

HydroGeo Ingegneria s.r.l.



Via Cardinal Latino, 20  
50126 Firenze  
Tel 055 6587050 - Fax 055 0676043  
e-mail info@studiohydrogeo.it

# STUDIO IDROLOGICO IDRAULICO SUL FOSSO DEL PELACANE DI SUPPORTO AL PROCEDIMENTO URBANISTICO PER LE AREE POSTE IN SINISTRA IDRAULICA DELLA LINEA FERROVIARIA E LA S.S. 67

*STUDIO IDROLOGICO IDRAULICO*

RELAZIONE IDROLOGICO IDRAULICA

**COMMITTENTE:**

Fibbi Elio srl  
Via P. Nenni, 12  
50065 Sieci (Pontassieve) FI

**DIRETTORE TECNICO**

ING. TIZIANO STAIANO

**PROGETTISTI:**

ING. TIZIANO STAIANO

PROGETTO

L 5 5 6

LOTTO

0 1

FASE

S 0 6

DOC

T

ELABORATO

R I I

REV

A

REV.

A

DATA EMISSIONE

Marzo 2017

REDATTO

T.Staiano

VERIFICATO

T.Staiano

APPROVATO

T.Staiano

## Indice generale

<b>1. PREMESSA</b> .....	<b>2</b>
<b>2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO</b> .....	<b>3</b>
2.1 <i>CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E RILIEVI TOPOGRAFICI</i> .....	3
2.2 <i>DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO</i> .....	3
<b>3. APPROCCIO METODOLOGICO</b> .....	<b>4</b>
<b>4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO</b> .....	<b>5</b>
4.1 <i>PARAMETRI IDROLOGICI</i> .....	6
4.2 <i>REGIME PLUVIOMETRICO</i> .....	7
4.3 <i>RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA</i> .....	8
<b>5. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO</b> .....	<b>9</b>
5.1 <i>CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI CORSI D'ACQUA E DELL'AREA DI STUDIO</i> .....	9
5.2 <i>EVENTI SIMULATI, CONDIZIONI AL CONTORNO E PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO</i> .....	11
5.3 <i>ANALISI DEI RISULTATI</i> .....	12
<b>6. PERICOLOSITÀ IDRAULICA</b> .....	<b>14</b>
<b>7. FATTIBILITÀ</b> .....	<b>14</b>
<b>APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA</b> .....	<b>15</b>
A.1 <i>MODELLISTICA IDROLOGICA</i> .....	15
A.1.1 <i>Regime pluviometrico – Studio Regionale LSPP</i> .....	15
A.1.2 <i>Calcolo della pioggia di progetto su un bacino idrografico</i> .....	15
A.1.3 <i>Calcolo degli idrogrammi di progetto</i> .....	15
A.2 <i>MODELLISTICA IDRAULICA</i> .....	18
A.2.1 <i>Modellistica Idraulica Monodimensionale</i> .....	18
A.2.2 <i>Modellistica Bidimensionale</i> .....	19
<b>APPENDICE B: RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDRAULICA</b> .....	<b>21</b>

## Indice delle figure

Figura 1-1: Individuazione del comparto .....	2
Figura 4-1: Idrogrammi di piena Tr 30 anni al variare della durata dell'evento meteorico ( $m^3/s$ ) .....	8
Figura 4-2: Idrogrammi di piena Tr 200 anni al variare della durata dell'evento meteorico ( $m^3/s$ ) .....	8
Figura 4-3: Idrogrammi di piena Tr 500 anni al variare della durata dell'evento meteorico ( $m^3/s$ ) .....	8
Figura 5-1: Scala di deflusso del Fiume Arno in corrispondenza del Fosso Pelacane.....	11
Figura 5-2: Sezione ferrovia, da DTM. ....	12
Figura 5-3: Estratto di mappa dalla Planimetria dei battenti idraulici – Inviluppo Tr 30 anni .....	13
Figura 5-4: Estratto di mappa dalla Planimetria dei battenti idraulici – Inviluppo Tr 200 anni .....	13
Figura 5-5: Estratto di mappa dalla Planimetria dei battenti idraulici – Inviluppo Tr 500 anni .....	13
Figura 7-1: a) Esempio di "sotto-griglia". b) Area bagnata associata ad una faccia della cella di calcolo k. c) Curva di invaso associata ad una cella di calcolo k. ....	20

## Indice delle tabelle

Tabella 4-1: Tabella di associazione tra formazione geologica e $K_s$ .....	6
Tabella 4-2: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici .....	6
Tabella 4-3: Altezze di pioggia lorda (mm) .....	7
Tabella 4-4: Parametri della LSPP trinomia e valori dei coefficienti di ragguaglio $K_r$ .....	7
Tabella 4-5: Portate al colmo ( $m^3/s$ ) .....	8
Tabella 5-1: Sezioni implementate nel modello idraulico .....	10
Tabella 7-1: Valori $K_s$ utilizzati nel presente studio .....	16
Tabella 7-2: Valori suggeriti da assegnare alla costante D. ....	20
Tabella 7-3: Risultati della modellistica idraulica monodimensionale in alveo per ogni evento simulato .....	26
Tabella 7-4: Inviluppo dei livelli idrometrici .....	27

## 1. PREMESSA

Hydrogeo Ingegneria s.r.l. è stato incaricato di redigere lo “Studio Idrologico-Idraulico, ai sensi del DPGR 53/R, sul Fosso del Pelacane, di supporto al procedimento urbanistico per le aree poste in sinistra idraulica della linea ferroviaria e la S.S. 67”.

In particolare ai sensi del suddetto Decreto vanno considerati gli elementi idrologico-idraulici necessari per caratterizzare la probabilità di esondazione dei corsi d'acqua in riferimento al reticolo d'interesse, definendo le pericolosità idrauliche come segue:

- Aree a pericolosità idraulica molto elevata (I4), che risultano allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- Aree a pericolosità idraulica elevata (I3), con aree allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni;
- Aree a pericolosità media (I2), caratterizzate da eventi alluvionali con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni;
- Aree a pericolosità bassa (I1), aree collinari o montane.

Le condizioni di attuazione delle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali possono essere differenziate secondo le seguenti categorie di fattibilità:

- **Fattibilità senza particolari limitazioni (F1):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali non sono necessarie prescrizioni specifiche ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia.
- **Fattibilità con normali vincoli (F2):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali è necessario indicare la tipologia di indagini e/o specifiche prescrizioni ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia.
- **Fattibilità condizionata (F3):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali, ai fini della individuazione delle condizioni di compatibilità degli interventi con le situazioni di pericolosità riscontrate, è necessario definire la tipologia degli approfondimenti di indagine da svolgersi in sede di predisposizione dei piani complessi di intervento o dei piani attuativi o, in loro assenza, in sede di predisposizione dei progetti edilizi.
- **Fattibilità limitata (F4):** si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali la cui attuazione è subordinata alla realizzazione di interventi di messa in sicurezza che vanno individuati e definiti in sede di redazione del medesimo regolamento urbanistico, sulla base di studi, dati da attività di monitoraggio e verifiche atte a determinare gli elementi di base utili per la predisposizione della relativa progettazione.

Il presente studio si propone di definire la pericolosità e la fattibilità idraulica all'interno del comparto riportato in Figura 1-1, comprendente le particelle 25 e 26 del Foglio catastale 94 del Comune di Pontassieve, valutando gli input idrologici e modellando il corso d'acqua costituente la rete idraulica superficiale. Il lotto in oggetto è confinato tra la ferrovia, il Fosso del Pelacane e la S.S. 67.

