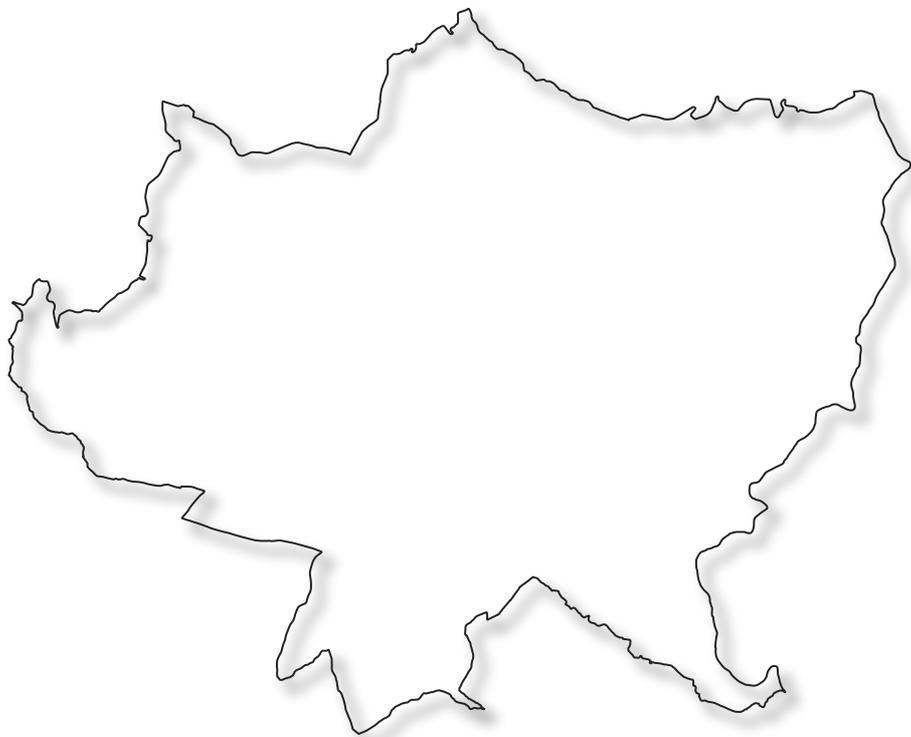


# R01

# Piano Strutturale



COMUNE  
DI SIENA



## Legge Regionale 41/2018

### Relazione idrologico-idraulica

progetto:

Roberto Vezzosi (capogruppo)

Febbraio 2020

Stefania Rizzotti, Idp studio

Luca Gentili e Idp progetti gis s.r.l., Sistema Informativo Territoriale

Monica Coletta (Studio tecnico Agostoli) e Bianca Borri, aspetti agronomici e paesaggistici

ATS s.r.l. (Cristina Felici), archeologia e beni culturali

#### **Indagini geologiche, idrauliche e sismiche**

ProGeo Engineering s.r.l.:

Massimiliano Rossi, Fabio Poggi, Laura Galmacci, Luca Berlingozzi,  
Davide Giovannuzzi, Gregorio Bartolucci, Mirko Frascioni

Sindaco: Luigi De Mossi

Andrea Debernardi ed Emanuele Gianmaria Ferrara, mobilità

Maria Rita Cecchini, edilizia sostenibile ed energia

Direzione Urbanistica:  
Responsabile Unico del Procedimento  
Paolo Giuliani

Gaetano Viciconte, aspetti legali in materia edilizia e urbanistica

Ufficio Urbanistica:  
Lucia Buracchini, Marco Vannocci  
Rossana Papini

Fabrizio Cinquini (Terre.it) e Techland Engineering studio associato, VAS





## INDICE

INDICE.....	1
1 PREMESSA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	3
2. CARATTERISTICHE GEO-MORFOLOGICHE DELL'AREA DI STUDIO .....	6
2.1 Inquadramento Generale .....	6
2.2 Inquadramento geomorfologico .....	8
2.3 Inquadramento idrografico e definizione del reticolo di studio .....	9
2.4 Individuazione dei Bacini Idrografici .....	11
3 RILIEVO DELLE SEZIONI D'ALVEO E CARTOGRAFIA DI RIFERIMENTO .....	15
4 ANALISI IDROLOGICA .....	16
4.1 Linee Segnatrici di Possibilità Pluviometrica.....	16
4.1.1 Linee segnatrici di possibilità pluviometrica puntuali.....	16
4.1.2 Linee segnatrici di possibilità pluviometrica areali .....	21
4.1.3 Durata critica di pioggia.....	27
4.2 Pioggia effettiva.....	29
4.2.1 Modello di infiltrazione - Metodo SCS-CN .....	29
4.2.2 Determinazione del CN III.....	33
4.3 Portate di progetto. Trasformazione afflussi/deflussi .....	36
4.3.1 Modello SCS Idrogramma Unitario .....	36
4.3.2 Modello Kinematic Wave.....	37
4.3.3 Stima del <i>lag time</i> .....	38
4.3.4 Risultati della modellazione idrologica .....	38
5 ANALISI IDRAULICA.....	41
5.1 Descrizione della modellazione idraulica.....	41
5.2 Modellazioni idrauliche monodimensionali con Hec-Ras 5.0.3 e 5.0.7.....	43
5.3 Modellazioni idrauliche bidimensionali - HEC-RAS 5.0.3 o 5.0.7 .....	44
5.4 Modellazioni idrauliche monodimensionali con EPA-SWMM .....	46
5.5 Modellazioni idrauliche bidimensionali - FLO 2D 2009.....	47
6 RISULTATI DELLE MODELLAZIONI IDRAULICHE.....	52
6.1 Modello "Bozzone" .....	53
6.2 Modello "Fossatone" .....	55



6.3	Modello "T. Sorra" .....	59
6.4	Modello "T. Sorra – area di laminazione" .....	65
6.5	Modello "T. Tressa" .....	67
6.6	Modello "F. Paradiso" .....	72
6.7	Modello "T. Riluogo monte" .....	76
6.8	Modello "T. Riluogo intermedio – EPA SWMM" .....	78
6.9	Modello "T. Riluogo " - FLO 2D .....	83
6.10	Modello "T. Riluogo intermedio" .....	85
6.11	Modello "T. Riluogo valle" .....	94
6.12	Modello "Fosso Castagno" .....	97
6.13	Modello "San Miniato" EPA-SWMM .....	100
6.14	Modello "San Miniato " - FLO 2D .....	103
6.15	Modello "T. Bolgione " .....	107
7	MAPPA DELLE AREE A PERICOLOSITA' D'ALLUVIONE .....	109
8	MAPPA DEI BATTENTI, DELLE VELOCITÀ E DELLA MAGNITUDO IDRAULICA.....	110
9	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	111



## 1 PREMESSA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Con Decreto Dirigenziale del Responsabile del Settore Assetto del Territorio - Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile della Regione Toscana n. 16147 del 20-09-2019, il Comune di Siena è stato ammesso al finanziamento inerente al bando per la realizzazione di studi per l'implementazione delle mappe di pericolosità da alluvione e rischio di alluvioni, comprensive di carte dei battenti, velocità e magnitudo idraulica. Questa società è stata incaricata dall'Amministrazione comunale di Siena a predisporre l'implementazione delle suddette mappe di pericolosità da alluvione nell'ambito dell'aggiornamento del quadro conoscitivo di Piano Strutturale.

Il lavoro intende caratterizzare gli aspetti connessi alla probabilità di allagamento per fenomeni di esondazione dai corsi d'acqua compresi nel reticolo d'interesse della difesa del suolo di cui alla L.R. 79/2012 e ss.mm.ii. ed elencati nella relazione allegata alla richiesta di partecipazione al suddetto bando regionale.

La probabilità di allagamento analizzata è quella indotta dal superamento della capacità di deflusso dei corsi d'acqua oggetto di modellazione, causa dei fenomeni esondativi. Non sono inclusi gli aspetti di pericolosità prodotti da collassi strutturali (argini, ponti...).

Al fine di definire le perimetrazioni delle aree allagabili per eventi con  $Tr \leq 30$  anni ed eventi con  $30 < Tr \leq 200$  anni, sono state implementate le modellazioni idrologico-idrauliche monodimensionali e bidimensionali con il codice di calcolo HEC-RAS 5.0.3 e 5.0.7, EPA-SWMM 5.1 e Flo-2D.

Con l'entrata in vigore della L.R. 41/2018, vale quanto segue:

Definizione e correlazione delle classi di pericolosità in funzione della frequenza degli eventi alluvionali (reg. attuazione 53/R, disciplina di PGRA e LR 41/2018):

Reg. attuazione 53/R	PGRA	LR41/2018
aree a pericolosità idraulica molto elevata (I.4)	aree a pericolosità per alluvioni elevata (P3)	aree a pericolosità per alluvioni frequenti
aree a pericolosità idraulica elevata (I.3)	aree a pericolosità per alluvioni media (P2)	aree a pericolosità per alluvioni poco frequenti



Il presente studio è stato quindi redatto in accordo con le linee guida dettate dalla Regione Toscana per la redazione degli studi idraulici di supporto agli Strumenti Urbanistici e si articola nelle seguenti fasi:

- **Quadro conoscitivo;**
- **Analisi idrologica** contenente la metodologia adottata per la stima delle portate di progetto per vari tempi di ritorno;
- **Analisi idraulica** contenente la descrizione delle modellazioni svolte (bidimensionale, moto vario...) ed i risultati conseguiti in termini di stima e localizzazione delle volumetrie di esondazione per i vari tempi di ritorno e la relativa perimetrazione delle aree allagate.

In particolare, lo studio idraulico è stato condotto, a partire dagli studi idrologico-idraulici del vigente piano strutturale, considerando i corsi d'acqua compresi nel reticolo d'interesse della difesa del suolo di cui alla L.R. 79/2012 e ss.mm.ii., elencati nella relazione allegata alla richiesta di partecipazione al suddetto bando regionale e in accordo con gli organi tecnici dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale, del Genio Civile Toscana Sud e dell'Amministrazione Comunale di Siena. Tali corsi d'acqua sono riportati nella tabella di pagina seguente (Tabella 1.1).

Si precisa che i corsi d'acqua modellati solo idrologicamente hanno la funzione di definire gli idrogrammi delle portate da inserire come condizioni al contorno nei modelli idraulici.





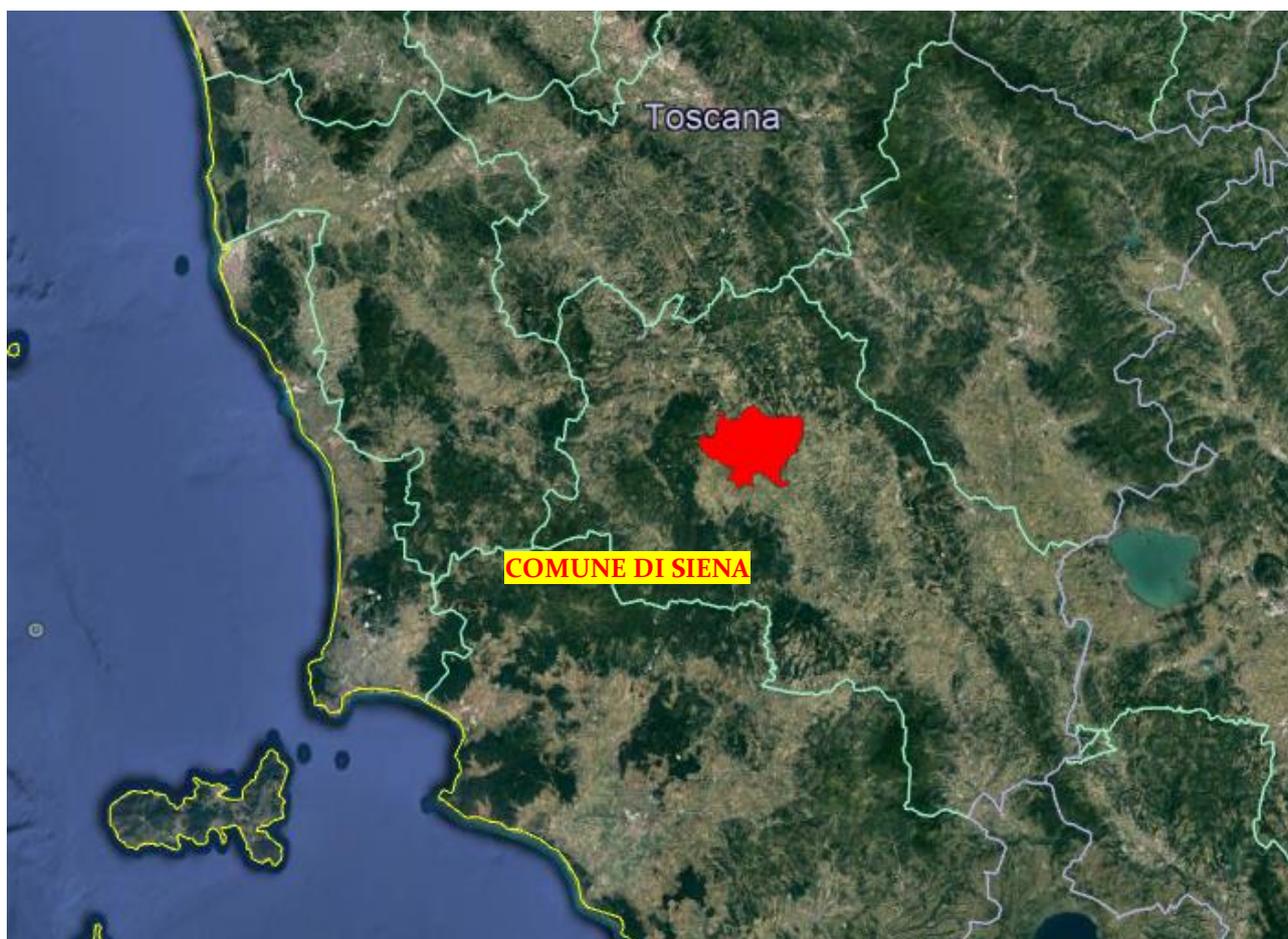
Corso d'acqua di cui alla L.R. 79/2012 così come aggiornato con DCRT n. 101/2016 e Delibera di Giunta 1357/2017	Modello idrologico	Modello idraulico
Fosso del Castagno	X	X
Fosso del Bolgione	X	X
Affluente Fosso del Bolgione	X	X
Fosso del Fossatone	X	X
Fosso della Bandita	X	X
Fosso di Santa Lucia	X	X
T. Bozzone	X	X
T. Riluogo	X	X
T. Ribucciano	X	X
Fosso Bocca di Cane	X	X
T. Tressa	X	X
Fosso Paradiso	X	X
Fosso Borrino	X	X
T. Sorra	X	X
Fosso Alfino	X	
Affluente T. Sorra	X	X
Affluente T. Sorra (2)	X	
Fosso di Pescaia	X	
Fosso di Val di Tufi	X	
Fosso Val di Montone	X	
Affluente T. Tressa in zona Doglia	X	
Affluente T. Tressa in zona Cappellaio	X	

**Tabella 1.1 – Corsi d'acqua oggetto di modellazione idrologico-idraulica**

## 2. CARATTERISTICHE GEO-MORFOLOGICHE DELL'AREA DI STUDIO

### 2.1 Inquadramento Generale

Lo studio in oggetto riguarda 15 aste fluviali, ubicate nel comune di Siena (SI), nella parte centro-Sud della Regione Toscana (Figura 1.1).



**Figura 1.1** - Individuazione del Comune di Siena (immagine da Google Earth).

Il territorio comunale di Siena si colloca nella parte centrale dell'omonima Provincia e si estende per una superficie di circa 118,53 km<sup>2</sup> ad un'altitudine media di 322 m s.l.m.. Da un punto di vista amministrativo confina a nord con il comune di Castelnuovo Berardenga (SI) e Monteriggioni (SI), a est con quello di Asciano (SI), a sud con Monteroni d'Arbia (SI), a ovest con Sovicille (SI) (Figura 1.2)

Il territorio comunale risulta inquadrato cartograficamente:

- Nei fogli della Cartografia Tecnica Regionale Toscana in scala 1:2.000: 14L33 2002, 14K46 2002, 14K47 2002, 14L41 2002, 14L42 2002, 14L43 2002, 14L44 2002, 14L45 2002, 14L46 2002, 14K54 2002, 14K55 2002, 14K56 2002, 14L49 2002, 14L50 2004, 14L51 2002, 14L43 2002, 14L52 2002, 14L53 2002, 14K63 2004, 14K64 2004, 14L57 2004, 14L58 2004, 14L62 2002, 14L63 2002, 13K05 2002, 13K07 2004, 13K08 2004, 13L01 2004, 13L02 2004, 13L03 2004, 13L06 2002, 13K16 2004, 13L09 2004, 13L10 2004, 13L11 2004, 13L12 2004, 13L13 2004, 13L09 2004, 13L14 2002, 13K24 2004, 13L17 2004, 13L18 2004, 13L19 2004, 13L20 2004, 13L21 2004, 13L22 2004, 13K30 2004, 13K31 2004, 13K32 2004, 13L25 2004, 13L26 2004, 13L27 2004, 13L28 2004, 13L29 2004, 13K38 2004, 13K39 2004, 13K40 2004, 13L35 2004, 13L36 2004, 13L37 2004, 13K38 2004, 13L43 2004, 13L44 2004, 13K56 2004, 13L51 2004, 13L52 2004, 13L53 2004, 13K64 2004, 13L61 2004.
- Nei fogli della Cartografia LIDAR della Regione Toscana: 14I46, 14I54, 14I55, 14I62, 14I63, 13I05, 13I06, 13I13, 13I14, 13I20, 13I21, 13I22, 13I28, 13I29, 13I30, 13I36, 13I37, 13I44, 13I52, 13I53, 13I61, 13K30, 13K31, 13K32, 13K39, 13K40, 13K48, 13K56, 13I49.

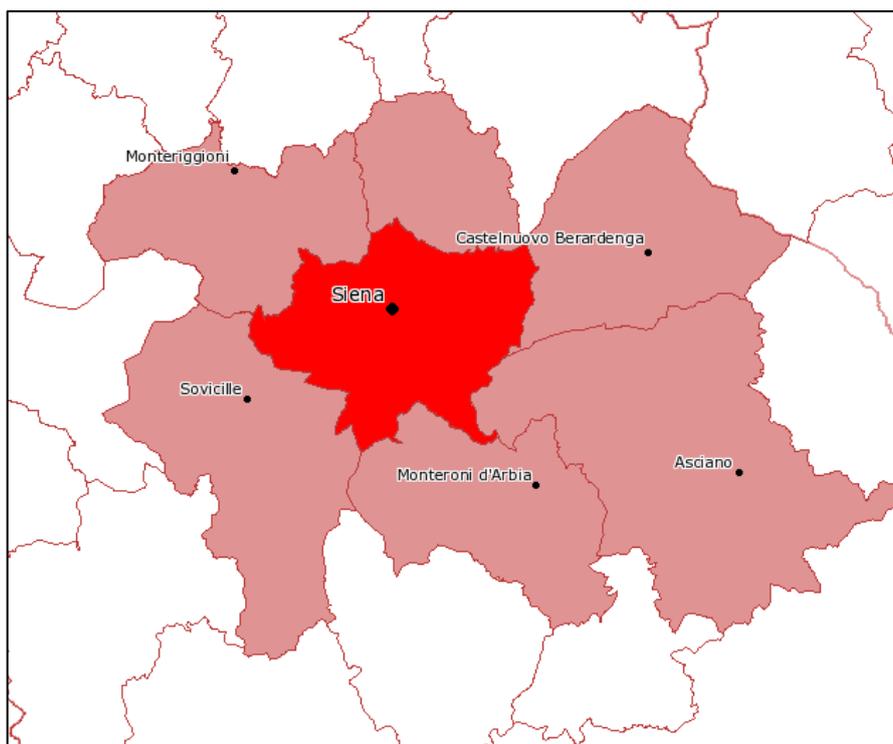


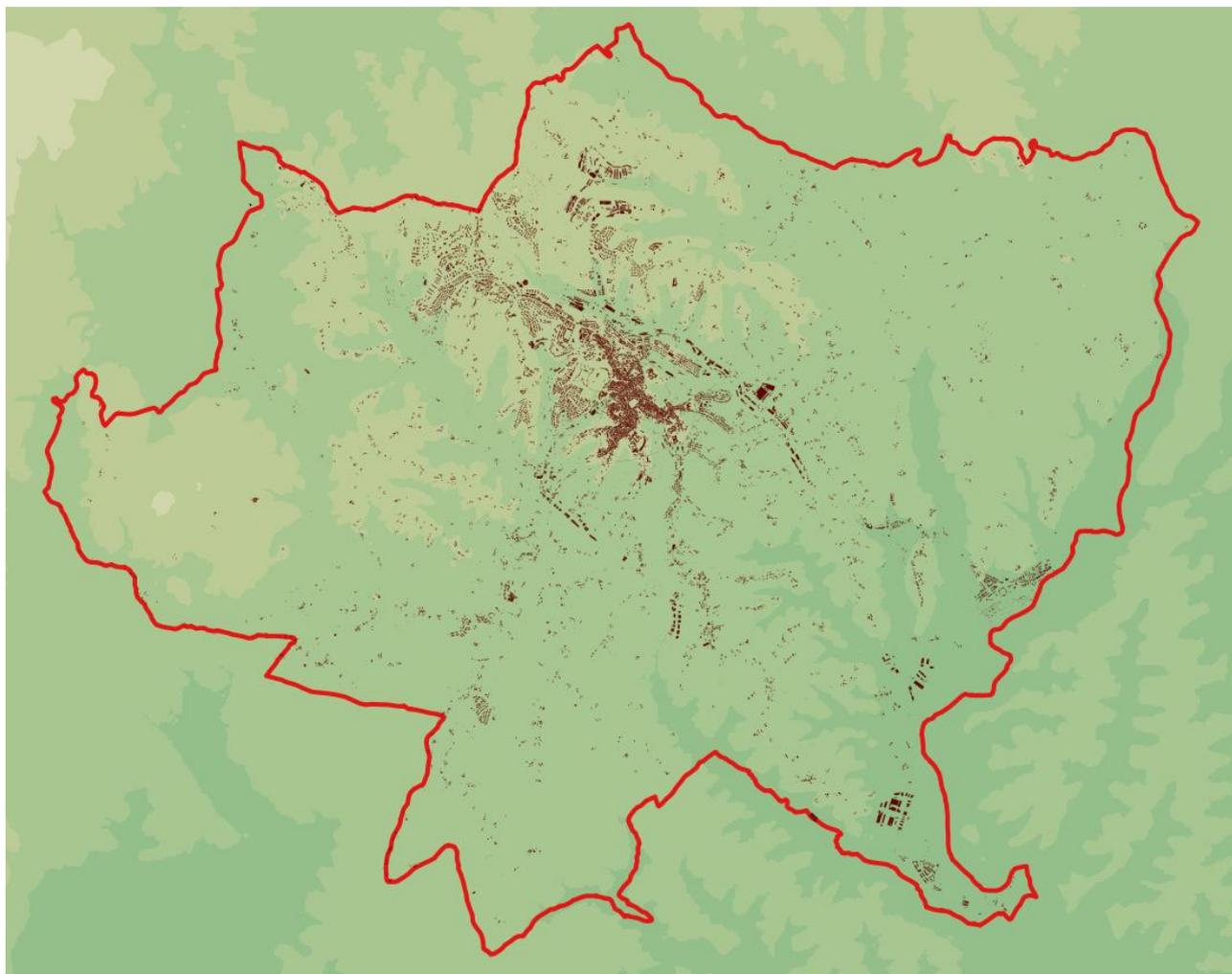
Figura 1.2 - Inquadramento del Comune di Siena - limiti amministrativi.

## 2.2 Inquadramento geomorfologico

Morfologicamente il territorio è delimitato a nord dalle colline del Chianti, ad ovest dalla Montagnola, dalle Crete senesi a sud est, la valle del T. Arbia delimita il territorio comunale ad est.

Il territorio di Siena è collocato ad una quota compresa tra i 410 m e i 160 m s.l.m.

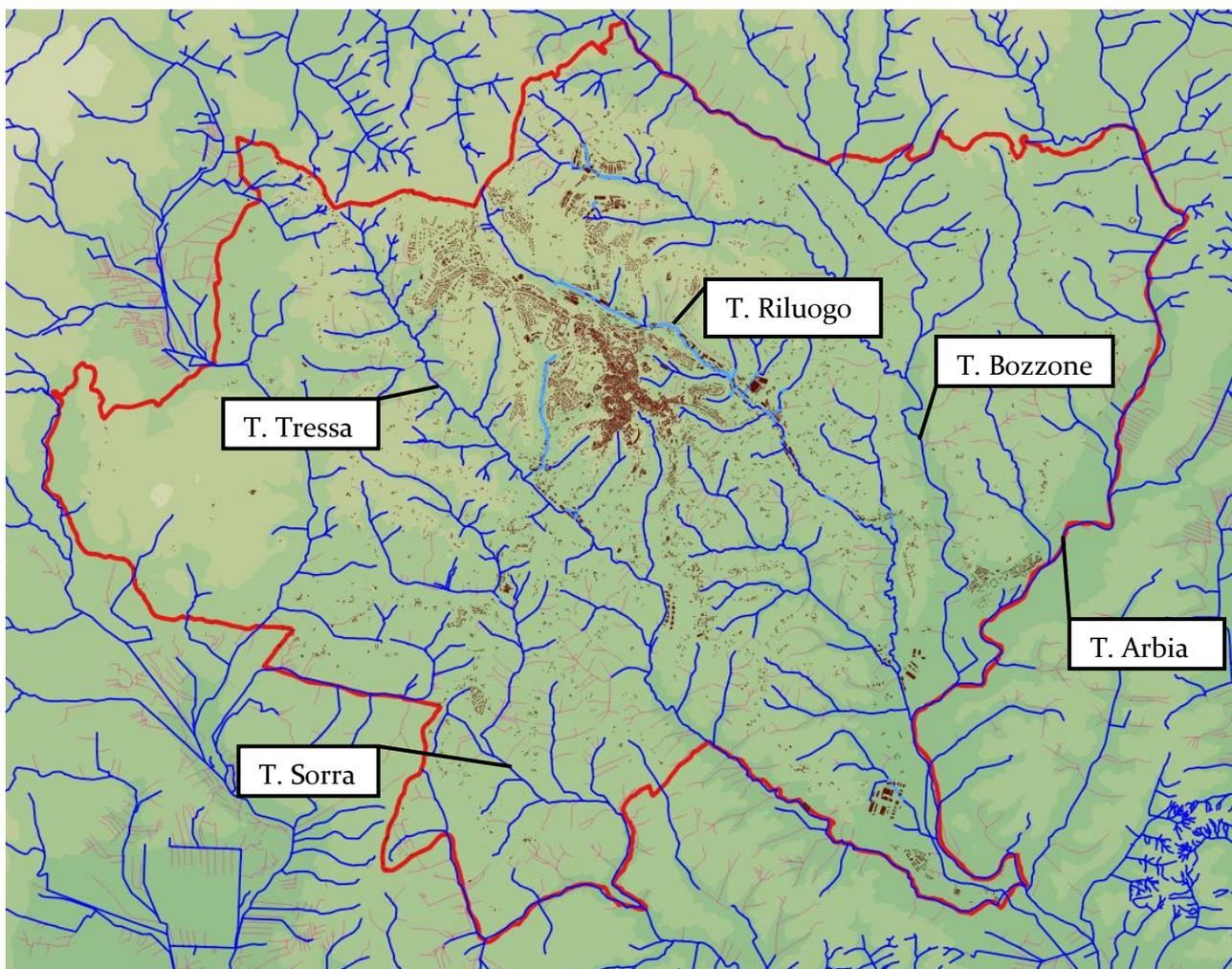
La morfologia del territorio (Figura 1.3) mostra generalmente il declivio del terreno in direzione sud-est, verso le valli del T. Arbia e del F. Merse.



**Figura 1.3** – Vista morfologica dell'area del Comune di Siena (Dati: DTM morfologico 10 m Regione Toscana), in rosso il confine comunale

### 2.3 Inquadramento idrografico e definizione del reticolo di studio

Nella figura seguente è mostrato l'inquadramento del reticolo idrografico di cui alla L.R. 79/2012 così come definito dal DCRT n. 101/2016, aggiornato con Delibera di Giunta 1357/2017 e 899/2018 e DCRT 20/2019 (Figura 1.4).



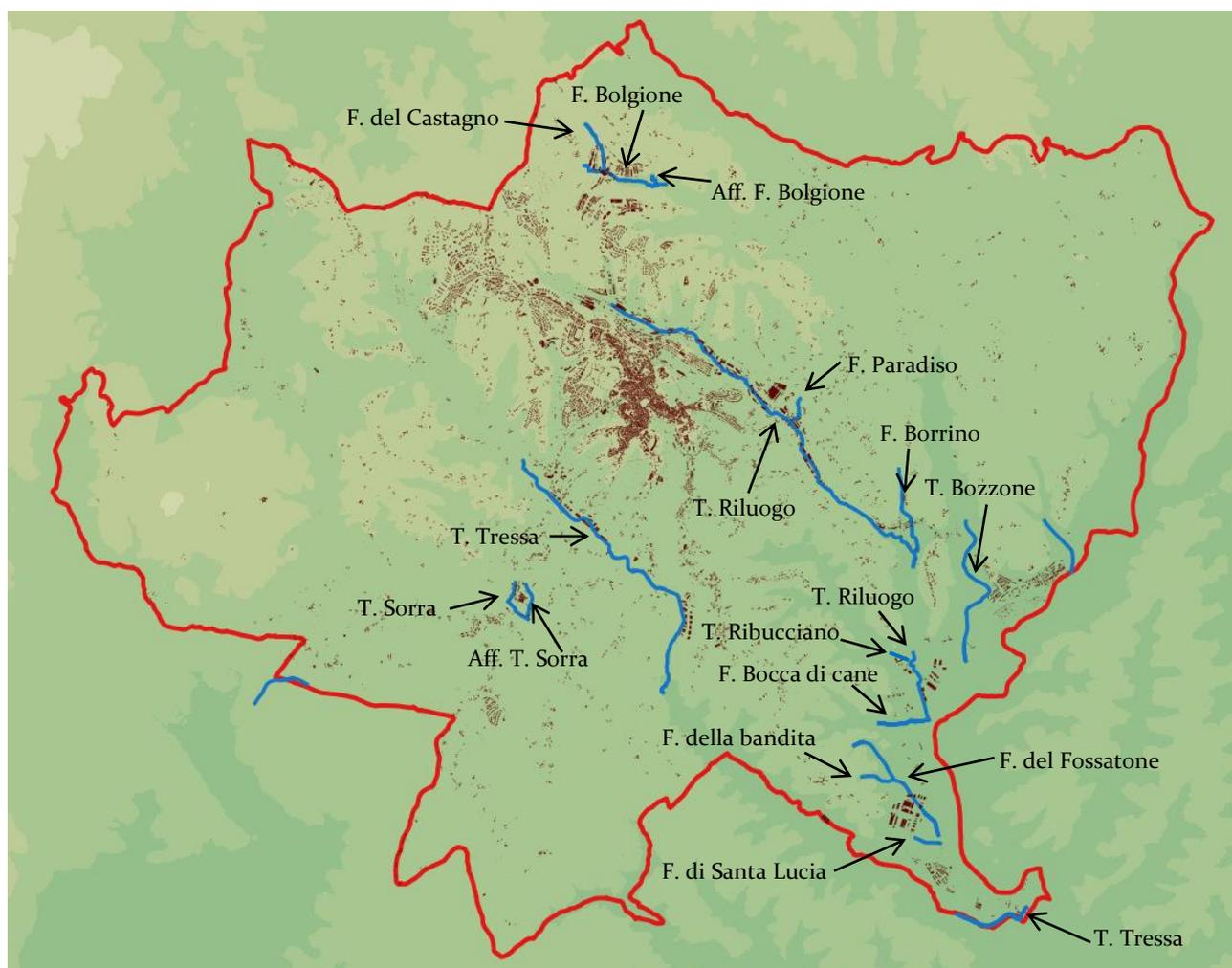
**Figura 1.4** – inquadramento idrografico del Comune di Siena di cui alla L.R. 79/2012 così come aggiornato con DCRT n. 101/2016 e Delibera di Giunta 1357/2017, in blu le aste idriche, in celeste i tratti tombati, in rosso il confine comunale

La principale asta idrica è il Torrente Arbia, che scorre da Nord verso sud, lungo il confine est del Comune di Siena. I principali affluenti sono costituiti dal T. Bozzone, dal T. Riluogo, dal T. Tressa (questi due scorrono ai lati dell'abitato di Siena) e dal T. Sorra.

Il comune di Siena fa parte del territorio di riferimento dell’Autorità di Bacino Distrettuale dell’Appennino Settentrionale e del Genio Civile Toscana Sud.

In Figura 1.5 sono mostrate le aste idriche oggetto di modellazione idraulica, ovvero i corsi d’acqua da cui, tramite apposita modellazione mono e bidimensionale, saranno elaborate le mappe delle aree allagate.

I nomi dei corsi d’acqua si rifanno all’elenco della “Tabella 1.1 – Modello idraulico”.



