi del Torrente Marinella.

2.4.3 Stima degli idrogrammi di piena del Torrente Marinella

In questo sottoparagrafo sono illustrati i passaggi che hanno condotto alla nuova stima delle portate di piena del Torrente Marinella e del Fosso Montisi per eventi con tempo di ritorno pari a 200 anni.

Come anticipato sono state completamente riviste tutte le parametrizzazioni del bacino del Torrente Marinella, sia dal punto di vista geometrico-geomorfologico, sia dal punto di vista pluviometrico.

Per quanto attiene la pluviometria, i dati di base utilizzati sono i medesimi dei lavori precedenti, pertanto vi è completa coerenza.

Per quanto riguarda gli aspetti geomorfologici e di infiltrazione il differente approccio metodologico non rende confrontabili le nuove parametrizzazioni con le precedenti, pertanto è possibile confrontare solo gli idrogrammi finali risultanti e la durata critica di precipitazione.

La nuova analisi idrologica è partita dalla ridefinizione del bacino idrografico del Torrente Marinella e del Fosso Montisi.

Basandosi sul reticolo idraulico di gestione delle Regione Toscana (L.R. 79/2012) e sulla C.T.R. in scala 1:10.00, il nuovo confine del bacino idrografico è stato ritracciato "manualmente", seguendo l'andamento delle curve di livello, sulle linee di spartiacque.

Nella successiva figura è mostrato l'intero bacino del Torrente Marinella, suddiviso in bacino di monte e bacino del Fosso Montisi, compreso il reticolo idraulico.

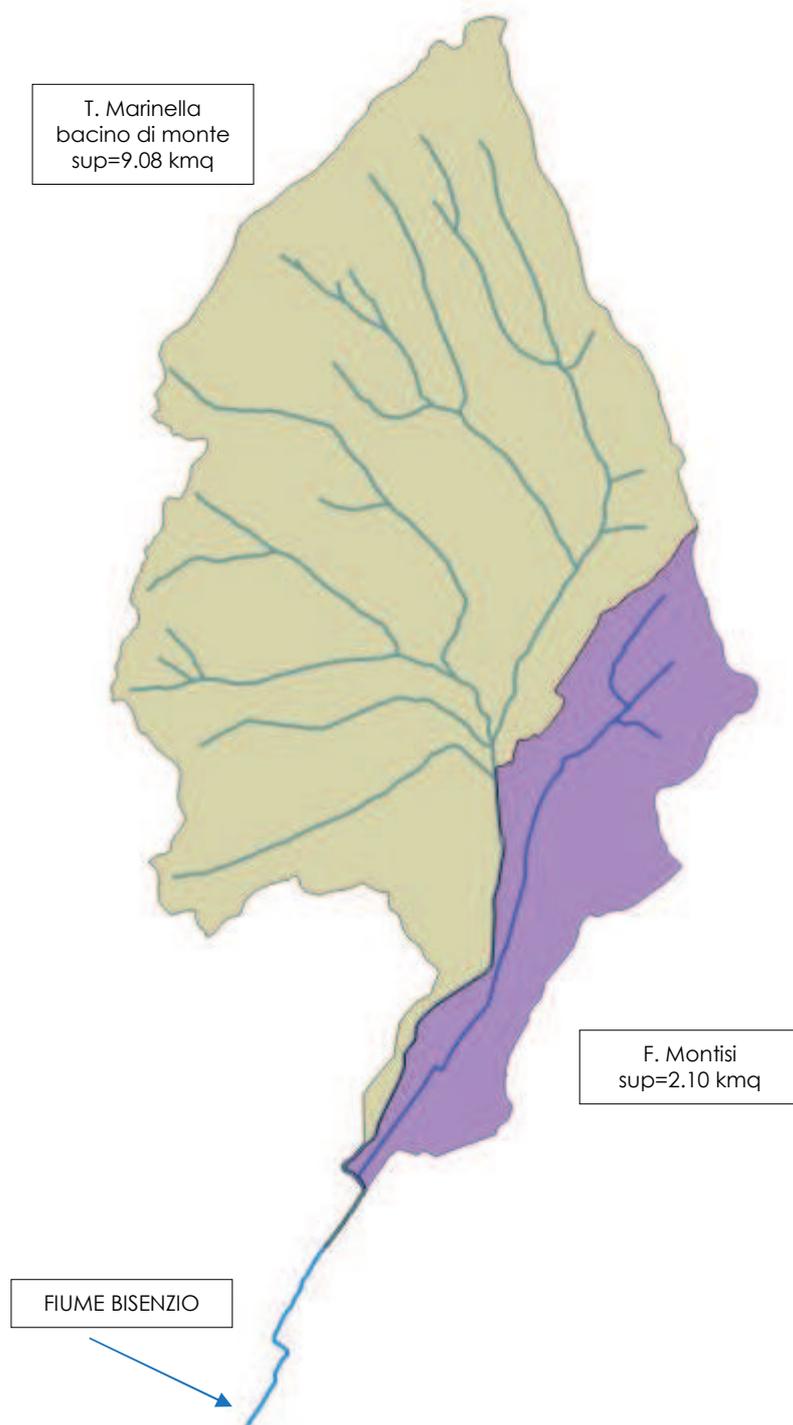


Fig. 3 – Bacino e reticolo del Torrente Marinella



Una volta definito il contorno del bacino ed il relativo reticolo è stato possibile stimare gli eventi meteorici estremi al suo interno, per il tempo di ritorno considerato (TR200 anni).

Lo studio "Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme" (Regione Toscana, 2014) fornisce i valori di a ed n come griglie in formato *ascii grid*, elaborabili in ambiente Gis, a maglie di 1 kmq.

L'afflusso meteorico (altezza lorda di precipitazione) su un bacino di riferimento, per un dato tempo di ritorno ed una data durata di pioggia, è stimato attraverso la seguente relazione:

$$h=a \cdot t^n \quad (5)$$

con a ed n caratteristiche dell'intero bacino e funzione del tempo di ritorno prescelto.

Si osserva come il citato codice di calcolo ALTO elaborasse non i parametri della precedente relazione binomia (5), bensì i parametri della formula trinomia seguente, cioè:

$$h=a' \times t^{n'} \times Tr^{m'} \quad (6),$$

in cui è presente un terzo parametro (m'), e con Tr si intende il tempo di ritorno, espresso in anni.

Passando dalla rappresentazione delle curve di possibilità pluviometrica in forma trinomia a quelle in forma binomia, è difatti "compromesso" l'utilizzo diretto ed immediato del modello di piena ALTO come solutore delle equazioni e delle relazioni che regolano la trasformazione da afflussi a deflussi e stimano gli idrogrammi di piena.

Considerato che la pubblicazione regionale fornisce i valori di a ed n sotto forma di dati discreti e diversi per ciascuna cella di 1 kmq sul territorio regionale, per definire l'altezza di precipitazione su un determinato bacino idrografico, ovvero uno "ietogramma", o pluviogramma, di progetto (nel presente caso considerato costante sul bacino per durata della precipitazione e tempo di ritorno considerati, e non del tipo "Chicago") risulta necessario valutare la media delle singole altezze di precipitazione di ciascuna cella ricadente all'interno del bacino stesso.

Infatti non è proceduralmente corretto mediare sul bacino i coefficienti a ed n forniti dalla Regione, bensì mediare, sempre sul bacino, la relativa altezza di pioggia h , e successivamente, se necessario, procedere a ritroso e ricavare i relativi valori di a ed n per così dire "medi" e caratteristici del bacino.

Per questo motivo, per una gamma di durate di pioggia prese a campione (1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12 e 24 ore) e per la gamma di tempi di ritorno forniti dallo studio regionale (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni) sono state stimate, mediante il calcolatore di campi in ambiente Gis (in particolare è stato utilizzato il software open source QGis), le rispettive distribuzioni di altezze di pioggia.

Di tutte queste distribuzioni di altezze di precipitazione riferite alle varie combinazioni durata-tempo di ritorno sono state calcolate le medie su ciascun bacino.

A questo punto, disponendo, per ciascun tempo di ritorno, delle altezze di pioggia h in funzione delle durate di pioggia t , mediante un procedimento di regressione lineare sul piano logaritmico $\log(h) - \log(t)$, sono stati ottenuti i valori dei coefficienti a ed n attraverso la seguente relazione:

$$\log(h)=\log(a)+n \cdot \log(t) \quad (7)$$



Una volta ottenuti detti coefficienti, l'iter di calcolo si è riallineato con quello sviluppato dal software ALTO (dove a' , n' ed m' sono già disponibili in partenza per ciascuna sezione di interesse).

A questo punto l'afflusso meteorico è stato ricostruito mediante uno "ietogramma" costante, nell'ipotesi semplificata ma comunemente adottata, di pioggia uniforme e costante sul bacino per tutta la durata dell'evento; non è stato confermato l'utilizzo dello "ietogramma Chicago".

In questa analisi sono state valutate, per TR200, differenti durate di pioggia, alla ricerca di quella a cui corrispondesse il massimo picco di portata.

Nel far ciò, sono state considerate, tutte le durate di pioggia comprese tra 1 ora e 4 ore, con intervalli di 30 minuti.

L'afflusso meteorico è inizialmente ragguagliato alla superficie del bacino.

All'input meteorico è applicato un coefficiente moltiplicativo di ragguaglio areale, Kr , che generalmente aumenta con l'aumentare della durata di pioggia e diminuisce con l'aumentare della superficie del bacino rispetto al quale è calcolato.

Per pervenire a questo valore di Kr è stata utilizzata, coerentemente con ALTO, la seguente relazione:

$$Kr = 1 - \exp(-\alpha t^\beta) + \exp(-\alpha t^\beta - \gamma A) \quad (8)$$

in cui t è la durata di precipitazione [h], A la superficie del bacino [kmq], mentre il parametro α è posto uguale a $0.036 \cdot a'$, dove a' rappresenta il coefficiente della curva di possibilità pluviometrica in forma trinomia (6), il parametro $\beta=0.25$ ed il parametro $\gamma=0.01$.

E' evidente come vi sia necessità, per la valutazione del coefficiente di ragguaglio areale secondo la precedente formulazione, di dover comunque stimare i parametri delle linee segnalatrici in forma trinomia.

L'operazione matematicamente corretta da svolgere è illustrata di seguito.

Ponendo in campo logaritmico la relazione trinomia delle linee segnalatrici ($h = a' \cdot t^{n'} \cdot Tr^{m'}$) si ottiene la seguente relazione:

$$\log(h) = \log(a') + n' \cdot \log(t) + m' \log(Tr) \quad (9)$$

Essendo $n = n'$, e tenuto conto della formula binomia in campo logaritmico $\log(h) = \log(a) + n \cdot \log(t)$, per sostituzione si ottiene

$$\log(a) = \log(a') + m' \log(Tr) \quad (10)$$

Mediante regressione lineare applicata alla precedente relazione, si possono dunque determinare i parametri a' ed m' della curva trinomia.

Così facendo, per il bacino oggetto di valutazione, si può ottenere il relativo parametro a' necessario al calcolo, tramite la precedente formula del Kr (8).

Desiderando compiere comunque valutazioni idrologiche prudenti e quanto più coerenti con quelle degli studi precedenti, al coefficiente di ragguaglio Kr è stato cautelativamente assegnato un valore pari ad 1, bypassando i calcoli appena descritti.

Nell'analisi idrologica, una volta ragguagliata la pioggia lorda all'area del bacino, si rende necessario "depurare" tale input meteorico di tutte le perdite a cui va incontro prima di poter contribuire al deflusso.



La trasformazione tra pioggia lorda e pioggia netta, o "efficace", è effettuata, secondo l'approccio metodologico di riferimento, mediante la stima e l'implementazione dei parametri I_a (dell'assorbimento completo della precipitazione durante le prime fasi dell'evento meteorico, mm) e K_s (infiltrazione costante a saturazione, mm/h), legati alla precipitazione dalla relazione precedentemente riportata **(4)**.

Il parametro I_a è valutato in base alla percentuale di superficie boscata all'interno del bacino, secondo la seguente relazione:

$$I_a = 3.3 + 22 \cdot (\% \text{Sup. boscata}) \quad \mathbf{(11)}$$

Prendendo a riferimento i dati relativi all'uso e copertura del suolo della Regione Toscana (anno 2013), si è stimato la percentuale del bosco sul bacino di interesse (codice 311).