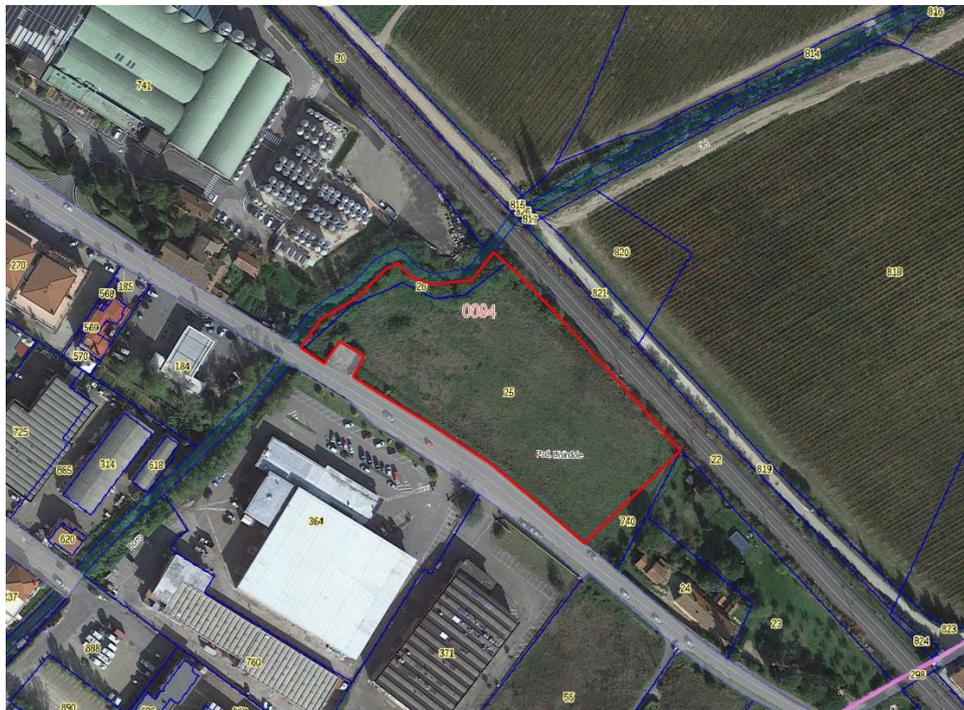


Figura 1-1: Individuazione del comparto

Il lavoro si articola nelle seguenti fasi operative:

- individuazione e caratterizzazione dell'ambito fisico oggetto di studio: raccolta ed analisi dei dati disponibili, caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua;
- modellazione idrologica;
- modellazione idraulica;
- analisi dei risultati e perimetrazione delle aree allagabili;
- definizione dei criteri di fattibilità idraulica.

## 2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO

### 2.1 CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E RILIEVI TOPOGRAFICI

L'ambito d'indagine comprende il corso d'acqua del Fosso del Pelacane, per una lunghezza di circa 1000 metri a monte della confluenza con il Fiume Arno e l'area a campagna adiacente il corso d'acqua.

Per la caratterizzazione dell'area di studio è stato effettuato un rilievo topografico del corso d'acqua, delle aree a campagna e delle principali opere antropiche presenti: viabilità, ponti, tombamenti, opere e manufatti di contenimento, ovvero tutte quelle opere che possono interferire con il deflusso delle acque.

Il rilievo topografico è stato poi integrato con il rilievo Lidar della regione Toscana, funzionale alla caratterizzazione delle aree contermini il corso d'acqua. Dall'analisi dei dati topografici, è emersa una buona conformità tra i rilievi eseguiti in campo e il rilievo Lidar della Regione Toscana.

Nelle seguenti tavole è riportato il rilievo topografico effettuato:

- L55601S06D002AA - Tavola 2A - Planimetria di Rilievo - Quadro A
- L55601S06D002BA - Tavola 2B - Planimetria di Rilievo - Quadro B
- L55601S06D002CA - Tavola 2C - Planimetria di Rilievo - Quadro C

### 2.2 DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO

Oltre ai dati necessari alla caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua, nell'ambito del presente lavoro sono stati consultati, utilizzati ed elaborati una serie di dati geografici, resi disponibili dalle Amministrazioni sovracomunali che li hanno realizzati ed in particolare:

- LIDAR (1x1 m) del Ministero dell'Ambiente, Fonte dei dati: Regione Toscana – "Rilievi LIDAR";
- Shape file della Carta Geologica Regionale. Fonte: Regione Toscana – DG Governo del Territorio - Sistema Informativo Territoriale ed Ambientale. Il dataset "Continuum Geologico – aggiornamento del 15/11/2013" è rilasciato con licenza CC BY 3.0 IT Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003).
- Shape file dell'Uso e copertura del suolo. Fonte: Regione Toscana - Il dataset "Uso e copertura del suolo 2007-2013" è rilasciato con licenza CC BY 3.0 IT Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003);
- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10000 e 1:2000 ove presente. Fonte: Regione Toscana - Carta Tecnica Regionale;
- Shape file del Reticolo Idrografico, approvato da Regione Toscana con Legge regionale 27 dicembre 2012, n. 79; Fonte dei dati: Regione Toscana <http://www.regione.toscana.it/-/consorzi-di-bonifica-reticolo-idrografico-e-di-gestione>;
- Griglie dei parametri caratteristici delle LSPP, a ed n, pubblicate dalla Regione Toscana nell'ambito dello Studio di Regionalizzazione delle Precipitazioni. Fonte: Regione Toscana <http://www.regione.toscana.it/-/nuovi-dati-sulla-regionalizzazione-delle-precipitazioni>

### 3. APPROCCIO METODOLOGICO

Lo schema metodologico adottato si basa essenzialmente su criteri analitici che, partendo dagli eventi di precipitazione, conduce alla definizione delle aree soggette ad inondazione attraverso la simulazione dei fenomeni di formazione e propagazione dell'onda di piena.

Ai fini dell'individuazione delle aree allagabili, l'approccio deve necessariamente considerare un corso d'acqua nella sua più completa caratterizzazione spaziale, sia in termini d'estensione, sia in termini di contributi laterali provenienti dagli affluenti considerati. La determinazione delle aree soggette ad inondazione dipende, in sostanza, dalla distribuzione spazio-temporale dei volumi di piena; pertanto, in ogni sezione del corso d'acqua, i volumi d'esondazione dipendono, a parità d'evento che li genera, dalla dinamica di propagazione e di laminazione verificatasi nelle sezioni precedenti.

È pertanto necessario, da un lato, stimare gli idrogrammi di piena in arrivo al corso d'acqua e, dall'altro, analizzarne la propagazione e laminazione per effetto di esondazioni, opere, diversivi ed immissioni laterali. Di qui la necessità di un approccio integrato di tipo idrologico-idraulico che consideri l'asta fluviale d'interesse, il relativo bacino afferente e le eventuali connessioni idrauliche laterali.

Le sollecitazioni idrologiche al sistema, costituite in generale da eventi caratterizzati da intensità di pioggia variabili nel tempo e nello spazio e dalle "condizioni iniziali" del bacino idrografico, vengono rappresentate da ietogrammi sintetici definiti in base alle Curve di Possibilità Pluviometrica per preassegnata durata di pioggia e tempo di ritorno. Attraverso la modellistica idrologica, vengono definiti gli idrogrammi di piena nelle sezioni prescelte del corso d'acqua considerato.