**Figura 1.5** – inquadramento idrografico del Comune di Siena di cui alla L.R. 79/2012 così come aggiornato con DCRT n. 101/2016 e Delibera di Giunta 1357/2017, in blu le aste idriche oggetto di modellazione idraulica, in rosso il confine comunale

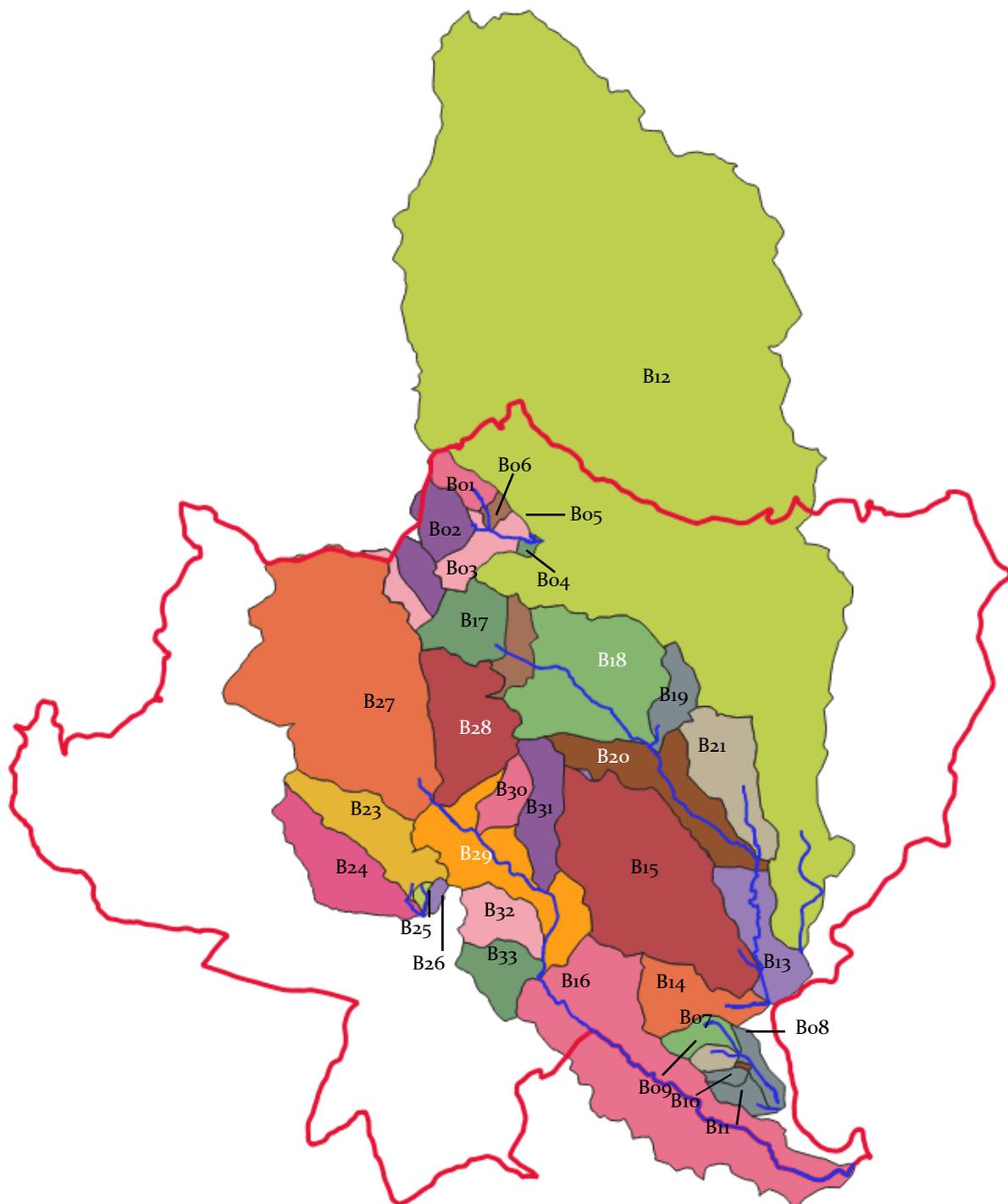


Corso d'acqua di cui alla L.R. 79/2012 così come aggiornato con DCRT n. 101/2016 e Delibera di Giunta 1357/2017	Lunghezza tratto con modello idraulico (m)
Fosso del Castagno	700
Fosso del Bolgione	1300
Affluente Fosso del Bolgione	200
Fosso del Fossatone	1900
Fosso della Bandita	700
Fosso di Santa Lucia	1100
T. Bozzone	2600
T. Riluogo	11300
T. Ribucciano	400
Fosso Bocca di Cane	1100
T. Tressa	12000
Fosso Paradiso	400
Fosso Borrino	1300
T. Sorra	800
Affluente T. Sorra	400
<b>TOTALE</b>	<b>36200</b>

**Tabella 1.2** - Elenco delle aste fluviali oggetto di studio idraulico con relativa lunghezza dell'asta fluviale

#### 2.4 Individuazione dei Bacini Idrografici

Per la definizione dei bacini oggetto di studio è stato fatto riferimento alla cartografia tecnica regionale e al modello digitale del terreno da Cartografia Lidar Regione Toscana. La Figura 1.6 mostra inoltre la suddivisione in sottobacini determinata dalle sezioni di chiusura dei tratti d'interesse e in Tabella 1.3 sono sintetizzate le caratteristiche di tali bacini di cui è stata sviluppata apposita modellazione idrologica.



**Figura 1.6** - Definizione dei bacini idrografici, in blu le aste modellate idraulicamente e in rosso il confine comunale



Codice	Bacino idrografico	Area (km <sup>2</sup> )
B01	Fosso del Castagno (monte)	0.5
B02	Fosso del Bolgione (monte)	0.8
B03	Fosso del Bolgione (intermedio)	0.8
B04	Fosso del Bolgione (valle)	0.1
B05	Affluente Fosso del Bolgione	0.2
B06	Fosso del Castagno (valle)	0.2
B07	Fosso del Fossatone (monte)	0.5
B08	Fosso del Fossatone (intermedio)	0.6
B08bis	Affluente Fosso del Fossatone	0.023
B09	Fosso della Bandita	0.3
B10	Fosso di Santa Lucia	0.36
B11	Fosso di Santa Lucia (intermedio)	0.15
B12	T. Bozzone	58.0
B13	T. Riluogo (valle)	14.1
B14	T. Ribucciano	6.6
B15	F. Bocca di Cane	1.5
B16	T. Tressa (intermedio)	7.74
B17_a	T. Riluogo (monte sx)	0.55
B17_b	T. Riluogo (monte dx)	0.41
B18	T. Riluogo (interbacino monte)	4.3
B19	Fosso Paradiso	0.7
B20	T. Riluogo (interbacino valle)	2.5
B21	Fosso Borrino	2.0
B23	T. Sorra (monte)	1.9
B24	Fosso Alfino	2.1
B25	Affluente T. Sorra	0.1
B26	Affluente T. Sorra (2)	0.1
B27	T. Tressa (monte)	9.6
B28	Fosso di Pescaia	2.7
B29	T. Tressa (interbacino)	3.0
B30	Fosso di Val di Tufi	0.7
B31	Fosso Val di Montone	1.3
B32	Affluente T. Tressa in zona Doglia	1.1
B33	Affluente T. Tressa in zona Cappellaio	1.0
	<b>TOTALE</b>	<b>126.5</b>

Tabella 1.3 - Caratteristiche dei bacini di studio.



Per quel che riguarda invece il caso del T. Arbia, l'impostazione dello studio idrologico per il confronto e la scelta delle condizioni al contorno nei modelli idraulici si basa su una suddivisione in sottobacini con sezioni di chiusura poste a valle dei principali affluenti. A tal proposito, si rimanda integralmente allo studio idrologico-idraulico del T. Arbia, condotto dall'Amministrazione Comunale di Siena per l'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale predisposto da questo studio nell'ambito del bando regionale della LR 41/2018.





### 3 RILIEVO DELLE SEZIONI D'ALVEO E CARTOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Per la caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua indagati (modello idraulico monodimensionale) è stato fatto riferimento:

- ai rilievi topografici disponibili nel previgente Piano Strutturale del Comune di Siena, svolti a supporto della modellazione idraulica (dopo opportuna verifica di coerenza);
- ai rilievi da cartografia LIDAR disponibile per il territorio;
- ad apposita campagna di rilievo da parte della società ProGeo Engineering Srl.

Per la caratterizzazione geometrica delle aree potenzialmente inondabili (modello idraulico bidimensionale) è stato fatto riferimento:

- Modello digitale del terreno fornito dall'amministrazione comunale a seguito di campagna di rilievo;
- Modello digitale del terreno su base cartografica Lidar della Regione Toscana;
- Modello digitale del terreno su base Carta Tecnica Regionale 1:2000;
- apposita campagna di rilievo da parte della società ProGeo Engineering Srl.
- Modello digitale del terreno messo a disposizione da ANAS per l'area di loc. Ruffolo.

L'adeguatezza dei rilievi, prima del loro utilizzo, è stata verificata mediante un controllo da Lidar delle sezioni topografiche rilevate. L'aggiornamento di alcune sezioni idrauliche è stato effettuato facendo riferimento alle sezioni estratte da Lidar o con apposite campagne di rilevamento.



## 4 ANALISI IDROLOGICA

Lo scopo dell'analisi idrologica è la determinazione degli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno da impiegare come dati di ingresso per la successiva analisi idraulica delle aste fluviali oggetto di studio.

In particolare, verranno valutate le condizioni di funzionamento idraulico per portate di progetto caratterizzate da tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni (in accordo con quanto previsto dal DPGR 25/11/2011 nr. 53/R) per verificare il grado di pericolosità idraulica a cui sono soggette le aree urbane limitrofe ai corsi d'acqua in seguito a fenomeni di tracimazione delle sommità spondali.

I passi, di seguito descritti, per determinare l'idrogramma di piena di progetto per ogni assegnato tempo di ritorno, sono:

- stima della relazione tra altezze e durata di pioggia di assegnato tempo di ritorno per i bacini idrografici in esame (linee segnalatrici di possibilità pluviometrica - LSPP) e operazioni di ragguglio all'area;
- determinazione dello ietogramma di progetto: scelta della durata critica dell'evento e della distribuzione temporale delle precipitazioni;
- stima delle perdite e della pioggia effettiva, che rappresenta il volume d'acqua che raggiunge per ruscellamento superficiale la rete di drenaggio fino alla sezione di chiusura, determinando l'evento di piena;
- schematizzazione della risposta del singolo bacino idrografico alle sollecitazioni meteoriche, in funzione delle proprie caratteristiche fisiografiche e combinazione di tale risposta con la pioggia netta per stimare le portate di progetto.

Per svolgere le analisi idrologiche su tutti i bacini oggetti dello studio, si è fatto uso del software HEC-HMS ver. 4.2.1 che, note le piogge, consente di procedere dalla definizione del modello di infiltrazione basato sul metodo SCS-CN (Soil Conservation Service, 1986) e del modello di formazione dell'onda di piena basato sull'idrogramma unitario istantaneo IUH-SCS, che è un idrogramma adimensionale definito dal SCS in base all'analisi di idrogrammi di piena in uscita dalla sezione di chiusura di numerosi bacini idrografici strumentati, di piccole e grandi dimensioni.

Per i bacini intermedi (interbacini) si è utilizzato invece il Kinematic Wave che meglio approssima la condizione d'immissione di pioggia efficace ai lati di un canale.

### 4.1 Linee Segnalatrici di Possibilità Pluviometrica

#### 4.1.1 Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica puntuali

Il primo elemento fondamentale nella creazione di un modello idrologico è costituito dalla stima degli afflussi meteorici: lo studio statistico delle piogge intense in un punto della superficie terrestre si



sintetizza nella formulazione delle Linee Segnatrici di Probabilità Pluviometrica (LSPP), ottenute a partire dall'elaborazione delle serie storiche dei valori massimi annuali delle altezze di precipitazione di assegnata durata, fornite da registrazioni pluviometriche.

Le LSPP descrivono le proprietà statistiche degli eventi di pioggia intensa a scala puntuale ed esprimono un legame tra altezza di pioggia, durata e frequenza. In particolare, per un prefissato tempo di ritorno, la corrispondente LSPP fornisce la relazione tra la durata della pioggia e la relativa altezza di precipitazione.

Per la stima delle LSPP per l'area in esame è stato fatto riferimento ai risultati dello studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012", realizzato nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012, con l'obiettivo di aggiornare le analisi di frequenza delle precipitazioni estreme sul territorio toscano fino all'anno 2012 compreso.

I risultati di tale studio sono consultabili sul sito del Servizio Idrologico Regionale - Centro Funzionale Regionale di Monitoraggio Meteo - Idrologico alla pagina <http://www.sir.toscana.it/index.php?IDS=4&IDSS=19>.

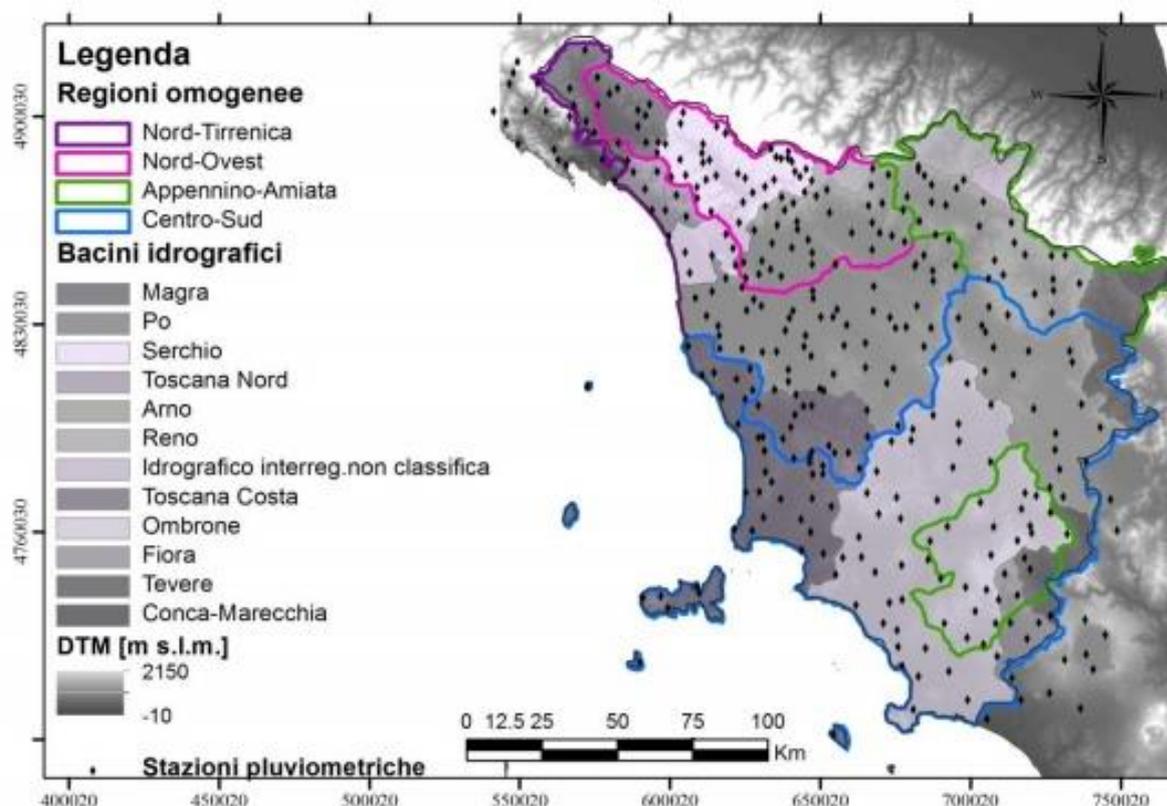
Il primo passo in una procedura di regionalizzazione è l'individuazione di regioni omogenee, all'interno delle quali le grandezze, o meglio le loro distribuzioni di frequenza, hanno alcune caratteristiche comuni.

Nello studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012" per la stima della variabile casuale  $h(t)$ , massimo annuale dell'altezza di pioggia di durata  $t$ , è stato utilizzato un metodo basato sulla legge di distribuzione probabilistica TCEV Two-Component Extreme Value secondo un approccio gerarchico a tre livelli.

Al primo livello di regionalizzazione sono state individuate una o più zone omogenee all'interno delle quali si può ammettere costante il coefficiente di asimmetria teorico. Al secondo livello di regionalizzazione sono state individuate delle sottozone omogenee nelle quali si può ritenere costante, oltre al coefficiente di asimmetria teorico, anche il coefficiente di variazione teorico e al terzo livello di regionalizzazione sono state infine individuate delle aree omogenee all'interno delle quali si ricercano delle relazioni tra la pioggia indice  $\mu$  e le caratteristiche geografiche del sito.

L'area di studio indagata comprende i bacini idrografici dei corsi d'acqua principali della Regione Toscana, come l'Arno, il Serchio e l'Ombrone Grossetano, bacini più piccoli di fiumi della costa tirrenica e i bacini attigui dei Fiumi Magra e Fiora. Una volta validato il set dei dati (aggiornati all'anno 2012) è stata ottenuta la consistenza definitiva delle serie temporali di valori annui di pioggia massima. Tra le varie ipotesi di suddivisione in regioni omogenee del territorio di studio è stata scelta, dopo opportune verifiche, quella in 4 regioni: NORD-TIRRENICA, NORD-OVEST, APPENNINO-AMIATA, CENTRO-SUD coincidenti con le 4 sub-regioni (Figura 4.1).





**Figura 4.1** - Suddivisione dell'area di studio in regioni omogenee - "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012"

Con altezza di precipitazione in un punto, comunemente misurata in mm, si intende l'altezza d'acqua che si formerebbe al suolo su una superficie orizzontale e impermeabile, in un certo intervallo di tempo (durata della precipitazione) trascurando le perdite.

La stime delle altezze di pioggia per le diverse durate caratteristiche (1, 3, 6, 12 e 24 ore) e i diversi tempi di ritorno fissati (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni), sono state ottenute come prodotto dei valori della pioggia indice  $\mu$  per le diverse durate ed il fattore di crescita adimensionale  $KT$  per i diversi tempi di ritorno validi per ognuna delle 4 regioni individuate nello studio in oggetto.

Per quanto qui di interesse, nello studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012" la previsione quantitativa dei valori estremi di pioggia in un determinato punto è stata effettuata anche attraverso la determinazione della curva o linea segnalatrice di probabilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla sua durata, per un assegnato tempo di ritorno.

La LSPP può essere comunemente descritta da una legge di potenza del tipo:

$$h(t) = a t^n$$

con:

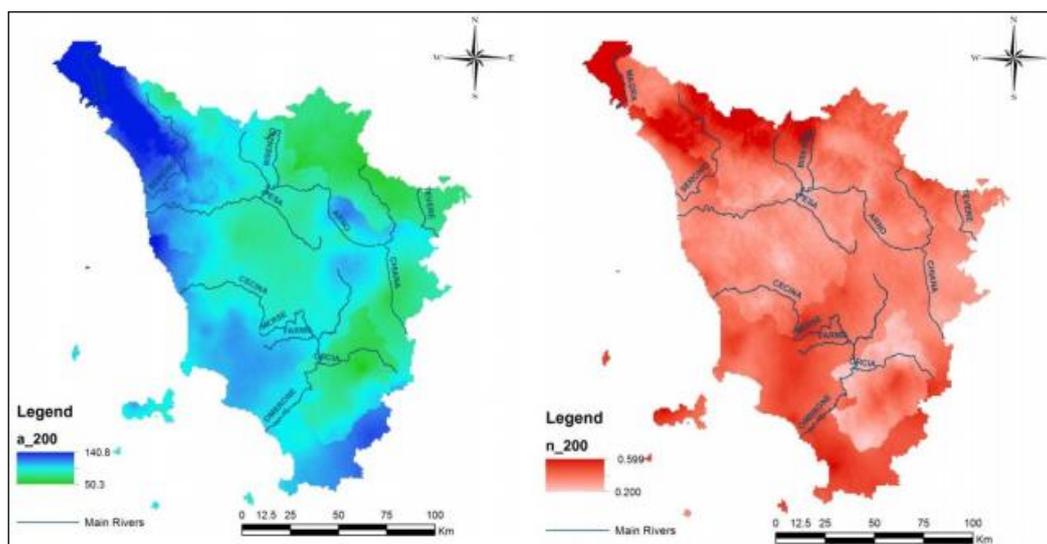
$h$  = altezza di pioggia [mm]

$t$  = durata [ore]

$a$  e  $n$  parametri caratteristici per i tempi di ritorno considerati.

Note le altezze di pioggia per durate e tempi di ritorno fissati, attraverso una regressione logaritmica è possibile determinare le griglie di 1 km su tutta la regione dei parametri  $a$  e  $n$ .

Tra i risultati dello studio, disponibili sul sito Servizio Idrologico Regionale - Centro Funzionale Regionale di Monitoraggio Meteo - Idrologico, sono riportati i valori delle coppie di ASCII Grid di  $a$  e di  $n$  delle LSPP per i diversi tempi di ritorno fissati (30 e 200 nel caso in esame, Figura 4.2).



**Figura 4.2** - Spazializzazione sull'intera regione dei parametri "a" ( sinistra) e "n" ( destra) della LSPP per Tr 200 anni. - "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012"

Nel presente studio idrologico-idraulico i parametri  $a$  e  $n$ , così come riportati dallo studio "Analisi di Frequenza Regionale delle Precipitazioni Estreme LSPP - Aggiornamento al 2012", ed utilizzati per il calcolo degli afflussi meteorici, sono stati determinati mediante la procedura sintetizzata di seguito e ripetuta per tutti i bacini considerati:

1. sono state scaricate le mappe in formato ASCII Grid dei valori  $a$  e  $n$  delle LSPP per i diversi tempi di ritorno disponibili dal sito della Regione Toscana [http://www.sir.toscana.it/supports/download/lsp\\_2012.pdf](http://www.sir.toscana.it/supports/download/lsp_2012.pdf);
2. sono stati individuati, sulla cartografia a disposizione, i bacini imbriferi di interesse e ne è stato creato un file apposito;
3. è stata estratta la parte di *raster* dei coefficienti  $a$  e  $n$  associata ai bacini oggetto di studio, da cui a questo punto è stato possibile ottenerne i valori medi.



Il valore medio dei parametri a ed n è stato calcolato come valore mediato sull'area dell'insieme dei bacini che afferiscono ad uno stesso modello idraulico.

Il risultato di queste operazioni è riportato in Tabella 4.1.

Codice	Bacino Idrografico	Area (Km <sup>2</sup> )	a30 [mm/h <sup>n</sup> ]	n30	a200 [mm/hn]	n200
B01	Fosso del Castagno	0.54	52.462	0.290	72.972	0.353
B02	Fosso del Bolgione (monte)	0.84				
B03	Fosso del Bolgione (tombato)	0.85				
B04	Fosso del Bolgione (valle)	0.08				
B05	Affluente Bolgione	0.22				
B06	Fosso del Castagno (tombato)	0.17				
B07	Fosso del Fossatone (monte)	0.51	54.000	0.282	75.115	0.345
B08	Fosso del Fossatone (intermedio)	0.43				
B08 bis	Affl. Dx Fossatone	0.02				
B09	Fosso della Bandita	0.27				
B10	Fosso Santa Lucia	0.15				
B11	Fosso Santa Lucia (intermedio)	0.36	53.626	0.271	74.593	0.333
B12	Bozzone	58.02				
B13	Riluogo valle	14.15				
B15	Ribucciano	6.62	53.653	0.288	75.02	0.346
B14	Bocca di Cane	1.50				
B16	Torrente Tressa - interbacino	7.74	52.49	0.3	73.011	0.364
B17_a	T. Riluogo monte sx	0.56	53.653	0.288	74.628	0.351
B17_b	T. Riluogo monte dx	0.41				
B18	Interbacino Riluogo monte	4.31				
B19	Fosso Paradiso	0.74				
B20	Interbacino Riluogo valle	2.49				
B21	Fosso Borrino	2.01				
B23	T. Sorra (monte)	1.91	52.131	0.304	72.513	0.368
B24	Fosso Alfino	2.07				
B25	Aff. Sorra	0.09				
B26	Aff. Sorra (2)	0.13				
B27	T. Tressa Monte	9.58	52.49	0.3	73.011	0.364
B28	Fosso di Pescaia	2.65				
B29	Interbacino Tressa	3.01				
B30	Fosso di Val di Tufi	0.65				
B31	Fosso Val di Montone	1.32				
B32	Aff. Tressa zona Doglia	1.07				
B33	Aff. Tressa zona Cappellaio	1.03				

Tabella 4.1 - Calcolo delle LSPP



#### 4.1.2 Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica areali

Le linee segnalatrici di possibilità pluviometrica, ottenute mediante il metodo precedentemente descritto, hanno validità locale e non possono quindi essere adottate per un intero bacino.

E' noto che le piogge di elevata intensità si concentrano in aree piccole e che, a parità di durata e di tempo di ritorno, l'altezza di pioggia decresce con l'area. Su tali basi l'altezza di pioggia media su un bacino si determina moltiplicando l'altezza di pioggia puntuale relativa al bacino stesso per un opportuno coefficiente di riduzione (o coefficiente di ragguglio all'area) che dipende principalmente dall'area del bacino, dal tempo di ritorno e dalla durata. L'uso di tale coefficiente di riduzione implica che il regime delle precipitazioni sia alquanto uniforme per l'intero bacino. Tale condizione è sicuramente soddisfatta quando le aree considerate non sono troppo grandi e quando lo sviluppo orografico non è molto accentuato (come nel presente studio).

Al fine di tenere conto della variabilità spaziale delle piogge l'input pluviometrico è pertanto stato raggugliato al bacino per mezzo di un coefficiente  $K_r$  di tipo "globale" secondo la:

$$K_r = 1 - \exp(-\alpha t) + \exp(-\alpha t - \gamma A)$$

dove  $\alpha = 0.036a$ ,  $\beta = 0.25$  e  $\gamma = 0.01$  sono i parametri della formula,  $t$  [h] è la durata della precipitazione e  $A$  [km<sup>2</sup>] è l'area del bacino.

Il valore della durata critica e, quindi, del coefficiente di ragguglio delle piogge è incognito e viene determinato indagandone diversi valori, corrispondenti a 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 ore.

In

Codice	Bacino Idrografico	Kr - 1 h	Kr - 2h	Kr - 3h	Kr - 4h	Kr - 5h	Kr - 6h	Kr - 7h
B01	Fosso del Castagno	0.991	0.993	0.994	0.994	0.995	0.995	0.996
B02	Fosso del Bolgione (monte)							
B03	Fosso del Bolgione (tombato)							
B04	Fosso del Bolgione (valle)							
B05	Affluente Bolgione							
B06	Fosso del Castagno (tombato)							
B07	Fosso del Fossatone (monte)	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997	0.997
B08	Fosso del Fossatone (intermedio)							
B08 bis	Affl. Dx Fossatone							
B09	Fosso della Bandita							
B10	Fosso Santa Lucia							
B11	Fosso Santa Lucia (intermedio)							



B12	Bozzone	0.853	0.881	0.896	0.907	0.915	0.921	0.926
B13	Riluogo valle	0.934	0.946	0.953	0.958	0.961	0.964	0.967
B15	Ribucciano							
B14	Bocca di Cane	0.921	0.936	0.944	0.950	0.954	0.958	0.960
B16	Torrente Tressa - interbacino							
B17_a	T. Riluogo monte sx	0.961	0.968	0.972	0.975	0.977	0.979	0.980
B17_b	T. Riluogo monte dx							
B18	Interbacino Riluogo monte							
B19	Fosso Paradiso							
B20	Interbacino Riluogo valle							
B21	Fosso Borrino	0.986	0.989	0.990	0.991	0.992	0.993	0.993
B23	T. Sorra (monte)							
B24	Fosso Alfino							
B25	Aff. Sorra							
B26	Aff. Sorra (2)	0.921	0.946	0.953	0.958	0.961	0.964	0.967
B27	T. Tressa Monte							
B28	Fosso di Pescaia							
B29	Interbacino Tressa							
B30	Fosso di Val di Tufi							
B31	Fosso Val di Montone							
B32	Aff. Tressa zona Doglia							
B33	Aff. Tressa zona Cappellaio							

Tabella 4.2 sono riportati i valori calcolati del Kr su scala di sistema di bacini afferenti allo stesso modello idraulico e nella

Codice	Bacino Idrografico	Tr 30 anni						
		h (mm) 1 ora	h (mm) 2 ore	h (mm) 3 ore	h (mm) 4 ore	h (mm) 5 ore	h (mm) 6 ore	h (mm) 7 ore
B01	Fosso del Castagno	52.0	63.7	71.7	78.0	83.2	87.8	91.8
B02	Fosso del Bolgione (monte)							
B03	Fosso del Bolgione (tombato)							
B04	Fosso del Bolgione (valle)							
B05	Affluente Bolgione							
B06	Fosso del Castagno (tombato)	53.7	65.4	73.3	79.5	84.7	89.2	93.2
B07	Fosso del Fossatone (monte)							
B08	Fosso del Fossatone (intermedio)							
B08 bis	Affl. Dx Fossatone							
B09	Fosso della Bandita							
B10	Fosso Santa Lucia							



B11	Fosso Santa Lucia (intermedio)							
B12	Bozzone	45.8	57.0	64.7	70.8	75.9	80.3	84.2
B13	Riluogo valle							
B15	Ribucciano	50.4	62.0	70.1	76.4	81.6	86.2	90.3
B14	Bocca di Cane							
B16	Torrente Tressa - interbacino	48.3	60.5	68.9	75.6	81.2	86.0	90.4
B17_a	T. Riluogo monte sx							
B17_b	T. Riluogo monte dx							
B18	Interbacino Riluogo monte	51.7	63.5	71.7	78.1	83.4	88.1	92.2
B19	Fosso Paradiso							
B20	Interbacino Riluogo valle							
B21	Fosso Borrino							
B23	T. Sorra (monte)							
B24	Fosso Alfino	51.4	63.6	72.1	78.8	84.4	89.2	93.5
B25	Aff. Sorra							
B26	Aff. Sorra (2)							
B27	T. Tressa Monte							
B28	Fosso di Pescaia							
B29	Interbacino Tressa							
B30	Fosso di Val di Tufi	48.3	61.1	69.6	76.2	81.8	86.6	91.0
B31	Fosso Val di Montone							
B32	Aff. Tressa zona Doglia							
B33	Aff. Tressa zona Cappellaio							

Tabella 4.3 e Tabella 4.4 il relativo valore dello spessore di pioggia per le varie durate indagate.



Codice	Bacino Idrografico	Kr- 1 h	Kr - 2h	Kr - 3h	Kr - 4h	Kr - 5h	Kr - 6h	Kr - 7h
B01	Fosso del Castagno	0.991	0.993	0.994	0.994	0.995	0.995	0.996
B02	Fosso del Bolgione (monte)							
B03	Fosso del Bolgione (tombato)							
B04	Fosso del Bolgione (valle)							
B05	Affluente Bolgione							
B06	Fosso del Castagno (tombato)							
B07	Fosso del Fossatone (monte)	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997	0.997
B08	Fosso del Fossatone (intermedio)							
B08 bis	Affl. Dx Fossatone							
B09	Fosso della Bandita							
B10	Fosso Santa Lucia							
B11	Fosso Santa Lucia (intermedio)							
B12	Bozzone	0.853	0.881	0.896	0.907	0.915	0.921	0.926
B13	Riluogo valle	0.934	0.946	0.953	0.958	0.961	0.964	0.967
B15	Ribucciano							
B14	Bocca di Cane							
B16	Torrente Tressa - interbacino	0.921	0.936	0.944	0.950	0.954	0.958	0.960
B17_a	T. Riluogo monte sx	0.961	0.968	0.972	0.975	0.977	0.979	0.980
B17_b	T. Riluogo monte dx							
B18	Interbacino Riluogo monte							
B19	Fosso Paradiso							
B20	Interbacino Riluogo valle							
B21	Fosso Borrino							
B23	T. Sorra (monte)	0.986	0.989	0.990	0.991	0.992	0.993	0.993
B24	Fosso Alfino							
B25	Aff. Sorra							
B26	Aff. Sorra (2)							
B27	T. Tressa Monte	0.921	0.946	0.953	0.958	0.961	0.964	0.967
B28	Fosso di Pescaia							
B29	Interbacino Tressa							
B30	Fosso di Val di Tufi							
B31	Fosso Val di Montone							
B32	Aff. Tressa zona Doglia							
B33	Aff. Tressa zona Cappellaio							

Tabella 4.2 - Coefficiente di ragguglio



Codice	Bacino Idrografico	Tr 30 anni						
		h (mm) 1 ora	h (mm) 2 ore	h (mm) 3 ore	h (mm) 4 ore	h (mm) 5 ore	h (mm) 6 ore	h (mm) 7 ore
B01	Fosso del Castagno	52.0	63.7	71.7	78.0	83.2	87.8	91.8
B02	Fosso del Bolgione (monte)							
B03	Fosso del Bolgione (tombato)							
B04	Fosso del Bolgione (valle)							
B05	Affluente Bolgione							
B06	Fosso del Castagno (tombato)							
B07	Fosso del Fossatone (monte)	53.7	65.4	73.3	79.5	84.7	89.2	93.2
B08	Fosso del Fossatone (intermedio)							
B08 bis	Affl. Dx Fossatone							
B09	Fosso della Bandita							
B10	Fosso Santa Lucia							
B11	Fosso Santa Lucia (intermedio)							
B12	Bozzone	45.8	57.0	64.7	70.8	75.9	80.3	84.2
B13	Riluogo valle	50.4	62.0	70.1	76.4	81.6	86.2	90.3
B15	Ribucciano							
B14	Bocca di Cane							
B16	Torrente Tressa - interbacino							
B17_a	T. Riluogo monte sx	51.7	63.5	71.7	78.1	83.4	88.1	92.2
B17_b	T. Riluogo monte dx							
B18	Interbacino Riluogo monte							
B19	Fosso Paradiso							
B20	Interbacino Riluogo valle							
B21	Fosso Borrino							
B23	T. Sorra (monte)	51.4	63.6	72.1	78.8	84.4	89.2	93.5
B24	Fosso Alfino							
B25	Aff. Sorra							
B26	Aff. Sorra (2)							
B27	T. Tressa Monte	48.3	61.1	69.6	76.2	81.8	86.6	91.0
B28	Fosso di Pescaia							
B29	Interbacino Tressa							
B30	Fosso di Val di Tufi							
B31	Fosso Val di Montone							
B32	Aff. Tressa zona Doglia							
B33	Aff. Tressa zona Cappellaio							

**Tabella 4.3** - spessori di pioggia considerati alle varie durate per Tr 30 anni



Codice	Bacino Idrografico	Tr 200 anni						
		h (mm) 1 ora	h (mm) 2 ore	h (mm) 3 ore	h (mm) 4 ore	h (mm) 5 ore	h (mm) 6 ore	h (mm) 7 ore
B01	Fosso del Castagno	72.3	92.5	106.9	118.4	128.1	136.7	144.4
B02	Fosso del Bolgione (monte)							
B03	Fosso del Bolgione (tombato)							
B04	Fosso del Bolgione (valle)							
B05	Affluente Bolgione							
B06	Fosso del Castagno (tombato)	74.7	95.0	109.3	120.7	130.4	138.9	146.6
B07	Fosso del Fossatone (monte)							
B08	Fosso del Fossatone (intermedio)							
B08 bis	Affl. Dx Fossatone							
B09	Fosso della Bandita							
B10	Fosso Santa Lucia	63.7	82.8	96.4	107.4	116.7	124.8	132.1
B11	Fosso Santa Lucia (intermedio)							
B12	Bozzone							
B13	Riluogo valle							
B15	Ribucciano							
B14	Bocca di Cane	70.0	90.2	104.6	116.1	125.9	134.5	142.2
B16	Torrente Tressa - interbacino							
B17_a	T. Riluogo monte sx							
B17_b	T. Riluogo monte dx							
B18	Interbacino Riluogo monte							
B19	Fosso Paradiso	67.2	87.9	102.8	114.9	125.2	134.2	142.4
B20	Interbacino Riluogo valle							
B21	Fosso Borrino							
B23	T. Sorra (monte)							
B24	Fosso Alfino							
B25	Aff. Sorra	71.5	92.5	107.6	119.7	130.1	139.2	139.2
B26	Aff. Sorra (2)							
B27	T. Tressa Monte							
B28	Fosso di Pescaia							
B29	Interbacino Tressa							
B30	Fosso di Val di Tufi	67.2	88.9	103.8	115.9	126.0	135.1	135.1
B31	Fosso Val di Montone							
B32	Aff. Tressa zona Doglia							
B33	Aff. Tressa zona Cappellaio							

**Tabella 4.4** - spessori di pioggia considerati alle varie durate per Tr 200 anni



#### 4.1.3 Durata critica di pioggia

Le LSPP forniscono, per una prefissata durata della pioggia ed un tempo di ritorno, l'intensità media dell'evento, senza però dare indicazioni sulla distribuzione temporale della precipitazione stessa nell'intervallo di tempo considerato. Tale aspetto risulta essere non secondario, poiché la portata defluente in una data sezione di un corso d'acqua dipende (oltre che dalle caratteristiche del bacino idrografico) dalla distribuzione spaziale e dall'andamento temporale della precipitazione, ed in particolare da:

- intensità massima di pioggia all'interno dell'intervallo di tempo  $t$ ;
- posizione del punto di intensità massima;
- volume di precipitazione caduto precedentemente all'istante di intensità massima.