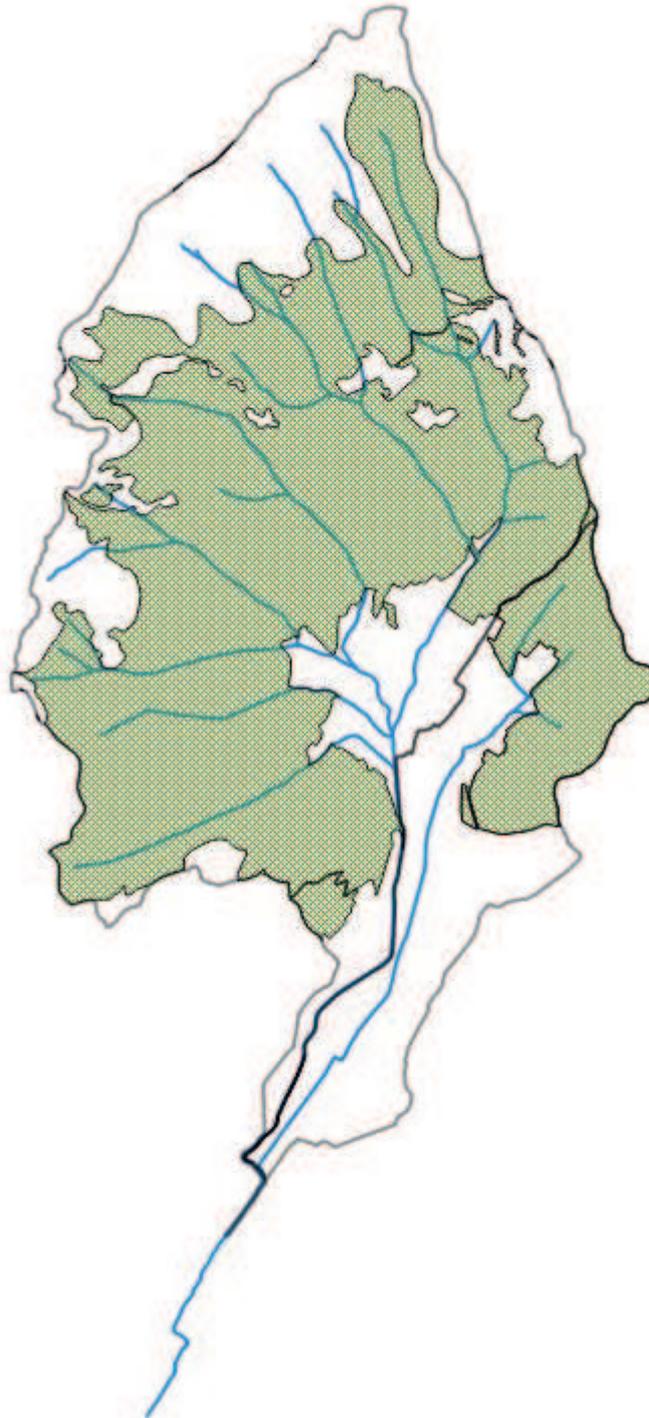


Fig. 4 – Aree boscate sul bacino del T. Marinella e F. Montisi da Uso del Suolo (R.T. 2013)

Per quanto riguarda invece l'infiltrazione a saturazione K_s , dipendendo esso dalla geopedologia dei suoli, si è invece fatto riferimento al DataBase Geopedologico della Regione Toscana, messo a disposizione dell'utenza sul sito internet istituzionale, e che contiene una vasta serie di informazioni geopedologiche ed idrologiche; il DB valuta anche la distribuzione del parametro K_s , sia ad una profondità di 30 cm dal piano campagna che ad una profondità di 150 cm.

In questo caso, a ciascun bacino, è stato assegnato il valore medio di K_{s30} pesato sulla superficie di distribuzione di ciascun valore.

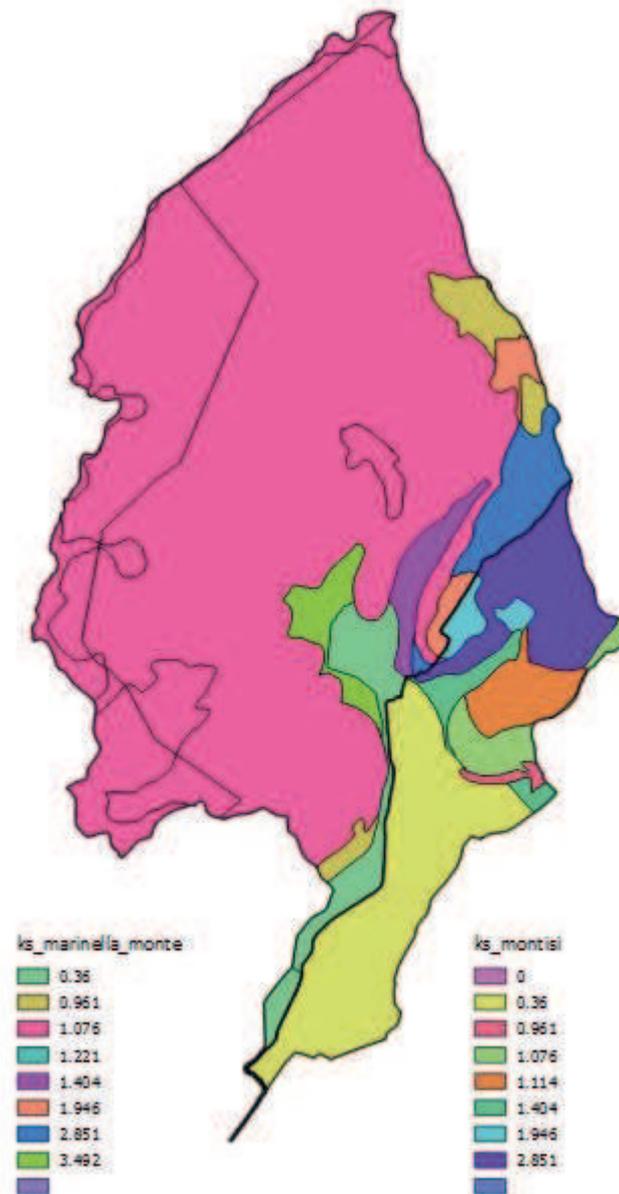


Fig. 5 – Distribuzione del parametro K_s sul bacino di monte del T. Marinella e del F. Montisi da DB Geopedologico (R.T.)

Il procedimento analitico di “depurazione” delle piogge definito dalla seguente, e già citata, relazione, ovvero

$$I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau \quad (4)$$

dove, per $t < t_a$, $P_n(t) = 0$ e $I_a(t) = I_a$, mentre per $t \geq t_a$, $P_n(t) = P(t) - K_s$,

è stato riprodotto in forma discretizzata in apposito foglio di calcolo, secondo lo schema seguente.



```
IDROLOGIA - SCHEMA DI CALCOLO - da pioggia netta a pioggia efficace - Metodo Ia/Ks

Delta T = i, Passo prescelto per l'idrogramma (h)
PLi = PIOGGIA LORDA RAGGUAGLIATA all'istante "i" (mm)
Pni = PIOGGIA NETTA all'istante "i" (mm)
Ks = VELOCITA' DI INFILTRAZIONE A SATURAZIONE costante per ogni Delta T (mm/Delta T)
Iai = INFILTRAZIONE, o ASSORBIMENTO, INIZIALE (mm)
IA0 = INFILTRAZIONE INIZIALE all'istante T=0 (mm)

CALCOLO ITERATIVO Pni
IF PLi <= Iai-1 THEN Pni = 0
    ELSE IF PLi < Ks THEN Pni = 0
        ELSE Pni = PLi - Iai-1 - Ks * (1 - (Iai-1) / PLi))

CALCOLO ITERATIVO Iai
IF Pni = 0 THEN
    IF Iai-1 - (PLi - Ks) >= IA0 THEN Iai = IA0
        ELSE Iai = Iai-1 - (PLi - Ks)
    ELSE
        IF Iai-1 + Ks > PLi THEN
            IF (Iai-1 * Ks) / PLi >= IA0 THEN Iai = IA0
                ELSE Iai = (Iai-1 * Ks) / PLi
            ELSE Iai = 0
```

Fig. 6 – Schema di calcolo della “depurazione” delle piogge mediante i parametri I_a e K_s

Il procedimento indicato nello schema precedente consente non solo la “depurazione” delle piogge per effetto dell’assorbimento iniziale I_a e dell’infiltrazione a saturazione K_s , ma anche la “ricarica” della capacità di assorbimento del terreno durante le fasi di precipitazione nulla (vedi passaggi del calcolo iterativo di I_{ai}): ciò consente di implementare il calcolo idrologico anche per eventi reali.

Il metodo adottato per la trasformazione degli afflussi meteorici in deflussi di piena è quello dell’idrogramma unitario istantaneo (IUH), ovvero l’idrogramma di piena causato da un evento di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero; ipotizzando la risposta del sistema lineare e stazionaria, l’idrogramma viene calcolato mediante la convoluzione tra lo ietogramma efficace (ovvero la distribuzione dell’input meteorico “depurato” e quindi effettivamente contribuente alla formazione del deflusso) e l’idrogramma unitario.

La relazione da applicare risulta la seguente:

$$Q(t) = \int_0^t U(t-\tau) \cdot p(\tau) d\tau \quad (12)$$

in cui Q è la portata, U l’idrogramma unitario e p l’afflusso efficace, quest’ultimo definito come



$$p(t)=[A \cdot i(t)] / 0.0036 \quad (13)$$

in cui A è la superficie del bacino in kmq ed i l'intensità della pioggia netta, media sul bacino, in mm/h; in pratica i è il valore risultante dalle fasi di calcolo precedenti fino alla "depurazione" mediante I_a e K_s .

Se il modello di piena ALTO risolve in automatico la convoluzione, nel presente lavoro questo calcolo è stato discretizzato in intervalli di tempo regolari.

Pertanto l'integrale di convoluzione si trasforma nella seguente successione di somme di prodotti incrociati, del tipo:

$$\begin{aligned} Q_1 &= U_1 p_1 \\ Q_2 &= U_1 p_2 + U_2 p_1 \\ Q_3 &= U_1 p_3 + U_2 p_2 + U_3 p_1 \\ &\dots\dots \\ Q_i &= U_1 p_i + U_2 p_{i-1} + \dots + U_n p_{i-n+1}. \end{aligned}$$

A questo punto, disponendo dello ietogramma efficace discretizzato, per ottenere la successione dei valori di Q_i che andranno a formare l'idrogramma di piena per un tempo di ritorno, durata di pioggia e step temporale assegnati, non resta che definire esattamente l'idrogramma unitario U_i .

Come anticipato, si è fatto ricorso all'Idrogramma Unitario Istantaneo di Nash, che risponde alla formulazione precedentemente riportata, ovvero

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{(n-1)} e^{-\left(\frac{t}{k}\right)} \quad (1)$$

Per la stima dei parametri n e k di Nash (rispettivamente fattore di forma e fattore di scala) valgono le relazioni

$$n = 3.29 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)^{0.78} R_l^{0.07} \quad (2)$$

$$k = 0.7 \left[\frac{R_a}{R_b R_l}\right]^{0.48} \frac{L_c}{v} \quad (3)$$

Si osserva come i parametri di Nash siano funzione dei rapporti di biforcazione (R_b), di lunghezza (R_l) e di area (R_a) di Horton.

Per la stima dei rapporti di Horton si procede dapprima ordinando il reticolo idrografico del bacino e le relative aree di alimentazione afferenti in ordini gerarchici, secondo Strahler.

L'intero bacino di monte del Torrente Marinella è stato gerarchizzato, come mostra la seguente figura; il reticolo risulta del 4° ordine gerarchico.

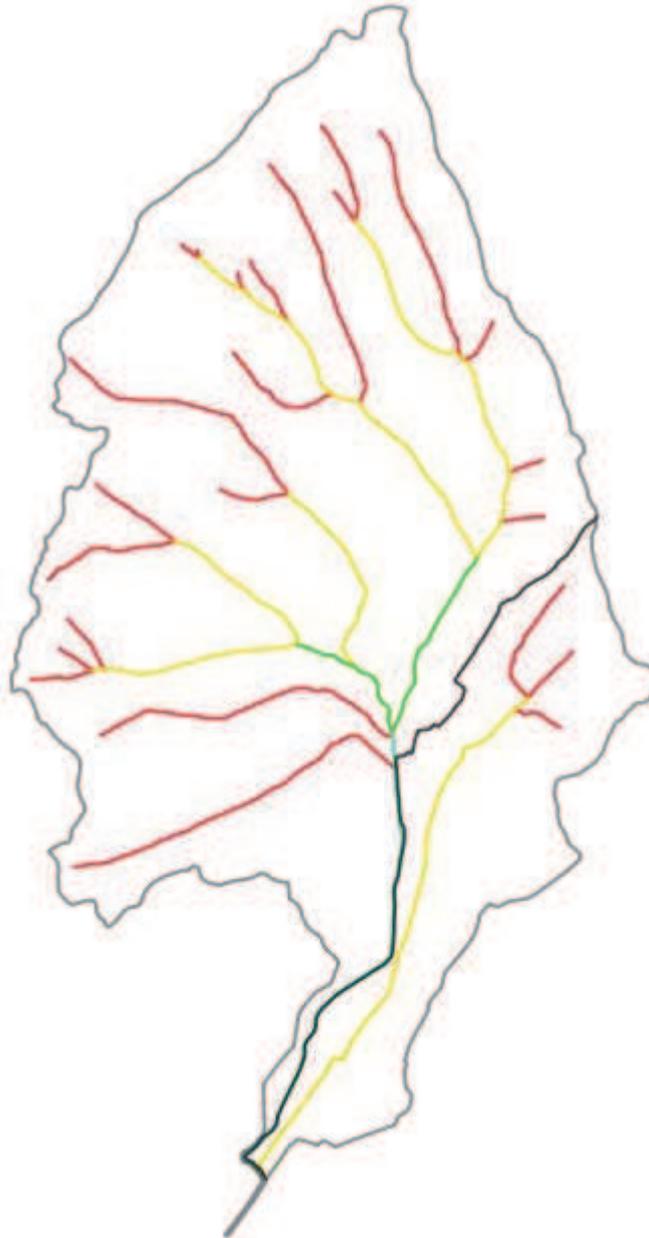


Fig. 7 – Gerarchizzazione secondo Strahler del bacino del Torrente Marinella

Una volta eseguita la gerarchizzazione, la determinazione dei rapporti di Horton per la successiva stima di n e k di Nash è eseguita mediante regressione delle seguenti espressioni:

$$N_u = R_b^{\omega-u} \quad (14)$$

$$\bar{L}_u = \bar{L}_1 \cdot R_l^{u-1} \quad (15)$$

$$\bar{A}_u = \bar{A}_1 \cdot R_a^{u-1} \quad (16)$$



in cui

ω rappresenta l'ordine massimo del reticolo,

N_u il numero delle aste di ordine u ,

L_u la lunghezza media delle aste di ordine u ,

A_u l'area media sottesa dalle aste di ordine u .