La propagazione dei deflussi di piena così generati e la valutazione dei fenomeni esondativi lungo l'asta fluviale considerata avviene tramite modelli idraulici, in grado di fornire in ogni sezione dell'asta fluviale l'idrogramma di piena in transito ed il massimo battente idraulico atteso, in modo tale da poter verificare l'efficienza delle strutture di contenimento o, in caso contrario, la sussistenza di fenomeni esondativi.

In questo studio è stato implementato un modello idraulico integrato che permette di combinare l'approccio monodimensionale, per la modellazione idraulica in alveo, a quello bidimensionale per la modellazione idraulica delle aree inondabili. L'integrazione tra i modelli avviene in modo dinamico, garantendo quindi la conservazione di massa e quantità di moto tra i vari sistemi. Gli alvei dei corsi d'acqua vengono modellati attraverso l'inserimento di sezioni trasversali, ricostruite a partire dai rilievi topografici e comprensive di tutte quelle strutture che interferiscono con il deflusso di piena, mentre le aree inondabili sono caratterizzate da un modello digitale del terreno che deriva dal rilievo lidar e da rilievo topografico. L'accoppiamento dei due modelli avviene attraverso degli appositi elementi che definiscono in ogni sezione fluviale la quota di sfioro in destra e sinistra idraulica e che quindi collegano il modello monodimensionale a quello bidimensionale.

#### 4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO

Per l'implementazione del modello idrologico si è in prima fase definito l'estensione del bacino idrografico analizzando la morfologia dell'area in esame che ha portato a definire la sezione di chiusura del bacino in corrispondenza della ferrovia.

Il modello numerico utilizzato consente la determinazione dei contributi idrologici al reticolo idraulico oggetto di studio ed è composto da un modello per il calcolo delle perdite del bacino idrografico (modello di infiltrazione) e da un modello afflussi-deflussi per la trasformazione degli input pluviometrici, depurati dalle perdite succitate, in idrogrammi sollecitanti il reticolo idraulico.

Il modello di infiltrazione utilizzato è il modello di infiltrazione asintotico a soglia, il quale richiede la stima di due parametri:

- $i_a$  (mm), volume unitario di perdita iniziale che il terreno assorbe durante i primi istanti di precipitazione;
- $K_s$  (mm/h), coefficiente di infiltrazione a saturazione.

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi utilizzato è il modello di Nash, che schematizza i bacini idrografici in una serie di serbatoi lineari disposti in serie e che dipende dai seguenti parametri:

- $n$  (-), numero di serbatoi lineari che rappresentano il bacino nella schematizzazione del modello di Nash;
- $k$  (h), tempo caratteristico che rappresenta il tempo di svuotamento del serbatoio.

A valle della parametrizzazione idrologica sono state determinate le piogge insistenti sul bacino considerato (piogge lorde, non depurate dalle perdite), come riportato al Paragrafo 4.2.

Osservando sperimentalmente le piogge intense è possibile affermare che, all'interno di una certa area, l'intensità di precipitazione durante l'evento piovoso varia da punto a punto, anche in maniera sensibile, e questa variazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'estensione dell'area considerata. Per questo alla precipitazione lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, è stato applicato un coefficiente di ragguaglio dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento, in linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, secondo la seguente formulazione:

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

dove  $t$  è la durata dell'evento,  $A$  è l'area del bacino sotteso e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

Per i dettagli sulla modellistica idrologica si rimanda all'Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica

#### 4.1 PARAMETRI IDROLOGICI

Sul bacino idrografico oggetto di studio è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler (si veda l'Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica per maggiori dettagli).

Per la stima delle perdite è stato adottato il metodo di infiltrazione asintotico a soglia. Il parametro  $la$  (mm) è stato determinato in funzione della percentuale di area boscata presente nel bacino considerato (derivata dall'Uso e Copertura del Suolo).

Il parametro  $Ks$  (mm/h) è stato determinato a partire dalla Carta Geologica Regionale assegnando ad ogni formazione geologica un coefficiente di infiltrazione, secondo quanto riportato in Tabella 4-1 e calcolando un coefficiente medio per il bacino.

CODICE	DESCRIZIONE	KS [mm/h]
aC	("arenarie di Monte Cervarola"); arenarie turbiditiche quarzoso-feldspatiche a grana fine, in strati sottili; talora lenti di selci (sel) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
alb	("alberese" e "formazione di Lanciata") calcari a grana fine grigio chiari, calcari marnosi scuri e arenarie calcaree gradate Paleocene-Eocene medio	4.65
all	alluvioni recenti e attuali Olocene	0
aS	("arenaria di Monte Senario") arenarie quarzoso-feldspatiche tipo "macigno", ma in generale più grossolane e contenenti ciottoli di quarzo, micascisti, filladi, calcari Paleogene	1.55
at	alluvioni terrazzate; ove distinte at1, at2, at3 Pleist. sup.	0
bn	(breccie nummulitiche) breccie poligeniche e calcareniti da torbide Paleogene	4.65
bw	conglomerati e arenarie di materiale ofiolitico alla base di cb.Paleocene-Eocene medio	0.775
cb	argille e marne con calcari, calcari marnosi, arenarie e calcareniti intercalate talora brecce sedimentarie costituite da rocce verdi, diaspri e calcari litografici	1.55
dt	detriti	2.325
fh	("formazione marno-siltose = flysch ad Elmintoidi"):calcari marnosi scuri, marne e arenarie calcaree Cretaceo superiore	4.65
fP1	("argilliti di Fiumalbo -marne di Le Piastre") argilliti varicolori,siltiti e marne grigie Oligocene superiore	0
fPaC	intervalli frequenti o potenti di marne siltose e siltiti in aC Aquitaniano-Langhiano superiore	0
fVc	(formazione di Vallina formazione di Sillano) argilloscisti variegati,alcari marnosi verdastrì o grigi, calcareniti minute e arenarie calcarifere Cret. sup.-Eocene inf.	4.65
fVR	(formazione di Villa a Radda) argilloscisti talora siltosi,prevalentemente rossi, con pochi strati calcari marnosi verdastrì o arenarie calcarifere, intercalati nella parte alta di pf o al tetto di questa Cretaceo sup.-Eocene inf.	0
mg	argille con lenti di gesso e di salgemma Messiniano sup.	0
Nu	calcareniti e calciruditi grigie, gradate Eocene	4.65
ol	a luoghi intercalazioni di materiale ligure in aC (olistostromi) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
Pag	argille azzurre e cinerine Plioc. inf.-medio	0
pb	("argille a palombini") argilliti e marne fogliettate con intercalazioni di calcari a palombini Cretaceo inf.	0
Pcg	conglomerati e ghiaie prevalentemente argillose, con sabbie e sabbie argillose (al tetto e laterale di Ps) Plioc. inf.-medio	0.775
pf	("pietraforte") arenarie calcaree alternate ad argilliti subordinatamente livelli di marne varieta' ofiolitifera Cretaceo superiore-Eocene inf.	1.55
Ps	sabbie gialle, arenarie Pliocene inf.-medio	1.55
sc	("scaglia toscana") argilliti rosse e varicolori con intercalazioni di calcari silicei grigi, marne rosse e calcareniti; al tetto marne siltose grigie, subordinatamente varicolori; Cretaceo inf. p.p.-Oligocene	0
Vs	("sabbie del Tasso") sabbie con lenti di ciottoli e sabbie argillose Pleist. inf.	2.325
VVB	("formazione di Villa Babbiani") sabbie con tasche e lenti di ciottoli di "macigno" Pleist. inf.	2.325

Tabella 4-1: Tabella di associazione tra formazione geologica e  $Ks$

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi adottato è quello di Nash, i cui parametri  $n$  e  $k$  sono ricavati in funzione della classificazione geomorfologica di Horton-Strahler.