A parità di tempo di ritorno,  $T_r$ , e di durata di pioggia,  $d$ , possono aversi infinite realizzazioni dello ietogramma a ciascuna delle quali sono associate differenti idrogrammi di piena  $Q(t)$ . La sensibilità della risposta del bacino alla forma dello ietogramma è maggiore in bacini piccoli (generalmente di area inferiore a circa 50 Km<sup>2</sup>) o, in generale, in bacini con ridotta capacità di invaso.

La distribuzione nel tempo dello spessore di pioggia fornito dalla LSPP può essere effettuata utilizzando diversi criteri, tra cui i più comunemente utilizzati sono:

- ietogrammi con intensità costante;
- ietogrammi con sequenza di spessori parziali di pioggia su intervalli costanti disposti in analogia alla LSPP;
- ietogrammi con sequenza di spessori parziali di pioggia su intervalli costanti disposti in analogia alla LSPP capovolta e ribaltata;
- ietogrammi a blocchi alterni (Alternating Block Method), in cui gli spessori di pioggia su intervalli costanti ricavati dalle LSPP sono ordinati con il valore massimo al centro dello ietogramma e i rimanenti valori disposti in maniera alternata a destra e sinistra dello stesso.

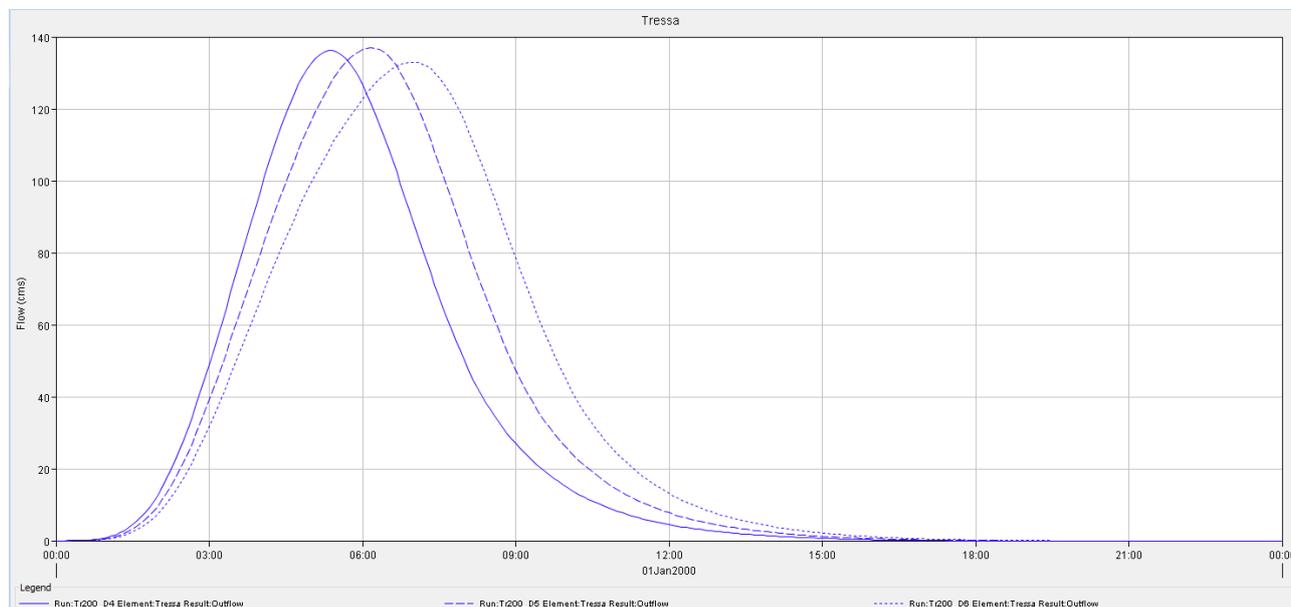
La risposta di un generico bacino al variare della distribuzione temporale della pioggia, in termini relativi, è pressoché indipendente dal tempo di ritorno e lo ietogramma uniforme, insieme a quello a blocchi alterni, rappresenta una condizione intermedia di criticità.



Per il presente studio, è stato pertanto utilizzato per la trasformazione afflussi deflussi lo ietogramma con intensità costante, caratterizzato da una durata  $t$  ed una intensità costante  $i(t)$  ricavata dalla LSPP con ragguglio all'area.

La durata di pioggia critica viene determinata assumendo che la portata al colmo (riferita alla sezione di chiusura di ogni sistema di bacini del modello idraulico) con assegnato tempo di ritorno  $d$ , sia la maggiore tra le portate al colmo determinate da tutti gli eventi di pioggia a intensità costante ricavati dalla linea di possibilità pluviometrica areale. E' possibile determinare la durata critica utilizzando diverse metodologie in funzione della modellistica afflussi-deflussi impiegata. In particolare, nel caso in esame, la durata critica è determinata inserendo nel software HEC-HMS differenti "Precipitation Gages" uniformi in funzione delle diverse durate tra 1 e 7 ore, distribuendo gli spessori d'acqua stimati in intervalli di 15 minuti.

A titolo di esempio si riporta nella figura successiva il risultato di questa procedura per il T. Tressa. Graficamente si vede che la durata critica corrisponde a 5 ore, poiché per tale valore si ottiene il picco delle portate. Questa procedura è ripetuta per tutti i corsi d'acqua e i relativi modelli idrologici, ottenendo quindi gli idrogrammi utili alle modellazioni idrauliche con software HEC-RAS.



**Figura 4.3** – Idrogrammi di piena relativi al T. Tressa per durate di pioggia di 4, 5 e 6 ore (Tr 200 anni)



## 4.2 Pioggia effettiva

Nota la pioggia areale, per la determinazione del deflusso diretto è necessario valutare la pioggia effettiva e, quindi, la quantità di pioggia che viene assorbita dal suolo e quella intercettata dalla vegetazione, mentre la quantità di pioggia persa per evapotraspirazione è trascurabile per eventi meteorici particolarmente intensi. Per effettuare tale stima, è stato applicato il metodo del Curve Number proposto dal Soil Conservation Service. È stato inoltre considerato nullo l'effetto di "ritenzione superficiale" e che tutta l'acqua che potenzialmente potrebbe sostare al di fuori del corso d'acqua, partecipi effettivamente al deflusso all'interno dello stesso.

### 4.2.1 Modello di infiltrazione - Metodo SCS-CN

La predisposizione dei suoli a contribuire ai deflussi di piena è determinata fondamentalmente da tre fattori:

- Dalle caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali e degli strati geologici immediatamente sottostanti;
- Dall'uso dei suoli e dalla copertura vegetale;
- Dallo stato di imbibimento dei suoli all'inizio della sollecitazione meteorica.

L'effetto di questi fattori sulla capacità di ritenzione del terreno viene sintetizzata efficientemente nel modello di infiltrazione del terreno messo a punto dal Soil Conservation Service (1972) degli Stati Uniti. Questo metodo viene largamente adottato perché consente, attraverso informazioni quantitative sulla natura del bacino di facile acquisizione, di valutare le grandezze di interesse anche per bacini non strumentati. Secondo il metodo SCS-CN, il volume di deflusso superficiale (altezza di pioggia effettiva),  $E^A$ , per un evento isolato di piena è dato da:

$$E^A = \frac{(R^A - I_a)^2}{R^A - I_a + S} \quad (4.1)$$

essendo  $R^A$  lo spessore di pioggia precipitato sul bacino,  $S$  lo spessore di massima ritenzione potenziale del terreno e  $I_a = cS$ , lo spessore di assorbimento iniziale, con  $0 \leq c < 1$ . L'assorbimento iniziale  $I_a$  rappresenta il volume specifico di pioggia sottratto a priori per l'intercettazione della vegetazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali e, come si può intuire, risulta difficilmente valutabile. Sulla base di dati sperimentali relativi a numerosi bacini statunitensi, il Soil Conservation Service ha suggerito per la stima di  $I_a$  un valore di  $c=0.2$ .

Per un fissato stato iniziale di imbibimento, la massima ritenzione potenziale del bacino è funzione del tipo di terreno e dell'uso del suolo, il cui effetto combinato è descritto globalmente dal parametro adimensionale CN,  $0 < CN < 100$ , legato ad  $S$  dalla relazione:





$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4.2)$$

dove S è espresso in mm. Per determinare il valore del CN è necessario conoscere il tipo e l'uso del suolo, nonché il grado iniziale di imbibimento del terreno che può essere di tre tipi: AMC Tipo I, in caso di bacino asciutto, AMC Tipo II, per condizioni intermedie, e AMC Tipo III, in caso di bacino fortemente imbibito.

Lo stato di imbibimento viene individuato, in modo qualitativo-quantitativo, in funzione dell'indice di pioggia API<sub>5</sub> (Antecedent Precipitation Index), ovvero la pioggia totale caduta nei cinque giorni che precedono l'evento di piena. E' stato però ben evidenziato che tale criterio non presenta particolare affidabilità per la realtà italiana (Borselli, 1989; Melone et. al., 2001; Brocca et al., 2008a; 2008b; 2008c). Cautelativamente si fa quindi riferimento alla condizione di Tipo III.

In funzione delle caratteristiche idrologiche, i suoli possono essere suddivisi in quattro classi di permeabilità (A, B, C e D); in Tabella 4.5 sono descritte tali categorie dalla A alla D con potenzialità di deflusso crescente (Chow et al., 1988), mentre in Tabella 4.6 sono riportati i valori di CN per condizioni iniziali intermedie, AMC Tipo II, in funzione del tipo di suolo e dell'uso del suolo stesso.

Gruppo	Descrizione
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione.
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità d'infiltrazione a saturazione.
D	Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie.

**Tabella 4.5** - Descrizione delle categorie dei tipi di suolo in base al metodo del Soil Conservation Service (1986).





Tipo di Copertura	Tipo di Suolo			
	A	B	C	D
<i>Terreno coltivato</i> Senza trattamenti di conservazione	72	81	88	91
	62	71	78	81
<i>Terreno da pascolo</i> Cattive condizioni	68	79	86	89
	39	61	74	80
<i>Praterie</i> Buone condizioni	30	58	71	78
<i>Terreni boscosi o forestati</i> Terreno sottile, sottobosco povero, senza foglie	45	66	77	83
	25	55	70	77
<i>Spazi aperti, prati rasati, parchi</i> Buone condizioni con almeno il 75% dell'area con copertura erbosa	39	61	74	80
	49	69	79	84
<i>Aree commerciali (impermeabilità 85%)</i>	89	92	94	95
<i>Distretti industriali (impermeabilità 72%)</i>	81	88	91	93
<i>Aree residenziali (impermeabilità media %)</i> 65%	77	85	90	92
	38%	61	75	83
	30%	57	72	81
	25%	54	70	80
	20%	51	68	79
<i>Parcheggi impermeabilizzati, tetti</i>	98	98	98	98
<i>Strade</i> Pavimentate, con cordoli e fognature	98	98	98	98
	76	85	89	91
	72	82	87	89

**Tabella 4.6** - Valori di CN II per condizioni intermedie in funzione del tipo di suolo e del tipo di copertura.



Nel caso in cui nel bacino siano presenti differenti tipi di terreno o questo sia utilizzato in differenti modi, si ricorre ad un valore medio di CN. Come suggerito da Mancini e Rosso (1989), si utilizza il valore medio a scala di bacino del parametro S, mediante un'integrazione spaziale dei valori puntuali, anziché un'integrazione dei valori di CN a causa della non linearità dell'eq. (4.2) che lega i due parametri. Quindi si ha:

$$\bar{S} = \frac{S_1 A_1 + S_2 A_2 + \dots + S_i A_i}{A_1 + A_2 + \dots + A_i} \quad (4.3)$$

dove  $S_i$  rappresenta il valore di S per l'area omogenea  $A_i$ .

Una volta nota  $\bar{S}$ , l'eq. (4.3) permette di calcolare la pioggia effettiva media areale dell'intero evento ma non fornisce il suo andamento temporale, che può essere ottenuto dalla:

$$e^A(t) = \frac{dE^A}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{(R^A - 0.2S)^2}{R^A + 0.8S} \right) \quad (4.4)$$

L'eq. (4.4) è valida sotto la condizione  $R^A > I_a$ ; fino a quando non è verificata tale condizione si pone  $e^A(t) = 0$ .

Nella pratica per risolvere la (4.4) a partire da uno ietogramma di pioggia discreto  $r_1, r_2, \dots$  si valuta ad ogni passo temporale  $t_m$  ( $t_m = m\Delta t$ ;  $m=1, 2, \dots$ ) il valore del volume incrementale di ruscellamento (o pioggia netta),  $E_m$ , come:

$$E_m = \begin{cases} 0 & \text{se } R_m < 0.2S \\ \frac{(R_m - cS)^2}{R_m} + (1 - c)S & \text{se } R_m > 0.2S \end{cases} \quad (4.5)$$

dove il valore della pioggia lorda cumulata,  $R_m$ , è dato da:

$$R_m = \sum_{i=1}^m r_i \quad (4.6)$$

e per semplicità è stato tralasciato l'apice A per indicare quantità riferite all'area del bacino.

In base al valore di  $E_m$  si ricava quindi  $\Delta E_m = E_m - E_{m-1}$ . Il tasso di ruscellamento  $e_m$  durante l'intervallo m-esimo è:

$$e_m = \Delta E_m / \Delta t$$

(4.7)

#### 4.2.2 Determinazione del CN III

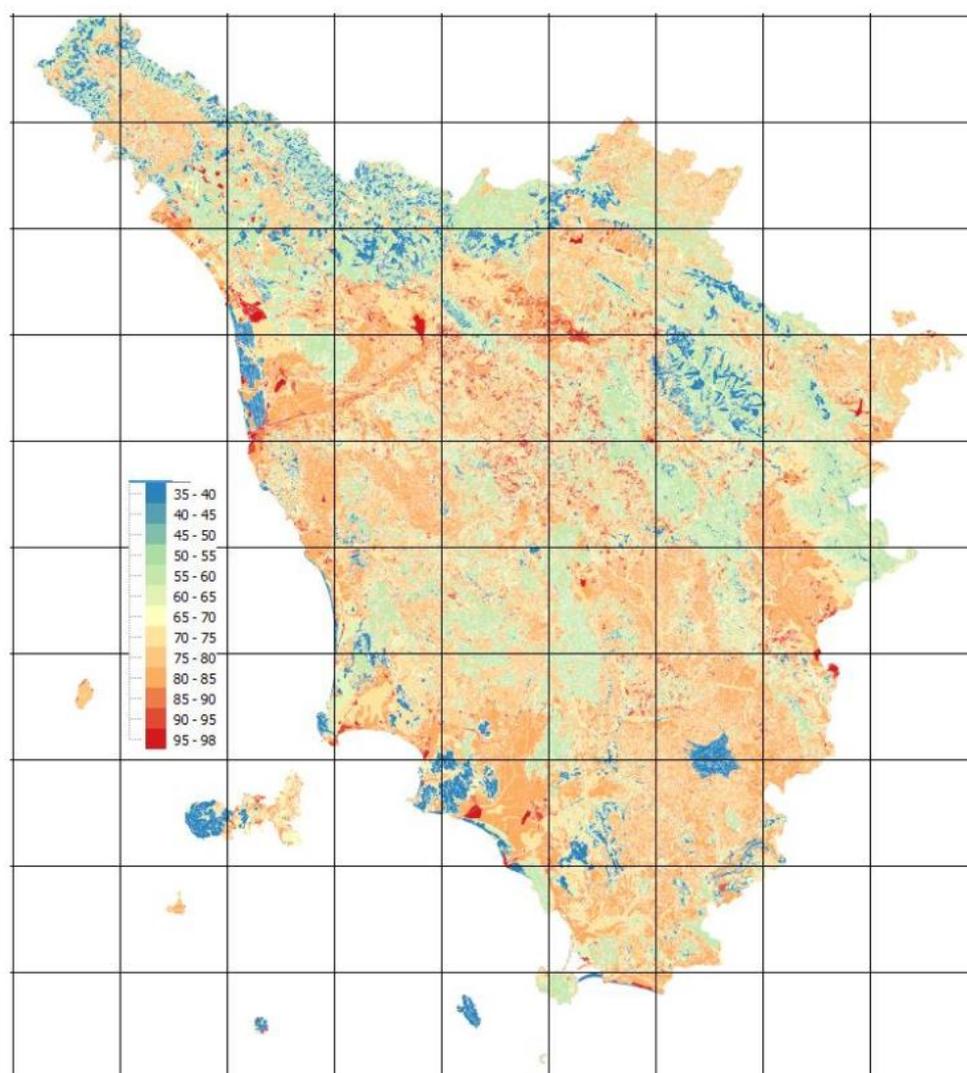
L'individuazione del valore CNII (condizione di terreno mediamente imbibito) si è basata sull'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012, per cui è avvenuto un processo di aggiornamento del modello Idrologico distribuito sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale in uso presso il Centro Funzionale della Regione Toscana per la previsione degli eventi di piena in tempo reale. Tra i parametri sviluppati rientrano i valori di Curve Number a partire dalla pedologia e dall'uso del suolo.

Il risultato che si ottiene, desunto dall'archivio della Regione Toscana, è riportato nella Figura 4.5.

Procedendo come esposto nel paragrafo 4.2.1 è possibile individuare il valore del CN a livello di singolo bacino idrografico. In realtà, l'applicazione della precedente formula 4.3 è stata riferita al valore del CNIII (condizione di terreno imbibito), ottenuto dal valore del CNII secondo l'espressione che segue:

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{[0.4036 + 0.005964 * CN(II)]}$$

A questo punto il valore del *Curve Number III* è definito e riportato in Tabella 4.7 per i vari bacini.



**Figura 4.4** – Valori di Curve Number – CNII per la Toscana

LEGENDA CNII

- 35
- 36
- 49
- 56
- 60
- 61
- 65
- 69
- 73
- 76
- 77
- 79
- 81
- 82
- 84
- 85
- 88
- 89
- 92
- 93
- 98

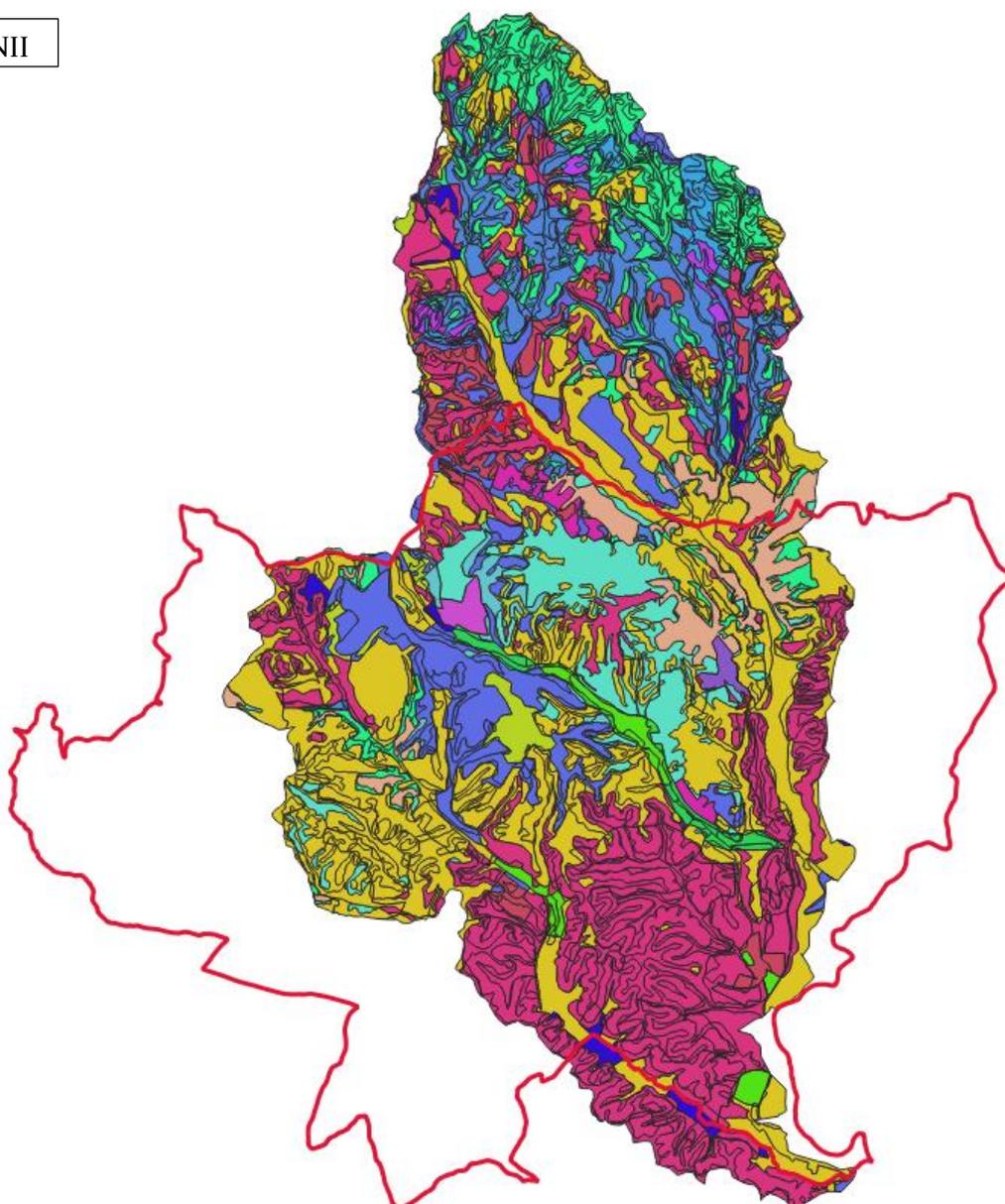


Figura 4.5 - Valori di CNII assunti per i vari bacini



### 4.3 Portate di progetto. Trasformazione afflussi/deflussi

Nel vasto panorama dei modelli di formazione dei deflussi, che si propongono di rappresentare matematicamente i processi idrologici che si manifestano in un bacino idrografico descrivendone il comportamento con un operatore che lega la funzione di distribuzione temporale delle piogge effettive (ingresso al sistema) ed il corrispondente idrogramma dei deflussi diretti (risposta del sistema), è stata scelta la metodologia basata sull'idrogramma unitario istantaneo (IUH). Il metodo si basa sulle ipotesi di linearità e stazionarietà del bacino ed effettua la combinazione tra pioggia in ingresso e IUH per il calcolo della portata diretta. In altre parole, la risposta  $Q(t)$  ad una sollecitazione meteorica di intensità  $p(t)$  variabile nel tempo, ma supposta costante su tutti i punti del bacino, è data dall'integrale di convoluzione:

$$Q(t) = \int_0^t p(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

dove  $p(t)=A i(t)$  è la portata di afflusso meteorico al generico tempo  $t$  e la funzione  $h(t)$ , che prende il nome di IUH, è definita come l'idrogramma dei deflussi generato da un'ipotetica pioggia efficace di altezza unitaria ed intensità costante, distribuita uniformemente sul bacino, e caduta in un intervallo di tempo unitario (immissione di tipo impulsivo).

#### 4.3.1 Modello SCS Idrogramma Unitario

La funzione  $h(t)$  può essere stimata mediante numerosi approcci, tra cui l'idrogramma unitario del SCS (quello scelto per il presente studio).

L'idrogramma SCS è un idrogramma adimensionale definito dal SCS in base all'analisi di idrogrammi di piena in uscita dalla sezione di chiusura di numerosi bacini idrografici strumentati, di dimensioni grandi e piccole. Esso ha un vasto campo di applicazioni pratiche nel campo delle trasformazioni afflussi deflussi per la sua semplicità d'uso e per la sua generalità. Questo IUH è adimensionalizzato rispetto al valore della portata di picco e del tempo corrispondente alla durata del ramo ascendente dell'idrogramma stesso.

L'approccio proposto dal SCS può essere impiegato purché si definisca il valore del *lag time* (tempo di ritardo del bacino) e il *peak rate factor* (PRF). Mentre il primo è comunemente definito sulla base di

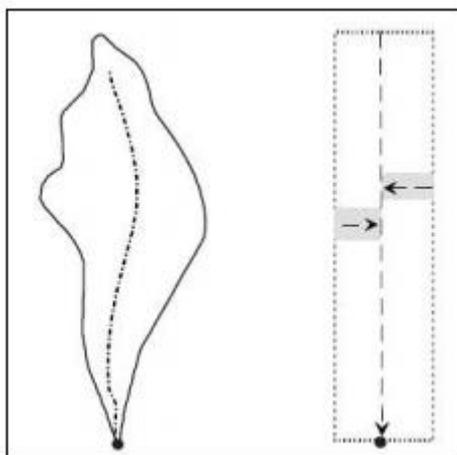
formule empiriche, il secondo deve essere scelto in funzione delle caratteristiche geomorfologiche del bacino e caratteristico del metodo impiegato. Il PRF è definito dalla seguente relazione

$$q_p = PRF \frac{AQ}{T_p}$$

intendendo per  $q_p$  la portata di picco in [ft<sup>3</sup>/s], A l'area di drenaggio in [mi<sup>2</sup>] e  $T_p$  il tempo in cui si realizza il picco in [h], Q runoff (in). Il valore di *default* proposto da HEC-HMS è di assumere PRF pari a 484 ed è definito ipotizzando che il volume trasportato dall'idrogramma di piena nel tratto ascendente è il 35% di quello totale. Quindi la scelta del PRF si riflette in un cambiamento percentuale del volume trasportato nel tratto ascendente dell'idrogramma di piena e, quindi, della sua forma. Ai fini del presente studio, si assume il valore del PRF costante e pari a 484 come quello di default.

#### 4.3.2 Modello Kinematic Wave

Il modello Kinematic Wave (onda cinematica) è un modello concettuale fisicamente basato, che rappresenta il bacino idrografico come un canale a pelo libero molto largo, con ingressi nel canale pari alla precipitazione che interessa il bacino stesso. L'idrogramma è calcolato attraverso la risoluzione delle equazioni di moto vario. La schematizzazione del bacino è indicata attraverso un esempio nella figura seguente:



Il modello schematizza quindi il deflusso lungo i versanti (overland flow) e il deflusso nel canale (channel flow). Le equazioni utilizzate sono le equazioni fondamentali del deflusso in canali a pelo libero: l'equazione di conservazione della quantità di moto e l'equazione di continuità. Il deflusso sui versanti e nei canali è schematizzato secondo un modello monodimensionale.

Per i dettagli sul metodo si rimanda al *Technical Reference Manual* di HEC-HMS consultabile online.

#### 4.3.3 Stima del lag time

Il lag time (o tempo di ritardo) è normalmente stimato per mezzo di relazioni empiriche. Nel caso in esame sono state prese in esame 15 diverse formulazioni da letteratura del Lag Time, ovvero le formule di Kirpich, Kerby-Hataway, Papadakis-Kazan, Horton, Kinematic wave, Watt & Chow, Chow, Melone, Snyder, Carter, Fiorentino, McEnroe & Zhao, SCS, con l'aggiunta di ulteriori 10 formule per il calcolo del tempo di corrivazione: Giandotti, Pasini, Ventura, Pezzoli, Puglisi, Aronica & Paltrinieri, Fattorelli & Marchi, NCRS, Tournon, U.S. Navy & Texas Highway departments. La correlazione tra il Tempo di Corrivazione ( $t_c$ ) e il Lag-Time ( $T_{lag}$ ) è dato da  $T_{lag} = 0.6 * t_c$ .

In generale le formule adottate si basano su dati morfologici come l'area del bacino, la lunghezza dell'asta principale, le quote del bacino idrografico, coefficienti che valutano la permeabilità del suolo e la velocità di ruscellamento dell'acqua.

Avere a disposizione una così ampia serie di dati permette di eliminare i valori estremi dovuti al non adattamento della formula per quel dato bacino (dovuto principalmente alle dimensioni e alla morfologia), dai valori validati ne è stata estratta la media.

#### 4.3.4 Risultati della modellazione idrologica

Il software HEC-HMS ver. 4.2.1 è il sistema d'analisi dei fiumi dell'Hydrologic Engineering Center (HEC), del Corpo degli Ingegneri dell'Esercito degli Stati Uniti d'America. E' stato progettato per simulare i processi di precipitazione e di deflussi di bacini idrografici e ne consente, quindi, la modellazione idrologica.

Per eseguire una simulazione idrologica il software richiede la specificazione di tre insiemi di dati:

- Basin Model: rappresentazione fisica delle caratteristiche del bacino idrografico
- Meteorologic Model: dati meteorologici relativi alle precipitazioni e all'evapotraspirazione
- Control Specifications, Time-Series Data: informazioni temporali necessarie per la simulazione

Il componente *Basin Model* permette di definire i bacini idrografici, le relative caratteristiche, i metodi di calcolo delle perdite di bacino e i metodi di calcolo della trasformazione afflussi-deflussi.



Il *meteorological model* definisce l'evento pluviometrico di progetto (*rainfall simulation*). L'evento pluviometrico assegnato, è inserito, nel caso in esame, utilizzando il metodo dello *specified hyetograph*, inserendo cioè uno ietogramma di pioggia costante per tutta la durata dell'evento. Per le simulazioni idrologiche si è scelto, quindi, di distribuire i valori dello spessore di pioggia in 15 minuti, ipotizzando, come già detto, lo ietogramma costante.

Nel caso dei bacini singoli, le modellazioni idrologiche sono svolte utilizzando un unico elemento *basin*, mentre nel caso dei Sistemi i bacini sono normalmente connessi tramite un elemento *junction*.

Ogni bacino è stato definito a partire delle seguenti caratteristiche: Area del bacino, SCS Curve Number come *Loss Method* e SCS Unit Hydrograph come *Transformation Method*.

L'individuazione della durata critica per tutti i sistemi è condotta massimizzando il picco dell'idrogramma in uscita alla *Junction*, procedendo iterativamente per diversi valori della durata di pioggia.

I risultati delle analisi idrologiche in termini di valore dei picchi degli idrogrammi sono infine riportate in Tabella 4.7 per tutti i bacini oggetto di studio.





Codice	Bacino Idrografico	Area (Km <sup>2</sup> )	CN <sub>III</sub>	LAG nuovo (min)	D <sub>crit</sub> [h]	Q <sub>max,Tr30</sub> [m3/s]	Q <sub>max.Tt200</sub> [m3/s]
B01	Fosso del Castagno	0.54	91	16.0	1	5.9	8.9
B02	Fosso del Bolgione (monte)	0.84	86	14.5		7.5	12.2
B03	Fosso del Bolgione (tombato)	0.85	84			6.3	12.2
B04	Fosso del Bolgione (valle)	0.08	80			0.6	1.1
B05	Affluente Bolgione	0.22	84	12.3		1.9	3.1
B06	Fosso del Castagno (tombato)	0.17	89			1.8	2.9
B07	Fosso del Fossatone (monte)	0.51	91	24	1	5.1	7.9
B08	Fosso del Fossatone (intermedio)	0.43	89			3.7	6.8
B08 bis	Affl. Dx Fossatone	0.02	91	6		0.3	0.5
B09	Fosso della Bandita	0.27	91	9		3.3	5.0
B10	Fosso Santa Lucia	0.15	92	15		3.4	2.8
B11	Fosso Santa Lucia (intermedio)	0.36	90		1.9	5.9	
B12	Bozzone	58.02	83	164	6	121.6	231.9
B13	Riluogo valle	14.15	86	100	3	51.0	88.1
B15	Ribucciano	6.62	91	56		35.3	56.1
B14	Bocca di Cane	1.50	91	32		8.6	13.5
B16	Torrente Tressa - interbacino	7.74	90		5	20.3	46.9
B17_a	T. Riluogo monte sx	0.56	89		2	4.2	6.6
B17_b	T. Riluogo monte dx	0.41	86			2.7	4.4
B18	Interbacino Riluogo monte	4.31	86			21.4	44.1
B19	Fosso Paradiso	0.74	80	28		3.6	6.5
B20	Interbacino Riluogo valle	2.49	88			8.5	19.5
B21	Fosso Borrino	2.01	88	61		10.3	17.3
B23	T. Sorra (monte)	1.91	84	57	2	8.7	15.3
B24	Fosso Alfino	2.07	84	51		9.9	17.3
B25	Aff. Sorra	0.09	87	10		0.9	1.5
B26	Aff. Sorra (2)	0.13	87	11		0.7	1.1
B27	T. Tressa Monte	9.58	84	84	3	32.7	59.7
B28	Fosso di Pescaia	2.65	91	36		14.5	23.4
B29	Interbacino Tressa	3.01	89			16.7	26.8
B30	Fosso di Val di Tufi	0.65	88	23		3.4	5.6
B31	Fosso Val di Montone	1.32	88	39		6.5	10.9
B32	Aff. Tressa zona Doglia	1.07	91	30		5.9	9.5
B33	Aff. Tressa zona Cappellaio	1.03	91	29		5.7	9.2

**Tabella 4.7** - Risultati della modellazione idrologica, i valori assenti di lag time indicano l'utilizzo del metodo Kinematic wave per il relativo bacino





## 5 ANALISI IDRAULICA

### 5.1 Descrizione della modellazione idraulica

Le modellazioni idrauliche sono state condotte per mezzo dei seguenti codici di calcolo: HEC-RAS 5.0.3 e 5.0.7, sviluppato dall'US Army Corps of Engineer, per le aste fluviali nei tratti naturali sia nelle modellazioni 1D e 2D.