Considerato poi che il parametro k dipende non solo dai suddetti rapporti di Horton ma anche dai fattori L_c , lunghezza del canale principale, e v , fattore cinematico, e tenuto conto della relazione che lega n con k , ovvero

$$T_l = n \cdot k \quad (17)$$

dove T_l rappresenta il tempo di ritardo e la sua espressione, secondo Nash, è fornita dalla seguente relazione:

$$T_l = 2.3 \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^{0.3} R_l^{-0.41} \cdot \frac{L}{v} \quad (18)$$

in cui compaiono ancora L_c , qui espresso semplicemente come L , e v ; però, secondo una procedura di regionalizzazione, il tempo di ritardo è definito anche da

$$T_l = 0.42 \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^{0.3} R_l^{-0.41} \cdot \frac{Lmc}{A^{0.075}} \quad (19)$$

dove Lmc rappresenta la lunghezza media complessiva dell'asta.

Pertanto il parametro k viene stimato semplicemente calcolando prima il parametro n mediante (2) ed il parametro T_l mediante (19), e poi applicando l'inversa della precedente espressione (17), ovvero $k = T_l/n$.

Tutti questi passaggi, svolti in ambiente Excel con un semplice foglio di calcolo, hanno permesso di completare la stima dei parametri pluviometrici e geomorfologici necessari per il calcolo dell'idrogrammi di piena duecentennale secondo la metodologia adottata per il bacino di monte del Torrente Marinella ed il bacino del Fosso Montisi, da inserire, unitamente agli idrogrammi degli altri corsi d'acqua minori, come input nel modello idraulico bidimensionale.

I risultati delle elaborazioni suddette, ovvero gli idrogrammi di piena duecentennali, sono mostrati nella figura che segue; essi sono mostrati per tutte le durate di precipitazione da 1 ora a 4 ore.

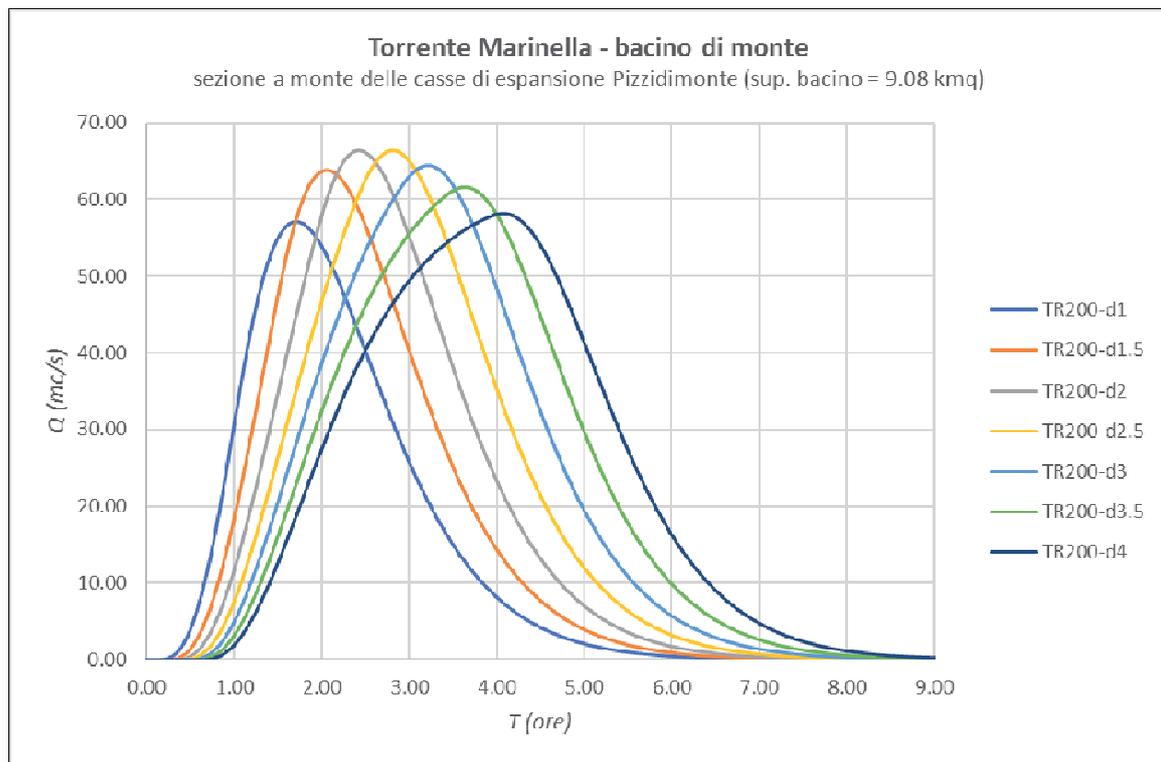


Fig. 8 – Idrogrammi di piena del bacino di monte del Torrente Marinella, per TR200

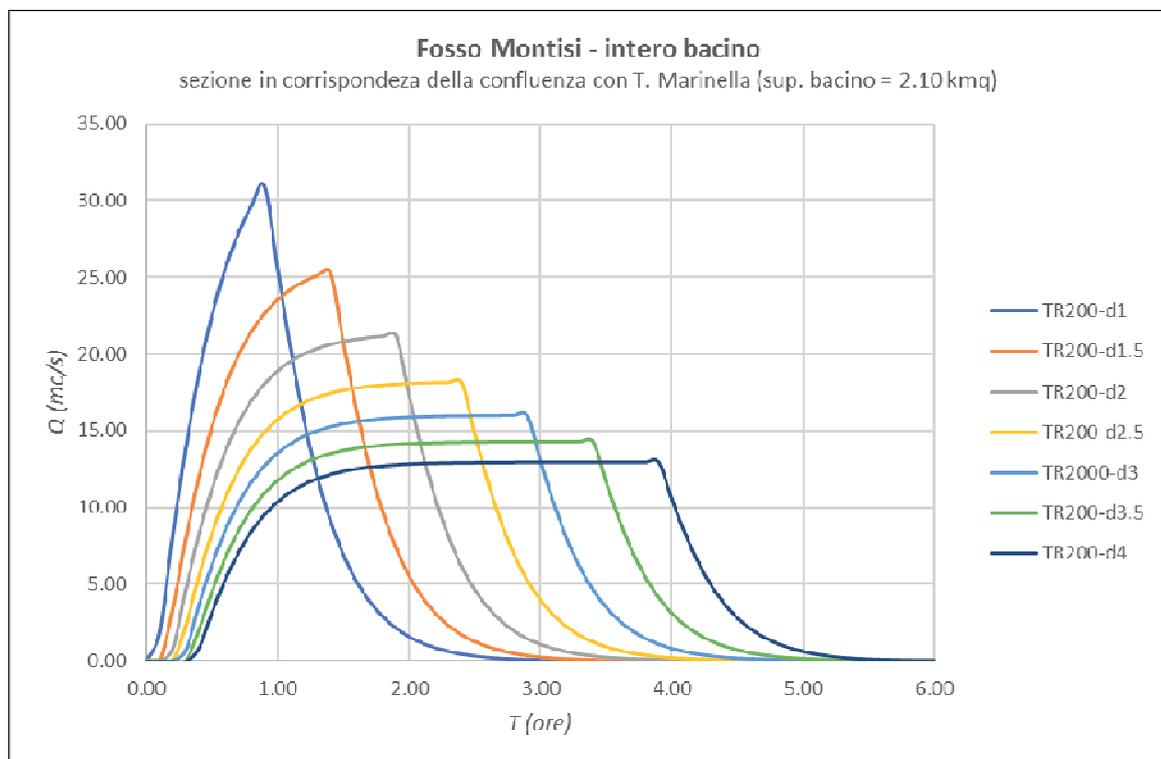


Fig. 9 – Idrogrammi di piena del bacino del Fosso Montisi, per TR200

La seguente figura mostra anche l'idrogramma idrologico complessivo del bacino idrografico del Torrente Marinella alla sezione di confluenza con il Fosso Montisi, valutato non come somma analitica dei contributi di ciascun intervallo temporale degli idrogrammi di monte (figure precedenti), ma con calcolo idrologico indipendente sull'intero bacino.

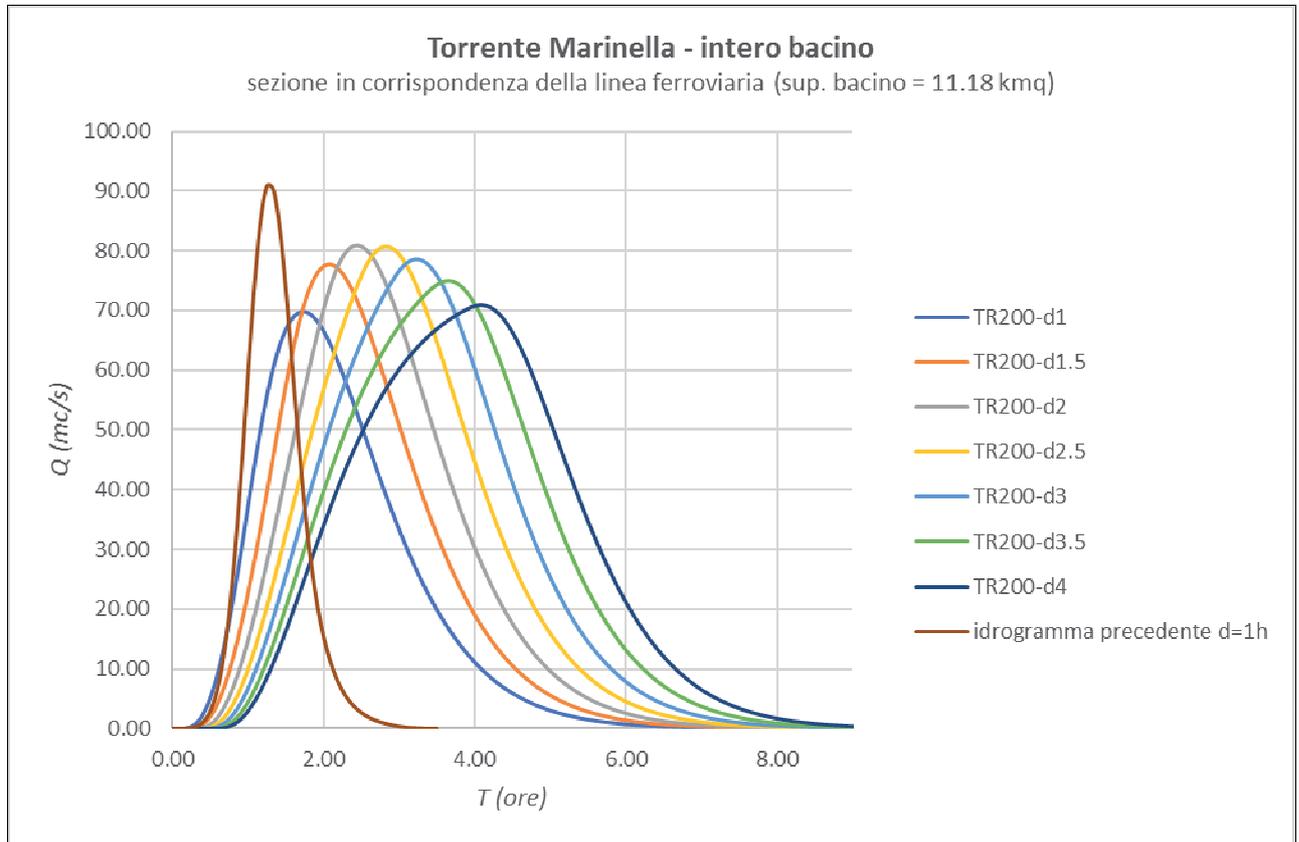


Fig. 10 – Idrogrammi di piena dell'intero bacino del Torrente Marinella, per TR200

Dai precedenti idrogrammi emerge che la durata di precipitazione che massimizza la portata a valle della confluenza con il Fosso Montisi è pari a 2 ore.

La portata di picco dell'intero bacino del Torrente Marinella risulta pari a circa 80.8 mc/s, quella del bacino di monte pari a circa 66.40 mc/s.

Nei modelli idraulici dello stato attuale e dello stato di progetto, per il Torrente Marinella e il Fosso Montisi, sono implementati gli idrogrammi duecentennali relativi alla durata di pioggia di 2 ore.

In Fig. 10 è sovrapposto anche l'idrogramma precedentemente calcolato; il picco di portata (d=1h) risulta inferiore di circa 10 mc/s rispetto aggiornato (d=2h); i volumi complessivamente prodotti dal nuovo idrogramma sono però ben maggiori.



2.5 Modello idraulico bidimensionale

Il presente lavoro si basa su un approccio metodologico ormai di impiego crescente, particolarmente appropriato per lo studio delle dinamiche di esondazione di corsi d'acqua su territori densamente urbanizzati e pianeggianti.

La modellistica idraulica bidimensionale, specialmente su aree assai estese come quella in esame, si distingue però per una complessità di ricostruzione geometrica e soprattutto computazionale ben superiore a quella dei semplici e più tradizionali modelli idraulici monodimensionali a celle, pertanto ciò ne complica, e forse ne limita, la diffusione.

Un modello come quello proposto, estremamente dettagliato sia dal punto di vista della **discretizzazione spaziale** (base topografica a maglia 1 mt x 1 mt) che dal punto di vista della **discretizzazione temporale** (step di avanzamento temporale della simulazione pari a 0.2 s), comporta lunghi tempi di attesa per le elaborazioni numeriche (tempi dell'ordine di qualche giorno).