In tavola L55601S06D001\_A - Tavola 1 - Planimetria del Modello Idrologico sono riportate le seguenti mappe: gerarchizzazione,  $la$  e  $Ks$ .

I risultati delle parametrizzazioni appena descritte sono riportati di seguito:

Nome	$k$ (h)	$n$ (-)	$la$ (mm)	$Ks$ (mm/h)	Area (kmq)
Borro del Pelacane	0.257	2.894	14.153	3.601	3.241

Tabella 4-2: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici

## 4.2 REGIME PLUVIOMETRICO

Gli eventi meteorici studiati fanno riferimento a tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni con un set di durate dell'evento meteorico sintetico a cavallo della "durata critica" (durata che massimizza la portata al colmo). Questa scelta ci consente di studiare anche gli eventi che possono avere maggiori esondazioni in termini di volumi, anche se caratterizzati da picchi dell'onda di piena minori. Nello specifico gli eventi meteorici studiati, sono i seguenti: Tr30, 200 e 500 anni con durate pari a 0.75h, 1.00h, 1.20h, 1.50h e 2.00h.

L'aggiornamento dell'analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme fino all'anno 2012, di recente pubblicazione da parte della Regione Toscana costituisce la nuova base dati su cui implementare le analisi idrologiche (elaborati nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012 al fine di procedere ad un'implementazione e un aggiornamento del quadro conoscitivo idrologico del territorio toscano).

I risultati di tale studio hanno portato alla determinazione delle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla durata dell'evento meteorico che l'ha generata, per un assegnato tempo di ritorno. La LSPP è 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.

La nuova pubblicazione dei dati ha imposto un sostanziale superamento di AITo, modello idrologico comunemente utilizzato e riferimento per il territorio Toscano negli ultimi dieci anni. Rimane invece valido il metodo di calcolo, trattandosi di un modello cosiddetto "lamped" di trasformazione afflussi deflussi, solido e collaudato.

In Tabella 4-3, sono riportate le altezze di pioggia (in mm) calcolate secondo la metodologia individuata dalla Regione Toscana. Per ogni tempo di ritorno sono riportate le altezze di pioggia lorda al variare della durata dell'evento meteorico considerato.

Tr	Durata evento meteorico (h)				
	0.75	1	1.2	1.5	2.0
30	47.2	51.0	53.6	57.0	61.6
200	64.4	70.2	74.1	79.2	86.3
500	72.9	79.7	84.3	90.2	98.6

Tabella 4-3: Altezze di pioggia lorda (mm)

In linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, la pioggia lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, viene raggugliata tramite il coefficiente Kr, dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento. Per il caso in esame, data la ridotta estensione del bacino, il coefficiente è risultato essere prossimo all'unità, come mostrato in Tabella 4-4.

a'	n'	m'	$\alpha$	$\beta$	$\mu$	A (kmq)	Kr d=0.75h	Kr d=1h	Kr d=1.2h	Kr d=1.5h	Kr d=2h
20.841	0.276	0.244	0.750	0.250	0.010	3.241	0.984	0.985	0.985	0.986	0.987

Tabella 4-4: Parametri della LSPP trinomia e valori dei coefficienti di ragguglio Kr

Si rimanda all'Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica per maggiori dettagli sulla procedura di regionalizzazione.

### 4.3 RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA

Per ognuno degli eventi meteorici, dall'applicazione del modello idrologico descritto nei paragrafi precedenti, si sono determinati i rispettivi idrogrammi di piena alla sezione di chiusura del bacino. La durata critica, ovvero quella che massimizza la portata al colmo, come si evince dai grafici seguenti., risulta pari a **dcr = 1.00 h.**

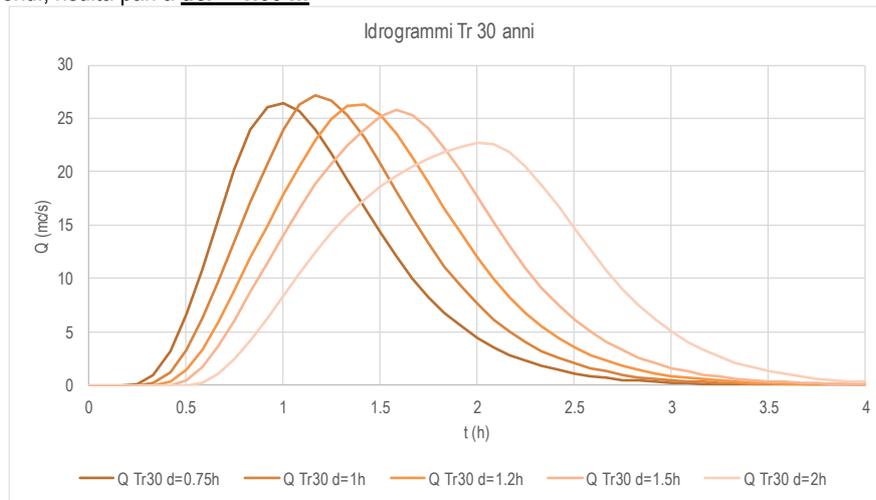


Figura 4-1: Idrogrammi di piena Tr 30 anni al variare della durata dell'evento meteorico (m³/s)

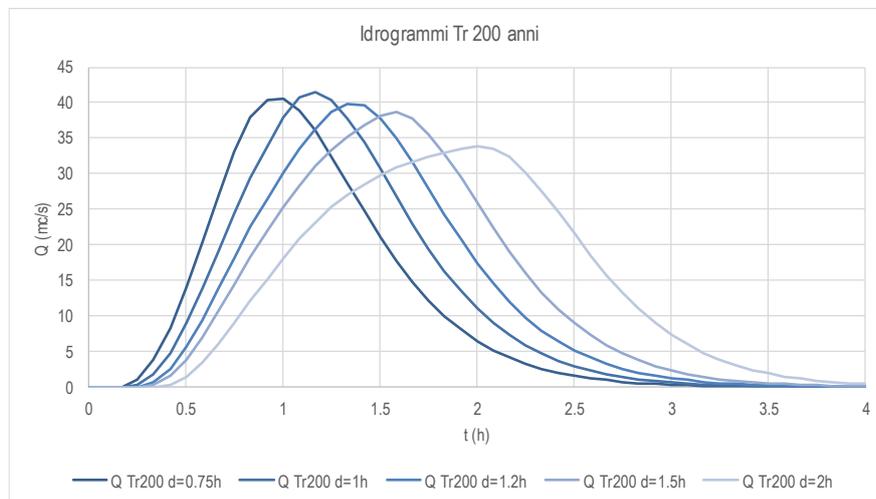


Figura 4-2: Idrogrammi di piena Tr 200 anni al variare della durata dell'evento meteorico (m³/s)

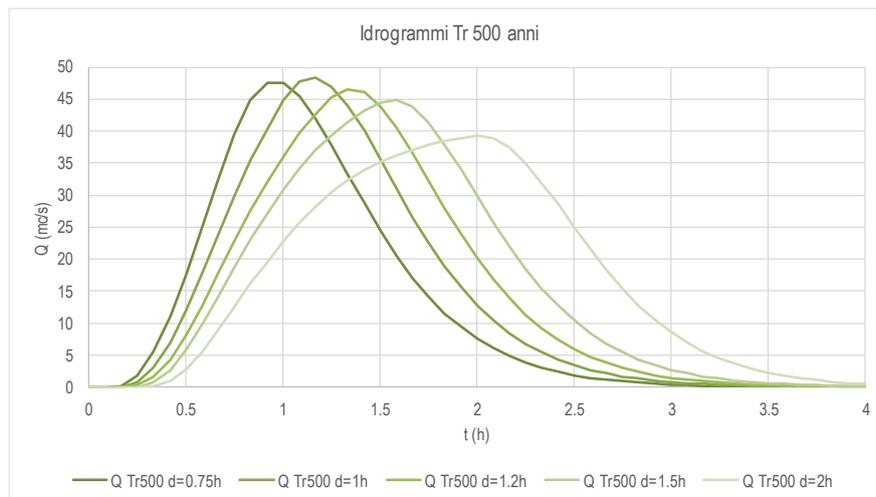


Figura 4-3: Idrogrammi di piena Tr 500 anni al variare della durata dell'evento meteorico (m³/s)