- EPAS SWWM 5.1, sviluppato dalla US Environmental Protection Agency, per le aste fluviali nei tratti tombati. Il software consente l'esecuzione delle sole modellazioni 1D.
- FLO 2D, sviluppato dalla FLO-2D software INC, per le modellazioni 2D in aree urbane e per simulare gli scenari di allagamento prodotti nei tratti tombati urbani.

Nella pagina seguente è riportata una tabella di sintesi, dove ad ogni corso d'acqua studiato è associato il codice di calcolo utilizzato per la modellazione.

In generale, nel caso dei tratti "a cielo aperto", la modellazione dei fenomeni di allagamento e di transito sono state eseguite utilizzando il codice di calcolo HEC-RAS 5.0.3 e 5.0.7. La modellazione è stata eseguita utilizzando le portate di piena ricavate dalle modellazioni idrologiche con HEC-HMS descritta in precedenza.

Le modellazioni idrauliche sono state condotte secondo uno schema monodimensionale in moto vario (*unsteady flow*), simulando il deflusso delle portate di piena all'interno degli alvei fluviali oggetto del presente studio.

Nei casi di superamento del livello dell'acqua dei limiti arginali (laddove presenti) o topografici delle sezioni rilevate e utilizzate per le modellazioni monodimensionali, si sono svolte delle modellazioni bidimensionali sempre con HEC-RAS. Laddove i fenomeni esondativi hanno interessato aree non confinate, tali da non poter immagazzinare i volumi idrici provenienti dal corso d'acqua, sono state inserite delle *storage area* all'interno delle quali il problema del flusso è schematizzato come bidimensionale, in modo da simulare le dinamiche di allagamento di tali aree.

Nel caso dei tratti tombati, invece, la modellazione 1D in moto vario è stata svolta con il codice EPA SWMM, che è specifico per i tratti fognari e tombati. La simulazione degli scenari di allagamento a seguito delle uscite dai pozzetti è stata quindi condotta con FLO 2D.





CORSO D'ACQUA MODELLATO	HEC-RAS 5.0.3/5.0.7 - modello 1D	HEC-RAS 5.0.3/5.0.7 - modello 2D	EPA-SWMM	FLO 2D
Fosso del Castagno (fino a San Miniato)	X			
Fosso del Castagno (tratto tombato fino all'immissione col Bolgione)			X	X
Fosso del Bolgione (sia a monte che a valle del tratto tombato)	X			
Fosso del Bolgione (tratto tombato dal Monte dei Paschi a valle di San Miniato)			X	X
Affluente Fosso del Bolgione	X			
Fosso del Fossatone	X	X		
Fosso della Bandita	X	X		
Fosso di Santa Lucia	X	X		
T. Bozzone	X	X		
T. Riluogo (tratto tombato di monte)			X	X
T. Riluogo (tratto intermedio - dall'uscita del tratto tombato in zona "la veloce" alla confluenza col Fosso del Borrino)	X	X		
T. Riluogo (tratto di valle alla confluenza con l'Arbia)	X	X		
T. Ribucciano	X	X		
Fosso Bocca di Cane	X	X		
T. Tressa (tratto di monte)	X	X		
T. Tressa (tratto di valle alla confluenza con l'Arbia)	X	X		
Fosso Paradiso	X			
Fosso Borrino	X	X		
T. Sorra	X	X		
Affluente T. Sorra	X	X		

Tabella 5.1 - Tabella di sintesi delle modellazioni idrauliche.





## 5.2 Modellazioni idrauliche monodimensionali con Hec-Ras 5.0.3 e 5.0.7

Per ciascun corso d'acqua oggetto di studio è stato sviluppato anzitutto un modello idraulico monodimensionale con il codice di calcolo HEC-RAS 5.0.3 o 5.0.7 e per ciascun tempo di ritorno di interesse (30 e 200 anni) è stata effettuata una simulazione in moto vario.

In questa sede, si preferisce omettere l'illustrazione teorica dei principi di base sui quali si fonda la soluzione numerica delle equazioni di moto e di continuità che regolano il processo di moto permanente e di moto vario, in quanto una esaustiva trattazione degli stessi argomenti è liberamente disponibile in rete all'indirizzo <http://www.hec.usace.army.mil> e si rimanda due pubblicazioni *Hydraulic Reference Manual* e *User's Manual* messe a disposizione direttamente dall'US Army Corps of Engineering.

Il codice HEC-RAS, al fine di seguire il calcolo, necessita, oltre della geometria dell'alveo tramite l'inserimento delle sezioni rilevate (*cross section*), di definire il valore del coefficiente di Manning.

Per i dettagli relativi a ciascun corso d'acqua si rimanda agli allegati delle sezioni dei modelli, mentre, in generale, si sono assunti valori medi del *Manning*, desunti dal Manuale di Hec-Ras e dal *Manuale dell'Ingegnere civile e ambientale* (Hoepli, 2015) pari a:

- 0.05 m<sup>-1/3</sup>/s corrispondente a un valore intermedio per "golene con sottobosco" nel caso di aree golenali in tratti non arginati
- 0.035 m<sup>-1/3</sup>/s corrispondente a un valore intermedio per "fiumi di montagna con fondo in ghiaia, ciottoli e pochi massi, lati ripidi" e "canali in terra sinuosi e lenti con folta vegetazione".
- 0.06 m<sup>-1/3</sup>/s corrispondente a un valore intermedio per "golene con sottobosco/ aree coltivate/con molti alberi per le aree modellate bidimensionalmente.

Al fine di rendere eseguibili le simulazioni, occorre definire le *boundary conditions* a monte e a valle del tratto studiato nel caso di simulazioni in moto vario. Com'è noto tali condizioni possono essere impostate in vari modi: livello idrico noto, altezza critica, altezza di moto uniforme o scala di deflusso. Nel caso in esame, quali condizioni al contorno di monte sono stati assunti gli idrogrammi di piena; per la condizione di valle, invece, si è generalmente optato per l'altezza di moto uniforme.

Fanno eccezione i modelli dei tratti alla confluenza con il Torrente Arbia, per i quali le condizioni al contorno dipendono dall'Arbia e che sono state ricavate dalle risultanze dello Studio idraulico sul T. Arbia.





Dai risultati di tale studio è stato infatti possibile recuperare i valori dei tiranti idraulici degli allagamenti prodotti dal T. Arbia in corrispondenza dell'intersezione con il corso d'acqua d'interesse. In particolare, ciò vale per le condizioni al contorno di valle dei seguenti corsi d'acqua modellati: T. Bozzone, T. Riluogo, Fosso del Fossatone, Fosso Santa Lucia e T. Tressa (valle).

### 5.3 Modellazioni idrauliche bidimensionali - HEC-RAS 5.0.3 o 5.0.7

Il software HEC-RAS ha aggiunto di recente la capacità di eseguire uno schema di modellazione bidimensionale all'interno della simulazione condotta in regime di moto vario. Nel presente studio, per i tratti in cui fosse necessario l'impiego di modelli 2D per la determinazione delle aree allagate, si è infatti svolto una modellazione in moto vario con schema monodimensionale (1D) combinato anche con uno schema bidimensionale (2D) con l'aggiunta di aree 2D (*2D-storage area*) nel modello. Tale area 2D viene aggiunta nel modello 1D disegnando un poligono connesso al *river* attraverso l'uso di uno sfioratore laterale (*lateral structure*).

Il codice di calcolo consente di risolvere il problema bidimensionale del moto sia risolvendo le equazioni complete di Saint Venant o di diffusione dell'onda in 2D. In generale, le equazioni di diffusione dell'onda (scelte ai fini del presente studio) consentono al codice di funzionare più velocemente garantendo inoltre una maggiore stabilità numerica. L'algoritmo di risoluzione è "*ai volumi finiti*" ed è "accoppiato" a quello di risoluzione del problema monodimensionale nello stesso passo temporale di calcolo. Questo permette una perfetta coerenza a ogni passo temporale tra le componenti monodimensionali e quelli bidimensionali. L'equazione dello stramazzo è utilizzata per calcolare il deflusso tra le sezioni del corso d'acqua modellato e la *storage area 2D*.

Come FLO 2D, HEC-RAS 5.0.3 e 5.0.7 funziona per celle, che però possono essere sia strutturate che non strutturate. Ciò significa che le celle computazionali possono essere triangoli, quadrate, rettangolari o anche elementi a cinque e sei facce (ma non più di 8). La maglia può essere una miscela di forme e dimensioni delle celle (Figura 5.1). Il contorno esterno della maglia computazionale è definito, invece, con un poligono. Generalmente, come si nota in Figura 5.1, il software crea delle celle di forma quadrata nella zona centrale, mentre in prossimità del contorno esterno la mesh si adatta al profilo dell'area.



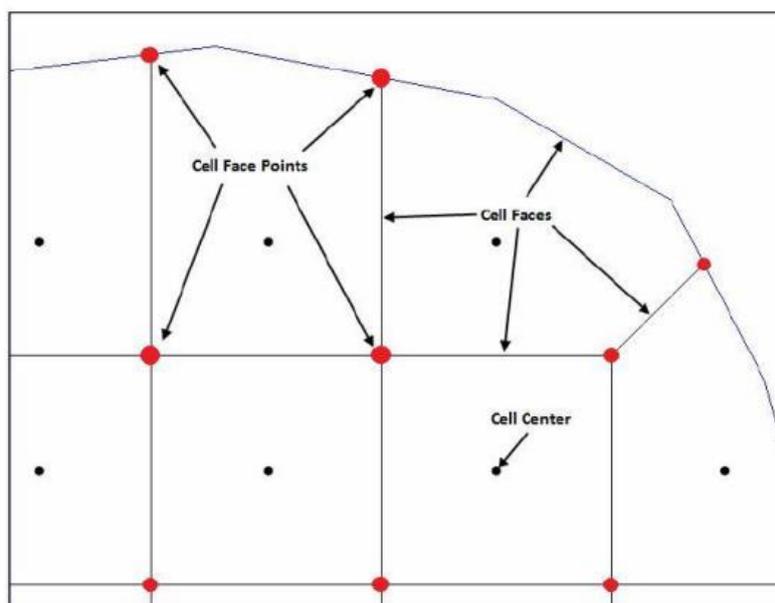


Figura 5.1 - Esempio mesh computazionale HEC-RAS 5.0.3

Si noti inoltre come ogni *cell center*, *cell face* e *cell face point* è identificato da un numero, in modo da facilitare l'operazione di analisi e visualizzazione dei risultati.

Il più grande vantaggio della modellazione bidimensionale in HEC-RAS riguarda comunque la dimensione della mesh computazionale. Ogni cella viene infatti pre-processata in modo da creare una serie di tabelle idrauliche, che mettono in relazione l'elevazione e il volume e, su ogni lato della cella, l'elevazione con il perimetro bagnato, l'area e la scabrezza. Queste curve permettono di utilizzare celle di dimensioni più grandi rispetto ad altri programmi 2D, con evidente diminuzione dei tempi computazionali.

Ad ogni modo, in una simulazione di moto vario bidimensionale, il parametro più significativo da considerare è l'intervallo computazionale  $\Delta T$ , che deve essere scelto con accuratezza in modo da non influenzare negativamente l'esito delle analisi. Generalmente questo valore viene valutato basandosi sul criterio di Courant, esprimibile, nel caso di impiego del set di equazioni *diffusive wave*, nella maniera seguente:

$$C = \frac{V \Delta T}{\Delta X} \leq 2$$

essendo  $C$  il numero di Courant,  $V$  la velocità massima dell'acqua,  $\Delta T$  il tempo di calcolo e  $\Delta X$  la dimensione media delle celle.

Infine, occorre sottolineare che il software computa la velocità della corrente nei nodi della griglia, mentre il livello idrico è calcolato nel *cell center* della griglia stessa.

#### 5.4 Modellazioni idrauliche monodimensionali con EPA-SWMM

Nel corso degli ultimi decenni sono stati sviluppati numerosi modelli matematici che analizzano i fenomeni quantitativi e qualitativi delle reti di drenaggio urbano. Attraverso l'utilizzo di questi modelli si possono valutare in dettaglio i molteplici aspetti delle reti idrauliche, verificandone la condizione e individuando provvedimenti per mitigarne le criticità. Uno di questi e tra i più conosciuti c'è proprio EPA-SWMM della US Environmental Protection Agency.

Nell'utilizzo del software può essere seguito un approccio distribuito, in cui si pratica una suddivisione più o meno spinta del bacino in sottobacini, attribuendo valori distribuiti dei parametri del modello. Il grado di suddivisione è fondamentale ai fini della classificazione del modello, in quanto solo una suddivisione molto spinta e puntuale porta ad una modellazione fisicamente basata.

SWMM è organizzato secondo una struttura a blocchi, rappresentata in Figura 5.2, ognuno dei quali affronta uno specifico aspetto del ciclo idrologico.

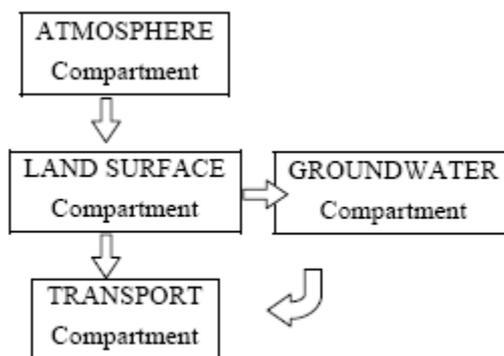


Figura 5.2 - Struttura a blocchi del modello SWMM

Di questi, nel caso del presente studio si è impiegato il solo modulo *Transport Compartment*, avendo impiegato HEC-HMS per la modellazione idrologica.

Il modulo *Transport compartment* contiene le informazioni degli elementi della rete (condotte, canali, pompe, pozzetti, ecc.) e consente di studiare la propagazione nella rete sia delle portate che degli inquinanti.



SWMM implementa tre metodi per la propagazione delle portate a seconda del livello di sofisticazione che si vuol ottenere:

- Uniform flow routing, il più semplice, in cui si assume che in ogni intervallo di tempo la corrente sia uniforme e regolare;
- Kinematic wave routing, in cui vengono impiegate le equazioni di De Saint Venant con la semplificazione cinematica;
- Dynamic wave routing, basato sulla risoluzione completa delle equazioni di De Saint Venant che governano i fenomeni idraulici di propagazione all'interno dei condotti.

Tali equazioni sopra riportate sono risolte attraverso il metodo alle differenze finite e necessitano per simulare i fenomeni idraulici di un intervallo di tempo abbastanza piccolo al fine di mantenere stabili le soluzioni. Nel caso di situazioni critiche (variazioni repentine di velocità, cambio rapido di condizioni di corrente tra supercritica a subcritica, ecc) che condurrebbero a situazioni di errore, il modello SWMM può automaticamente diminuire l'intervallo di tempo definito dall'utente per riportarsi in una situazione di stabilità numerica. In ogni caso per valutare le perdite di carico viene utilizzata la formulazione di Manning. Per le modellazioni si è assunto un valore pari a  $0.017-0.018\text{m}^{1/3}/\text{s}$ , desunto dal Manuale di Hec-Ras e dal *Manuale dell'Ingegnere civile e ambientale* (Hoepli, 2015) e corrispondente a un valore intermedio per "canalizzazioni artificiali" e cautelativo per "tubazioni in calcestruzzo", ritenuto più idoneo per tener conto dello stato di usura e incrostamento delle pareti interne dei condotti.

In questa sede, si preferisce omettere l'illustrazione teorica dei principi di base sui quali si fonda la soluzione numerica delle equazioni di moto e di continuità che regolano il processo di moto di moto vario, in quanto una esaustiva trattazione degli stessi argomenti è liberamente disponibile in rete all'indirizzo <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> e si rimanda due pubblicazioni SWMM Reference Manual e SWMM 5.1 User's Manual messe a disposizione direttamente nel sito dell'EPA.

## 5.5 Modellazioni idrauliche bidimensionali - FLO 2D 2009

Il programma bidimensionale FLO-2D 2009 presenta le seguenti caratteristiche principali:

- è un modello fisicamente basato;
- conserva i volumi e ne fornisce un report.





Si limita pertanto la descrizione del programma ai criteri di modellazione 2D nelle floodplains (*Overland flow*) rimandando per gli altri aspetti alla documentazione tecnica consultabile online al sito <http://www.flo-2d.com/v2007/v2007-documentation.htm>.

Il moto bidimensionale di propagazione della piena è risolto mediante l'integrazione numerica delle equazioni del moto e di conservazione del volume. FLO-2D utilizza il seguente sistema di equazioni, costituito rispettivamente dall'equazione di continuità e dall'equazione del moto espressa come equazione dell'onda dinamica completa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i$$

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$$

dove:

$h$  tirante idrico;

$V_x$  componente lungo  $x$  della velocità media;

$i$  intensità dell'eccesso di pioggia;

$S_{fx}$  componente lungo  $x$  del gradiente delle perdite di carico per attrito (da equazione di Manning);

$S_{0x}$  pendenza del piano campagna.

La forma differenziale delle equazioni di continuità e del moto è risolta con uno schema numerico esplicito alle differenze finite centrato, ovvero interpolando con legge quadratica la soluzione reale.

In FLO-2D il dominio di calcolo è discretizzato mediante una griglia di celle quadrate di dimensione uniforme. La procedura computazionale di analisi della propagazione della piena fuori alveo (*overland flow*) consiste nel calcolare la portata attraverso ognuna delle 8 potenziali direzioni di flusso (4 ortogonali ai bordi della cella e 4 diagonali, vedi Figura 5.3) e inizia con una prima stima del tirante idrico ai bordi della cella. Tale tirante  $h$  è una media dei battenti delle due celle che si scambiano volumi idrici in una delle 8 direzioni. Altri parametri idraulici sono mediati tra le due celle per poter stimare la velocità, come la resistenza al moto (coefficiente  $n$  di Manning), l'area di deflusso, la pendenza, il perimetro bagnato, ecc.



L'equazione dell'onda dinamica completa è un'equazione differenziale parziale non lineare del secondo ordine. Per risolverla, la velocità è inizialmente calcolata a partire dalla pendenza media della superficie idrica tra due celle: tale valore di primo tentativo è poi utilizzato per determinare le soluzioni delle equazioni di moto mediante il *metodo di Newton-Raphson* del secondo ordine.

Il gradiente delle perdite di carico per attrito è fornito dall'equazione di Manning. La modalità utilizzata da FLO-2D per tener conto delle dissipazioni di energia aggiuntive (dovute a vegetazione/edifici, espansioni/contrazioni, curve che i filetti fluidi sono costretti a seguire, ecc..) e del conseguente rallentamento della corrente, è quella di assumere valori maggiorati dei coefficienti  $n$ , disponibili in letteratura.

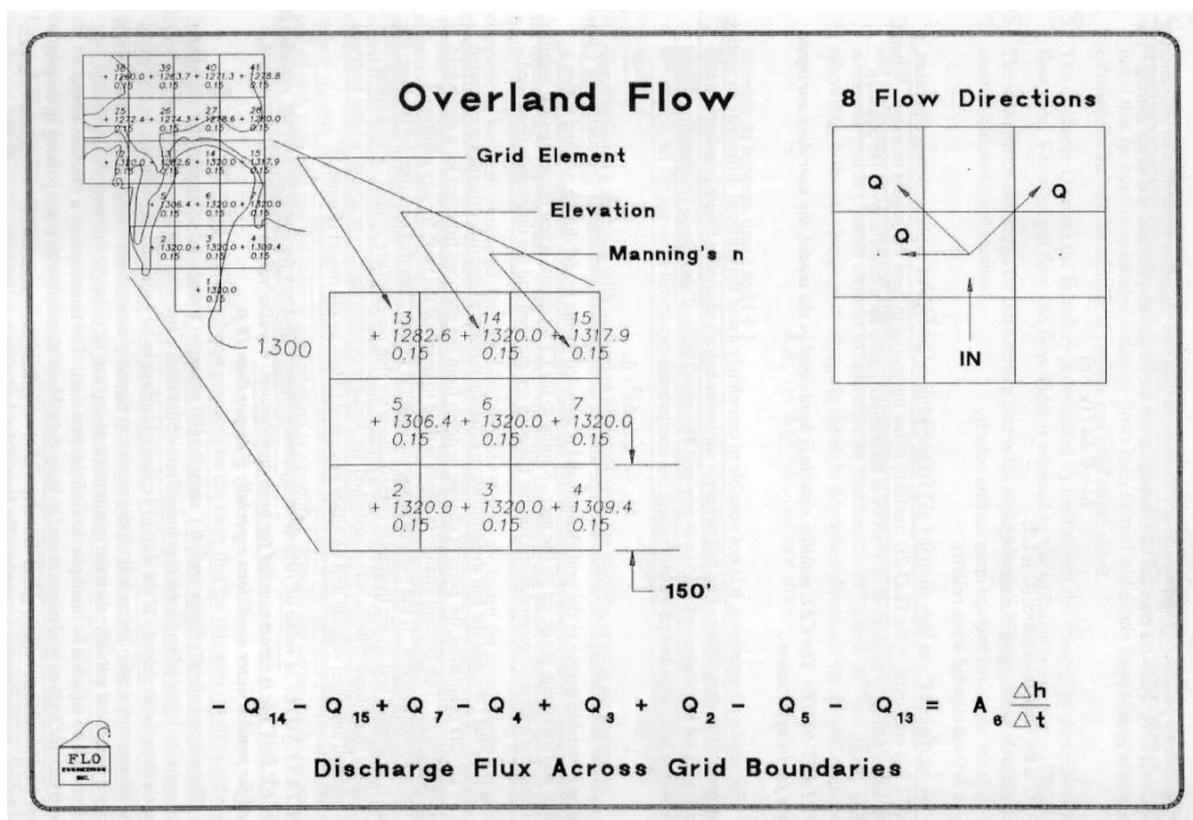


Figura 5.3 - Flussi attraverso i confini di una cella in FLO-2D

La velocità attraverso il confine tra due celle è quindi calcolata risolvendo l'equazione del moto: dall'area media di deflusso si ottiene successivamente la portata per ogni istante di tempo di calcolo. La modifica del volume idrico contenuto in ogni cella in cui è suddivisa l'area inondata (*floodplain*) è data dalla somma delle singole portate che attraversano i confini nelle 8 direzioni, moltiplicate per l'intervallo temporale di calcolo.



Tale cambiamento di volume è successivamente diviso per l'area della cella per ottenere l'aumento o la diminuzione del tirante idrico.

FLO-2D adotta un passo temporale di calcolo variabile in automatico (sia in incremento sia in decremento) in base alle condizioni numeriche di stabilità, in modo da evitare l'insorgenza di instabilità numerica (*surging*). La variabilità temporale di calcolo può essere controllata dall'utente.

Le ipotesi e le limitazioni di base del programma riguardano principalmente la risoluzione spaziale e temporale della griglia di calcolo:

- ogni cella è associata univocamente ad un valore di elevazione, un coefficiente di scabrezza di Manning ed un tirante idrico;
- condizioni di moto uniforme per la durata del passo temporale;
- distribuzione idrostatica delle pressioni;

Nelle applicazioni pratiche, sempre facendo riferimento ad analisi tipo *overland flow*, l'uso del programma prevede in successione l'uso dei seguenti componenti:

- Creazione della griglia di calcolo con il software di pre-processamento GDS;
- Generazione e modifica dei dati di input/output (tra cui dati di inflow, outflow, strade, levee, edifici, parametri di controllo e di stabilità della simulazione) con i moduli GDS, GUI, FLOENVIR;
- Esecuzione del codice di calcolo idraulico FLO;
- Lancio dei moduli di post-processamento MAXPLOT, MAPPER per l'analisi dei risultati;
- Esportazione/integrazione dei risultati in un GIS.

Il primo problema relativo ad una modellazione bidimensionale consiste nella definizione e discretizzazione del dominio di integrazione. Una volta acquisiti i dati topografici relativi all'area di studio, è necessario definire la griglia computazione su cui sarà implementata l'integrazione delle equazioni differenziali del modello matematico. Definire la griglia significa determinare le dimensioni delle celle che la costituiscono e la loro relativa quota. L'interpolazione delle quote geodetiche del dominio da cui si ottengono le quote delle celle di discretizzazione rappresenta un punto importante di una modellazione bidimensionale, in quanto da esso dipende l'accuratezza della soluzione finale. Tale griglia è costruita a partire da un modello del terreno.

La dimensione della cella è un altro fattore importante, in quanto si intuisce facilmente che quanto più questa è piccola, tanto più riesce a interpretare fedelmente il reale andamento orografico del





terreno. Infatti se immaginiamo cinque diversi punti, la loro interpolazione con un'unica cella genera una quota media che leviga i picchi e riduce le zone depresse, mentre al contrario una discretizzazione con cinque celle conserverebbe una migliore rappresentazione dell'andamento naturale del terreno.

Tuttavia, oltre al fatto che per estesi allagamenti un'elevata discretizzazione del dominio di calcolo perde significatività, motivi computazionali richiedono una dimensione maggiore della singola cella in caso di elevate portate in ingresso; il criterio suggerito dai creatori del software per la corretta scelta della dimensione della cella è

$$\frac{Q_p}{A_c} < 0.15 \text{ m}^3/\text{s m}^2$$

con

$Q_p$  portata massima in arrivo ad una cella

$A_c$  superficie della singola cella

La densità dei punti rilevati influisce sulla discretizzazione finale e dipende essenzialmente dalla precisione di dettaglio della carta topografica che si utilizza.





## 6 RISULTATI DELLE MODELLAZIONI IDRAULICHE

La descrizione qui riportata delle varie modellazioni idrauliche, è articolata secondo lo schema seguente, rimandando agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio:

- Descrizione generale dell'area e dei tratti del corso d'acqua oggetto di studio;
- Tipo di modellazione effettuata (mono-dimensionale in moto vario oppure mono-dimensionale in moto vario con sfioratori laterali e settori di allagamento con HEC-RAS 5.0.3 o 5.0.7.).
- Descrizione delle condizioni al contorno imposte e peculiarità del modello.
- Descrizione sintetica dei risultati più significativi

Nel seguito, come si è già anticipato nei capitoli precedenti, per i modelli idraulici dei corsi d'acqua che confluiscono nel T. Arbia oggetto dello studio si è imposto, quale condizione al contorno di valle, una *stage hydrograph* in cui si è assunto il valore del tirante idraulico dell'area allagate causata dal T. Arbia nel punto di incrocio con il corso d'acqua esaminato.

Il valore del tirante idraulico assunto è il massimo, tra tutti quelli associati alle diverse durate di pioggia indagate, calcolato nello Studio Idrologico-Idraulico del T. Arbia.



## 6.1 Modello "Bozzone"

### *Descrizione generale*

Il modello comprende il tratto del T. Bozzone a monte della confluenza col T. Arbia per 2.5 km. Il tratto fluviale del T. Bozzone oggetto della modellazione comprende 13 sezioni rilevate (si veda Figura 6.1 a seguire).

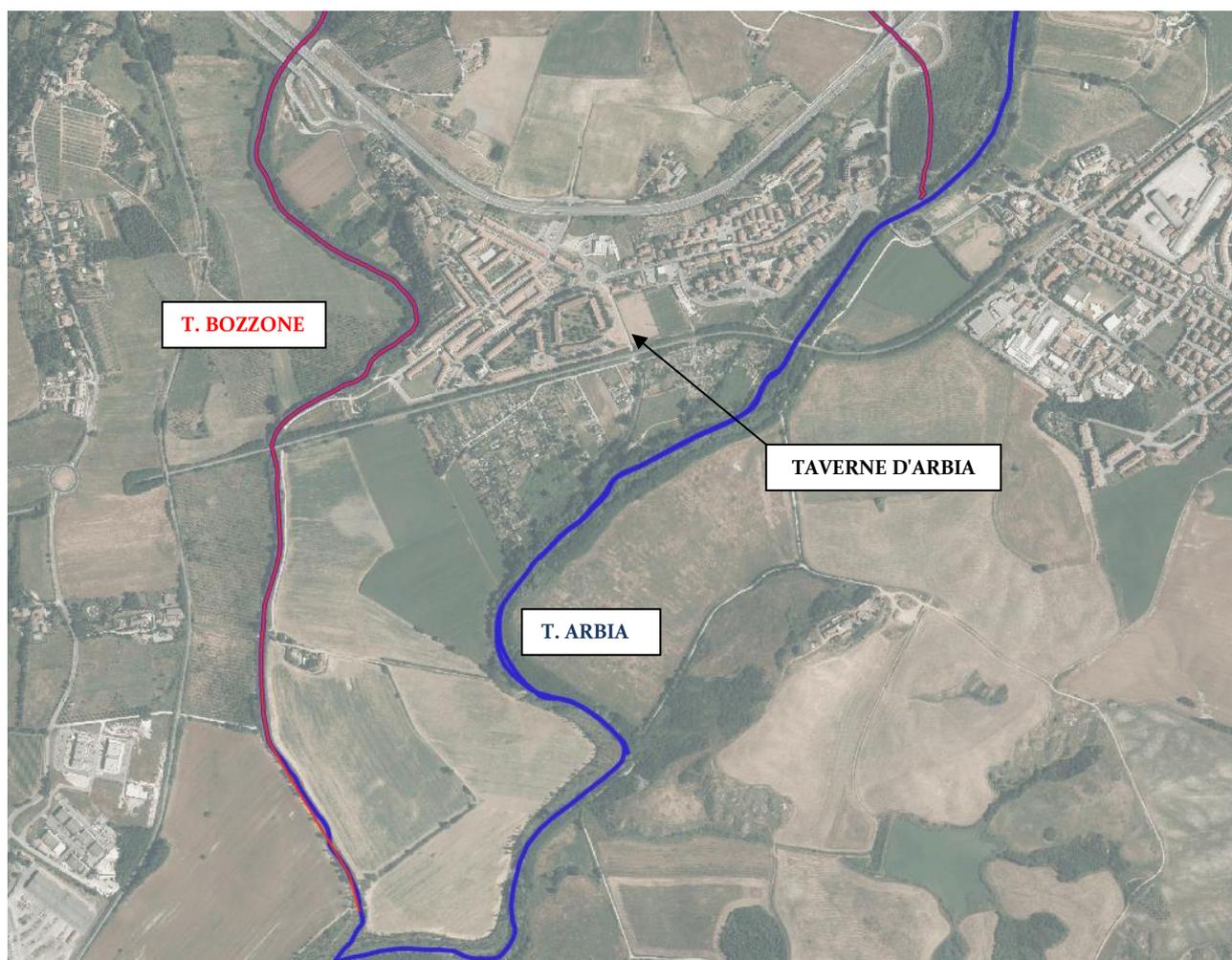


Figura 6.1 - Inquadramento del T. Bozzone

L'alveo è inciso e attraversa nel tratto di monte aree a carattere prevalentemente agricolo. Poco a monte della ferrovia sopraelevata, il fosso passa in prossimità di Taverne d'Arbia, per poi proseguire nuovamente in aree a carattere prevalentemente agricolo e boscato fino all'immissione nell'Arbia.

### Caratteristiche del Modello

Il modello è realizzato con HEC-RAS 5.0.3 in cui l'asta fluviale del Torrente Bozzone è modellata come elemento *river* monodimensionale definito per mezzo di *cross sections* e due *storage areas 2D*, una in destra e una in sinistra idraulica. Le sezioni rilevate sono state tagliate ai lati in modo che la modellazione 1D riguardi il solo *main channel*, mentre le aree golenali e di espansione naturale del corso s'acqua sono state appunto modellate con gli elementi *storage*.

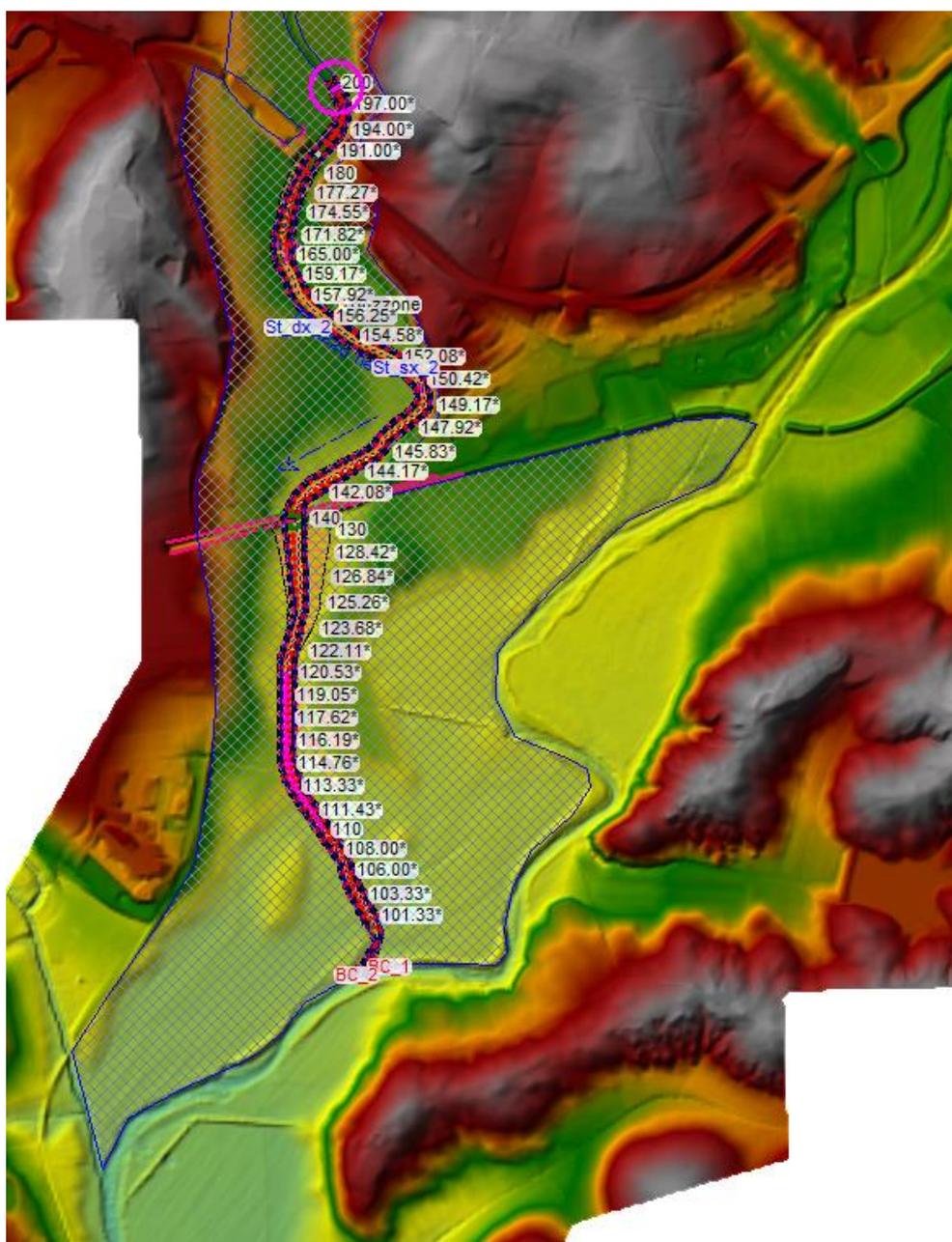


Figura 6.2 - Modello idraulico del T. Bozzone



Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte e uno stage hydrograph costante nel tempo per simulare l'immissione nell'Arbia. La quota imposta è di 174.68 m s.l.m. per TR200 e 173.89 per Tr30, quote corrispondenti al tirante idraulico dell'area allagata dall'Arbia all'incrocio con il T. Bozzone. Le stesse condizioni al contorno sono date sulle celle nell'intorno della confluenza, così da tenere conto nel modello 2D, in maniera cautelativa, dell'influenza che gli allagamenti prodotti dall'Arbia hanno sulle aree allagate dovute alle uscite lungo gli affluenti.