Questi tempi "tecnici" spesso confliggono con i tempi concessi per il completamento delle prestazioni professionali, come nel presente caso in cui era previsto una scadenza temporale per la consegna della documentazione integrativa; per questo non è stato possibile simulare l'evento di piena per tutta la durata degli idrogrammi, ma si è compiuto un taglio (interruzione del *Run*) una volta superate le fasi di picco dell'evento. Questo taglio ha riguardato solo la dinamica di piena del Torrente Marinella, caratterizzata da un idrogramma più lungo, mentre non ha inciso sulla completa descrizione delle dinamiche dei corsi d'acqua minori (idrogrammi più brevi).

La modellazione complessiva del sistema idraulico in esame è stata comunque garantita, sia allo stato attuale che allo stato di progetto.

Nei paragrafi che seguono sono approfondite le tematiche legate al moto bidimensionale affrontate nell'ottica della struttura operativa del codice di calcolo Mike di DHI (versione Mike Hydro 2016), utilizzato per la modellazione (licenza MZ 28831).

Tale codice di calcolo comprende i software Mike Hydro River (ex Mike 11), Mike 21 e Mike Flood (quest'ultimo rappresentato dall'accoppiamento dei primi due).

Il software Mike Hydro River consente la modellazione monodimensionale dell'alveo, il software Mike 21 la modellazione completamente bidimensionale dell'alveo e delle aree circostanti, mentre il software Mike Flood permette di accoppiare con "link" bidirezionali le due simulazioni.

In questo lavoro sono state implementate modellistiche accoppiate tramite Mike Flood, monodimensionali all'interno degli alvei delle aste studiate e bidimensionali nel territorio circostante, determinando le aree allagate in termini di battenti e velocità di propagazione.

2.5.1 Modellistica monodimensionale Mike Hydro River

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.

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).



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:

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

L'adozione del programma di simulazione Mike Hydro River consente la soluzione delle equazioni idrodinamiche di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo (n.b. si fa riferimento ai tempi di calcolo della modellazione monodimensionale in alveo) consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

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

1. 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.
2. 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.
3. 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.

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 modesta;
- 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:

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

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

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

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

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

dove:

A = area della sezione bagnata (m^2);

C = coefficiente di attrito di Chezy ($m^{1/2} s^{-1}$);

g = accelerazione di gravità ($m s^{-2}$);

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

Q = portata (m^3/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta ($m^2 s^{-1}$).

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:

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

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.

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:

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



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).

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:

Stramazzo a larga soglia

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.

Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi dello *stramazzo a larga soglia*.

Tombino

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 dà una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Relazione $Q = A(Zj1) \cdot Zj2$

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).

Strutture mobili

E' 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.

Ponti

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).

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:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{C^2 AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQQ}{M^2 AR^{4/3}}$$

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

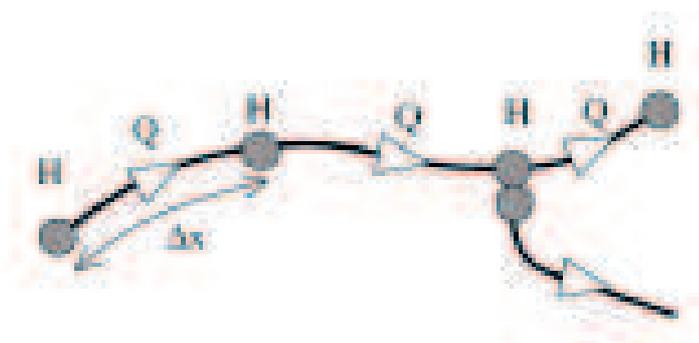
CONDIZIONI INIZIALI

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.

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 .

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).

2.5.2 Modellistica bidimensionale Mike 21

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.

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.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De Saint 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 Saint Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x :

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



$$+ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

$$+ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) = 0$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;

$\xi(x,y,t)$ = 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;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$ = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y ;

$\Omega(x,y)$ = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$ = pressione atmosferica;

ρ_w = densità dell'acqua;

x, y = coordinate spaziali;

t = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

S_{xx}, S_{yy}, S_{xy} = 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 (nella direzione x):

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

2. dipendente dalla velocità locale (nella direzione x):

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

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:



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

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s 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 ($m^3/s/m$) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m^3/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 pianoaltimetriche della batimetria.

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'algorithmo 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 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.



2.5.3 Modellistica Mike Flood

Come già anticipato, Mike Flood permette l'accoppiamento tra modello monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree circostanti.

L'accoppiamento dei modelli di Mike Hydro River e Mike 21 è dinamico, ovvero i modelli compiono simultaneamente le loro elaborazioni, ad ogni istante di simulazione avviene uno scambio di dati, e la loro interazione è mutua e bidirezionale.

L'integrazione tra i diversi modelli avviene in modo totalmente dinamico, garantendo quindi la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi ed è impostata attraverso un'interfaccia grafica comune.

L'accoppiamento tra mono e bidimensionale può avvenire in maniera puntuale, oppure l'accoppiamento può avvenire in maniera distribuita.

Le aste fluviali modellate con Mike Hydro River sono "linkate" al modello di Mike 21 attraverso tradizionali connessioni laterali (*lateral link*) o connessioni "frontali" (*standard link*); per connessioni "frontali" si intendono i casi in cui, ad esempio, un corso d'acqua si immette in un'area di invaso o, più semplicemente, i casi in cui si desidera dare continuità di deflusso, a valle di un'asta modellata con Mike Hydro River, verso un'asta rappresentata nella base topografica 2D; quest'ultima soluzione è stata adottata nel presente modello per "allungare" lo scorrimento negli alvei della Gora del Cillegio e del Fosso Colatore Sx.

2.5.4 Specifiche e parametrizzazioni del modello idraulico

Per il modello idraulico bidimensionale relativo allo stato attuale del sistema del Torrente Marinella e dei fossi minori interferenti con l'area di Interporto è stata eseguita un'unica simulazione idraulica in cui sono stati introdotti gli idrogrammi di piena duecentennali del Torrente Marinella e del Fosso Montisi così come rivalutati nel presente lavoro (Paragrafo 2.4) e gli idrogrammi di piena degli altri corsi d'acqua così come calcolati nel precedente lavoro e distribuiti lungo le aste così come indicato nella **Tavola I.1 – schema del modello bidimensionale stato attuale**.

Le aste sono state rappresentate mediante le sezioni idrauliche di cui al Paragrafo 2.3.

Di seguito sono mostrate le tabelle di corrispondenza tra la denominazione delle sezioni nella del corso d'acqua è stata rappresentata mediante n. 13 sezioni fluviali, come nel modello del P.S.

Le seguenti tabelle mostrano l'equivalenza tra le denominazioni delle sezioni nella **Tavola I.1 – schema del modello bidimensionale stato attuale** e nel modello di Mike; infatti quest'ultimo, a differenza del software Hec Ras, assegna alle sezioni il "nome" corrispondente alla progressiva (*Chainage*) a partire dalla sezione 0 (sezioni di monte del modello) e la loro corrispondenza nel modello del P.S., realizzato col software Hec Ras.



da	a	dist	chain
60	59	79.01	0
59	58	98.93	79.01
58	57	79.63	177.94
57	56	68.92	257.57
56	55	107.32	326.49
55	54	63.87	433.81
54	53	70.58	497.68
53	52	86.12	568.26
52	51	70.95	654.38
51	50	90.96	725.33
50	49	51.57	816.29
49	48	30.16	867.86
48	47	69.9	898.02
47	46	76.24	967.92
46	45	106.37	1044.16
45	44	82.96	1150.53
44	43	67.68	1233.49
43	42	68.04	1301.17
42	41	88.06	1369.21
41	40	88.12	1457.27
40	39	55.54	1545.39
39	38	88.58	1600.93
38	37	91.44	1689.51
37	36	74.02	1780.95
36	35	85.75	1854.97
35	34	77.72	1940.72
34	33	85.51	2018.44
33	32	61.55	2103.95
32	31	93.98	2165.5
31	30	80.04	2259.48
30	29C	48.83	2339.52
29C	29B	15.02	2388.35
29B	28	9.58	2403.37
28	27C	6.23	2412.95
27C	27B	11.08	2419.18
27B	27A	16.72	2430.26
27A	26	32.45	2446.98
26	25D	44.32	2479.43
25D	25C	12.84	2523.75
25C	25B	24.31	2536.59
25B	24/1C	10.71	2560.9
24/1C	24/1B	1.42	2571.61
24/1B	24	92.69	2573.03



24	23	55.47	2665.72
23	22	57.11	2721.19
22	21	62.49	2778.3
21	20	63.54	2840.79
20	19	81.07	2904.33
19	18	61.58	2985.4
18	17	34.3	3046.98
17	16	105.82	3081.28
16	15	111.12	3187.1
15	14	79.37	3298.22
14	13D	46.49	3377.59
13D	13C	11.74	3424.08
13C	13B	18.36	3435.82
13B	13A	13.47	3454.18
13A	12	123.26	3467.65
12	11	101.04	3590.91
11	10	102.14	3691.95
10	9D	88.12	3794.09
9D	9C	12.47	3882.21
9C	9B	12.64	3894.68
9B	9A	12.35	3907.32
9A	8	72.65	3919.67
8	7	109.04	3992.32
7	6	117.42	4101.36
6	5D	57.35	4218.78
5D	5C	12.98	4276.13
5C	5B	26.07	4289.11
5B	5A	13.83	4315.18
5A	4	75.82	4329.01
4	3	76.75	4404.83
3	2D	44.55	4481.58
2D	2C	10.93	4526.13
2C	2B	7.35	4537.06
2B	2A	11.48	4544.41
2A	1	34.36	4555.89
1	-----		4590.25

Tab. 2 – Torrente Marinella: corrispondenza delle sezioni tra tavole grafiche e modello idraulico



da	a	dist	chain
32	31.6	120.6	0
31.6	31.4	6.8	120.6
31.4	30	61.83	127.4
30	29.6	90.13	189.23
29.6	29.4	11.85	279.36
29.4	28	55.85	291.21
28	27.6	94.51	347.06
27.6	27.4	9.52	441.57
27.4	26	6.7	451.09
26	25	116.77	457.79
25	24	43.29	574.56
24	23	21.07	617.85
23	22	32.96	638.92
22	21.6	63.88	671.88
21.6	21.4	9.11	735.76
21.4	20.6	32.07	744.87
20.6	20.4	6.07	776.94
20.4	19	42.76	783.01
19	18.6	52.99	825.77
18.6	18.4	10.47	878.76
18.4	17	28.78	889.23
17	16	37.92	918.01
16	15.6	42.34	955.93
15.6	15.4	10.57	998.27
15.4	14	25.09	1008.84
14	13.6	58.35	1033.93
13.6	13.4	7.83	1092.28
13.4	12	32.14	1100.11
12	11	36.24	1132.25
11	10	30.61	1168.49
10	9.6	15.62	1199.1
9.6	9.4	6.62	1214.72
9.4	9.2	1	1221.34
9.2	8	14.43	1222.34
8	7	18.12	1236.77
7	6	34.14	1254.89
6	5	28.3	1289.03
5	4.6	39.89	1317.33
4.6	4.4	7.86	1357.22



4.4	3	2.37	1365.08
3	2	26.96	1367.45
2	1	20.83	1394.41
1	junction	11.18	1415.24

Tab. 3 – Fosso Montisi: corrispondenza delle sezioni tra tavole grafiche e modello idraulico

10	9	45.23	0
9	8	58.07	45.23
8	7	72.97	103.3
7	6.6	47.18	176.27
6.6	6.4	7.6	223.45
6.4	5	63.16	231.05
5	4.6	57.22	294.21
4.6	4.4	9.14	351.43
4.4	3	3.53	360.57
3	2	137.57	364.1
2	1	122.6	501.67
			624.27

Tab. 4 – Gora del Ciliegio: corrispondenza delle sezioni tra tavole grafiche e modello idraulico

da	a	dist	chain
14	13	198.3	0
13	12	113.35	198.3
12	11	70.79	311.65
11	10.6	27.12	382.44
10.6	10.4	59.64	409.56
10.4	9	6.05	469.2
9	8.6	5.57	475.25
8.6	8.4	34.74	480.82
8.4	7	11.9	515.56
7	6	85.92	527.46
6	5	130.22	613.38
5	4	82.05	743.6
4	3	26.67	825.65
3	2.6	27.6	852.32
2.6	2.4	79.61	879.92
2.4	1	8.49	959.53
			968.02

Tab. 5 – Fosso di Collegamento Pantano-Colatore Sx: corrispondenza delle sezioni tra tavole grafiche e modello idraulico



da	a	dist	chain
7	6.6	121.58	0
6.6	6.4	331.12	121.58
6.4	5.6	51.49	452.7
5.6	5.4	13.6	504.19
5.4	4.6	31.74	517.79
4.6	4.4	34.89	549.53
4.4	3.6	45.56	584.42
3.6	3.4	32.72	629.98
3.4	2	28.79	662.7
2	1	46.06	691.49
1		4.96	737.55

Tab. 6 – Fosso del Pantano: corrispondenza delle sezioni tra tavole grafiche e modello idraulico

da	a	dist	chain
16	15	95.1	0
15	14	42.15	95.1
14	13	90.36	137.25
13	12.6	16.83	227.61
12.6	12.4	11.32	244.44
12.4	11	67.75	255.76
11	10	51.94	323.51
10	9.6	37.96	375.45
9.6	9.4	12.27	413.41
9.4	8	88.08	425.68
8	7	77.63	513.76
7	6	62.69	591.39
6	5	72.88	654.08
5	4	77.15	726.96
4	3.8	47.75	804.11
3.8	3.6	4	851.86
3.6	3.4	7.1	855.86
3.4	2	15.6	862.96
2	1	27.4	878.56
		6.41	905.96

Tab. 7 – Fosso Colatore Dx: corrispondenza delle sezioni tra tavole grafiche e modello idraulico



Parametri o condizioni di calcolo	Descrizione	Valore
<i>Simulation period</i>	Durata della simulazione dall'inizio dell'evento	3.5 ore
<i>Time step interval</i>	Avanzamento temporale della simulazione	0.2 sec
<i>Boundary</i>	Condizioni al contorno	Livello 45 m slm per Marinella (=TR30 per Bisenzio), <i>standard link</i> alla Bathymetry per gli altri corsi d'acqua
<i>Flood and dry</i>	Livelli di attivazione delle celle: fino al <i>dying depth</i> la cella è secca, tra il <i>dying depth</i> e il <i>flooding depth</i> la cella è bagnata ma il fluido non si sposta, oltre il <i>flooding depth</i> inizia il trasferimento nelle celle adiacenti	<i>d.d.</i> 0.02 m <i>f.d.</i> 0.03 m
<i>Initial surface elevation</i>	Livello iniziale sull'area di studio	Nessun livello sulla Bathymetry, 10 cm nell'alveo dei corsi d'acqua
<i>Eddy viscosity</i>	Coefficiente di viscosità turbolenta	0.5 mq/s
<i>Bed resistance</i>	Scabrezza media del piano campagna: da formula di Manning	0.03125 m ^{1/3} /s
<i>Land value</i>	Valore massimo di quota della Bathymetry considerato come valore nullo ed esterno all'area di calcolo	90 m s.l.m.