Tr	d=0.75h	d=1h	d=1.2h	d=1.5h	d=2h
30	26.45	27.18	26.29	25.75	22.66
200	40.55	41.45	39.89	38.61	33.79
500	47.5	48.43	46.52	44.89	39.22

Tabella 4-5: Portate al colmo (m³/s)

## 5. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO

L'implementazione della modellistica idraulica è stata effettuata con il software *HEC-RAS 5.0.3 (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)*, prodotto e reso disponibile gratuitamente dall'*USACE (United States Army Corps of Engineering)*. Il codice di calcolo permette la simulazione accoppiata mono-bidimensionale. La risoluzione dello schema di moto viene ottenuta per via numerica, discretizzando le equazioni nel dominio spazio-temporale mediante opportuni schemi numerici. La soluzione viene pertanto ottenuta solo nei punti di discretizzazione (e non con continuità su tutto il dominio). Tali punti sono rappresentati dalle sezioni trasversali (discretizzazione spaziale) e dalla scansione temporale utilizzata nella rappresentazione dei fenomeni (discretizzazione temporale).

Per ulteriori dettagli si rimanda all'Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica.

Il modello idraulico implementato si estende circa 1000 m a monte dalla confluenza con il Fiume Arno, ed attraversa, a sud-est l'abitato di Sieci. Il corso d'acqua è stato schematizzato da 39 sezioni fluviali, costruite a partire dal rilievo topografico. In tavola *L55601S06D003\_A - Tavola 3 - Planimetria del Modello Idraulico* sono riportate le tracce delle sezioni fluviali ed il modello digitale del terreno.

### 5.1 CARATTERIZZAZIONE GEOMETRICA DEI CORSI D'ACQUA E DELL'AREA DI STUDIO

La caratterizzazione geometrica del corso d'acqua studiato è stata ricavata a partire dal rilievo topografico. Le sezioni fluviali sono individuate attraverso un codice alfanumerico che contiene al proprio interno le seguenti informazioni:

(Esempio: sezione 00100PB17)

- 5 caratteri (Esempio: 00100) identificativo del codice della sezione, in questo caso è la 100
- 2 caratteri (Esempio: PB) identificativo delle opere idrauliche; se non presenti si utilizzano i caratteri: \_\_
- 2 caratteri (Esempio: 17) identificativo dell'anno del rilievo topografico

In Tabella 5-1 si riportano le codifiche delle sezioni fluviali utilizzate nel modello numerico, comprensive di, distanza dalla foce e coordinate dei pilastri delle stesse.

Su ciascuna sezione è stata individuata la quota di "sfioro" (quote del massimo contenimento delle acque in alveo), in destra e sinistra idraulica, che rappresenta l'informazione necessaria al software per l'accoppiamento del modello monodimensionale a quello bidimensionale.

La caratterizzazione delle aree limitrofe al corso d'acqua, potenzialmente allagabili, è schematizzata attraverso un modello bidimensionale, per la cui caratterizzazione geometrica è stato utilizzato un modello digitale del terreno determinato a partire dai seguenti elementi:

- Rilievo Lidar della Regione Toscana;
- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:2000;
- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10000;
- Rilievo topografico.

Il modello digitale del terreno è stato costruito con una risoluzione spaziale delle celle di 1x1 metri, successivamente ricampionato, nell'ambito della simulazione idraulica, con celle di dimensioni 2 x 2 metri.

La discretizzazione spaziale a 2 metri consente in ogni caso di mantenere inalterate le informazioni spaziali principali; sono infatti leggibili, cambi morfologici, rilevati stradali e ferroviari.

Legenda:

- SEZIONE: lista delle sezioni codificate
- RIVER: nome del corso d'acqua
- COORD: sistema di coordinate
- DP\_FOCE: distanze progressive delle sezioni dalla foce
- SX\_E: coordinata Est del pilastrino sinistro
- SX\_N: coordinata Nord del pilastrino sinistro
- DX\_E: coordinata Est del pilastrino destro
- DX\_N: coordinata Nord del pilastrino destro

SEZIONE	RIVER	COORD	DP_FOCE	SX_E	SX_N	DX_E	DX_N
00105__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	1049.73	1693907.99	4851160.10	1693890.83	4851169.76
00103BB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	1025.91	1693884.74	4851144.19	1693878.50	4851158.55
00103BC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	1025.41	1693884.28	4851143.99	1693878.04	4851158.35
00100PB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	1000.09	1693869.61	4851137.30	1693850.79	4851141.83
00100PC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	995.79	1693865.27	4851133.97	1693848.01	4851137.99
00092BB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	923.83	1693816.28	4851077.25	1693794.83	4851100.74
00092BC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	923.33	1693815.91	4851076.92	1693794.47	4851100.40
00089BB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	888.36	1693788.20	4851052.37	1693771.87	4851074.49
00089BC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	887.86	1693787.80	4851052.08	1693771.46	4851074.19
00085BB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	850.36	1693758.93	4851028.24	1693740.13	4851053.46
00085BC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	849.86	1693758.53	4851027.94	1693739.73	4851053.16
00078__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	782.73	1693703.02	4850984.00	1693689.55	4851009.51
00065__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	650.66	1693586.97	4850921.86	1693571.62	4850949.83
00063__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	625.05	1693567.53	4850912.39	1693546.50	4850937.38
00062BB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	616.25	1693557.89	4850908.78	1693539.42	4850933.49
00062BC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	615.74	1693557.49	4850908.49	1693539.02	4850933.19
00052BB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	517.14	1693465.80	4850865.73	1693454.28	4850885.70
00052BC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	516.64	1693465.37	4850865.48	1693453.85	4850885.45
00048__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	482.87	1693434.89	4850851.51	1693423.04	4850870.61
00045PB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	448.34	1693403.53	4850839.25	1693393.96	4850849.48
00045PC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	442.32	1693398.88	4850835.48	1693385.79	4850849.23
00044PB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	437.60	1693397.70	4850830.26	1693381.94	4850845.84
00044PC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	428.71	1693388.69	4850826.56	1693375.75	4850839.78
00042__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	418.85	1693390.43	4850814.17	1693372.78	4850827.17
00041__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	411.29	1693386.09	4850808.94	1693368.52	4850820.58
00038__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	376.80	1693346.35	4850799.66	1693339.19	4850828.07
00034BB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	336.89	1693316.48	4850785.94	1693299.93	4850799.42
00034BC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	336.39	1693316.17	4850785.56	1693299.61	4850799.03
00032PB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	321.26	1693316.15	4850770.18	1693288.63	4850786.00
00032PC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	312.02	1693304.64	4850766.66	1693282.77	4850778.92
00027__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	273.38	1693280.16	4850729.66	1693256.05	4850757.00
00021__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	211.71	1693242.59	4850686.78	1693217.15	4850705.26
00018PB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	182.57	1693209.49	4850675.10	1693200.10	4850681.69
00018PC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	170.09	1693202.43	4850664.91	1693193.07	4850671.48
00017__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	169.59	1693202.15	4850664.50	1693192.78	4850671.07
00014__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	140.54	1693182.54	4850642.66	1693173.09	4850649.84
00007PB17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	71.09	1693132.50	4850593.80	1693122.19	4850602.79
00007PC17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	58.49	1693124.70	4850583.97	1693109.43	4850597.40
00004__17	Borro del Pelacane	Gauss-Boaga > Roma 40	42.30	1693111.12	4850574.52	1693094.33	4850589.28

Tabella 5-1: Sezioni implementate nel modello idraulico

## 5.2 EVENTI SIMULATI, CONDIZIONI AL CONTORNO E PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO

Gli scenari simulati sono rappresentati da eventi caratterizzati da tempo di ritorno  $T_r$  pari a 30, 200 e 500 anni per durate di 1.00h, 1.20h, 1.50h e 2.00h.