### Sintesi dei risultati

Dato il contesto a carattere prevalentemente rurale non sono presenti situazioni di elevata criticità per i tempi di ritorno 30 e 200 anni. Anche nel tratto prossimo a Taverne d'Arbia, i risultati delle modellazioni mostrano che non vi sono particolari situazioni di rischio per l'abitato, in quanto quest'ultimo si trova in posizione di alto morfologico rispetto al Bozzone con un dislivello di almeno 10 m.

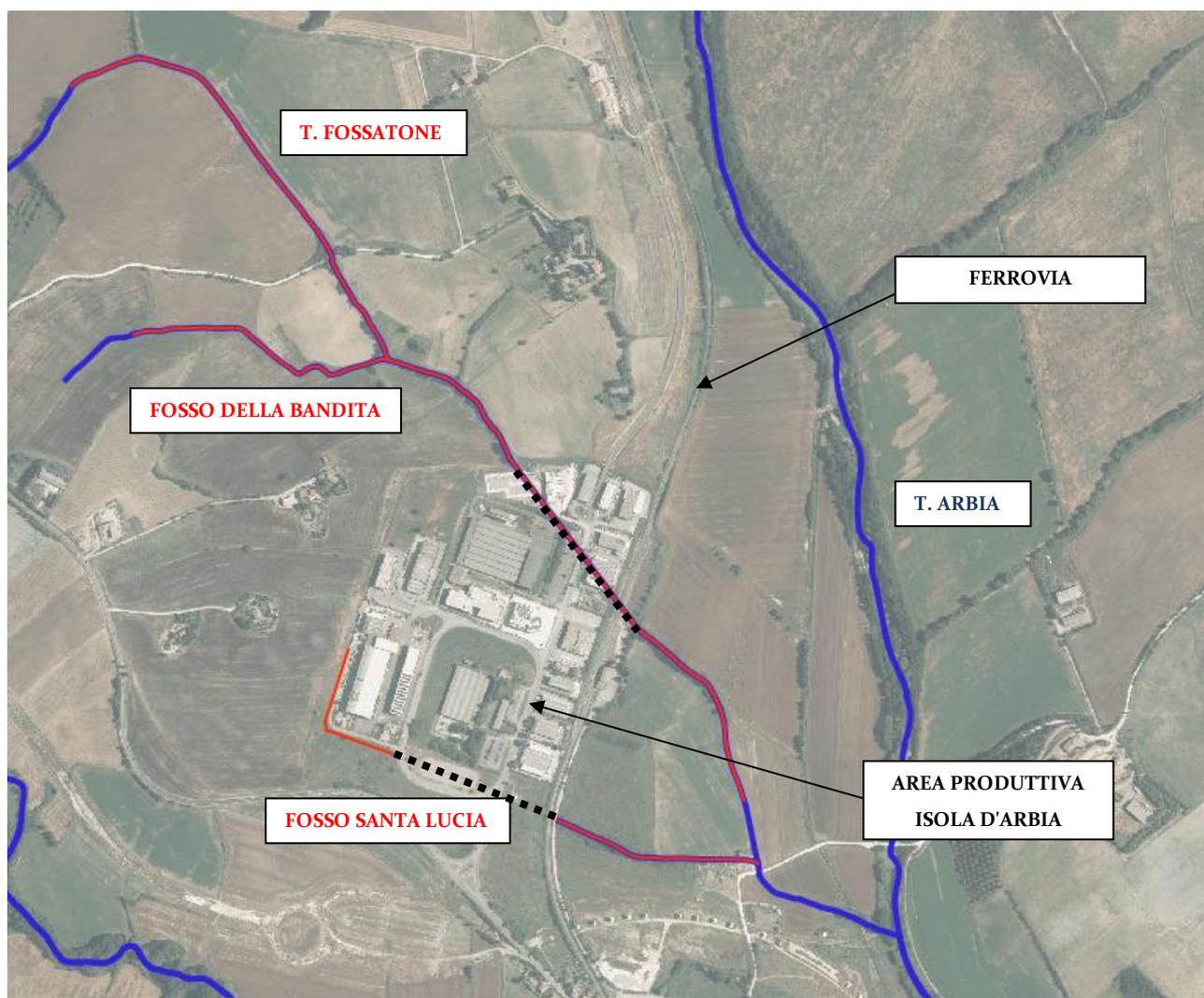
## **6.2 Modello "Fossatone"**

### Descrizione generale

Il modello comprende il Fosso del Fossatone, il Fosso della Bandita, che ne è un affluente, e il Fosso Santa Lucia (Figura 6.3). Il Fosso del Fossatone è stato modellato per 780 m a monte dell'immissione del Fosso della Bandita e per 1.2 km circa a valle della stessa, il Fosso della Bandita per circa 640 m a monte dell'immissione e il fosso Santa Lucia per circa 840 m prima dell'immissione nel Fossatone.

Il contesto in cui si muovono questi fossi è di carattere prevalentemente agricolo nei tratti di monte, mentre a valle il Fossatone e il Santa Lucia presentano due tratti tombati in corrispondenza d'Isola d'Arbia, che è un'area produttiva. Il tombamento del Fossatone si estende per circa 365 m (Figura 6.4), mentre il Santa Lucia è tombato per 308 m sotto Isola d'Arbia, torna a cielo aperto prima della ferrovia per qualche metro per poi sotto-attraversare quest'ultima.





**Figura 6.3** - Inquadramento del Fosso del Fossatone, del Fosso della Bandita e del Fosso di Santa Lucia. In Rosso le aste per la lunghezza e i tratti in cui sono state modellate. In tratteggio nero i tratti tombati dei due fossi.

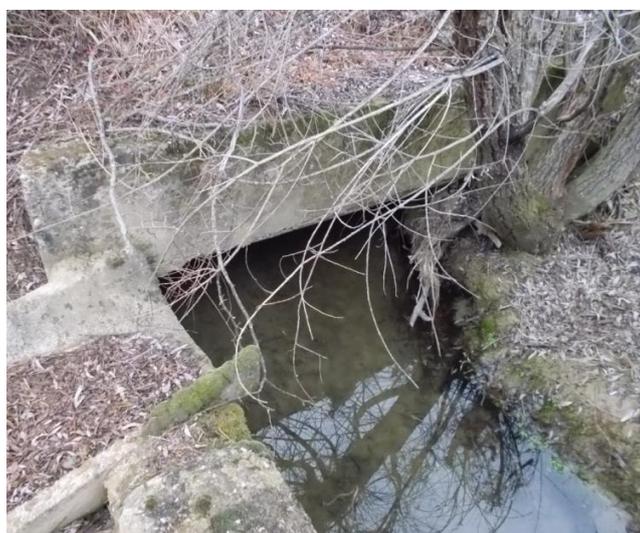
### Caratteristiche del Modello

Il modello è realizzato con HEC-RAS 5.0.7 in cui le aste fluviali sopra citate sono modellate come elementi *river* monodimensionali definiti per mezzo di *cross sections* e un'unica *storage areas 2D*.

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).



**Figura 6.4** - A sinistra sezione inizio tratto tombato e a destra fine tratto tombato del Fossatone



**Figura 6.5** - A sinistra sezione inizio tratto tombato e a destra fine tratto tombato del Santa Lucia



**Figura 6.6** - A sinistra sezione a monte e valle del sotto attraversamento della ferrovia del Santa Lucia

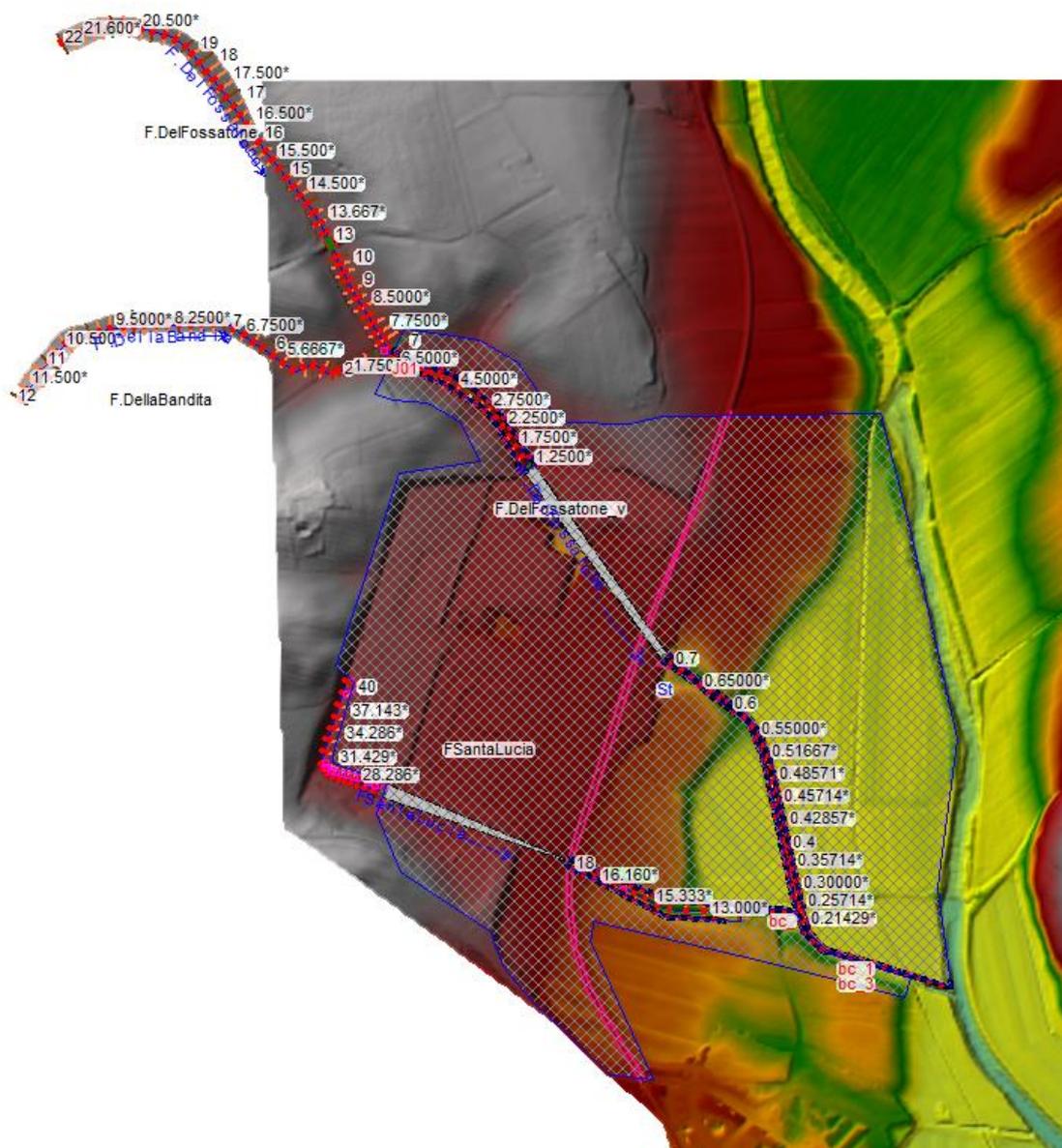


Figura 6.7 - Modello idraulico "Fossatone"

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte e degli idrogrammi distribuiti per simulare il contributo idrologico degli interbacini. Per le sezioni di valle terminali delle modellazioni si è imposto uno *stage hydrograph* costante nel tempo per simulare l'immissione nell'Arbia. La quota imposta è di 169.93 m s.l.m. per TR200 e 169.18 per Tr30, quote corrispondenti al tirante idraulico dell'area allagata dall'Arbia all'incrocio con il F. Fossatone e il S. Lucia. Le stesse condizioni al contorno sono date sulle celle nell'intorno della confluenza, così da tenere conto nel

modello 2D, in maniera cautelativa, dell'influenza che gli allagamenti prodotti dall'Arbia hanno sulle aree allagate dovute alle uscite lungo gli affluenti.

### Sintesi dei risultati

Per quel che riguarda il tratto di monte del Fossatone e il Bandita non si hanno particolari situazioni di elevata criticità per i tempi di ritorno 30 e 200 anni, tenuto conto del carattere prevalentemente rurale dell'area. Inoltre, anche nelle zone prossime a Isola d'Arbia non si verificano particolari criticità determinate dalla presenza dei due tratti tombati.

## 6.3 Modello "T. Sorra"

### Descrizione generale

Il modello comprende il Torrente Sorra e il suo affluente (Figura 6.8).

Il T. Sorra è stato modellato per 780 m circa, mentre il suo affluente è modellato per 450 m della sua immissione nel Sorra.

Il contesto in cui si muovono questi fossi è di carattere sia agricolo (in destra del Sorra e in sinistra del suo affluente) che urbano (nell'area compresa tra gli stessi). I due corsi d'acqua, infatti, transitano perimetralmente all'area di Pian delle Fornaci e dell'ippodromo. In particolare, procede da monte, transita sotto la rotatoria della SS73 (Figura 6.9), corre lungo la stessa in direzione dell'ippodromo, ne sotto-attraversa la pista (Figura 6.10), prosegue all'interno dell'area dello stesso, lo ri-attraversa (Figura 6.11) per poi proseguire verso valle. Il suo affluente si immette a valle dell'ippodromo e lo costeggia in destra idraulica (Figura 6.12).

### Caratteristiche del Modello

Il modello è realizzato con HEC-RAS 5.0.3 in cui le aste fluviali del T. Sorra e del suo affluente sono modellate come elementi *river* monodimensionali definiti per mezzo di *cross sections*. Sono poi inserite tre *storage areas 2D*, una in destra del Sorra, una in sinistra del suo affluente e una nell'area compresa.



Figura 6.8 - Inquadramento del T. Sorra. In Rosso le aste per le lunghezze e i tratti in cui sono stati modellati.

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte e la *normal depth* pari alla pendenza del fondo alveo nel tratto finale per le sezioni a valle del modello. Sono state poi inserite degli *lateral inflow* per simulare l'ingresso del T. Alfino nel Sorra e del secondo affluente dello stesso a valle di quello modellato.



**Figura 6.9** - Vista da monte dell'attraversamento della rotatoria sulla SS73



**Figura 6.10** - Vista da valle dell'attraversamento dell'ippodromo



**Figura 6.11** - Vista da monte dell'attraversamento dell'ippodromo



**Figura 6.12** - Vista dell'affluente che costeggia l'ippodromo

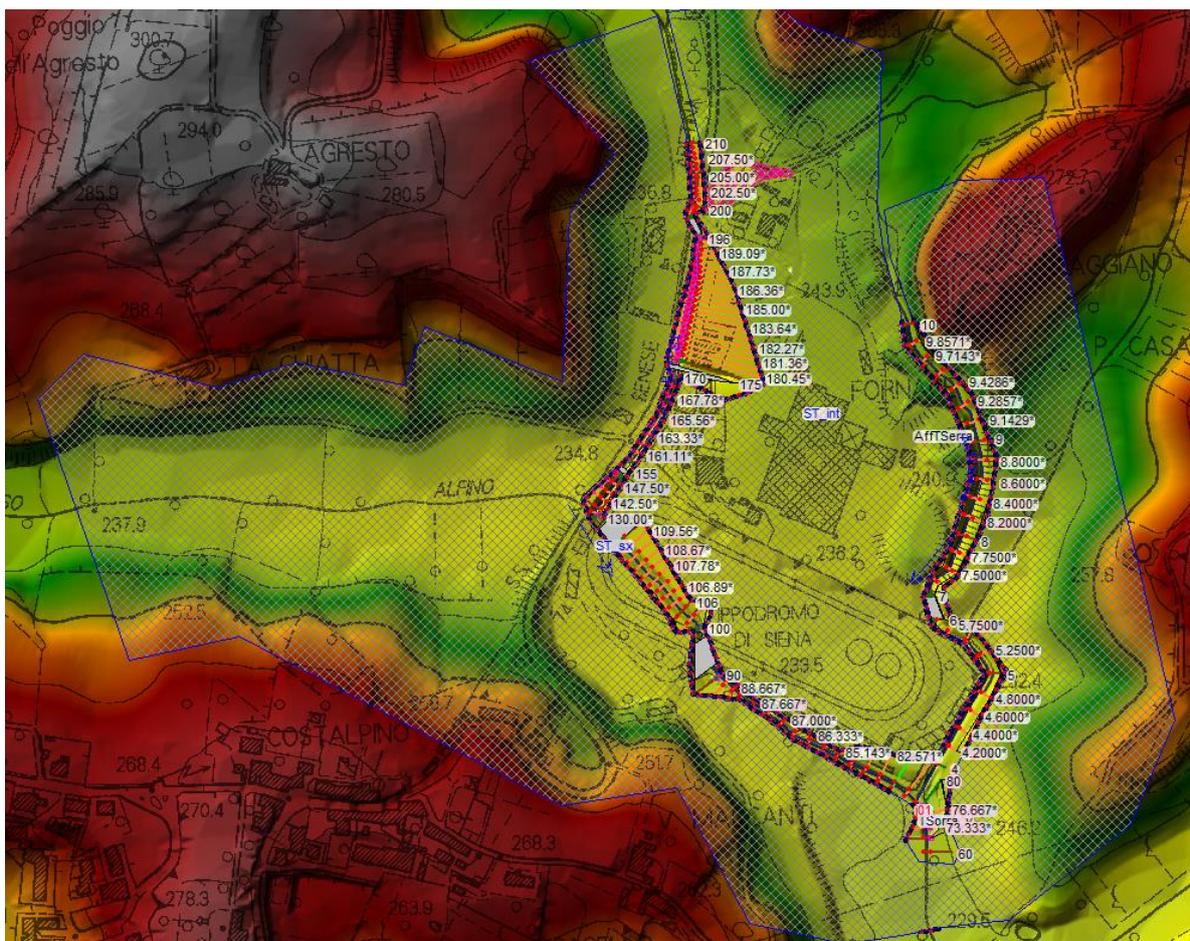


Figura 6.13 - Modello idraulico "T. Sorra"

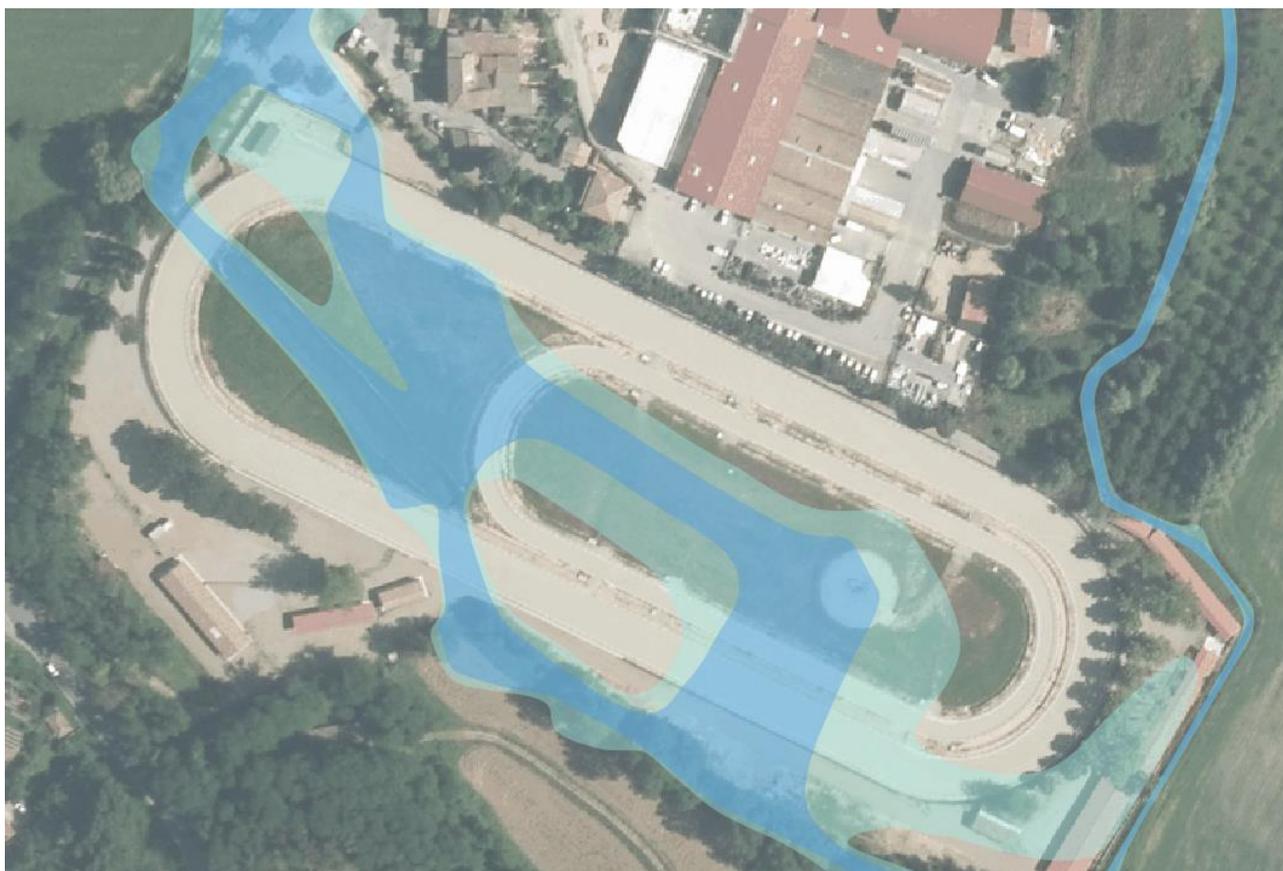
### Sintesi dei risultati

Le aree urbane del Pian delle Fornaci sono interessate da diverse criticità sia per effetto delle esondazioni in sinistra e in destra a valle dell'attraversamento della rotatoria sia nelle aree in cui il fosso costeggia la strada per effetto dei rigurgiti prodotti dagli attraversamenti e dagli accessi alle abitazioni lungo la strada (Figura 6.14).

Anche l'area contermina all'ippodromo è interessata da scenari di fenomeni alluvionali sia per Tr30 che per Tr200 (Figura 6.15).



**Figura 6.14** - Indicazione del punto di uscita dell'acqua (freccia blu) lungo SS73. Vista degli allagamenti per Tr200 (tratteggio blu) e Tr30 (tratteggio nero).



**Figura 6.15** - Estratto della carta delle aree allagate per TR200 (celeste) e Tr30 (blu).

#### 6.4 Modello "T. Sorra – area di laminazione"

##### Descrizione generale

In occasione della realizzazione della rotatoria sulla SS73, a Nord dell'abitato di Pian delle Fornaci, fu costruita un'area di espansione finalizzata alla messa in sicurezza della stessa (Figura 6.16).



Figura 6.16 – Area di laminazione sulla SS73 e vista del T. Sorra

Con l'obiettivo di studiare i mutui effetti tra l'area di laminazione e il T. Sorra si è predisposto un modello ad hoc in cui è stato modellato il collegamento idraulico tra l'area di laminazione e il T. Sorra.

### Descrizione del modello

Il modello è realizzato con HEC-RAS 5.0.7 in cui l'asta fluviale del collegamento con il T. Sorra è modellata come elemento *river* monodimensionale definito per mezzo di *cross sections* (Figura 6.19).

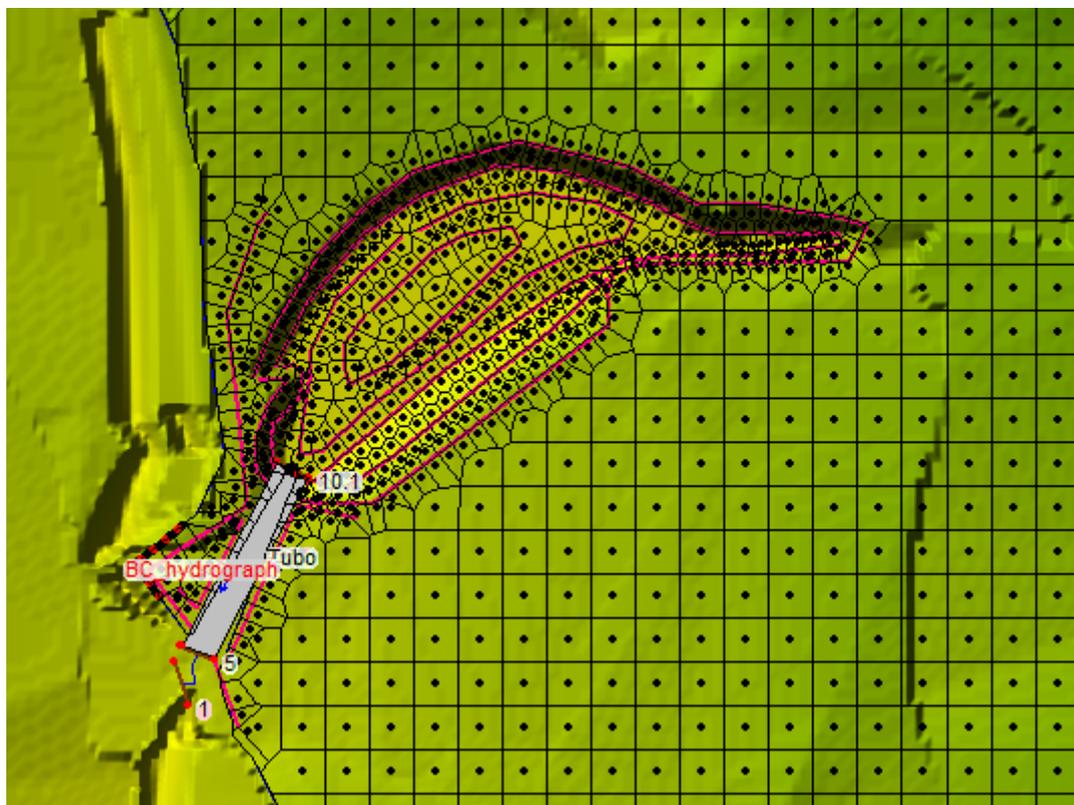


Figura 6.17 – Inquadramento generale del modello T.

Come condizione di valle è stato dato lo *stage hydrograph* della sezione del T. Sorra nella sezione di collegamento con il T. Sorra e l'idrogramma in uscita, valutato col modello descritto nel precedente paragrafo e che allaga l'area di laminazione.

### Sintesi dei risultati

Le aree in esondazione dal T. Sorra ricadono nell'area di laminazione, garantendo il non allagamento della rotatoria sulla SS73; ad ogni modo, dato il volume esiguo dell'area di laminazione, questa non incide significativamente sulle aree allagate di valle. D'altro canto, l'intervento di messa in sicurezza realizzato in fase di esecuzione della rotatoria, è servito esclusivamente alla messa in sicurezza della stessa, senza aggiungere effetti di mitigazione sulle condizioni di allagamento a valle (così come dichiarato nella relazione tecnica del progetto).

## 6.5 Modello "T. Tressa"

### Descrizione generale

Il modello comprende il tratto del T. Tressa che va dall'incrocio tra la Statale 674 e la Strada di Montalbuccio fino alla confluenza con il T. Arbia.

Il fosso costeggia nel tratto di monte la tangenziale ovest di Siena. Lungo il tracciato sono presenti vari attraversamenti. Per un tratto di circa 180 metri, in prossimità della zona commerciale di Massetana Romana (Figura 6.22), l'alveo presenta una sezione rettangolare rivestita in calcestruzzo, dei quali circa 80 metri risultano a sezione chiusa. È inoltre presente una traversa di epoca medioevale, legata al sistema dei mulini posti a valle (con funzione di presa per derivazione del canale di carico), collocata all'uscita del tratto che corre al di sotto della tangenziale (Figura 6.19).

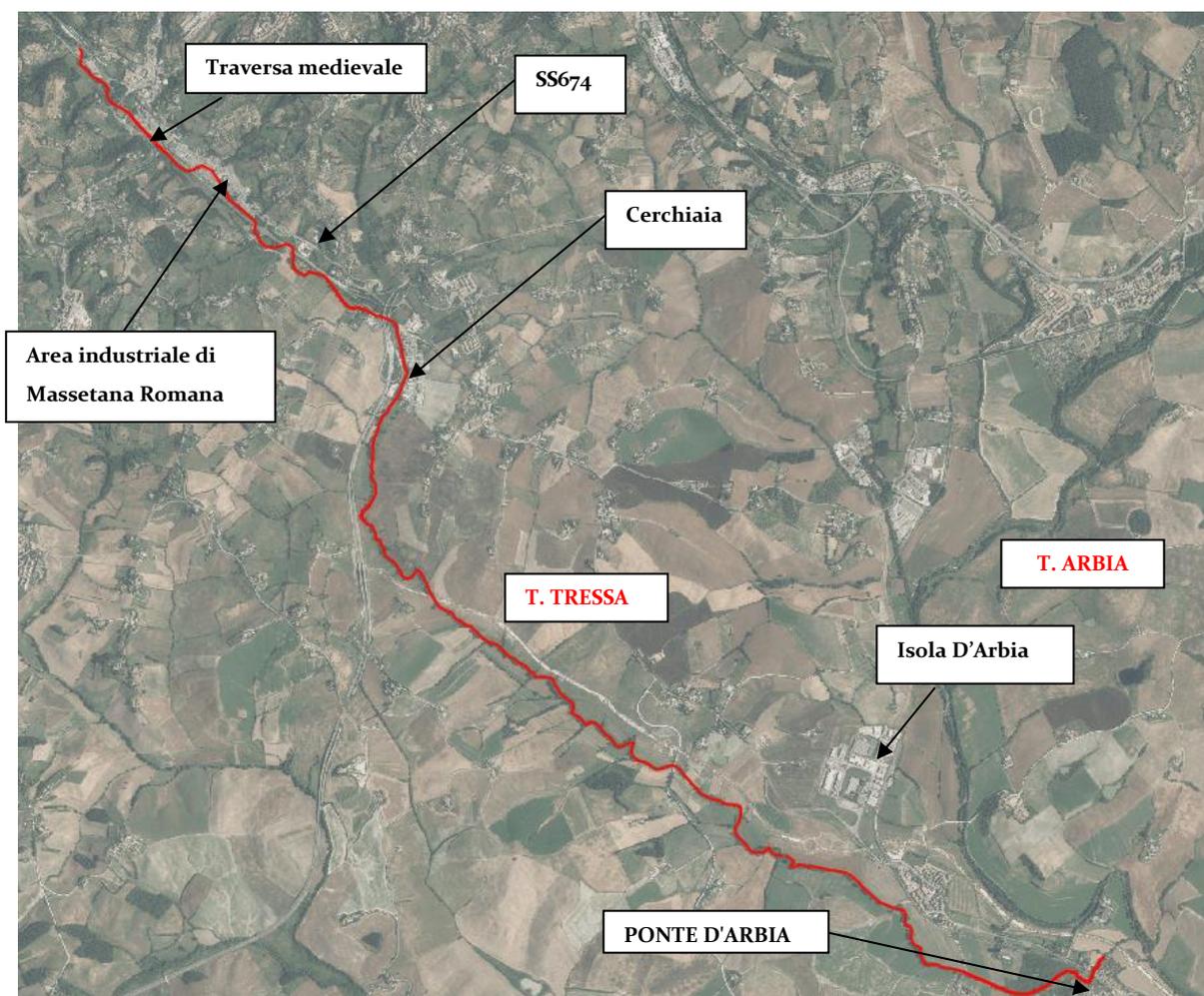


Figura 6.18 - Inquadramento generale del T. Tressa



**Figura 6.19** – Ciò che rimane di una traversa di epoca medioevale



**Figura 6.20** - Tratto in cui il Tressa sotto attraversa la tangenziale ovest



**Figura 6.21** - Tratto in cui il Tressa sotto attraversa la tangenziale ovest. Immissione del Pescaia completamente tombato



**Figura 6.22** - Tratto a sezione rettangolare nella zona commerciale di Massetana Romana



**Figura 6.23** - Sotto attraversamento del Tressa sullo svincolo della tangenziale ovest



**Figura 6.24** - Guado a ruota bagnata in località Cerchiaia

### Caratteristiche del Modello

Il modello è realizzato con HEC-RAS 5.0.7 in cui l'asta fluviale del T. Tressa è modellata come elemento river monodimensionale definito per mezzo di *cross sections*.