Tab. 8 – Individuazione dei principali parametri e condizioni di calcolo del modello bidimensionale



2.6 Considerazioni e commenti sui risultati del modello idraulico bidimensionale dello stato attuale

La modellistica idraulica bidimensionale relativa allo stato attuale del sistema idraulico del Torrente Marinella e dei corsi d'acqua minori potenzialmente interferenti con l'area in cui è previsto l'ampliamento di Interporto fornisce un quadro esaustivo delle dinamiche idrauliche locali in caso di piene eccezionali del reticolo in esame (TR200).

All'interno di tale quadro complessivo, di cui è dato graficamente conto in termini di estensione delle aree allagate e di battenti da esondazione (involuppo dei livelli massimi) nell'allegata **Tavola I.5 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato attuale**, sono di seguito puntualizzati i principali aspetti generali di criticità del sistema e gli aspetti specifici legati alle richieste contenute nei pareri e nei contributi istruttori degli Enti coinvolti che già trovano parziale risposta in questa prima modellazione relativa allo stato attuale.

Si ricorda che la durata della simulazione idraulica da cui scaturiscono le perimetrazioni della **Tavola I.5** è pari a 3.5 ore; per il Torrente Marinella, a tale istante, le dinamiche di esondazione o di scambio con le casse di espansione non risultano ancora del tutto terminate, pur volgendo al termine; il picco dell'idrogramma di piena risulta comunque già passato, pertanto lo scenario esondativo finale (oltre le 5-6 ore) non si discosta in modo sensibile da quello rappresentato.

Come anticipato, le dinamiche dei fossi minori sono invece completamente modellate nell'arco delle 3.5 ore di simulazione.

2.6.1 Criticità idrauliche non correlate con l'area oggetto di ampliamento

La modellazione idraulica bidimensionale permette di valutare in modo approfondito le dinamiche d'alveo del reticolo studiato, il funzionamento delle opere idrauliche presenti e le dinamiche idrauliche da esondazione sul territorio circostante.

Tenuto conto che la finalità del presente lavoro è quella di dare risposta alle specifiche richieste degli Enti nell'ambito della procedura di V.I.A. in corso, di seguito sono semplicemente accennate le criticità generali del sistema studiato, pur non direttamente interferenti o correlate con l'area oggetto di ampliamento.

1. Funzionamento delle casse di espansione del Torrente Marinella e dinamiche esondative del tratto di monte

La modellazione mette in risalto un funzionamento non propriamente adeguato della casse di espansione di Pizzidimonte e Le Pagnelle.

Tali casse risultano, durante l'evento duecentennale di riferimento, completamente invase (meno il Settore 3 della cassa di Pizzidimonte, sprovvisto di propria opera di presa), ma non garantiscono a pieno il grado di laminazione previsto.

La portata in transito sotto la ferrovia risulta appena superiore ai 50 mc/s di progetto, ma tale livello è raggiunto anche attraverso le ingenti esondazioni naturali che si sviluppano appena a monte della Via Pratese, sia in sinistra (con propagazione dei volumi verso l'abitato di Calenzano), che in destra (con allagamenti verso l'abitato della Querce).

Inoltre si osservano, lungo l'asta del Torrente Marinella a monte della confluenza con il Fosso Montisi, alcuni sormonti arginali, specialmente in sinistra idraulica (verso l'area delle Pagnelle), ma anche in destra oltre l'argine del Settore 3 della cassa di Pizzidimonte.

L'area di espansione delle Pagnelle fornisce un modesto contributo alla laminazione delle portate di piena.

Il Fosso Montisi, dotato di sezione d'alveo assai ridotta, inizia ad esondare fin dalle prime fasi dell'evento, producendo allagamenti diffusi in tutta la zona.



La confluenza a cielo aperto e “non regolata” del corso d'acqua nel Torrente Marinella fa sì che le acque si reimmettano rapidamente nel sistema, rallentando appena rispetto al loro naturale deflusso.

L'argine posto in sinistra del Fosso Montisi svolge di fatto una mera funzione di contenimento; per giunta si manifesta anche un lieve aggiramento dell'argine stesso, con conseguente allagamento della zona alle sue spalle.

2. Esondazioni del Torrente Marinella a valle dell'area oggetto di ampliamento di Interporto

Nel tratto di valle del Torrente Marinella il principale fenomeno esondativo si verifica in destra idraulica a valle della Mezzana-Perfetti Ricasoli.

All'altezza della sezione n. 11 del modello si osserva un importante sormonto arginale che riversa ingenti volumetrie nell'area industriale di Campi Bisenzio, pari a circa 42.000 mc (valutati entro le 3.5 ore dall'inizio dell'evento) su una superficie esondata di oltre con battenti massimi sul piano campagna dell'ordine di 50.000-100.000 mc.

2.6.2 Aspetti idraulici correlati con l'area oggetto di ampliamento

La modellazione idraulica bidimensionale dello stato permette di valutare compiutamente anche gli aspetti più strettamente legati al progetto di ampliamento e richiamati nei vari pareri e contributi istruttori.

In questo paragrafo sono sinteticamente descritte le interferenze, allo stato attuale, del Torrente Marinella, della Gora del Ciliegio e dei corsi d'acqua minori che attraversano o lambiscono l'area di intervento, sulla base delle risultanze della modellazione idraulica eseguita.

1. Interferenze con il Torrente Marinella – sormonto arginale a cavallo della sezione n. 15 del modello idraulico ed altre criticità

Nei precedenti lavori era emersa l'eventualità che il Torrente Marinella potesse determinare un sormonto arginale all'altezza delle sezioni n. 15 e n. 16 del modello idraulico.

Tali sezioni sono state oggetto di un nuovo rilievo topografico eseguito nel mese di Novembre 2016.

Dal rilievo si osserva che la sommità arginale risulta più bassa di circa 20 cm rispetto a quella delle sezioni utilizzate in precedenza (rilievo Consorzio di Bonifica Medio Valdarno).

La seguente figura mostra il confronto tra la vecchia versione e quella aggiornata del rilievo delle due sezioni.

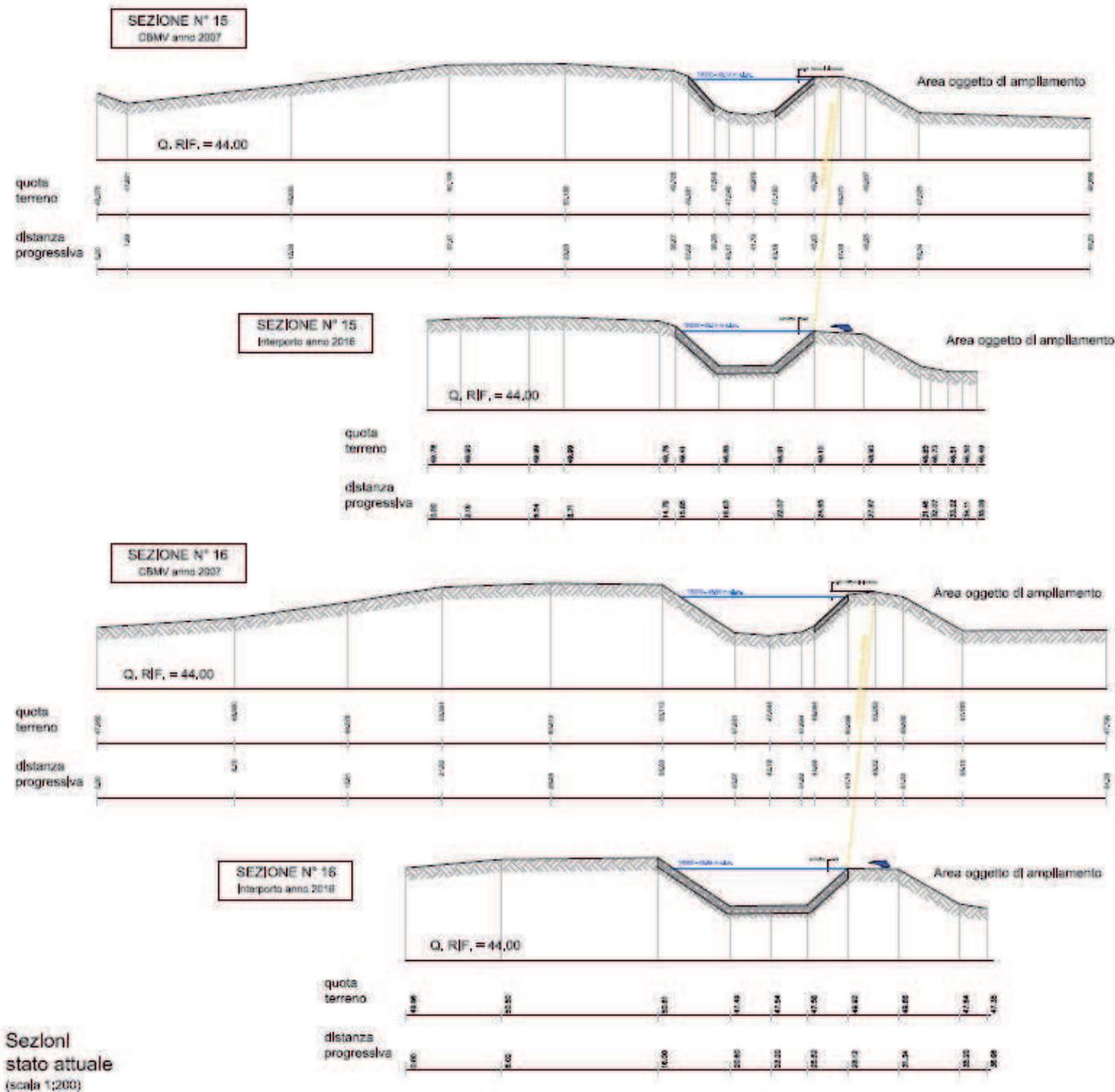


Fig. 11 – Confronto tra le nuove e le vecchie sezioni n. 15 e n. 16

Tenuto conto di questo leggero abbassamento della sezione rispetto alla precedente modellazione, il sormonto arginale appare adesso più evidente. Il tratto oggetto di sormonto è quello a cavallo della sezione n. 15, in corrispondenza della quale si raggiunge un livello di sormonto di 20 cm. Dal momento che il tratto superato è di lunghezza piuttosto modesta, i potenziali volumi che si riversano nell'area oggetti di ampliamento non poi molto significativo. Nell'arco della modellazione idraulica di durata 3.5 ore risultano sormontare l'argine circa 17.000 mc.

La fase più intensa del sormonto riscontra intorno alle 2:30 – 2:40 minuti dall'inizio dell'evento, con un idrogramma in uscita di no più di 3.5 mc/s.

Le acque esondate si riversano nell'attuale area agricola con distribuendosi su battenti modesti e propagandosi verso il Fosso Colatore Dx, nel quale si immettono e attraverso il quale defluiscono nel reticolo minore, fino al Fosso di Collegamento Pantano-Colatore Sx e al sottopasso sifonato del Torrente Marinella.

Nonostante i volumi fuoriusciti durante l'evento non siano trascurabili nel loro complesso, la superficie massima allagata risulta piuttosto ridotta, come anche la massima volumetria "istantanea" accumulata nell'area oggetto di ampliamento; infatti la superficie allagata risulta di poco superiore ad 1.5 ettari (a differenza della superficie massima allagata nel sormonto di valle, pari ad oltre 11 ettari), con un volume massimo di accumulo "istantaneo" pari 1.400 mc soltanto.

L'altezza media di accumulo sul piano campagna risulta pari a 15 cm circa, con un massimo di 77 cm in corrispondenza del fossetto che scorre ai piedi dell'argine destro del Marinella.

Nella seguente figura è mostrato un estratto delle aree allagate nell'istante di massima estensione ed invaso (inviluppo dei massimi battenti).