La scelta di simulare idraulicamente gli eventi a partire dalla durata di 1.00h, che rappresenta la durata critica, consente di studiare anche gli eventi che possono avere maggiori esondazioni in termini di volumi, anche se caratterizzati da picchi dell'onda di piena minori.

Sono stati esclusi dalle simulazioni idrauliche gli eventi con durata di 0.75h, inferiore alla durata critica e quindi caratterizzati da portate al colmo e volumi inferiori.

Le condizioni al contorno del modello idraulico sono rappresentate da:

- Sollecitazioni idrologiche in testa al tratto simulato idraulicamente (vedi Figura 4-1, Figura 4-2, Figura 4-3);
- Livello idraulico costante alla confluenza con il Fiume Arno, pari a 78.03 m slm.

La condizione di valle è rappresentata dal massimo livello idraulico duecentennale del Fiume Arno in corrispondenza della confluenza con il Fosso del Pelacane. Tale condizione è stata estrapolata da una scala di deflusso calcolata mediante il software Hec-Ras 4.1.0 e fornita dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno (vedi Figura 5-1).

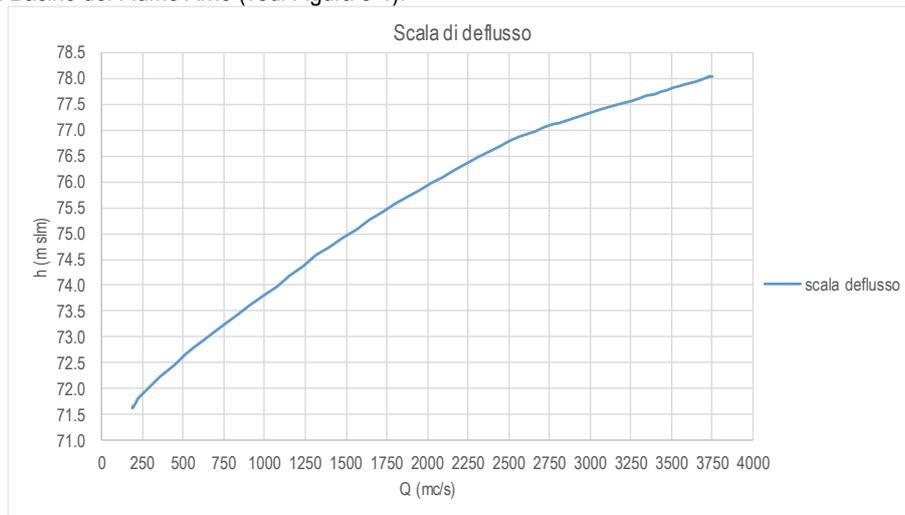


Figura 5-1: Scala di deflusso del Fiume Arno in corrispondenza del Fosso Pelacane

La condizione di valle implementata risulta estremamente cautelativa in quanto si sta ipotizzando uno scenario, fisicamente non realistico, nel quale Arno e Fosso Pelacane presentano entrambi condizioni di deflusso critiche. Questa assunzione ci permette di capire quanto il rigurgito indotto dall'Arno influisce sul corso d'acqua oggetto di studio.

Per ciò che attiene ai coefficienti di scabrezza da associare alle singole sezioni fluviali, attraverso il confronto con i parametri riportati in letteratura ed il supporto dei sopralluoghi effettuati, è stato possibile associare il coefficiente di scabrezza, secondo Manning, più appropriato. In considerazione di ciò, si è scelto un coefficiente pari a  $0.04 \text{ s/m}^{1/3}$ .

Per quanto riguarda la scabrezza delle aree contermini il corso d'acqua, simulate dal modello bidimensionale, si è scelto di adottare una scabrezza di  $0.050 \text{ s/m}^{1/3}$ .

In merito alle perdite di carico nelle strutture, i coefficienti utilizzati sono stati ricavati dalla letteratura disponibile. Tali valori, influenzano il modello in corrispondenza degli attraversamenti fluviali, che generano una brusca variazione di sezione. In particolare si è utilizzato un coefficiente di contrazione di 0.1 e un coefficiente di espansione di 0.3.

### 5.3 ANALISI DEI RISULTATI

Il tratto fluviale a monte della ferrovia è caratterizzato da esondazioni diffuse, seppure contenute, in destra idraulica, in quanto i contenimenti in sinistra risultano sensibilmente maggiori, come deducibile dalle tavole del rilievo topografico.

In questo tratto la criticità maggiore si riscontra a monte del ponte tra le sezioni 00100PB17 e 00100PC17, che considerata la sezione libera, risulta insufficiente, provocando rigurgito a monte che da luogo ad esondazioni.

In prossimità della ferrovia si riscontra un rigurgito provocato dal ponte tra le sezioni 00045PB17 e 00045PC17. Le esondazioni generate, vanno ad interessare in parte la sinistra idraulica, rimanendo comunque contenute e concentrate a monte della sede ferroviaria. Risultano più marcate le esondazioni in destra idraulica, le quali vanno ad occupare la sede ferroviaria, che risulta, per circa 250 m dal corso d'acqua, confinata tra un rilevato in terra ed un muro, come mostrato in Figura 5-2.

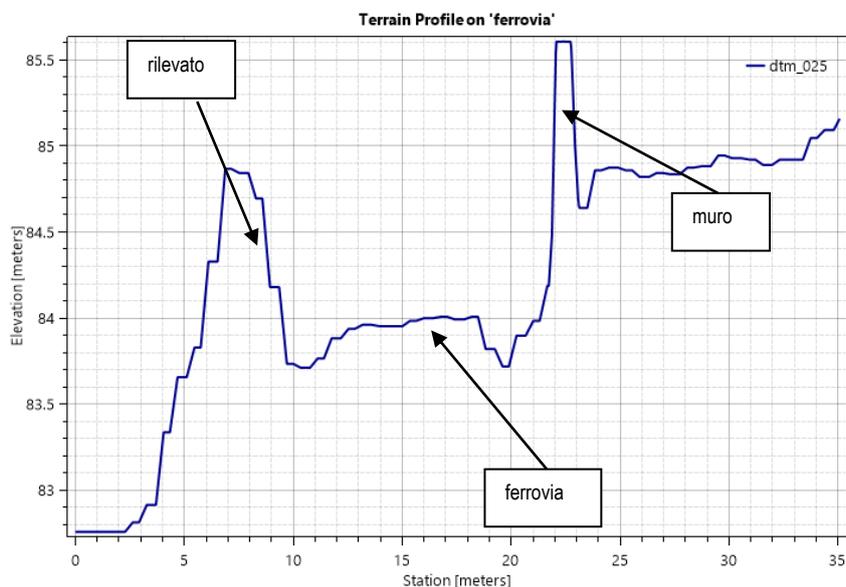


Figura 5-2: Sezione ferrovia, da DTM.