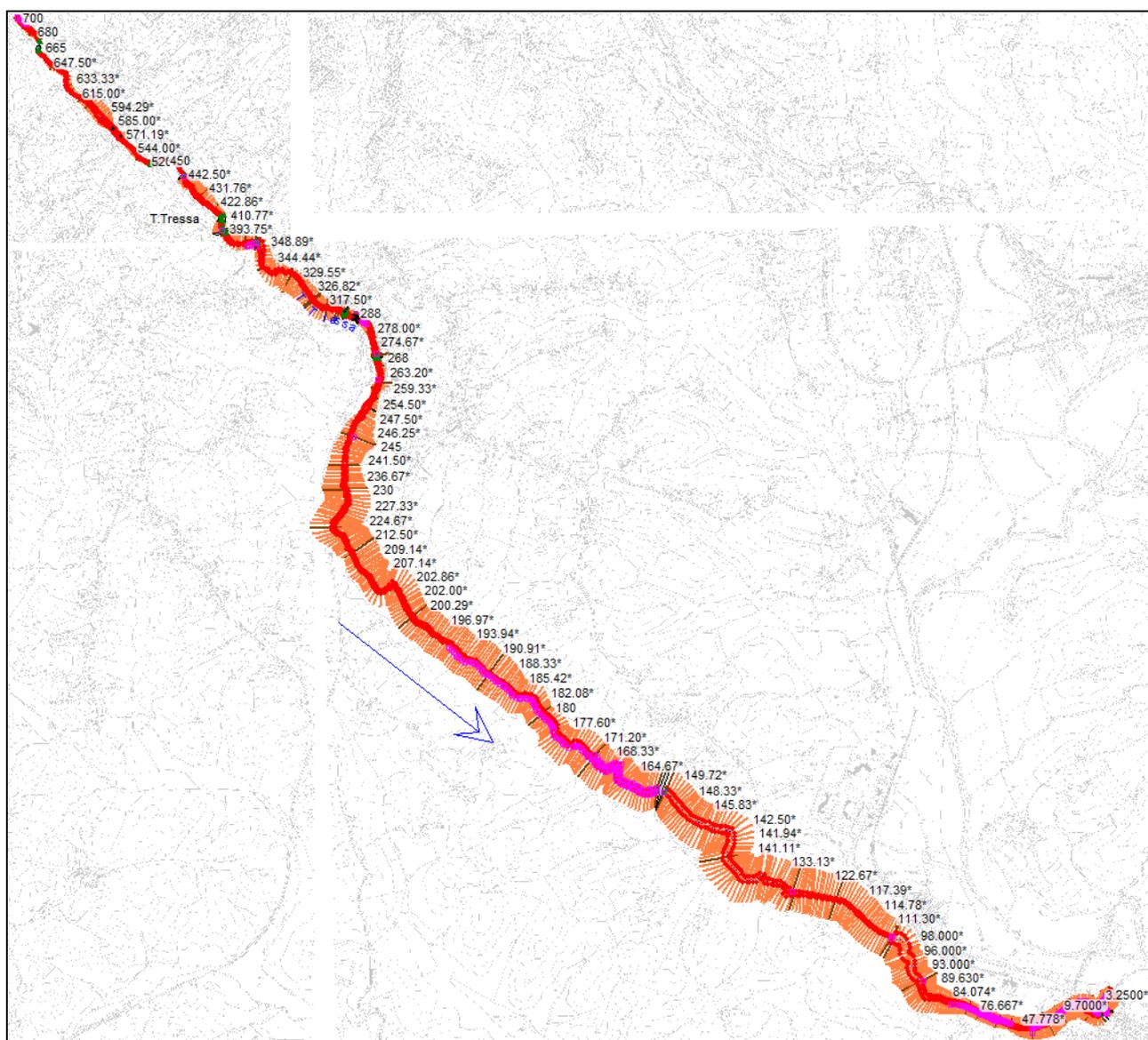


Figura 6.25 - Modello "T. Tressa"

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni associati a durate di piogge di 3 e 5 ore; la prima massimizza le portate di piena alla sezione di chiusura a valle di località Cerchiaia, mentre la seconda a quella di valle.

Per quel che riguarda invece le condizioni al contorno di valle, sono stati utilizzati i valori dei tiranti idraulici delle aree allagate del T. Arbia in corrispondenza dell'ultima sezione del modello. Tali tiranti sono per la durata di pioggia di 3 e 5 ore pari a 166.05 e 165.17 m slm.

### Sintesi dei risultati

Non sono da segnalare particolari criticità riscontrate per gli scenari di allagamento per Tr<sub>30</sub> e per Tr<sub>200</sub> anni. Ciò vale anche per il tratto di monte che costeggia la tangenziale, tenuto conto dell'elevato dislivello tra il piano d'imposta della strada e il corso d'acqua.

In effetti, la conformazione morfologica incisa del corso d'acqua e delle aree contermini determina la permanenza nell'ambito fluviale dei volumi idrici senza che si manifestino fenomeni esondativi e di immagazzinamento nelle aree circostanti.

## **6.6 Modello "F. Paradiso"**

### Descrizione generale

Il modello comprende il tratto del F. Paradiso in zona "La Veloce" per una lunghezza complessiva di circa 260 m con 7 sezioni rilevate (Figura 6.26).

Il Fosso Paradiso proviene da monte in un'area a carattere prevalentemente boschiva, sotto attraversa Strada di Pieve a Bozzone e si tomba subito dopo andando a raccordarsi con il Riluogo nel suo tratto tombato.

### Caratteristiche del Modello

Il Fosso Paradiso è modellato per il tratto a "cielo aperto" con HEC-RAS 5.0.3. La geometria del river è definita tramite 7 sezioni idrauliche ed il modello è monodimensionale.

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).



Figura 6.26 - Inquadramento "F. Paradiso"

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte e la *normal depth* pari alla pendenza del fondo alveo nel tratto finale per le sezioni di valle del modello. Gli idrogrammi in uscita nella sezione di valle sono poi utilizzati come condizione al contorno di monte per il successivo modello su EPA-SWMM del Rilugo monte.

#### Sintesi dei Risultati

La conformazione morfologica incisa del corso d'acqua e delle aree contermini determina la permanenza nell'ambito fluviale dei volumi idrici senza che si manifestino fenomeni esondativi e di immagazzinamento nelle aree circostanti.



**Figura 6.27** - Inizio del modello F. Paradiso (sezione di monte)



**Figura 6.28** - Vista del Fosso Paradiso a monte del culvert



**Figura 6.29** - Culvert sul Fosso Paradiso immediatamente a monte dell'attraversamento della Strada di Pieve a Bozzone



**Figura 6.30** - Inizio tratto tombato del F. Paradiso

## 6.7 Modello "T. Riluogo monte"

### Descrizione generale

Il modello comprende il tratto del T. Riluogo lungo 3300 m a partire dall'inizio, dove il T. Riluogo è solo una canaletta stradale (SS222 tra le due rotonde di Via delle Province, sul confine comunale) fino alla rotonda di Via Pietro Toselli, comprendendo quindi i tratti tombati a monte e a valle della stazione ferroviaria, prima del lungo tombamento di Via Toselli.

Le geometrie dei tratti tombati sono state determinate sulla base dei rilievi condotti in sito.

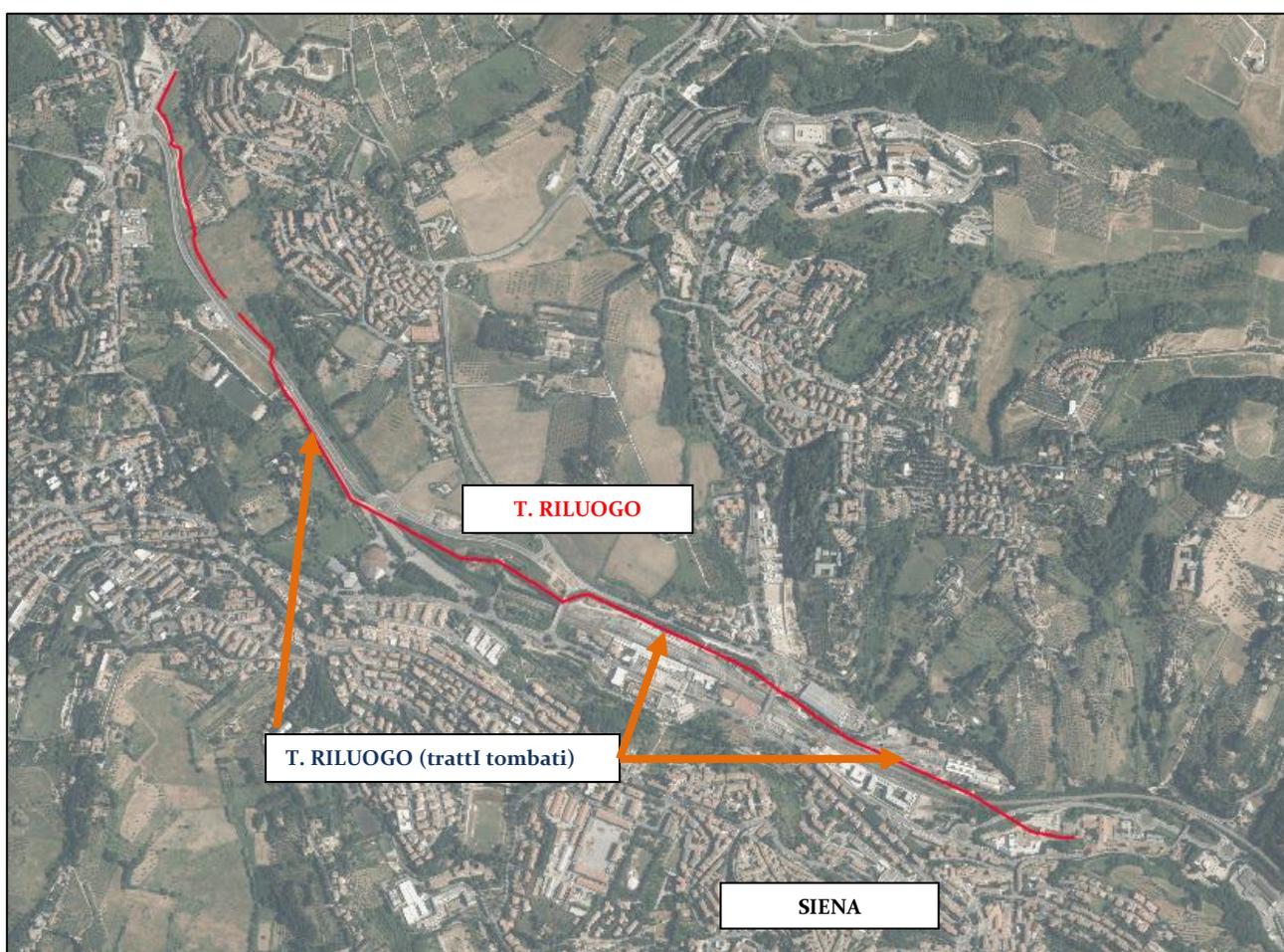


Figura 6.31 - Inquadramento "T. Riluogo monte"

### Caratteristiche del Modello

Il modello è realizzato con HEC-RAS 5.0.7 in cui l'asta fluviale del T. Riluogo modellato come

elemento *river* monodimensionali definito per mezzo di 41 *cross sections*. Sono poi inserite tre *storage areas 2D*, due in destra e sinistra idraulica del T. Riluogo nel tratto di monte, prima del primo tombamento, e l'altra a valle del primo tombamento e che interessa l'area della stazione ferroviaria.

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte e la *normal depth* pari alla pendenza del fondo alveo nel tratto finale per le sezioni a valle del modello. Sono state poi inserite dei *lateral inflow* e delle *uniform lateral inflow* per simulare tutti gli input idrologici elencati nella precedente Tabella 4.7.

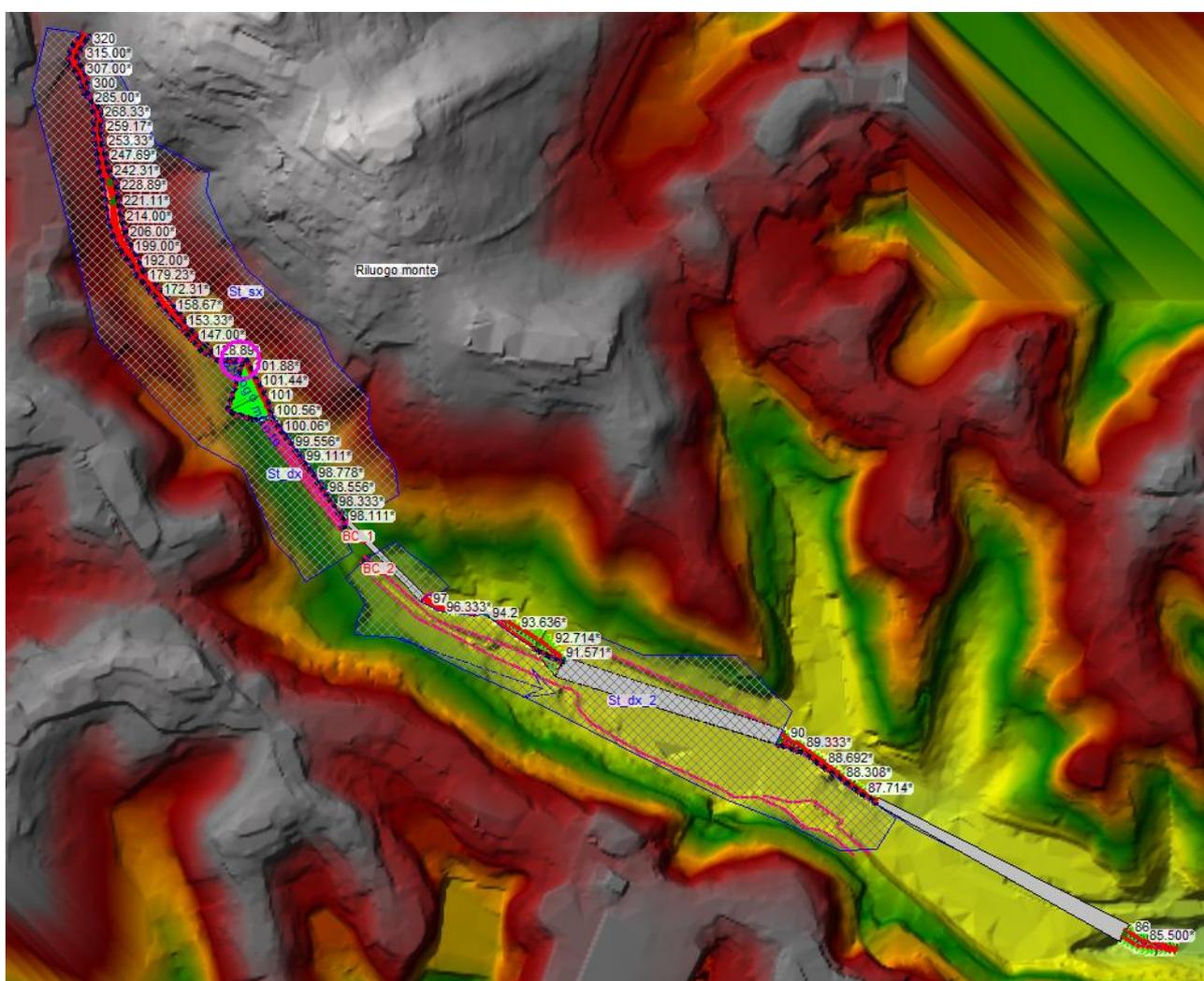


Figura 6.32 - Modello "T. Riluogo monte"

### Sintesi dei risultati

Le aree urbane comprese nell'area di studio sono interessate da diverse criticità. Il primo lungo tombamento del T. Riluogo risulta insufficiente a smaltire la portata idraulica defluente; esce in destra idraulica e viene canalizzato lungo la galleria ferroviaria sotto la rotatoria e, attraversandola, allaga le aree interessate dai binari e della stazione ferroviaria, dove il T. Riluogo è nuovamente tombato, per poi rientrate nel corso d'acqua a valle, secondo quanto indicato nella successiva Figura 6.33. Ciò accade sia per Tr 30 che per Tr 200 anni, per le quali la dinamica di esondazione è sostanzialmente la stessa.



**Figura 6.33** – Principali criticità idrauliche; l'area della stazione ferroviaria.

## 6.8 Modello "T. Riluogo intermedio – EPA SWMM"

### Descrizione generale

Il modello comprende il tratto del T. Riluogo lungo 2700 m a partire dalla stazione ferroviaria fino alla località Due Ponti. In questa zona il T. Riluogo risulta quasi esclusivamente tombato, ad eccezione del

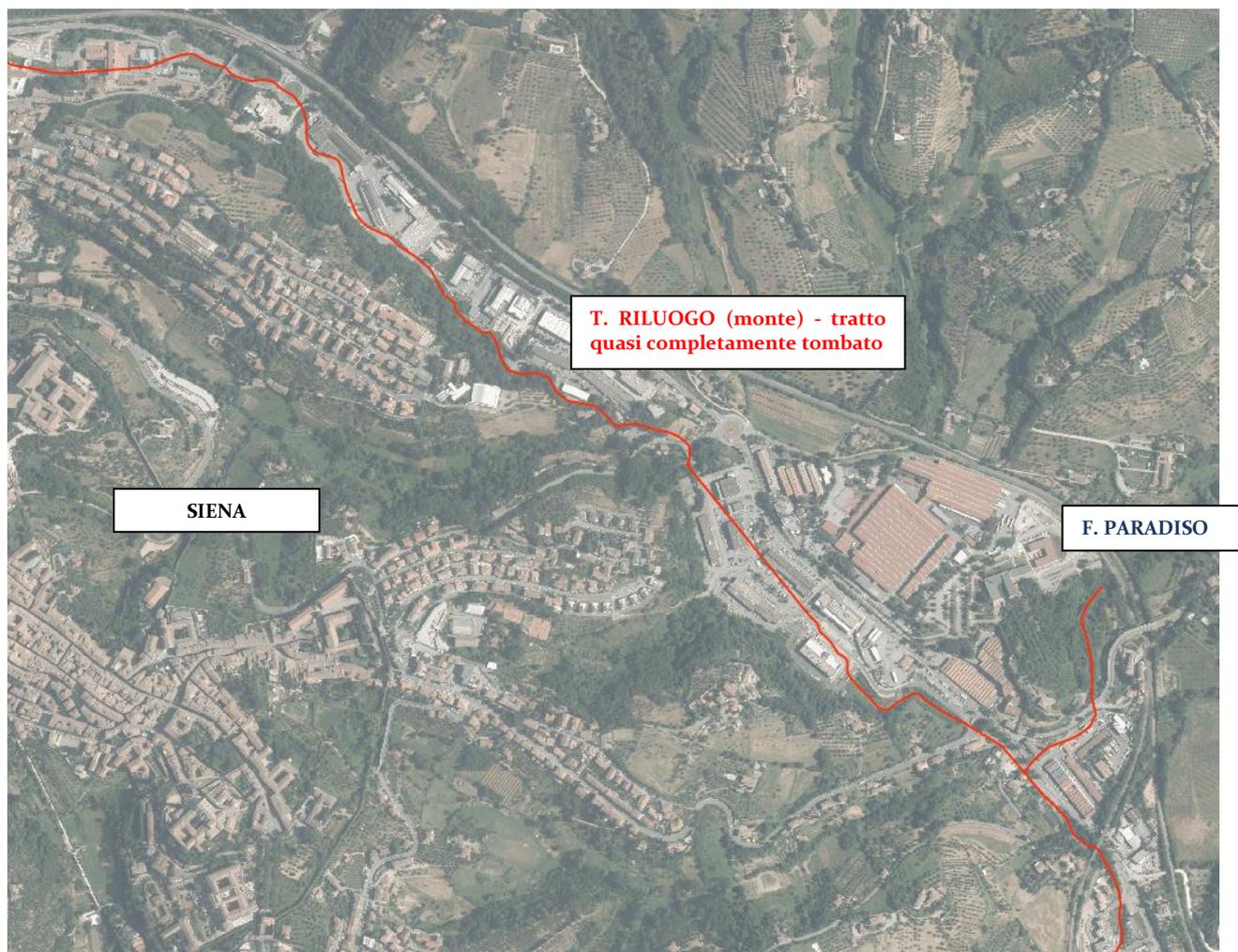


Figura 6.34 - Inquadramento "T. Riluogo monte"

tratto iniziale a monte del complesso Ex Socini e di quello a monte dello svincolo fra Viale Toselli e la SS Senese Aretina (zona Due Ponti).

Le geometrie degli elementi tombati, così come quella dei tombini sono state determinate a partire dalle geometrie riportate nel precedente studio idraulico a supporto del RU vigente del Comune di Siena svolto dall'Ing. Claudio Lombardi.

### Caratteristiche del Modello

Il modello è stato realizzato con il codice di calcolo EPA-SWMM 5.1. La geometria è definita per mezzo di nodi (i pozzetti) e di condotte (i tratti tombati). Nei tratti a cielo aperto di monte del modello e a

monte dell'immissione col Paradiso sono state inserite le sezioni idrauliche tramite l'elemento *transect* per sezioni irregolari (quelle che non sono tipiche dei tratti fognari).

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali nel caso degli elementi *transect*, mentre per gli elementi di fognatura in calcestruzzo si è utilizzato un valore del manning pari a  $0.018 \text{ s m}^{-1/3}$  costante sulla sezione.

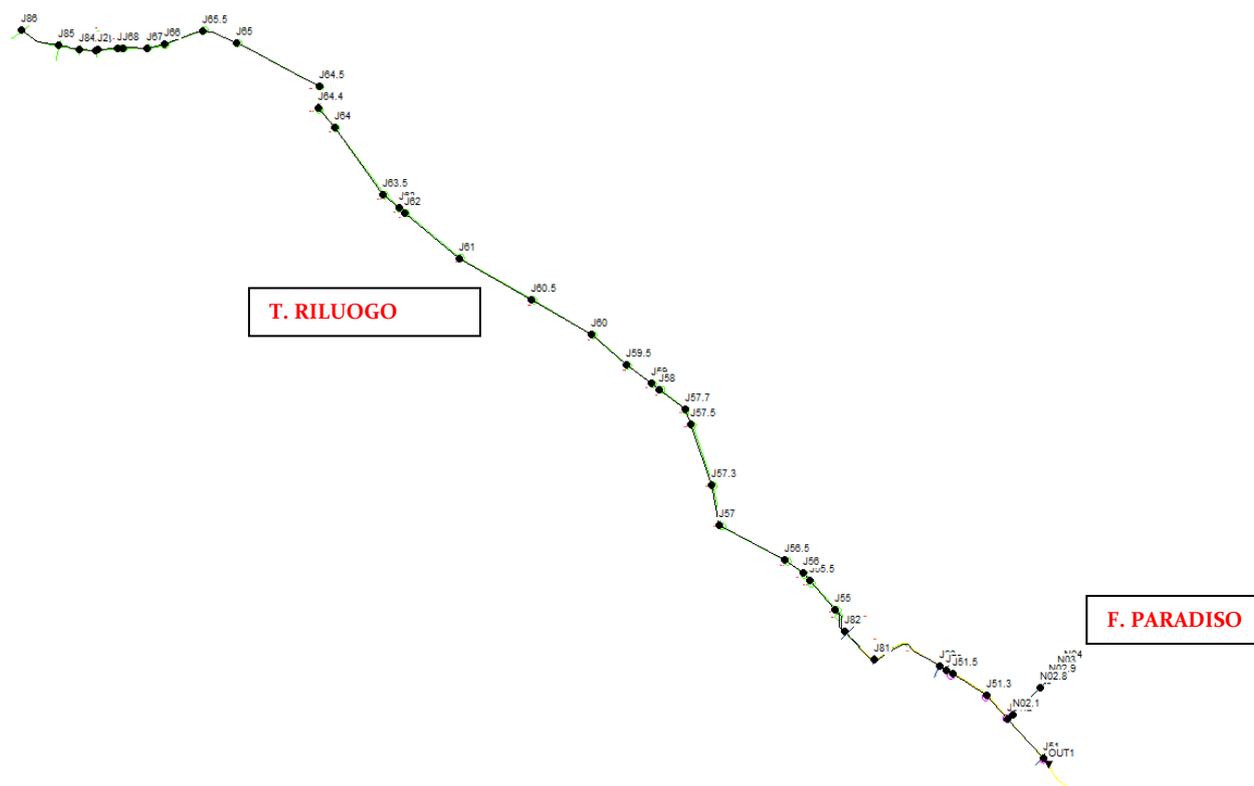


Figura 6.35 - Modello "T. Riluogo monte"

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte. Inoltre per tener conto delle immissioni laterali degli interbacini, si è distribuito in funzione della lunghezza su ogni nodo delle *lateral inflow*. La condizione di valle scelta, tra quelle possibile, è di tipo *free*.

Gli idrogrammi di uscita per  $Tr_{30}$  e  $Tr_{200}$  dal nodo  $OUT_1$ , che è quello finale della modellazione su EPA-SWMM, sono stati poi utilizzati come condizione al contorno di monte per il modello a valle del Riluogo nel tratto a "cielo aperto".

### Sintesi dei Risultati

La modellazione per TR<sub>30</sub> anni mostra che le sezioni degli elementi fognari sono sufficienti a garantire lo smaltimento delle portate, senza che si verificano fenomeni alluvionali.

Lo scenario di alluvione per Tr<sub>200</sub> è, invece, sostanzialmente differente, in quanto la capacità di trasporto delle condotte fognarie non è sufficiente allo smaltimento delle portate, così che si verificano esondazioni dai tombini, i cui effetti, in termini di aree allagate, sono stati valutati col codice di calcolo FLO-2D.

Nelle Figura 6.36 e Figura 6.37 sono riportate le posizioni dei tombini nei punti di fuoriuscita dal sistema fognario.

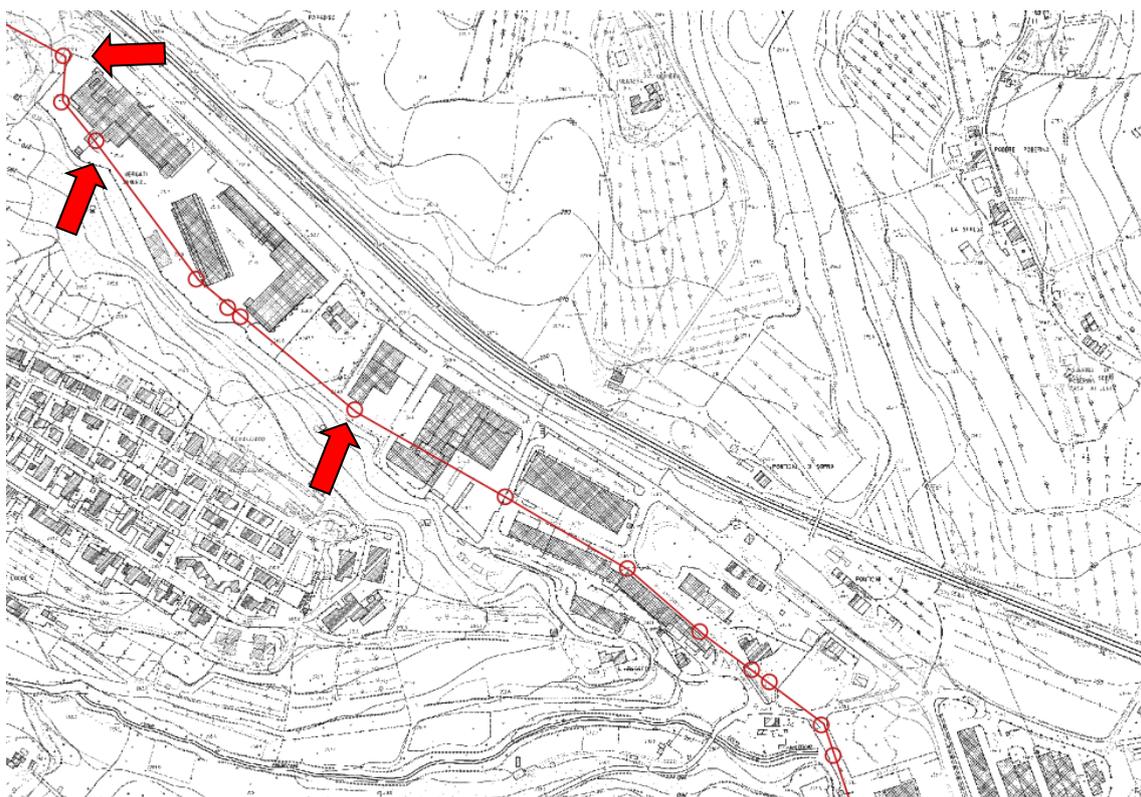


Figura 6.36 - Estratto da CTR 2k con individuazione dei nodi critici soggetti ad allagamento.

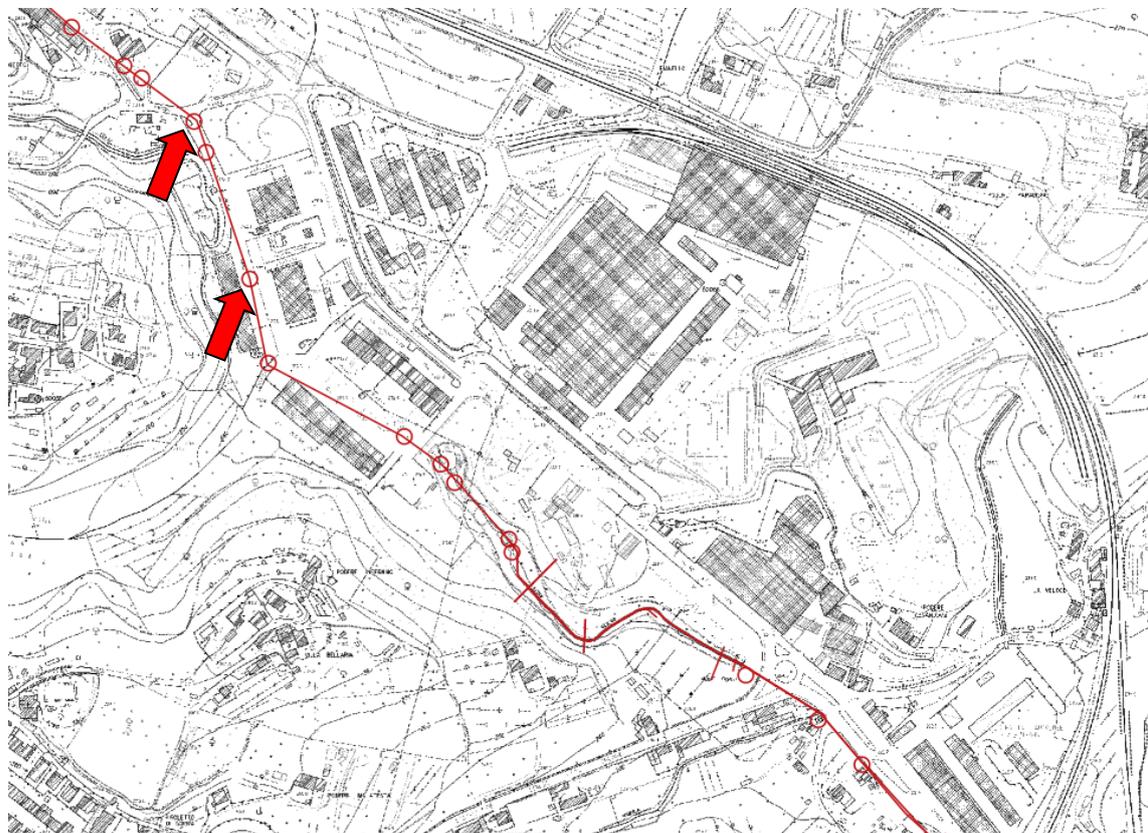


Figura 6.37 - Estratto da CTR 2k con individuazione dei nodi critici soggetti ad allagamento.

## 6.9 Modello "T. Riluogo" - FLO 2D

### Caratteristiche del Modello

Il modello con FLO-2D è costituito da celle di 10 m e comprende tutta l'area circostante il tratto del Riluogo tombato e che quindi è potenzialmente suscettibile ad allagamento.

L'area in questione è fortemente urbanizzata e a carattere prevalentemente industriale, così che si è assunto un coefficiente di Manning da inserire nel codice pari a 0.11. Inoltre, per tenere conto della presenza degli edifici, che costituiscono un ostacolo per il naturale deflusso delle acque, è stato assegnato alle celle su cui gli edifici sono ubicati una condizione *Area Reduction Factor* in tutte le direzioni pari a 1.