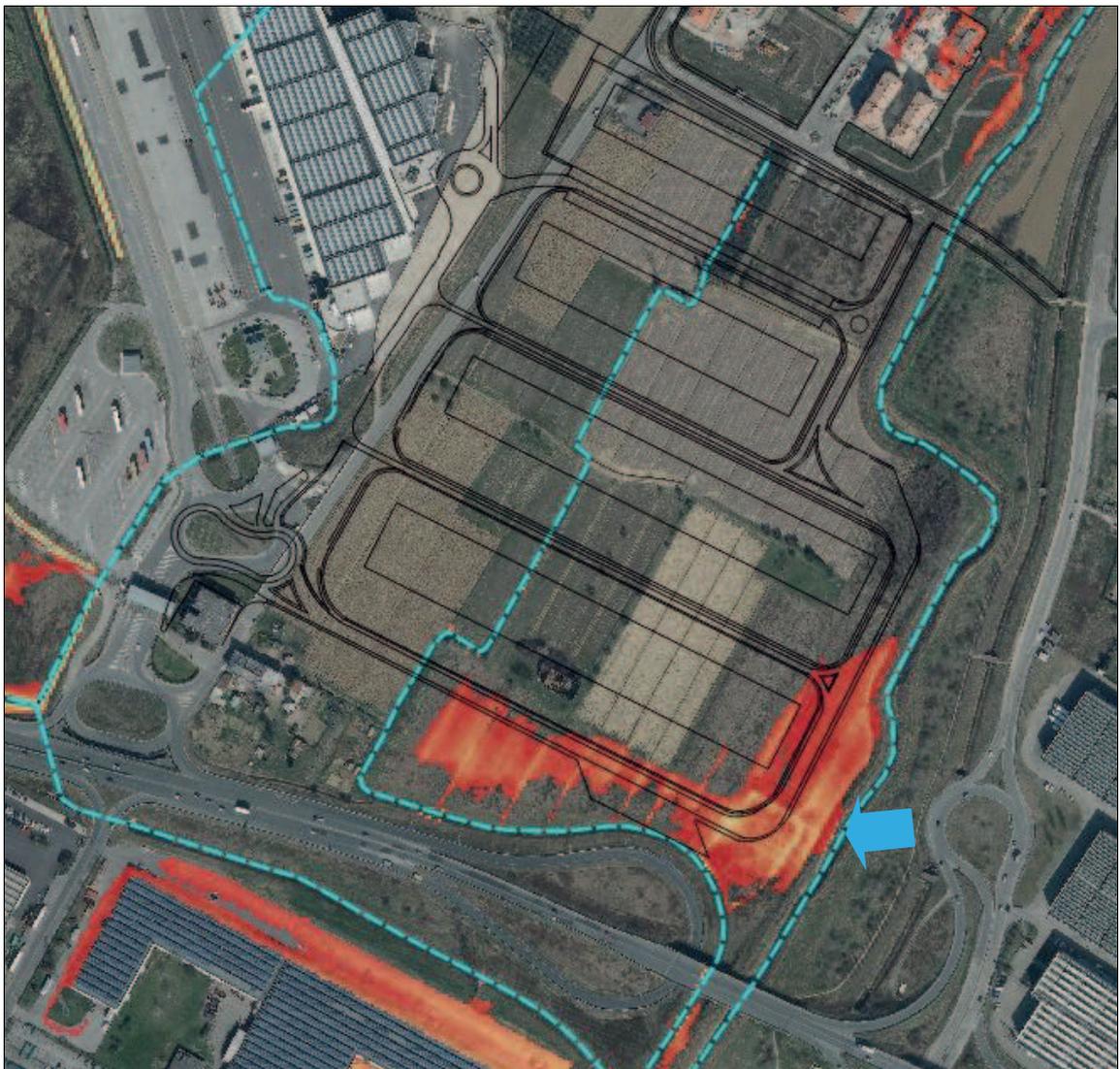


Fig. 12 – Particolare delle aree allagate dal Torrente Marinella per sormonto della sezione n. 15



La Fig. 12 mostra anche il sovrapposto dello schema di progetto dell'ampliamento. Si osserva come vi sia una leggera sovrapposizione delle aree allagate nella parte Sud-Est dell'area di intervento.

La risoluzione di tale interferenza è esposta in seguito, all'interno del Cap. 3.

Ad integrazione del quadro di interferenza tra il Torrente Marinella e l'area oggetto di intervento si specifica che l'esondazione che si sviluppa direttamente nella zona del Rosi appena a valle della linea ferroviaria, a cavallo della sezione n. 24 del modello idraulico, ben visibile nell'elaborato **Tavola I.5 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato attuale**, non rappresenta né un vincolo né un'interferenza in quanto gli esigui volumi esondati (circa 2.500 mc entro le prime 3.5 ore di simulazione) tendono a spostarsi verso Ovest seguendo le naturali pendenze delle strade, rimanendo a distanza dall'area oggetto di ampliamento.

2. Interferenza con le aree esondate della Gora del Ciliegio

Il modello idraulico bidimensionale ha consentito di definire in modo appropriato le dinamiche di esondazione della Gora del Ciliegio.

Secondo gli studi a supporto del Piano Strutturale del Comune di Prato le esondazioni di tale corso d'acqua provenienti da monte della linea ferroviaria potrebbero riversarsi nella zona del Rosi e nei pressi dell'area oggetto di ampliamento.

Il modello idraulico del Piano Strutturale di Prato (2010) riproduce l'asta e le aree adiacenti alla Gora del Ciliegio all'interno di un modello monodimensionale a celle di accumulo; gli idrogrammi in input al modello provengono da un'analisi idrologica antecedente alla pubblicazione della nuova analisi frequenza regionale delle precipitazioni (Regione Toscana, 2014); inoltre il D.T.M. rispetto al quale sono calcolate le curve di invaso delle celle è fondato sulla C.T.R. in scala 1:2.000.

Il presente studio appare, nel confronto, assai più aggiornato ed adeguato per descrivere le dinamiche di esondazione di un'area intensamente urbanizzata.

I risultati della modellazione idraulica bidimensionale mettono in evidenza, per la Gora del Ciliegio, una forte criticità in corrispondenza dell'imbocco del lungo tratto tombato, con ingenti volumi esondati nell'area della Querce.

Le aree allagate allo stato attuale (inviluppo dei massimi battenti) sono rappresentate nella **Tavola I.5 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato attuale** e nell'estratto della figura seguente.



Fig. 13 – Particolare delle aree allagate dalla Gora del Ciliegio nella zona della Querce

La quasi totalità delle portate in arrivo all'imbocco del tombamento (freccia azzurra) non riesce a defluire al suo interno, e si riversa prima nei campi e poi nell'area urbana sottostante.

La possibilità che gli allagamenti duecentennali si propaghino oltre la linea ferroviaria non è remota, ma il modello mostra che l'unico punto in cui può attivarsi questo trasferimento è il sottopasso con la freccia verde. Infatti le acque di monte trovano una corsia preferenziale verso tale sottopasso per via delle pendenze del piano campagna, e non verso l'altro sottopasso, ovvero quello collegato a Via Cellere e l'abitato del Rosi, indicato con il simbolo "stop", al quale le acque esondate non giungono affatto.

L'eventuale trasmissione di volumi idrici attraverso il sottopasso con freccia verde (collegamento idraulico non presente nel modello 2D) non potrà essere tale da propagarsi verso l'area oggetto di ampliamento, piuttosto potrebbe determinare allagamenti diffusi nell'abitato a valle della ferrovia.

Tali considerazioni sono rese più immediate con la consultazione della **Tavola I.5 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato attuale**.

Le ulteriori aree allagate da parte della Gora del Ciliegio a valle dell'area dell'attuale non paiono interferire in alcun modo con la zona di ampliamento.



3. Interferenza con le dinamiche idrauliche dei corsi d'acqua minori

I risultati del modello idraulico bidimensionale dimostrano l'insussistenza di condizioni di rischio o interferenza tra le dinamiche idrauliche del Fosso Colatore Dx, del Fosso del Pantano e del Fosso di Collegamento Pantano-Colatore Sx e l'area oggetto di intervento.

Nell'allegata **Tavola I.5 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato attuale** l'assenza di "macchie" colore lungo tali corsi d'acqua sta ad indicare che la portata in transito (idrogrammi duecentennali con durata critica pari a 20 minuti) risulta contenuta nell'alveo attivo di questi corsi d'acqua.

Alla luce di ciò l'unica interferenza dell'area in progetto con il reticolo idraulico minore è rappresentata, ovviamente, dalla sovrapposizione dell'intervento previsto con il tracciato del Fosso Colatore Dx.

Le caratteristiche e la natura di questo corso d'acqua sono già state analizzate nel precedente capitolo.

Anche alla luce delle nuove informazioni ottenute, la proposta di spostamento/adeguamento del Fosso Colatore Dx così come prevista nelle precedenti versioni dello studio ha adesso subito una leggera modifica, illustrata nel capitolo successivo.

E' comunque dimostrato che, al di là dell'interferenza "fisica", non sussistono interferenze legate all'idraulica superficiale dei fossi minori.



2.7 Modellazione idraulica monodimensionale integrativa per TR30

A monte della predisposizione del modello idraulico bidimensionale del Torrente Marinella e dei vari corsi d'acqua minori, è stato preliminarmente costruito un tradizionale modello idraulico monodimensionale a celle di accumulo con l'ausilio del software Hec Ras 4.1.0 per il solo Torrente Marinella e Fosso Montisi.

Tale modellazione ha avuto la funzione di inquadrare, già ad un buon livello di dettaglio, il funzionamento idraulico delle casse di espansione del Torrente Marinella e definire indicativamente quali fossero le criticità del sistema, per poi avviare "consapevolmente" la composizione del più complesso modello bidimensionale.

Questo modello, impostato originariamente sullo scenario critico duecentennale, con stessi input idrologici e geometria d'alveo del modello bidimensionale successivo, è adesso utilizzato semplicemente per dimostrare la capacità di contenimento dell'idrogramma con tempo di ritorno pari a 30 anni da parte delle strutture arginali che caratterizzano tutta l'asta del Torrente Marinella, ed in particolare in corrispondenza delle sezioni con minor superficie libera, come la sezione n. 15 e la sezione n. 16 in cui si verifica sormonto per l'evento duecentennale.

Tenuto conto che, al di là delle ovvie differenze geometriche nella modellazione del territorio circostante, il modello monodimensionale a celle risulta del tutto analogo come asta studiata, sezioni idrauliche, quote degli sfioratori e rappresentazione delle casse di espansione al modello idraulico bidimensionale, si trascurano sia la descrizione delle caratteristiche geometriche del modello che gli aspetti metodologici circa le modalità di risoluzione da parte del software Hec Ras delle equazioni che regolano il moto vario in alveo e gli scambi con le adiacenti celle.

Semplicemente si sottolinea che la definizione delle curve di invaso delle celle in cui è stato suddiviso il territorio è fondata sui dati altimetrici del rilievo LIDAR, e si mostra un estratto dello schema geometrico del modello.

Successivamente si mostrano anche gli idrogrammi trentennali relativi al bacino di monte del Torrente Marinella e al Fosso Montisi, valutati con la stessa metodologia esposta nel precedente Paragrafo 2.4.

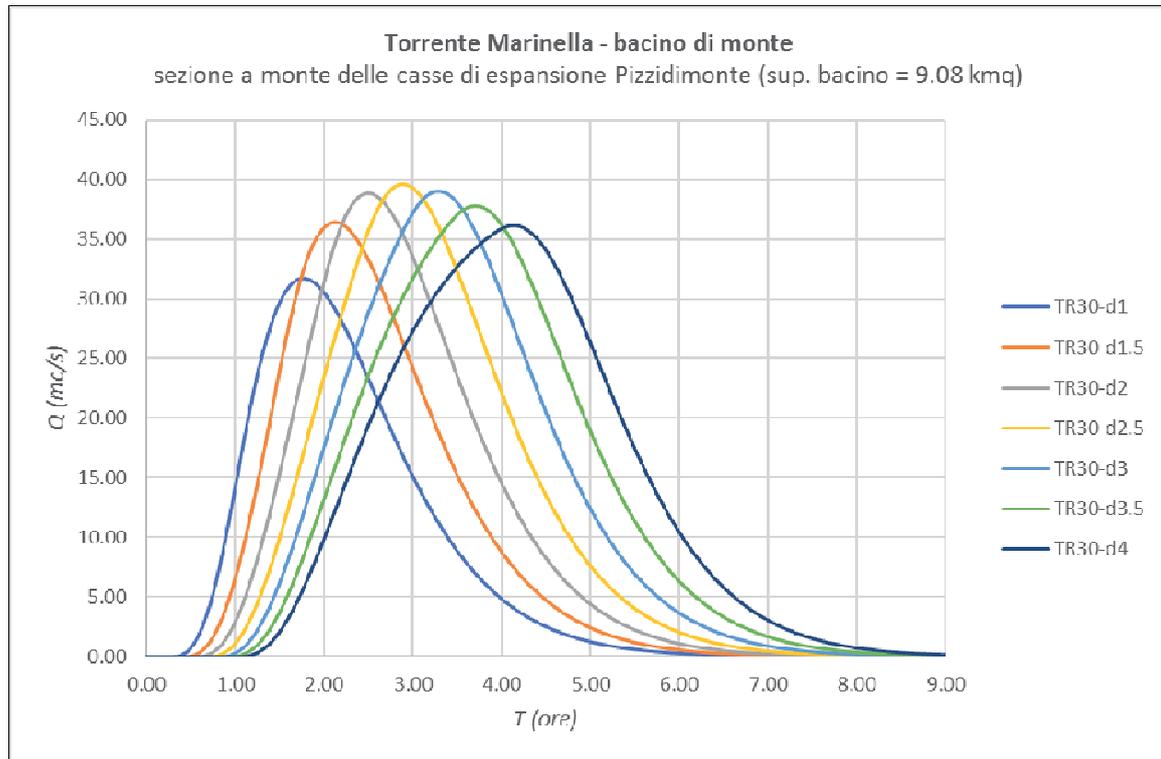


Fig. 15 – Idrogrammi di piena del bacino di monte del Torrente Marinella, per TR30