In prossimità della fine del muro, dove termina anche il rilevato, i deflussi che erano confinati nella sede ferroviaria, vanno ad interessare l'abitato di Sieci, con una direzione preferenziale est-ovest, dovuta alla morfologia del terreno.

A valle della sezione 00027\_\_17, le esondazioni, generate dal rigurgito dell'Arno, vanno ad interessare per la maggior parte le aree poste in destra idraulica, perché caratterizzate da quote inferiori rispetto alle aree in sinistra.

In linea generale le esondazioni sono più contenute in sinistra idraulica in quanto i contenimenti, sono generalmente posti a quote superiori rispetto alla destra idraulica. Considerando che i volumi esondati sono comunque moderati, e considerando la morfologia del territorio adiacente al corso d'acqua, i battenti che si generano risultano essere per la maggior parte inferiori a 40 cm, trattandosi per lo più di volumi di transito e non di ristagno.

In merito al comparto urbanistico oggetto di studio, si riscontrano allagamenti parziali, concentrati nella zona adiacente al corso d'acqua, solo per eventi con tempo di ritorno  $T_r$  500 anni.

In Figura 5-3, Figura 5-4, Figura 5-5 sono mostrati degli estratti di mappa dalle planimetrie dei battenti idraulici per  $T_r$  30, 200 e 500 anni.



Figura 5-3: Estratto di mappa dalla Planimetria dei battenti idraulici – Inviluppo Tr 30 anni



Figura 5-4: Estratto di mappa dalla Planimetria dei battenti idraulici – Inviluppo Tr 200 anni



Figura 5-5: Estratto di mappa dalla Planimetria dei battenti idraulici – Inviluppo Tr 500 anni

Per ogni tempo di ritorno sono stati involuppati i massimi livelli in alveo e i battenti nelle aree allagate. Con questa impostazione si restituiscono:

- Sezioni fluviali con livelli idrometrici;
- Profilo longitudinale con livelli idrometrici;
- Tavole dei battenti idraulici;

I risultati della modellistica monodimensionale in alveo sono riportati in Appendice B – Risultati della modellistica idraulica.

Sono quindi restituite le seguenti tavole:

L55601S06D004\_A - Tavola 4 - Libretto Sezioni e Profilo Longitudinale con Livelli Idrometrici Tr 30 - 200 - 500 anni

L55601S06D005\_A - Tavola 5 - Planimetria dei Battenti idraulici - Inviluppo Tr 30 anni

L55601S06D006\_A - Tavola 6 - Planimetria dei Battenti idraulici - Inviluppo Tr 200 anni

L55601S06D007\_A - Tavola 7 - Planimetria dei Battenti idraulici - Inviluppo Tr 500 anni

## 6. PERICOLOSITÀ IDRAULICA

A valle dell'implementazione del modello integrato idrologico-idraulico si è arrivati alla definizione delle aree a pericolosità idraulica, ai sensi del DPGR 53R/2011, che definisce le probabilità di esondazione come segue:

- **Aree a pericolosità idraulica molto elevata (I4)**, che risultano allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- **Aree a pericolosità idraulica elevata (I3)**, con aree allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni;
- **Aree a pericolosità media (I2)**, caratterizzate da eventi alluvionali con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni;
- **Aree a pericolosità bassa (I1)**, aree collinari o montane.

L'implementazione della modellistica idraulica fornisce, per gli eventi considerati, i valori di massimo livello e portata in alveo per ciascuna sezione del corso d'acqua analizzato, e di battenti idraulici nelle aree soggette ad allagamenti.

L'inviluppo dei battenti su ciascun tempo di ritorno ha quindi permesso la definizione della pericolosità idraulica ai sensi del D.P.G.R. 53R/2011, riportata alla seguente tavola:

L55601S06D008\_A - Tavola 08 - Planimetria della Pericolosità idraulica ai sensi del 53/R

## 7. FATTIBILITÀ

Le condizioni di attuazione delle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali possono essere differenziate secondo le seguenti categorie di fattibilità:

- **Fattibilità senza particolari limitazioni (F1)**: si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali non sono necessarie prescrizioni specifiche ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia;
- **Fattibilità con normali vincoli (F2)**: si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali è necessario indicare la tipologia di indagini e/o specifiche prescrizioni ai fini della valida formazione del titolo abilitativo all'attività edilizia;
- **Fattibilità condizionata (F3)**: si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali per le quali, ai fini della individuazione delle condizioni di compatibilità degli interventi con le situazioni di pericolosità riscontrate, è necessario definire la tipologia degli approfondimenti di indagine da svolgersi in sede di predisposizione dei piani complessivi di intervento o dei piani attuativi o, in loro assenza, in sede di predisposizione dei progetti edilizi;
- **Fattibilità limitata (F4)**: si riferisce alle previsioni urbanistiche ed infrastrutturali la cui attuazione è subordinata alla realizzazione di interventi di messa in sicurezza che vanno individuati e definiti in sede di redazione del medesimo regolamento urbanistico, sulla base di studi, dati da attività di monitoraggio e verifiche atte a determinare gli elementi di base utili per la predisposizione della relativa progettazione.

Dall'analisi dei risultati, il comparto oggetto di studio risulta caratterizzato per la maggior parte da aree non perimetrate. Si evidenzia una zona adiacente al corso d'acqua caratterizzata da aree a pericolosità idraulica media (I.2) e da una fascia, di larghezza massima circa 7.00 m, di aree a pericolosità idraulica molto elevata (I.4).

Si attribuisce quindi classe **Fattibilità limitata (F4)** alle aree in I.4 e **Fattibilità senza particolari limitazioni (F1)** alla restante area.

Per quanto esposto, gli interventi previsti all'interno del comparto risultano fattibili senza particolari limitazioni al di fuori della fascia di 10 m dal ciglio di sponda del corso d'acqua, così come previsto dal RD 523/1904. Sono ammesse distanze minori previo rilascio di autorizzazione dell'autorità idraulica competente.

## APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA

### A.1 MODELLISTICA IDROLOGICA

La modellistica idrologica per la determinazione dell'idrogramma di piena in una o più sezioni fluviali di un bacino idrografico deve significativamente rappresentare tutte le fasi che si hanno a partire dalla distribuzione delle piogge insistenti sul bacino, fino alla valutazione dell'onda di piena.

La trasformazione da pioggia al suolo a portata nella sezione di chiusura avviene secondo una cascata di processi. L'ingresso principale al modello è costituito da una serie di misurazioni di pioggia. La quota parte di tali precipitazioni che andrà in scorrimento superficiale, detta anche precipitazione efficace (netta), viene valutata con un opportuno *modello di trasformazione afflussi-deflussi*, per la stima della produzione di deflusso idealmente in ciascun punto del bacino, avente la dimensione di una portata per unità di area. Infine, il processo di concentrazione dei deflussi nel reticolo idrografico e di trasferimento lungo questo fino alla sezione di chiusura verrà rappresentato tramite un opportuno *modello di formazione dell'onda di piena*.

La metodologia alla base degli studi effettuati mira ad un'agevole caratterizzazione degli eventi in termini di tempi di ritorno e durata dell'evento meteorico; conseguenza diretta, la possibilità di definire i livelli di rischio in funzione della probabilità di accadimento. Ciò si ottiene facilmente attraverso una procedura semplificata di generazione di eventi sintetici, che si basa sulle seguenti ipotesi:

- isofrequenza fra evento meteorico e portata in alveo ( $T_r$  evento di pioggia =  $T_r$  idrogramma di piena).