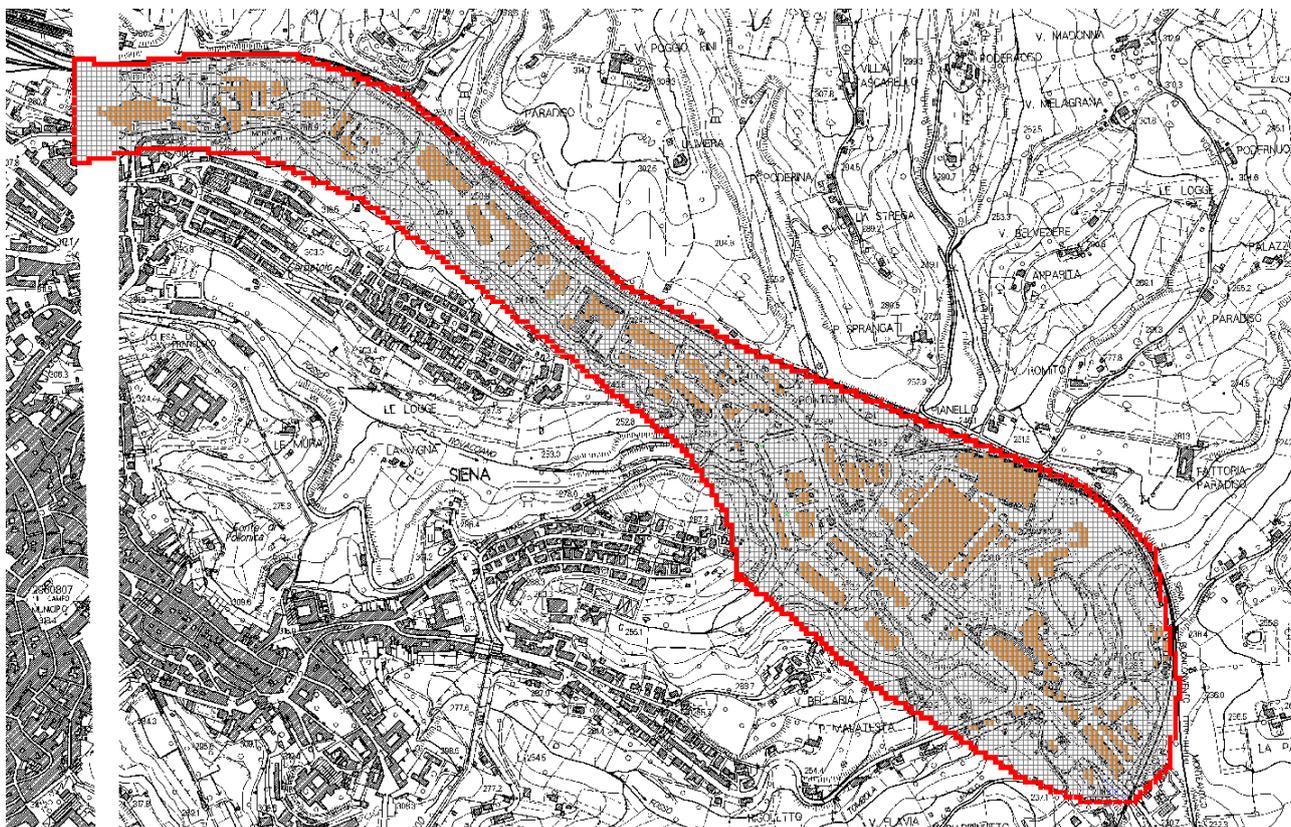


Figura 6.38 - Vista del modello su FLO 2D. In rosso il confine della *Computational Area*

### Sintesi dei Risultati

I risultati di tale modellazione sono riportati nelle tavole allegate. Di seguito un estratto delle aree allagate su CTR 2K, al fine di evidenziare le aree potenzialmente allagabili, per evento con Tr 200

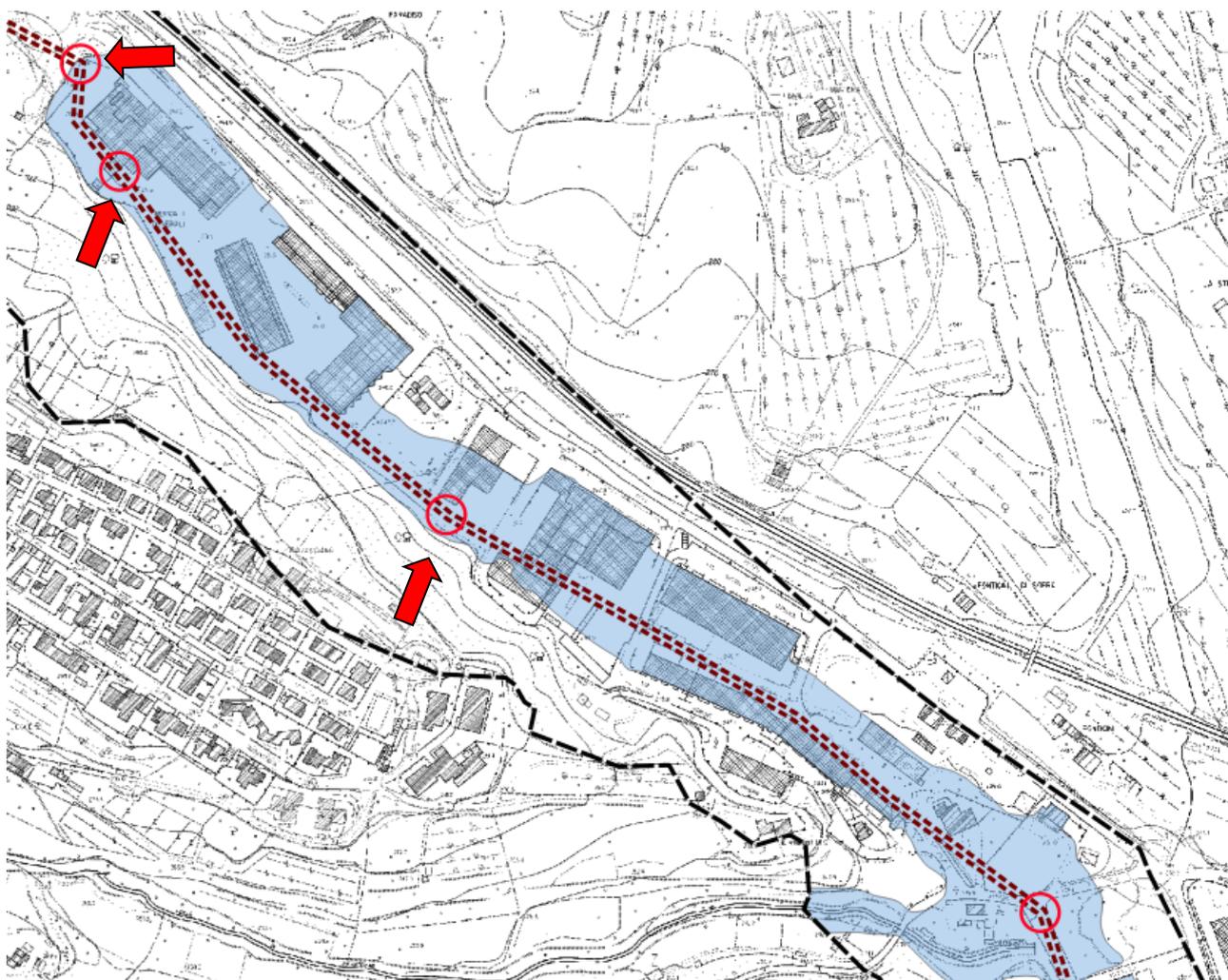


Figura 6.39 - Scenario di allagamento per Tr200. Parte di monte del modello.

anni, le zone a monte del complesso Ex-Socini, le zone dei Mercati Generali, di Via dell'Artigianato, di Via Bruno Marzi e Piazza dei Maestri del Lavoro e dell'innesto di Via Aretina su V.le Toselli in loc.tà Due Ponti.

Nel caso delle condotte fognarie gli allagamenti sono normalmente prodotti da un funzionamento in pressione dei manufatti, che nel caso specifico è dovuto principalmente a sezioni idrauliche non in grado di smaltire tutta la portata immessa, in particolar modo in corrispondenza di restringimenti che causano rigurgiti a monte degli stessi.

I volumi complessivamente esondati sono dell'ordine di 64.400 m<sup>3</sup>, la distribuzione areale degli stessi dipende dalle caratteristiche morfologiche del terreno nell'area, ribassato rispetto alle zone contermini (è la valle alluvionale del Riluogo stesso).

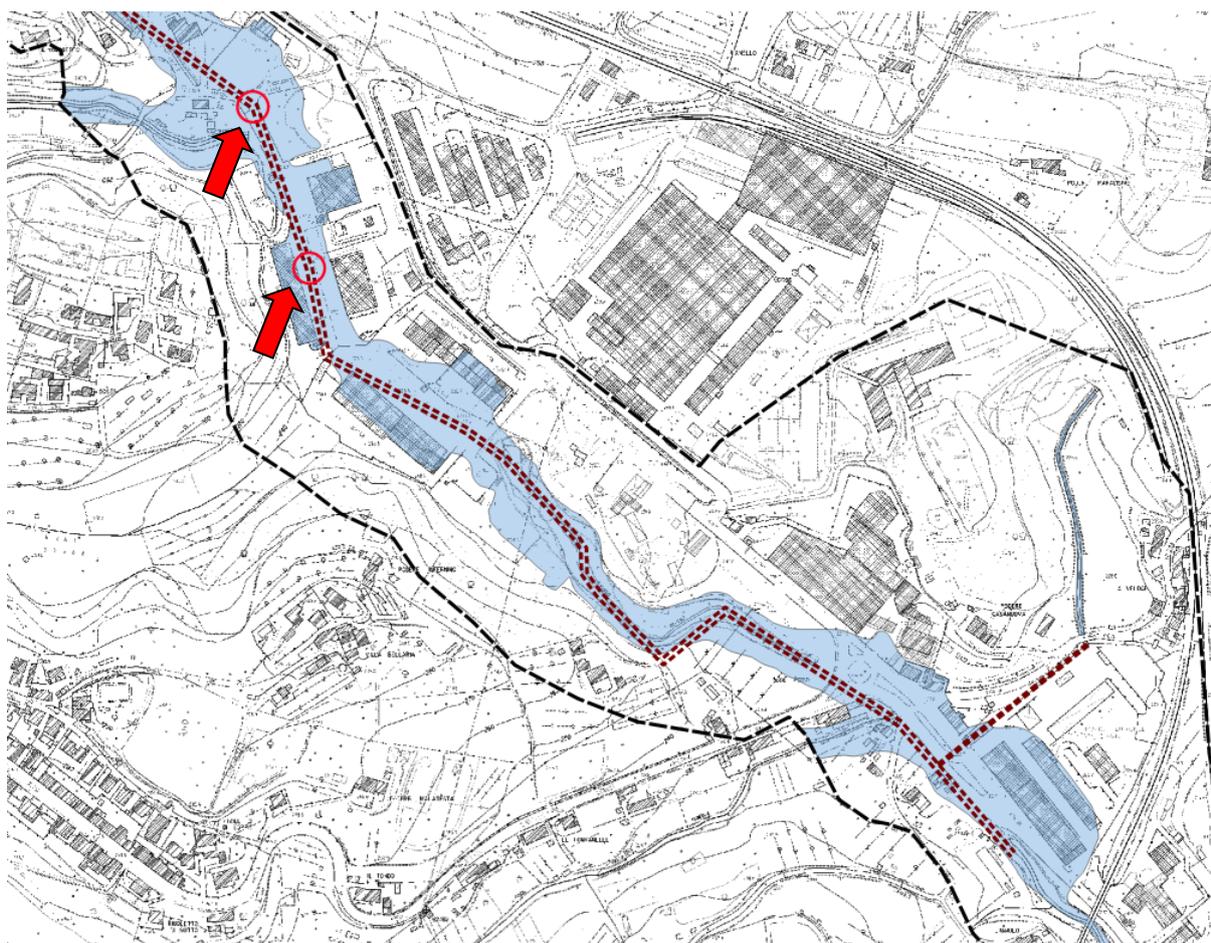


Figura 6.40 - Scenario di allagamento per Tr200. Parte di valle del modello.

## 6.10 Modello "T. Riluogo intermedio"

### Descrizione generale

Il modello comprende il Torrente Riluogo a valle del tratto tombato e il suo affluente, il Fosso del Borrino (Figura 6.41). Il Torrente Riluogo è modellato con 34 sezioni, mentre il Borrino con 19. Il Riluogo si estende per 2.85 km a valle del tratto tombato, mentre il Borrino per 1.25 km a monte dell'immissione nel Riluogo.

Nel tratto di monte il Riluogo attraversa parte dell'area industriale di Siena, con diversi sotto attraversamenti e tombamenti, assumendo in alcune aree una sezione rettangolare, costeggia la Strada statale Siena-Bettolle, sotto attraversa lo svincolo della SS223 e si unisce al Borrino.



**Figura 6.41** - Inquadramento "T. Riluogo intermedio" e del "Fosso Borrino"

Quest'ultimo invece, attraversa nelle zone di monte un'area a carattere prevalentemente agricolo, sotto-attraversa la ferrovia, si tomba a monte della zona "Il Piano" per 190 m, per poi uscire di nuovo in una zona a carattere prevalentemente agricolo.

Nel seguito si riporta un report fotografico di alcuni dei punti di maggiore interesse del corso d'acqua e degli elementi rilevati in sede di sopralluogo.

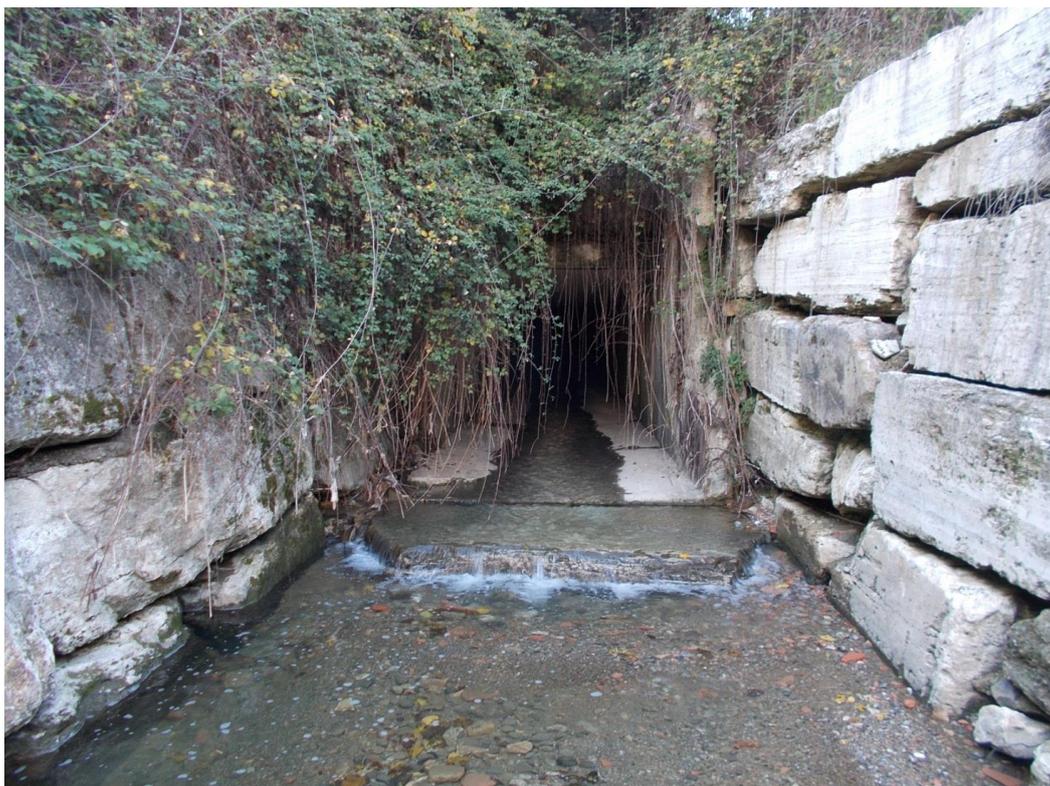


Figura 6.42 - Uscita dal tratto tombato del Rilugo monte



Figura 6.43 - Sezione rettangolo e attraversamenti del Rilugo nelle zone dell'area industriale di Siena



**Figura 6.44** - Sezione rettangolare e attraversamenti del Riluogo nelle zone dell'area industriale di Siena



**Figura 6.45** - Sezione in uscita tombamento sotto attraversamento del Riluogo della Strada del Ruffolo



**Figura 6.46** - Briglia sul Rilugo tra sotto attraversamento Strada del Rufolo e quello in prossimità della Caserma dei Vigili del Fuoco



**Figura 6.47** - Sezione in uscita tombamento sotto attraversamento zona Vigili del Fuoco



**Figura 6.48** - Sezione in ingresso tombamento F. Borrino



**Figura 6.49** - Sezione in uscita tombamento F. Borrino

### Caratteristiche del Modello

Il modello è realizzato con HEC-RAS 5.0.7 in cui le aste fluviali del T. Riluogo e del suo affluente sono modellate come elementi *river* monodimensionale definite per mezzo di *cross sections*. Tali elementi sono poi collegati con delle *lateral structures* ad un'unica *Storage Area 2D*.

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).

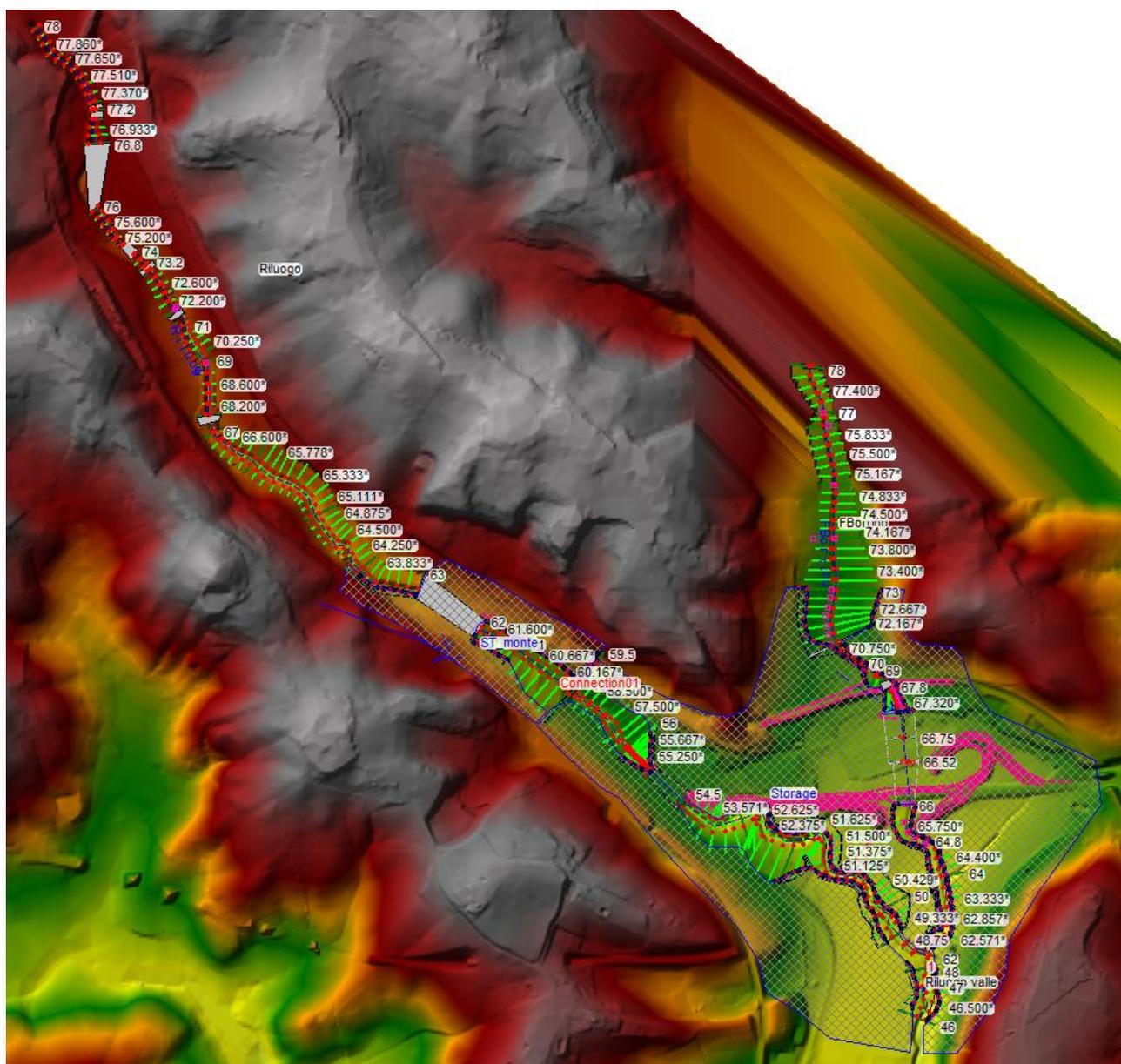


Figura 6.50 - Modello idraulico "T. Riluogo intermedio"



Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalla sezione di valle del modello EPA-SWMM del Riluogo Monte, gli idrogrammi risultanti dalle modellazioni idrologiche per il Borrino e la *normal depth* pari alla pendenza del fondo alveo nel tratto finale per le sezioni a valle del modello. Sono state poi inserite degli *uniform inflow* per simulare ingressi distribuiti degli interbacini.

Per la determinazione del *terrain* su cui definire le aree allagate, nell'area intorno alla confluenza, fino a tutto il paese di Ruffolo è stato utilizzato un DTM ad alta definizione messo a disposizione da ANAS, determinato a seguito di un volo fotogrammetrico.

### Sintesi dei Risultati

La maggiore criticità che presenta questo modello in termini di aree allagate riguarda loc. Ruffolo a causa delle uscite in destra e sinistra della piena per TR200, in corrispondenza dell'imbocco del tratto tombato a monte dell'area industriale e residenziale (Figura 6.51).

Per quel che riguarda il T. Riluogo, le sezioni di monte sono tali da riuscire a smaltire la portata in ingresso per Tr200 e Tr30, così che la principale criticità è data dallo scenario di allagamento per Tr200 in corrispondenza del tombamento in prossimità della Caserma dei Vigili del Fuoco (Figura 6.51). Non sono invece da segnalare particolari criticità riscontrate per gli scenari di allagamento per Tr30, anche se, per una dettagliata descrizione degli stessi per le portate di progetto, si rimanda alle tavole delle aree allagate.



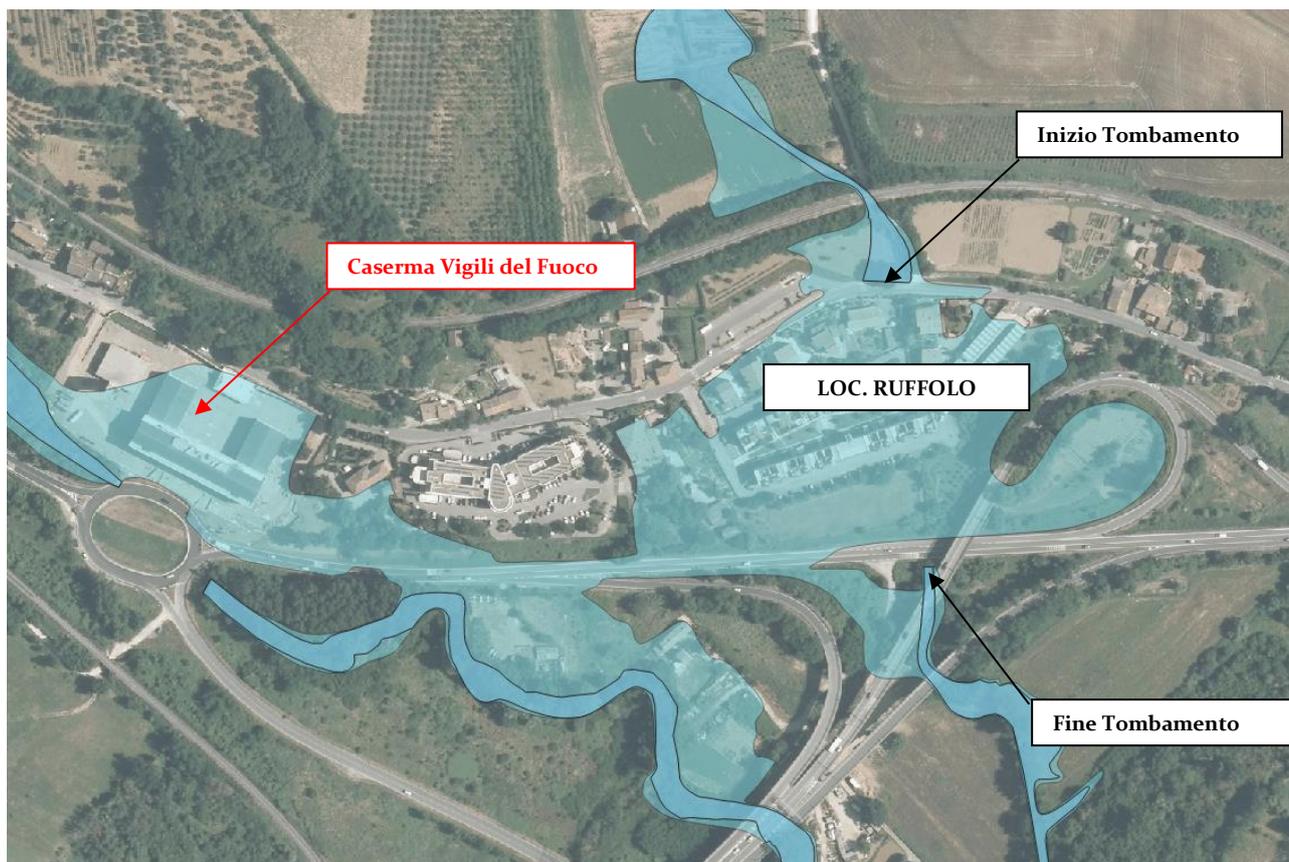


Figura 6.51 - Estratto della carta delle aree allagate per TR200 (celeste) e Tr30 (blu).



Figura 6.52 - Strada del Ruffolo. Vista delle aree allagate per Tr200.

## 6.11 Modello "T. Riluogo valle"

### Descrizione generale

Il modello comprende il Torrente Riluogo nel tratto di valle, in prossimità della confluenza col Torrente Arbia, il Torrente Ribucciano e il Fosso Bocca di Cane che ne sono affluenti (Figura 6.53).

Il Torrente Riluogo è modellato con 11 sezioni per una lunghezza di 1.1 km, il Torrente Ribucciano con 6 sezioni per 322 m prima della confluenza e il Bocca di Cane con 18 per 1.09 km prima della confluenza col Riluogo.

Il Riluogo e il Ribucciano transitano in aree parzialmente antropizzate ad uso prevalentemente industriale, mentre il Bocca di Cane all'interno di aree a carattere prevalentemente agricolo.

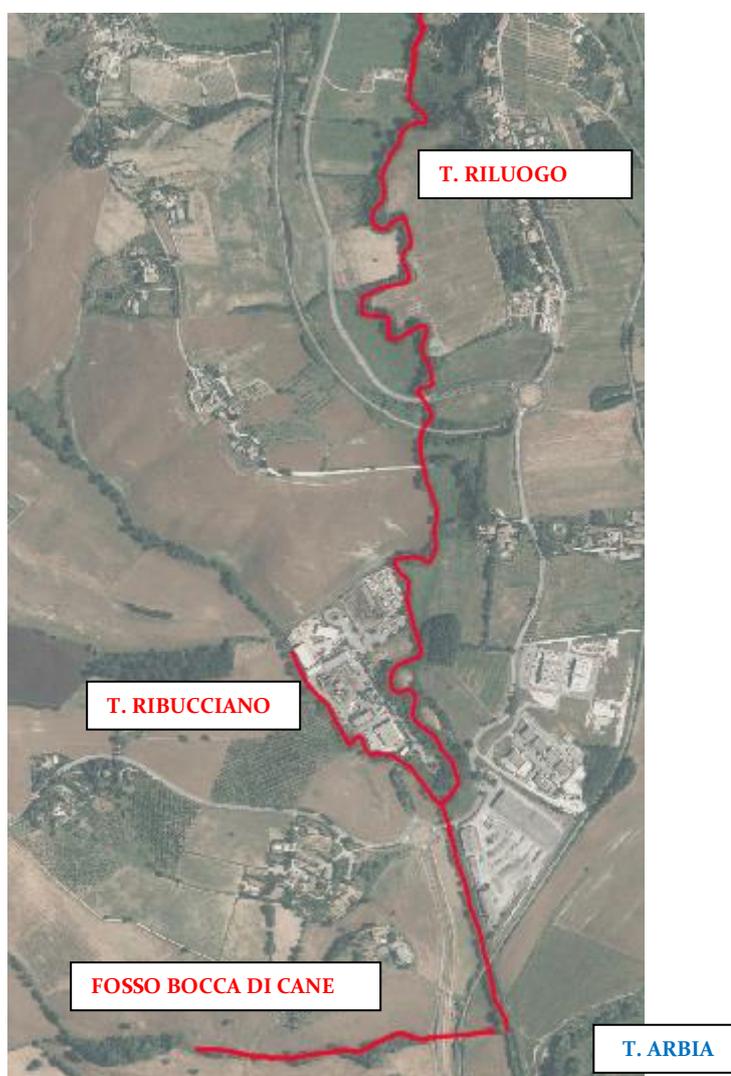


Figura 6.53 - Inquadramento "T. Riluogo valle", del "Ribucciano" e del "Fosso Bocca di Cane"



### Caratteristiche del Modello

Il modello è realizzato con HEC-RAS 5.0.7 in cui le aste fluviali del T. Riluogo e dei suoi affluenti sono modellate come elementi *river* monodimensionale definite per mezzo di *cross sections*. Tali elementi sono poi collegati con delle *lateral structures* a 3 *Storage Area 2D*, una in destra del Bocca di Cane, una in sinistra dello stesso e una in sinistra del Riluogo. Le sezioni rilevate sono state tagliate in modo tale che la modellazione 1D riguardi il solo *main channel*, mentre le aree golenali e di espansione naturale del corso s'acqua sono state appunto modellate con gli elementi *storage*.

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte (durata di pioggia di 3 ore).

Per le sezioni di valle terminali delle modellazioni si è imposto uno *stage hydrograph* costante nel tempo per simulare l'immissione nell'Arbia. La quota imposta è di 173.56 m s.l.m. per TR200 e 172.78 per Tr30, quote corrispondenti al tirante idraulico dell'area allagata dall'Arbia all'incrocio con il F. Fossatone e il S. Lucia. Le stesse condizioni al contorno sono date sulle celle nell'intorno della confluenza, così da tenere conto nel modello 2D, in maniera cautelativa, dell'influenza che gli allagamenti prodotti dall'Arbia hanno sulle aree allagate dovute alle uscite lungo gli affluenti.

### Sintesi dei Risultati

Non sono da segnalare particolari criticità riscontrate per gli scenari di allagamento per Tr30 e Tr200, anche se, per una dettagliata descrizione degli scenari di esondazione per le portate di progetto, si rimanda alle tavole delle aree allagate. Anche nel tratto prossimo all'area produttiva del Renaccio, i risultati delle modellazioni mostrano che non vi è elevata suscettibilità all'allagamento.



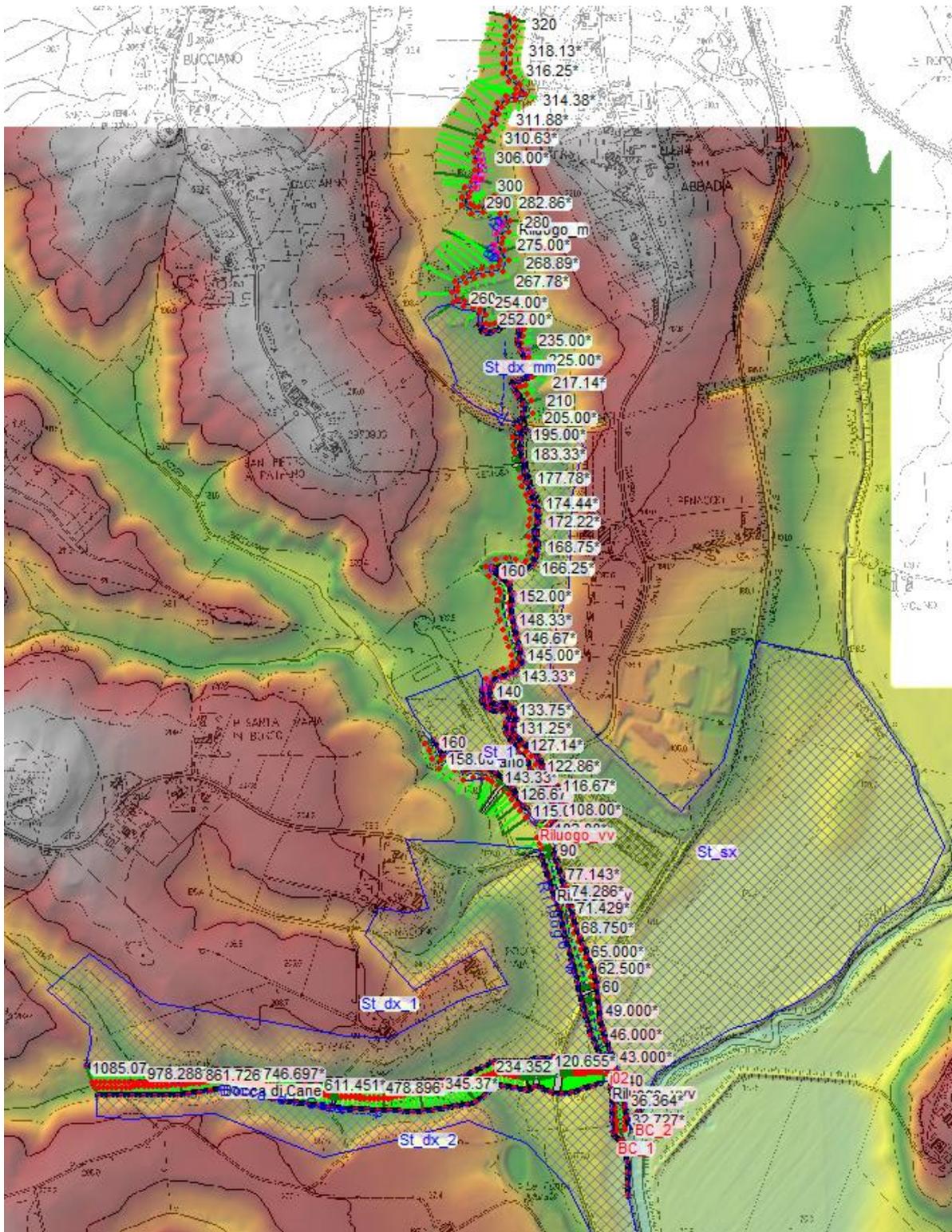


Figura 6.54 - Modello "T. Riluogo valle"



## 6.12 Modello "Fosso Castagno"

### Descrizione generale

Il modello comprende il tratto del F. Castagno a monte dell'abitato di San Miniato fino al tombamento per una lunghezza complessiva di circa 363 m con 8 sezioni rilevate (Figura 6.55).

Il fosso attraversa un'area a carattere prevalentemente agricolo fino al tombamento a San Miniato (Figura 6.56). A quel punto, il fosso s'immette nel tratto tombato del Fosso Bolgione. Al solito, la modellazione del canale a "cielo aperto" è eseguita con HEC-RAS 5.0.3, mentre si rimanda al successivo modello con EPA-SWMM la modellazione dei condotti.

### Caratteristiche del Modello

Il Fosso del Castagno è modellato per il tratto a "cielo aperto" con HEC-RAS 5.0.3. La geometria del *river* è definita tramite 8 sezioni idrauliche ed il modello è monodimensionale.

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte e la *normal depth* per le sezioni di valle del modello. Gli idrogrammi in uscita nella sezione di valle sono poi utilizzati come condizione al contorno di monte per il successivo modello su EPA-SWMM di San Miniato.

### Sintesi dei Risultati

La conformazione morfologica incisa del corso d'acqua e delle aree contermini determina la permanenza nell'ambito fluviale dei volumi idrici senza che si manifestino fenomeni esondativi e di immagazzinamento nelle aree circostanti.