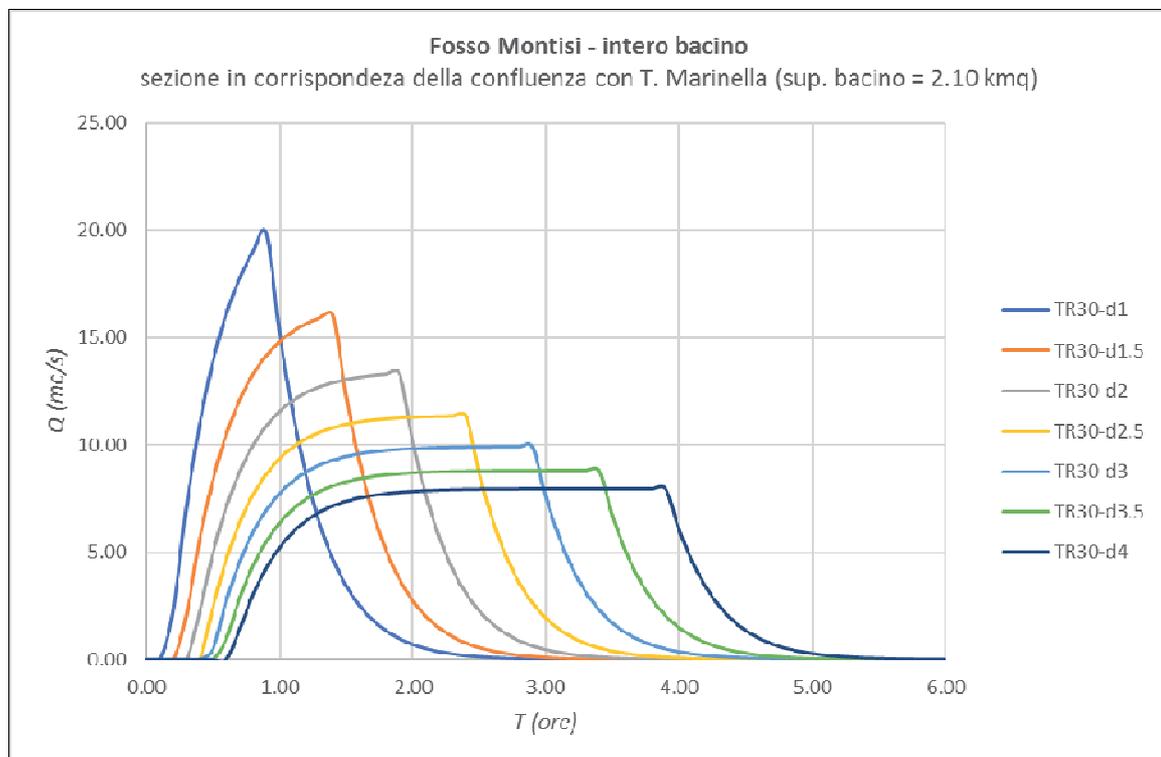


Fig. 16 – Idrogrammi di piena del bacino del Fosso Montisi, per TR30



Per il tempo di ritorno trentennale si osserva che il picco dell'idrogramma è raggiunto per una durata di precipitazione pari a 2.5 ore, piuttosto che per la durata di 2 ore, come nel caso duecentennale.

Le simulazioni di verifica della dinamica d'alveo del Torrente Marinella per TR30 sono quindi condotte sia rispetto all'idrogramma con durate 2 ore che rispetto a quello con durata 2.5 ore.

Di seguito si mostrano immediatamente i risultati di tale modellazione relativamente alle sezioni n. 15 e n. 16 del modello idraulico.

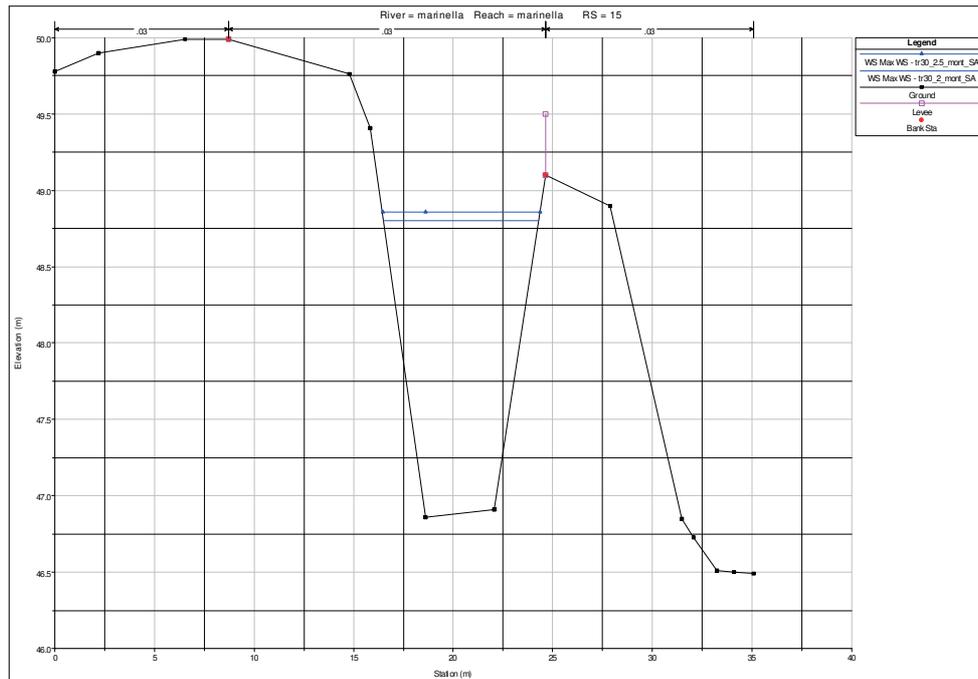


Fig. 17 – Livelli idrometrici del Torrente Marinella alla sezione n. 15 per TR30 e durate pari a 2 e 2.5 ore

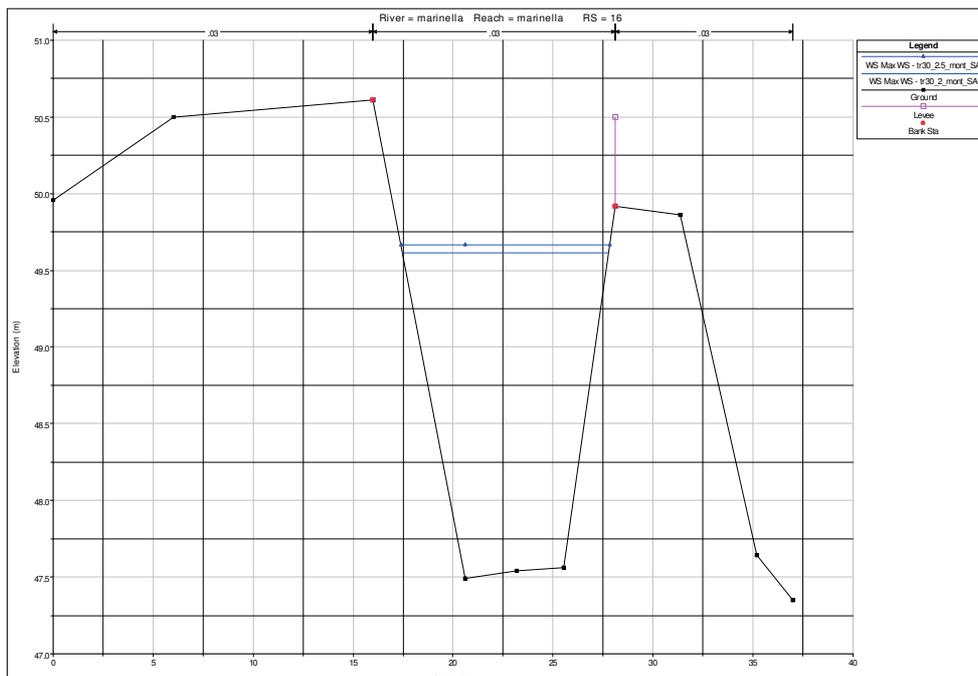


Fig. 18 – Livelli idrometrici del Torrente Marinella alla sezione n. 16 per TR30 e durate pari a 2 e 2.5 ore



I risultati della modellazione mostrano come la portata trentennale in transito lungo l'asta del Torrente Marinella sia contenuto all'interno delle attuali strutture arginali.

I franchi di sicurezza risultano pari a 20 cm rispetto all'evento con durata 2.5 ore e 25 cm rispetto all'evento con durata 2 ore.

Confrontando la portata trentennale di picco con la portata duecentennale di picco per il bacino di monte, ad esempio per la durata di 2 ore, si osserva, per TR30, una portata di 39 mc/s, e per TR200 di 66 mc/s; nonostante ci saremmo attesi un livello in alveo inferiore per TR30, le casse di espansione di monte giocano un ruolo determinante, in particolare quella di Pizzidimonte, che risulta pienamente funzionante, e quindi "laminante", rispetto all'evento duecentennale, ma praticamente vuota rispetto all'evento trentennale.

In ogni caso il franco di sicurezza per appare solido, e tale da escludere esondazione ed interferenza con l'area oggetto di ampliamento.

3. PROPOSTA DI SISTEMAZIONE IDRAULICA DELL'AREA OGGETTO DI INTERVENTO E MODELLO IDROLOGICO-IDRAULICO DELLO STATO DI PROGETTO

3.1 Premessa

In questo secondo "macro-capitolo" sono affrontati tutti i temi relativi alle modalità di superamento delle interferenze idrauliche residue nello stato di progetto, attraverso la proposta di sistemazione idraulica dell'area oggetto di intervento.

La compatibilità idraulica è dimostrata attraverso la predisposizione di un modello idrologico-idraulico di progetto, sempre con schema bidimensionale, a partire dal modello dello stato attuale.

Ogni "trasformazione" apportata al sistema idraulico superficiale e di smaltimento delle acque meteoriche è schematizzata ed introdotta nel modello idraulico bidimensionale.

Gli interventi di sistemazione idraulica dell'area non si discostano da quelli proposti in precedenza, ma subiscono alcune modifiche ed ottimizzazioni in funzione del nuovo scenario emerso con il modello di stato attuale e delle informazioni aggiuntive reperite riguardo al funzionamento del sistema fognario a servizio dell'abitato del Rosi.

Il presente capitolo si articola secondo una preliminare esposizione dei criteri alla base delle scelte progettuali compiute, una successiva descrizione delle opere di sistemazione idraulica previste, la predisposizione del modello idrologico-idraulico dello stato di progetto e, infine, le considerazioni circa i risultati ottenuti nel raggiungimento della compatibilità idraulica dell'intervento e la risoluzione delle interferenze idrauliche residue.

In analogia all'analisi dello stato attuale, sono stati predisposti opportuni elaborati grafici atti a descrivere in modo più diretto ed immediato le opere di sistemazione idrauliche.

Ad essi è fatto sovente riferimento, ed è su di essi che si intende "puntare" per dimostrare la sostenibilità del progetto di ampliamento, piuttosto che con lunghe descrizioni discorsive.

In questo capitolo la trattazione è affrontata quindi in modo più snello, sia perché buona parte dei contenuti di analisi sono stati già trattati o anticipati in precedenza, sia perché con la presente proposta di sistemazione idraulica si è inteso dare un'unica risposta a tutti i quesiti e dubbi residui.



3.2 Indicazione dei criteri alla base delle scelte progettuali compiute

Le scelte progettuali compiute si fondano sono finalizzate al superamento delle seguenti problematiche ed interferenze residue, derivanti dal nuovo quadro di conoscenze, legato anche alla predisposizione del nuovo modello idraulico bidimensionale dello stato attuale, che si configura soltanto come uno strumento di verifica delle nuove opere ma anche come uno di approfondimento del quadro conoscitivo:

1. Esondazione del Torrente Marinella per sormonto arginale;
2. Gestione delle acque di scolo e meteoriche provenienti dall'abitato del Rosi attraverso il Fosso Colatore Dx;
3. Ottimizzazione del funzionamento della cassa di laminazione;
4. Superamento dell'interferenza di sovrapposizione del collettore fognario esistente di Via Cellerese con l'urbanizzazione dell'area di ampliamento.

Per quanto riguarda il primo punto, una volta dimostrata la sussistenza di tale fenomeno di sormonto, ci si è trovati davanti ad una doppia possibilità: proporre un sovrizzo e ringrosso arginale in corrispondenza del tratto di tracimazione (intervento tecnicamente anche piuttosto semplice) o provare a gestire le acque esondate all'interno dell'area di ampliamento e compatibilmente agli interventi edificatori previsti.

Al momento la scelta è ricaduta su questa seconda opzione, per i seguenti motivi:

- Si è preferito non aggravare attraverso un sovrizzo arginale, e quindi il mantenimento di una volumetria aggiuntiva in alveo, le condizioni di rischio del Torrente Marinella, tenuto anche conto dell'ulteriore punto di criticità arginale presente in desta idraulica a valle della Mezzana-Perfetti Ricasoli;
- Si è ritenuto tecnicamente non adeguato limitare un sovrizzo e ringrosso arginale ad un breve tratto; sarebbe invece auspicabile l'adeguamento di tutta la struttura arginale desta del Torrente Marinella dalla ferrovia verso valle, ed in tal senso il Proponente si rende disponibile a contribuire per quanto di propria competenza e disponibilità;
- Si è valutato di poter gestire all'interno dell'area verde posta nello spigolo Sud-Est dell'area di ampliamento i volumi idrici esondati, migliorandone il deflusso verso valle;
- Si è ritenuto di poter sfruttare la cassa di laminazione in progetto per abbattere, ancorché parzialmente, le portate esondate, fornendo un miglioramento sul sistema del reticolo di acque basse, seppur in caso di eventi eccezionali.