**Figura 6.55** - Inquadramento "Fosso Castagno"



**Figura 6.56** - Soglia e inizio tratto tombato del Fosso Castagno

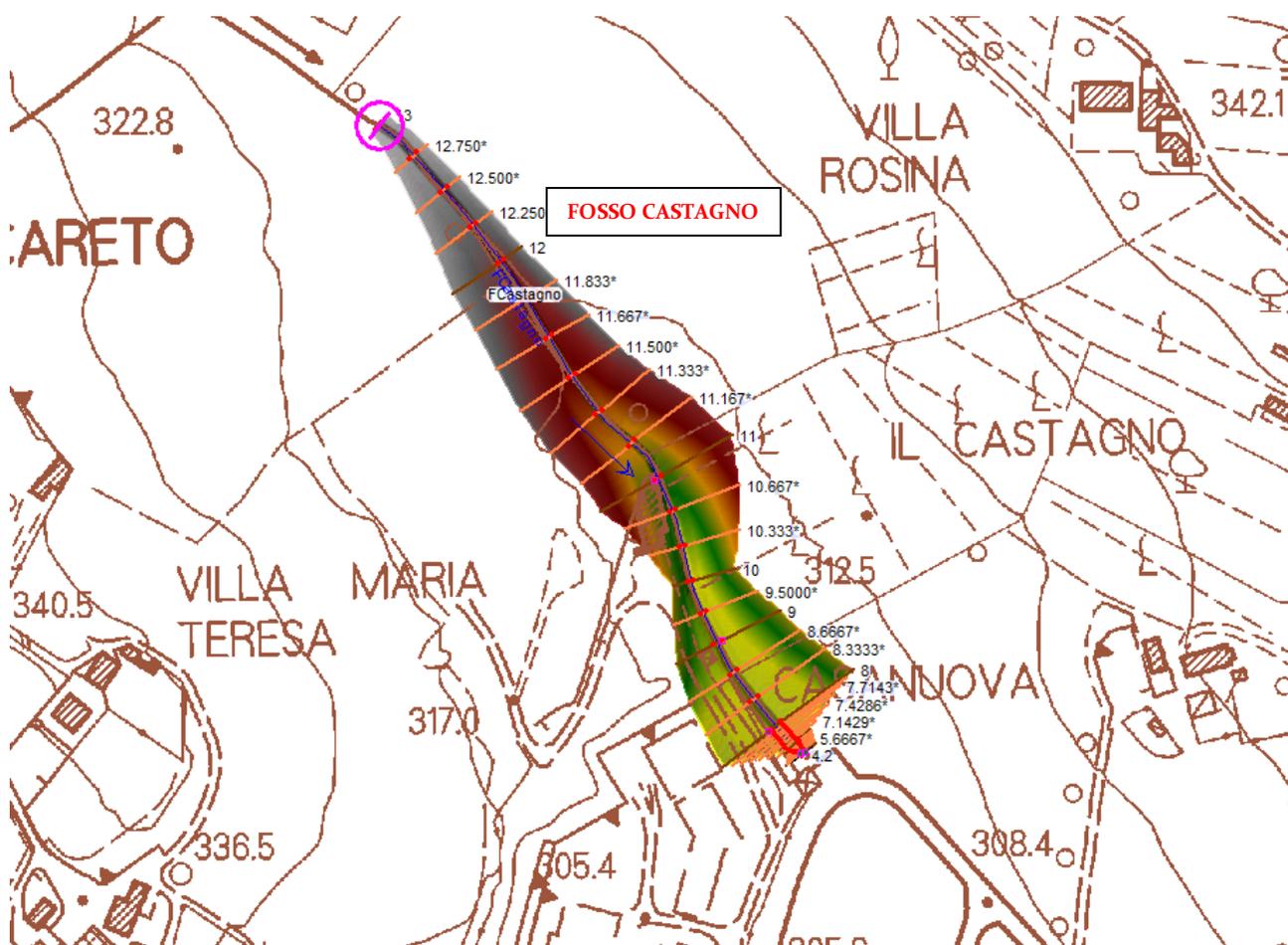


Figura 6.57 - Modello "F. Castagno"

### 6.13 Modello "San Miniato" EPA-SWMM

#### Descrizione generale

Il modello comprende il tratto del T. Bolgione lungo circa 1000 m e un tratto a "cielo aperto" a monte dell'edificio sede del Monte dei Paschi, dove si tomba per uscire poi a valle del campo sportivo di San Miniato.

La geometria degli elementi tombati è ricavata dai rilievi eseguiti a supporto del precedente studio idraulico e a partire dai rilievi e dei progetti messi a disposizione dall'Amministrazione Comunale. La posizione e la geometria dei tombini sul Castagno è stata poi rilevata dalla stessa Amministrazione.

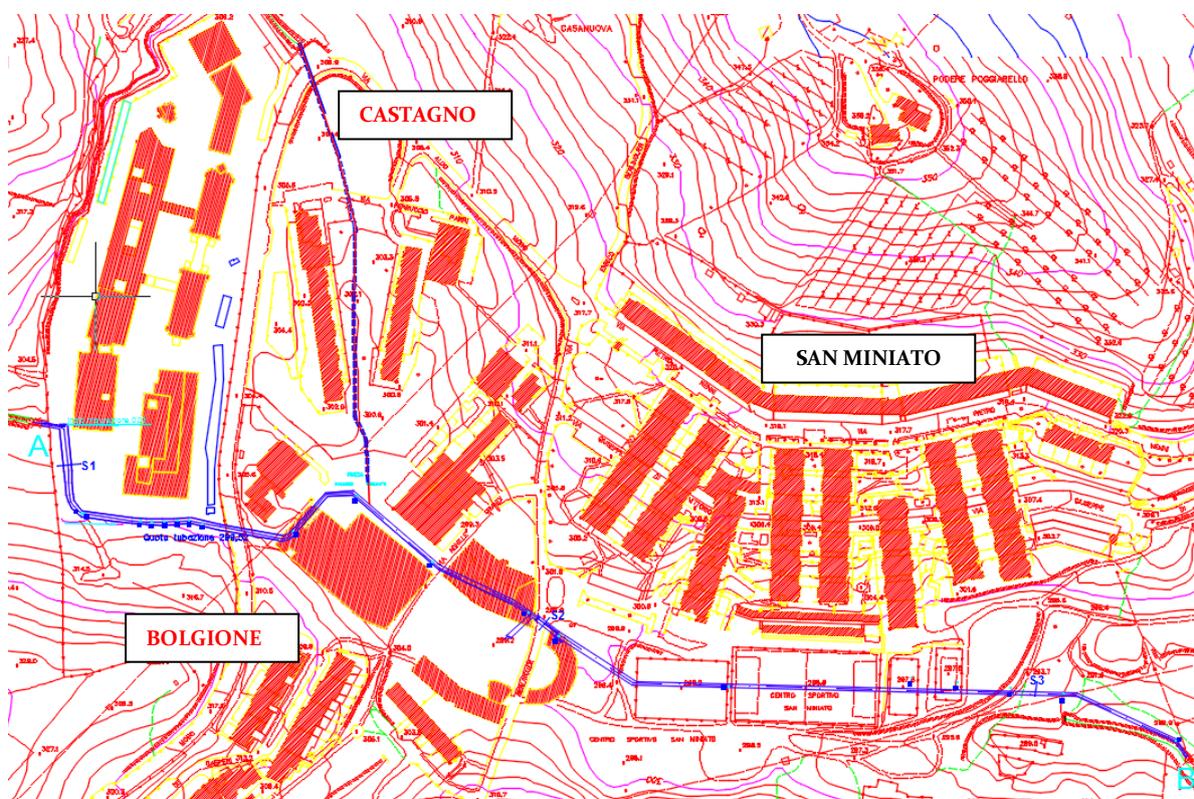


Figura 6.58 - Estratto della documentazione messa a disposizione dall'amministrazione comunale. In blu i tratti tombati fognari dei due fossi

#### Caratteristiche del Modello

Il modello è stato realizzato con il codice di calcolo EPA-SWMM 5.1. La geometria è definita per mezzo di nodi (i pozzetti) e di condotte (i tombamenti). Nei tratti a cielo aperto di monte del modello sono state inserite le sezioni idrauliche tramite l'elemento *transect* per sezioni irregolari

(quelle che non sono tipiche dei tratti fognari).

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali nel caso degli elementi *transect*, mentre per gli elementi di fognatura in calcestruzzo si è utilizzato un valore del manning pari a  $0.017 \text{ s m}^{-1/3}$  costante sulla sezione.

Le condizioni al contorno inserite sono gli idrogrammi di piena per tempi di ritorno 30 e 200 anni ottenuti dalle modellazioni idrologiche in corrispondenza della sezione di monte. Inoltre per tener conto delle immissioni laterali degli interbacini, si è distribuito in funzione della lunghezza su ogni nodo delle *lateral inflow*. La condizione di valle scelta, tra quelle possibile, è di tipo *free*.

Gli idrogrammi di uscita per  $Tr_{30}$  e  $Tr_{200}$  dal nodo  $OUT_1$ , che è quello finale della modellazione su EPA-SWMM, sono stati poi utilizzati come condizione al contorno di monte per il modello a valle del Bolgione nel tratto a "cielo aperto".

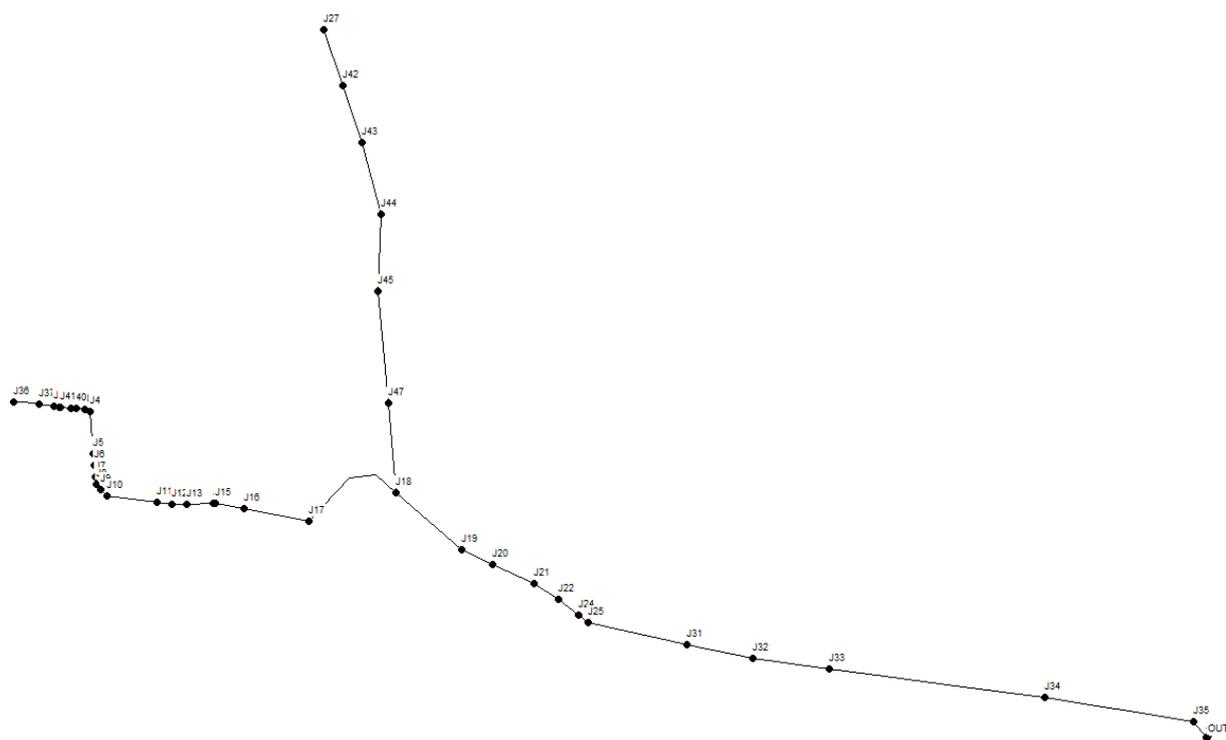


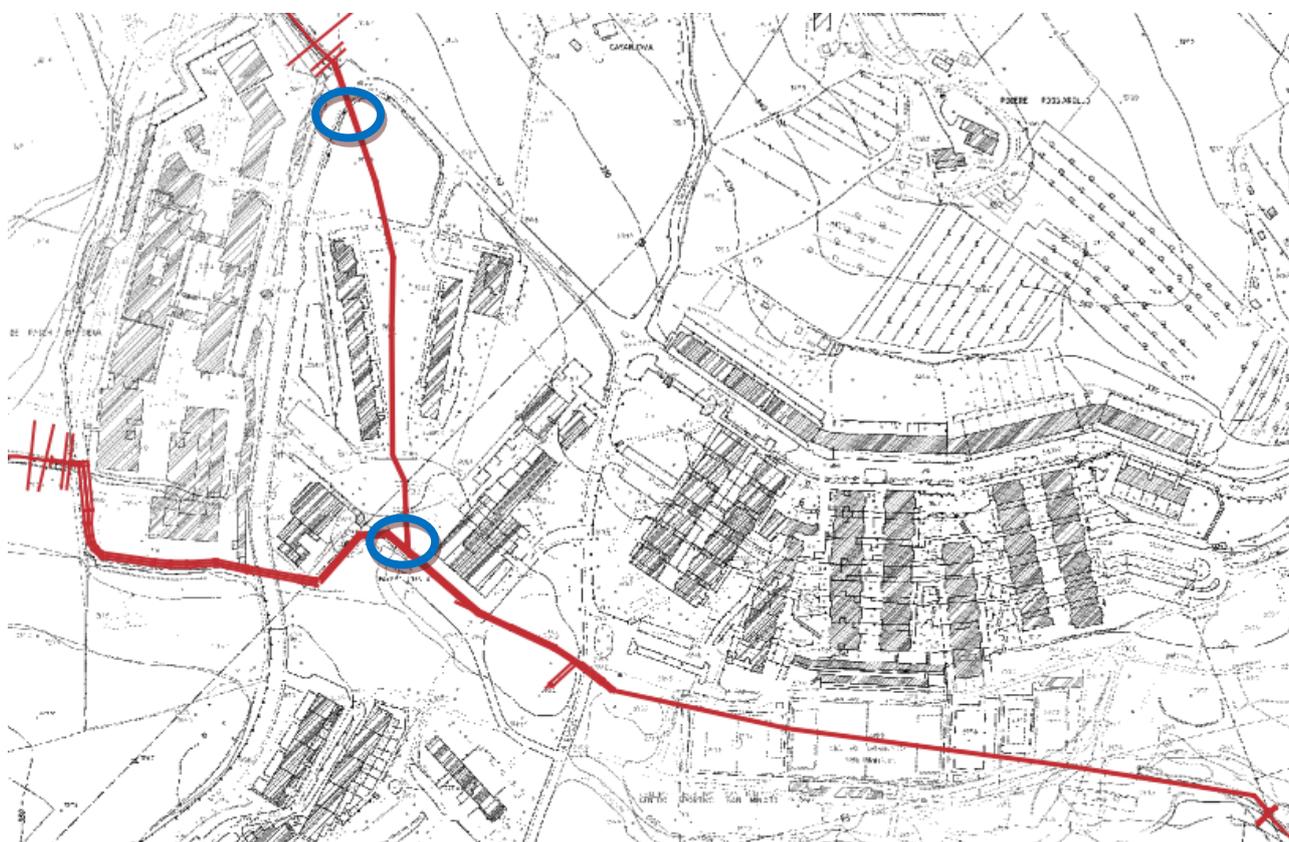
Figura 6.59 - Modello dei tratti tombati del Bozzone e del Castagno

### Sintesi dei Risultati

La modellazione per TR<sub>30</sub> anni mostra che le sezioni degli elementi fognari sono sufficiente a garantire lo smaltimento delle portate, senza che si verificano fenomeni alluvionali.

Lo scenario di alluvione per Tr<sub>200</sub> è, invece, sostanzialmente differente, in quanto la capacità di trasporto delle condotte fognarie non è sufficiente allo smaltimento delle portate, così che si verificano esondazioni dai tombini, i cui effetti, in termini di aree allagate, sono stati valutati col codice di calcolo FLO-2D.

Nella Figura 6.60 sono riportate le posizioni dei tombini nei punti di fuoriuscita dal sistema fognario.



**Figura 6.60** - Estratto da CTR 2k con individuazione dei nodi critici soggetti ad allagamento.

Il modello digitale del terreno è stato prodotto a seguito del rilievo dello studio PROGEO srl di una serie di punti all'interno dell'area interessata dai fenomeni alluvionali (l'area di San Miniato, da Via Aldo Moro a Via Achille Grandi).

## 6.14 Modello "San Miniato" - FLO 2D

### Caratteristiche del Modello

Il modello con FLO-2D è costituito da celle di 8 m e comprende l'area di San Miniato e che quindi è potenzialmente suscettibile da allagamenti.

L'area in questione è fortemente urbanizzata e a carattere prevalentemente residenziale, così che si è assunto un coefficiente di Manning da inserire nel codice pari a 0.11. Inoltre, per tenere conto della presenza degli edifici, che costituiscono un ostacolo per il naturale deflusso delle acque, è stato assegnato alle celle su cui gli edifici sono ubicati una condizione *Area Reduction Factor* in tutte le direzioni pari a 1.

Per simulare, invece, la presenza dei muri di recinzione dell'area sede del Monte dei Paschi sono stati invece utilizzati degli elementi *levee*.

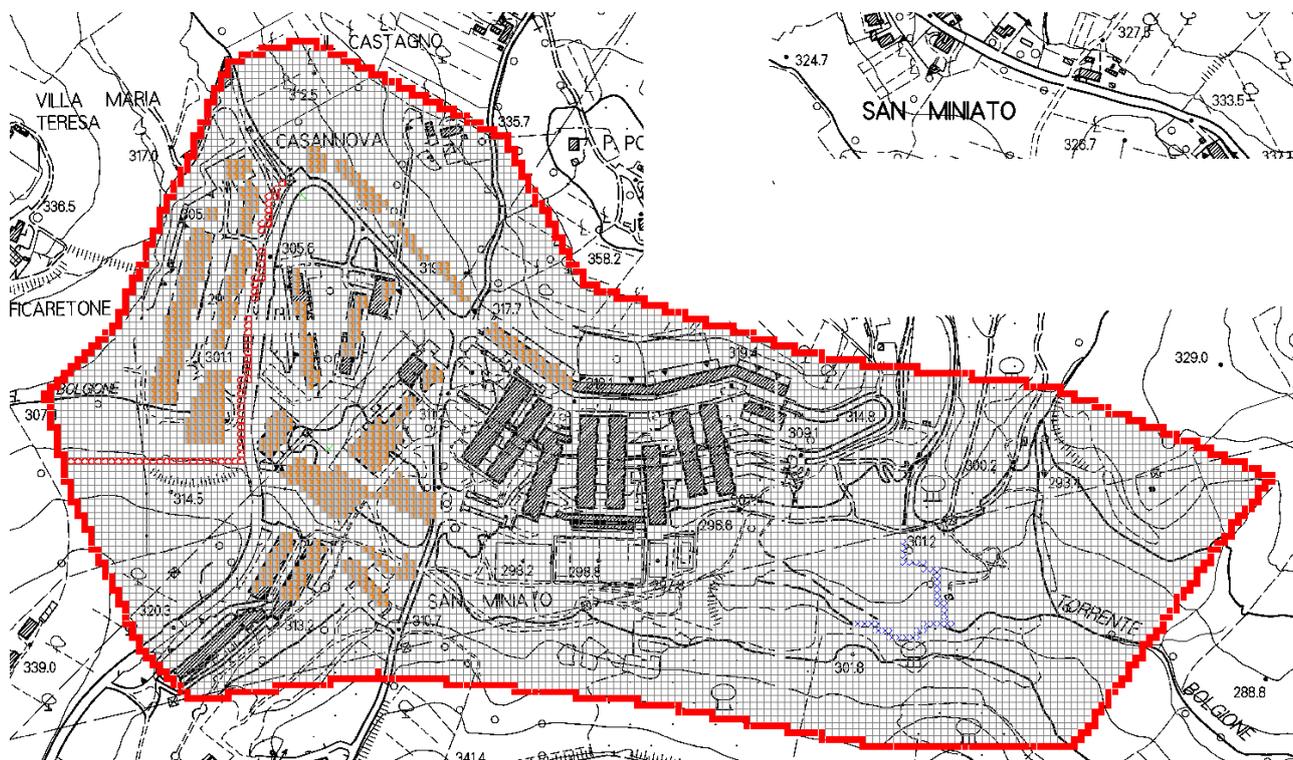


Figura 6.61 - Vista del modello su FLO 2D. In rosso il confine della *Computational Area*

### Sintesi dei Risultati

I risultati della modellazione sono riportati nelle tavole allegate.

I volumi complessivamente esondati sono dell'ordine di 6.139 m<sup>3</sup>, la distribuzione areale degli stessi dipende dalle caratteristiche morfologiche del terreno nell'area. La principale uscita è localizzata in corrispondenza del pozzetto di Figura 6.62, che si trova in alto morfologico rispetto alle zone più densamente abitate di San Miniato e del supermercato Coop (si veda a tal proposito Figura 6.60), così che l'acqua in uscita dal Castagno scende dal punto di esondazione fino a Via Achille Grandi, dove si ferma per la presenza di edifici che funzionano da ostacoli (Figura 6.63).

L'acqua ristagna in tale zona e l'unica via di fuga è rappresentata dagli ingressi ai parcheggi coperti lungo Viale Achille Grandi. Per valutare tali effetti, sono state eseguite due modellazioni: nella prima, si è ipotizzato che gli ingressi ai parcheggi fossero a "chiusura stagna" e quindi che il deflusso delle acque al loro interno fosse impossibile; nella seconda, si è ipotizzato invece che l'acqua defluisse all'interno dei parcheggi, inserendo un elemento *outflow* nella cella corrispondente del FLO-2D.

Il risultato in termini di aree allagate è del tutto simile e il risultato riportato nelle tavole allegate è dato dall'involuppo tra i due scenari, mentre vi è grande differenza in termini di battenti che nel primo scenario raggiungono il valore di 1.54 m (Figura 6.64) e 0.6 m nel secondo (Figura 6.65) e in corrispondenza dell'angolo di Viale Achille Grandi.



**Figura 6.62** - Vista del pozzetto sul tombamento del Castagno da cui provengono i maggiori volumi allaganti



**Figura 6.63** - Vista di Viale Achille Grandi e delle aree allagate per Tr200. Le frecce indicano le posizioni d'ingresso a parcheggi interrati.



Figura 6.64 - Risultati in termini di battenti per TR200 scenario "senza uscite"

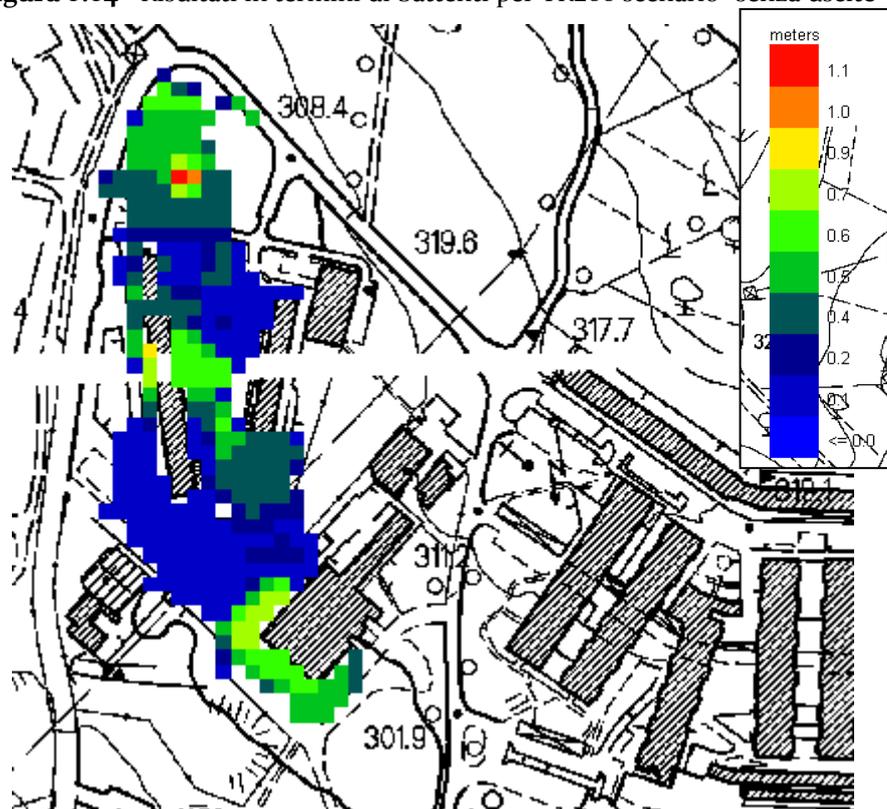


Figura 6.65 - Risultati in termini di battenti per TR200 scenario "con uscite"

## 6.15 Modello "T. Bolgione "

### Descrizione generale

Il modello comprende il tratto del T. Bolgione a valle dell'uscita dal tombamento fino a comprendere il suo affluente di sinistra (Figura 6.66).



Figura 6.66 - Inquadramento "T. Bolgione" e affluente

Il T. Bolgione è modellato per circa 300 m a valle del tombamento, mentre il suo affluente per circa 150 m prima della confluenza. I fossi attraversano un'area a carattere prevalentemente agricolo.

### Caratteristiche del Modello

Il Fosso Bolgione è modellato con HEC-RAS 5.0.3. La geometria del *river* è definita tramite 7 sezioni idrauliche e il suo affluente tramite altre 7. Il modello è monodimensionale.

Le scabrezze nel corso d'acqua sono state assunte pari a  $n = 0.035 \text{ s m}^{-1/3}$  per l'alveo principale e 0.05 per le zone golenali (si rimanda agli allegati di HEC-RAS per le informazioni di dettaglio).

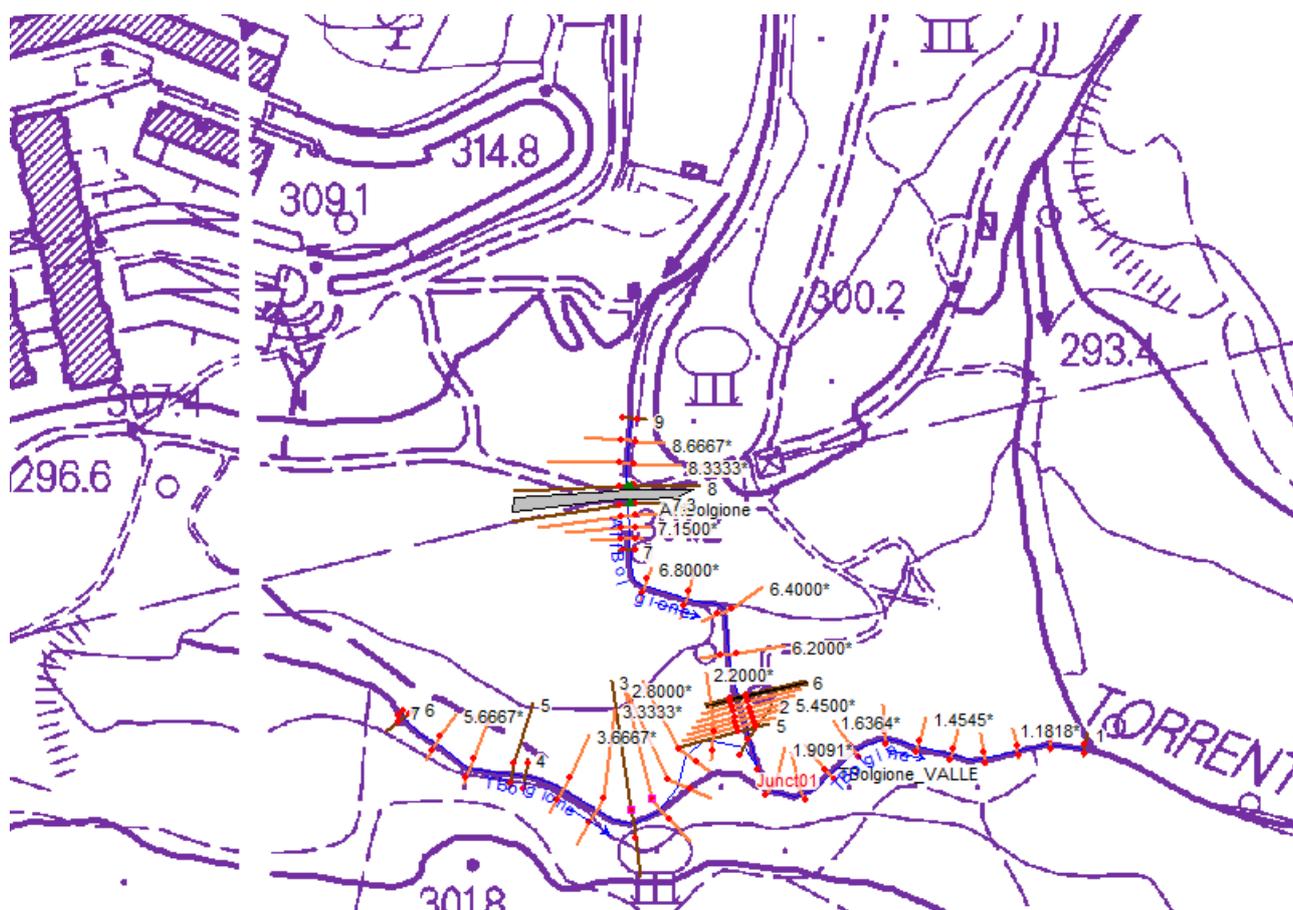


Figura 6.67 - Inquadramento modello "Bolgione"

### Sintesi dei Risultati

La conformazione morfologica incisa del corso d'acqua e delle aree contermini determina la permanenza nell'ambito fluviale dei volumi idrici senza che si manifestino fenomeni esondativi.



## 7 MAPPA DELLE AREE A PERICOLOSITA' D'ALLUVIONE

Le perimetrazioni delle aree a pericolosità d'alluvione sono state eseguite sulla base dei risultati delle modellazioni precedentemente descritte, nel seguente modo (art. 2 LR 41/2018):

- Aree a pericolosità d'alluvione frequente (per  $Tr \leq 30$  anni) – P<sub>3</sub>;
- Aree a pericolosità d'alluvione poco frequente ( $30 < Tr \leq 200$  anni) – P<sub>2</sub>;
- Aree a pericolosità d'alluvione rara ( $200 < Tr \leq 500$  anni) – P<sub>1</sub>;

Per la definizione delle aree a pericolosità d'alluvione rara si è fatto riferimento a criteri storico-inventariali.

Per quel che riguarda la perimetrazione delle aree del Borro del Casino, si è fatto uso degli studi idraulici condotti per definizione della suscettibilità all'allagamento per  $Tr$  30 e 200 anni messi a disposizione del Genio Civile Toscana Sud e relativi al progetto di fattibilità tecnico-economico degli interventi di "Riassetto idraulico del Borro del Casino per la mitigazione del rischio idraulico dell'abitato Taverne d'Arbia (SI)".

All'interno delle carte sono riportate ulteriori informazioni complementari che riguardano l'ubicazione dei tratti tombati di pertinenza fognaria del Fosso Riluogo e del T. Bolgione e del F. Castagno nell'area di San Miniato.

Le perimetrazioni delle classi di pericolosità sopra definite sono state eseguite sulla base dei risultati delle modellazioni idrologiche e idrauliche per le durate critiche individuate e disegnate sul dettaglio della CTC del Comune di Siena in scala 1:2.000. Le mappe di pericolosità, battente, velocità e magnitudo sono state restituite in scala 1:10.000 su Cartografia Tecnica Regionale.

La perimetrazione delle aree a pericolosità d'alluvione rara (eventi con  $200 < Tr \leq 500$  anni) è stata eseguita sulla base delle informazioni storico inventariali esistenti riguardanti aree inondabili da eventi eccezionali e quelle ottenute dallo strato informativo derivante dalla cartografia di Pericolosità Idraulica di PS e dal PGRA dell'Autorità di Bacino Distrettuale del Bacino Settentrionale.



## 8 MAPPA DEI BATTENTI, DELLE VELOCITÀ E DELLA MAGNITUDO IDRAULICA

Al fine di implementare le mappe di pericolosità da alluvione e rischio alluvione, comprensive di battenti e velocità necessari per l'applicazione della L.R. 41/2018, sono redatte le carte dei battenti e quella delle velocità della corrente sulla base dei risultati raster messi a disposizione dai software di calcolo (FLO-2D e HEC-RAS).

Secondo le definizioni dell'Art. 2 della L.R. 41/2018 è definito "battente" l'altezza della lama d'acqua in una determinata area associata allo scenario relativo alle alluvioni poco frequenti.

Si definisce **magnitudo idraulica**: la combinazione del battente e della velocità della corrente in una determinata area, associata allo scenario relativo alle alluvioni poco frequenti:

- **magnitudo idraulica moderata**: valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente uguale o inferiore a 0,3 metri;
- **magnitudo idraulica severa**: valori di battente inferiore o uguale a 0,5 metri e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 0,5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità inferiore o uguale a 1 metro per secondo (m/s). Nei casi in cui la velocità non sia determinata, battente superiore a 0,3 metri e inferiore o uguale a 0,5 metri;
- **magnitudo idraulica molto severa**: battente superiore a 0,5 metri e inferiore o uguale a 1 metro e velocità superiore a 1 metro per secondo (m/s) oppure battente superiore a 1 metro. Nei casi in cui la velocità non sia determina, battente superiore a 0,5 metri;

Le modellazioni bidimensionali eseguite con FLO 2D ed HEC-RAS 5.0.3/5.0.7 hanno permesso di definire la magnitudo idraulica sulla base dei valori dei battenti e delle velocità ricavata dall'esecuzione dei due codici di calcolo e restituiti in formato raster su cartografia, in accordo con la bozza delle specifiche regionali del gruppo di lavoro sulla LR 41/2018.

Per quel che riguarda il T. Tressa, per il quale sono state indagate due diverse durate di pioggia (3h e 5h), la metodologia adottata per la definizione delle mappe dei battente, velocità e magnitudo è la stessa impiegata per il T. Arbia (si riveda quanto riportato nella relazione di supporto Ro2).





## 9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente studio idrologico ed idraulico è stato redatto su incarico del Comune di Siena, nell'ambito dell'aggiornamento del quadro conoscitivo di Piano Strutturale utilizzando anche le risorse e le indicazioni regionali per la realizzazione di studi per l'implementazione delle mappe di pericolosità da alluvione e rischio di alluvioni, comprensive di carte dei battenti, velocità e magnitudo idraulica.

A tal fine, si sono svolte le seguenti attività:

- Attività sul campo, consistenti in sopralluoghi delle aree oggetto dello studio e reperimento della documentazione fotografica riportata nei capitoli precedenti;
- Modellazione idrologica, tramite software HEC-HMS con applicazione del modello di infiltrazione dell'SCS-CN e di formazione dell'onda di piena (SCSC-CN e Kinematic Wave);
- Modellazione idraulica 1D e 2D con HEC-RAS 5.0.3 e 5.0.7;
- Redazione degli elaborati grafici delle mappe di pericolosità, battenti, velocità e magnitudo.

La definizione delle aree a pericolosità d'alluvione deriva da valutazioni ed elaborazioni sviluppate tramite modelli informatici basati su dati, conoscenze e parametri vigenti allo stato attuale.

Qualsiasi modifica di tali condizioni, su cui sono state elaborate le valutazioni di carattere idrologico idraulico, pregiudicano la validità di quanto esposto e potrebbero rendere necessaria una rivalutazione del quadro conoscitivo.

Occorre osservare che i risultati del presente studio sono vincolati al mantenimento delle attuali condizioni e assetti del reticolo idrografico; eventuali future modifiche di tali assetti impongono la necessità di una revisione dei presenti risultati.

Inoltre si ritiene doveroso osservare che tali risultati dovranno essere aggiornati anche in conseguenza di una possibile futura espansione edilizia, dell'eventuale approvazione di varianti al regolamento urbanistico, delle variazioni significative dell'assetto dell'uso del suolo o delle reti idrauliche naturali e artificiali interferenti con le aree investigate.



Arezzo, Febbraio 2020

I professionisti incaricati

Geol. Massimiliano Rossi

Ing. Davide Giovannuzzi

Geol. Fabio Poggi

Ing. Mirko Frascioni