In considerazione di ciò, si è proceduto nel dimensionamento e nella verifica delle opere in progetto, illustrate nel successivo paragrafo.

Per quanto riguarda la gestione delle acque provenienti dal Rosi attraverso l'attuale Fosso Colatore Dx la scelta progettuale compiuta, leggermente diversa da quella precedentemente proposta, è legata alle nuove informazioni reperite circa la natura delle acque recapitate in tale fosso, nonché alle indicazioni ricevute in merito dal Gestore.

Per una più precisa disamina di questi aspetti e queste valutazioni si rimanda alla consultazione del documento *Integrazioni in merito alla componente "Ambiente Idrico Superficiale"*, di cui il presente **Studio Specialistico** rappresenta di fatto un allegato.

Per l'ottimizzazione del funzionamento della cassa di laminazione si è proceduto rivedendo alcuni aspetti del precedente progetto (ad esempio i volumi di scavo e il dimensionamento del manufatto di restituzione al Fosso Colatore Dx), accogliendo le indicazioni ricevute a riguardo da parte di alcuni degli Enti coinvolti.



Allo stesso modo, anche per il superamento dell'interferenza con il collettore fognario di Via Cellerese, sono state recepite ed attuate le indicazioni del Gestore circa la necessità di spostamenti di un tratto di tale collettore.

Nel loro insieme, tali principi si sono dunque tradotti in una revisione funzionale della precedente proposta progettuale, come illustrato nel successivo paragrafo.

3.3 Sintesi della proposta di sistemazione idraulica dell'area di ampliamento

La proposta di sistemazione idraulica dell'area di ampliamento di Interporto è qui illustrata in estrema sintesi.

E' stato predisposto infatti un nuovo elaborato grafico di progetto (**Tavola I.4 – schema del reticolo idraulico superficiale e del reticolo fognario – stato di progetto**) in cui è fornita non solo una schematizzazione planimetrica degli interventi ma anche una descrizione testuale del dimensionamento e delle caratteristiche delle principali opere idrauliche in progetto.

Non sono stati predisposti particolari progettuali (sezioni o planimetrie di dettaglio) in quanto sostanzialmente le modifiche apportate sono coerenti con i disegni precedenti, se non, appunto, nei dimensionamenti di dettaglio di alcuni manufatti, comunque forniti nella **Tavola I.4**.

Tenuto conto della specificità delle opere in progetto, in particolare del manufatto di restituzione della cassa di laminazione, si ritiene appropriato rimandare a fasi di approfondimento successivo la verifica del funzionamento di dettaglio di alcune opere, magari anche rispetto a scenari idrologici di progetto diversi (ad esempio più frequenti e di durata maggiore) da quello critico duecentennale.

In sintesi, i singoli sotto interventi in progetto sono i seguenti:

- Realizzazione del nuovo Fosso Colatore Dx sul lato Ovest dell'area di ampliamento, con dimensioni e tracciato analoghi a quanto precedentemente presentato;
- Realizzazione della cassa di laminazione nell'area precedentemente individuata, avente la medesima superficie ma dotata di manufatto di regolazione della restituzione nel Fosso Colatore Dx leggermente diverso dalla precedente versione, nonché con diversa ubicazione, e con scavo spinto fino ad 1 mt di profondità media rispetto del piano campagna;
- Realizzazione di un nuovo collettore (bypass) con funzioni di scolmatore fognario dell'area del Rosi, collegato all'uscita dell'attuale Colatore Dx, e recapitante a valle della cassa di laminazione;
- Adeguamento della sezione del fossetto esistente ai piedi dell'argine destro "sormontato" del Torrente Marinella, finalizzata a migliorarne la capacità di deflusso, e realizzazione di una condotta di scolmo delle acque esondate da tale fossetto fino alla cassa di laminazioni;
- Realizzazione di opportuni raccordi tra la "testa" del nuovo Colatore Dx e la rete urbana di raccolta delle acque meteoriche dell'abitato del Rosi, all'altezza dell'intersezione stradale tra Via Cellerese e Via degli Etruschi (ove attualmente tale rete si immette nel collettore fognario principale di Via Cellerese).

Come anticipato, ogni singolo intervento è rappresentato e descritto nella **Tavola I.4 – schema del reticolo idraulico superficiale e del reticolo fognario – stato di progetto**.



3.4 Modello idrologico-idraulico dello stato di progetto

Gli interventi idraulici in progetto sono stati schematizzati ed inseriti in un nuovo modello idraulico bidimensionale, in cui sono stati leggermente redistribuiti gli apporti idrologici in funzione dello scenario progettuale.

Sostanzialmente è stata applicata una modifica di estremo dettaglio al modello idraulico dello stato attuale, che, in tutte le sue altre componenti e corsi d'acqua non interessati, risulta del tutto invariato.

Rispetto al modello di stato attuale, avente una finalità di inquadramento più generale, il modello dello stato di progetto ha finalità più di dettaglio.

Considerando che le principali variazioni attengono al Fosso Colatore Dx e alle aree contermini, è stato sufficiente ridurre la durata della simulazione idraulica di progetto a sole 2.5 ore dall'inizio dell'evento di piena "generalizzato" del Torrente Marinella e di tutti gli altri corsi d'acqua minori.

Entro le 2.5. ore la dinamica del Fosso Colatore Dx si è già ampiamente sviluppata, salvo la permanenza di volumi nella cassa di laminazione, mentre l'esondazione del Torrente Marinella in corrispondenza della sezione n. 15 si trova nella sua fase di picco.

Il modello idrologico ed idraulico dello stato di progetto è schematizzato, analogamente allo stato attuale, in un apposito elaborato grafico, la **Tavola I.2 - schema del modello bidimensionale stato di progetto**, alla cui consultazione si rimanda per eventuali approfondimenti.

Si ribadisce che quanto non espressamente indicato nel presente paragrafo o nella **Tavola I.2** non risulta modificato rispetto alla modellistica relativa allo stato attuale.



3.5 Considerazioni sui risultati conseguiti

Attraverso il modello idraulico si è riusciti a simulare il comportamento idraulico delle opere di sistemazione previste all'interno dell'area di ampliamento.

I risultati si sono rivelati confortanti ed in linea con le aspettative.

Come per lo stato attuale è stato predisposto un apposito elaborato grafico, denominato **Tavola I.6 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato di progetto**; a differenza del modello di stato attuale, come anticipato, tale simulazione è stata troncata dopo 2.5 ore dall'inizio dell'evento, pertanto le aree allagate esterne all'area di Interporto risultano leggermente meno estese di quelle di **Tavola I.5**.

Si specifica inoltre che nella simulazione dello stato di progetto, per dimenticanza, non sono state apportate alcune modifiche al LIDAR, invece presenti nella simulazione di stato attuale; in particolare non sono stati introdotti gli aggiornamenti cartografici con i nuovi edifici, pertanto alcune aree esondate paiono divergere da quelle dello stato attuale, ma solo per questa incoerenza localizzata tra i due modelli 2D.

In ogni caso si tratta di zone distanti da quelle oggetto di intervento, pertanto queste "imperfezioni" non risultano significative.

Il nuovo Fosso Colatore Dx appare anche sovradimensionato rispetto alle portate meteoriche ad esso conferite (in minima parte provenienti dal Rosi ed in gran parte prodotte dal nuovo ampliamento); senza particolari alterazioni anche in corrispondenza delle restrizioni dei tre attraversamenti e del tombamento di valle, riesce a recapitare le portate alla cassa di laminazione.

L'assenza di aree allagate intorno al tracciato di tale Fosso (vedi elaborato **Tavola I.6 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato di progetto**) accerta il contenimento delle portate al suo interno.

La **cassa di laminazione**, dimensionata secondo il massimo apporto volumetrico previsto dal nuovo Fosso Colatore Dx, risulta accumulare e trattenere interamente i volumi al suo interno, restituendoli gradualmente al tratto di valle del Fosso Colatore Dx, senza che lo sfioratore di sicurezza entri in funzione durante l'evento.

L'assenza di aree allagate intorno all'area di cassa (vedi elaborato **Tavola I.6 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato di progetto**) accerta il contenimento dei volumi idrici al suo interno.

La seguente figura mostra l'idrogramma in uscita dall'opera di restituzione.

Fig. 19 – Idrogramma in uscita dallo scarico di fondo della cassa di laminazione



Il nuovo bypass di scolmo della fognatura del Rosi riesce a trasmettere a valle, nel Colatore Dx, le portate in ingresso da monte, coincidenti con la quota di scolmo della fognatura mista.

L'assenza di aree allagate intorno al tracciato del bypass fognario (vedi elaborato **Tavola I.6 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato di progetto**) accerta l'adeguatezza della sezione del collettore per il contenimento delle portate.

La seguente figura mostra l'idrogramma in transito al suo interno.

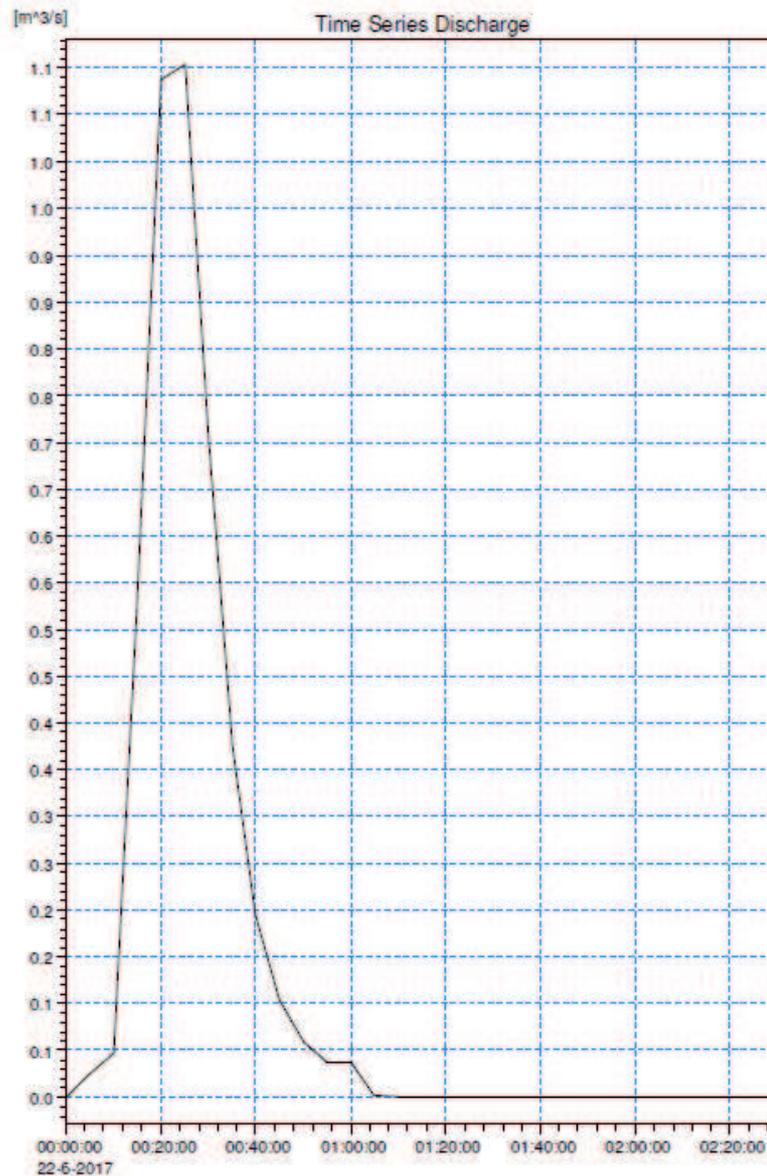


Fig. 20 – Idrogramma in transito all'interno del bypass di scolmo fognario, dal Rosi e la Fosso Colatore Dx

La **nuova condotta di scolmo delle acque esondate** dal Torrente Marinella contribuisce, seppur parzialmente, all'allontanamento dei volumi dall'area esondata. Essa entra in funzione appena dopo l'inizio della tracimazione arginale, intorno alle 2 ore, come mostra il seguente idrogramma.

I volumi esondati dal Torrente Marinella, grazie all'adeguamento del fossetto a cielo aperto, al contributo della condotta di scolmo e soprattutto del rialzamento della parte edificata, rimangono contenuti nell'area di Sud-Est e da essa defluiscono regolarmente nel reticolo minore, analogamente allo stato attuale.

La **Tavola I.6 – aree allagate e battenti massimi di esondazione - stato di progetto** identifica bene questo fenomeno; si osserva che i battenti massimi sul limite della zona edificata risultano non superiori a 20-30 cm sul piano campagna, mentre si prevede il rialzamento della viabilità a quota superiore di circa 80-100 cm rispetto al piano campagna attuale.



Fig. 21 – Idrogramma in transito all'interno della condotta di scolmo delle acque esondate dal Torrente Marinella (attivazione intorno alle 2 ore dopo l'inizio dell'evento)

A luci di queste semplici considerazioni e verifiche, si può affermare che nel complesso le opere in progetto paiono rispondere alle esigenze e alle richieste pervenute nell'ambito della presente procedura di Valutazione di Impatto Ambientale.