#### A.1.1 REGIME PLUVIOMETRICO – STUDIO REGIONALE LSPP

Il regime pluviometrico è stato caratterizzato sulla base dei risultati prodotti dal gruppo di lavoro dell'attività "Modellazione idrologica", nell'ambito dell'Accordo stipulato tra la Regione Toscana e il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze, per lo sviluppo di attività di ricerca sulla Mitigazione del Rischio Idraulico nella Regione Toscana.

Nell'ambito di tale lavoro è stata fornita la stima dell'altezza di pioggia per le diverse durate caratteristiche (1, 3, 6, 12 e 24 ore e giornaliera) e i diversi tempi di ritorno fissati (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 e 500 anni). Per le durate caratteristiche, sono state elaborate le griglie di risoluzione 1 km dei valori estremi delle altezze di pioggia, per i tempi di ritorno.

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 è 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  $n$ .

Una volta noti i parametri  $a$  e  $n$  della LSPP per i tempi di ritorno fissati è possibile calcolare l'altezza di pioggia di durata desiderata in punto della Regione Toscana.

#### A.1.2 CALCOLO DELLA PIOGGIA DI PROGETTO SU UN BACINO IDROGRAFICO

Dalle linee guida della Regione Toscana è possibile definire la metodologia di calcolo delle altezze di pioggia su un bacino idrografico.

Per calcolare l'altezza di pioggia su un bacino idrografico è necessario individuare lo spartiacque del bacino imbrifero e, una volta scelto il tempo di ritorno, è possibile valutare le altezze di pioggia.

**Utilizzo dei parametri  $a$  e  $n$  della LSPP** - Noti i parametri  $a$  e  $n$  della LSPP per assegnato  $T_r$ , viene definita la durata  $t$  dell'evento. Per un bacino idrografico si usa  $t = T_r$  (durata dell'evento meteorico). È possibile quindi trovare l'altezza di pioggia in ogni cella tramite la relazione:

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

con:  $h$  = altezza di pioggia [mm];  $t$  = durata dell'evento meteorico [ore],  $a$  e  $n$  parametri caratteristici.

La stima dell'altezza di pioggia con l'equazione può essere effettuata tramite software GIS con un *tool* tipo **Raster Calculator**.

Una volta trovata l'altezza di pioggia  $h$  in ogni cella, per la durata e il tempo di ritorno stabilito, è sufficiente calcolare il valore medio sul bacino idrografico.

#### A.1.3 CALCOLO DEGLI IDROGRAMMI DI PROGETTO

La determinazione degli idrogrammi di piena è stata effettuata secondo lo schema e la procedura che comunemente veniva utilizzata dalla *Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana*. **Nel caso specifico del presente studio, tutti i parametri necessari alla determinazione e formazione dell'onda di piena sono stati ricalcolati.**

Tale procedura parte dalla teoria dell'*Idrogramma Istantaneo Unitario (Instantaneous Unit Hydrograph, IUH)* dove i parametri in gioco sono ricavati dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino, ottenendo così un *Idrogramma Istantaneo Unitario Geomorfologico* di cui vengono riportate di seguito le linee principali. Il modello di formazione dell'onda di piena adottato è quello proposto da Nash.

L'input meteorico è rappresentato da uno "ietogramma sintetico ad intensità costante" con il quale si assume che l'intensità di precipitazione sia costante durante l'intera evoluzione del fenomeno. Tale ietogramma consente la determinazione della portata al colmo di assegnato tempo di ritorno e durata dell'evento.

Il valore della pioggia lorda deve essere depurato delle perdite. La trasformazione afflussi-deflussi adottata prevede l'adozione di un "approccio asintotico a soglia" che richiede la stima di due parametri: la *perdita iniziale*, schematizzata introducendo un *volume unitario di perdita iniziale* (indicato con  $I_a$ ) che il terreno assorbe completamente durante i primi istanti di precipitazione (dall'inizio dell'evento  $t=0$  all'istante  $t=t_a$ ) e la perdita per infiltrazione nel suolo durante l'evento, schematizzata con una *infiltrazione cumulata costante a saturazione* (indicata con  $K_s$ ).

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a(0) + \int_0^{t_a} (P(\tau) - K_s) d\tau \\ P_n(t) = 0 \end{cases} \quad \text{per } t < t_a$$

$$\begin{cases} I_a(t) = I_a \\ P_n(t) = P(t) - K_s \end{cases} \quad \text{per } t \geq t_a$$

dove:

$P(t)$  intensità di precipitazione lorda sul bacino [mm/h];

$P_n(t)$  intensità di precipitazione netta sul bacino [mm/h];

$I_a(t)$  volume unitario di perdita iniziale all'istante  $t$  dell'evento [mm];

$I_a = I_a(t_a)$  volume di perdita iniziale per unità di area [mm];

$K_s$  velocità di infiltrazione a saturazione [mm/h].

In particolare per la stima del coefficiente  $I_a$  si è utilizzata la formula  $I_a = 3.3 + 22S_b$   
In cui  $S_b$  rappresenta la percentuale di superficie boscata presente sul bacino considerato.

Per quanto riguarda invece il valore del coefficiente  $K_s$  adottato, nella tabella seguente si riportano i valori dello stesso in funzione della classe geolitologica.

CODICE	DESCRIZIONE	KS [mm/h]
aC	("arenarie di Monte Cervarola"); arenarie turbiditiche quarzoso-feldspatiche a grana fine, in strati sottili; talora lenti di selci (sel) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
alb	("alberese" e "formazione di Lanciata") calcari a grana fine grigio chiari, calcari marnosi scuri e arenarie calcaree gradate Paleocene-Eocene medio	4.65
all	alluvioni recenti e attuali Olocene	0
aS	("arenaria di Monte Senario") arenarie quarzoso-feldspatiche tipo "macigno", ma in generale più grossolane e contenenti ciottoli di quarzo, micascisti, filladi, calcari Paleogene	1.55
at	alluvioni terrazzate; ove distinte at1, at2, at3 Pleist. sup.	0
bn	(breccie nummulitiche) breccie poligeniche e calcareniti da torbide Paleogene	4.65
bw	conglomerati e arenarie di materiale ofiolitico alla base di cb.Paleocene-Eocene medio	0.775
cb	argille e marne con calcari, calcari marnosi, arenarie e calcareniti intercalate talora breccie sedimentarie costituite da rocce verdi, diaspri e calcari litografici	1.55
dt	detriti	2.325
fh	("formazione marno-siltose = flysch ad Elmintoidi"): calcari marnosi scuri, marne e arenarie calcaree Cretaceo superiore	4.65
fP1	("argilliti di Fiumalbo -marne di Le Piastre") argilliti varicolori, siltiti e marne grigie Oligocene superiore	0
fPaC	intervalli frequenti o potenti di marne siltose e siltiti in aC Aquitaniano-Langhiano superiore	0
fVc	(formazione di Vallina formazione di Sillano) argilloscisti variegati, calcari marnosi verdastri o grigi, calcareniti minute e arenarie calcaree Cret. sup.-Eocene inf.	4.65
fVR	(formazione di Villa a Radda) argilloscisti talora siltosi, prevalentemente rossi, con pochi strati calcari marnosi verdastri o arenarie calcaree, intercalati nella parte alta di pf o al tetto di questa Cretaceo sup.-Eocene inf.	0
mg	argille con lenti di gesso e di salgemma Messiniano sup.	0
Nu	calcareniti e calciruditi grigie, gradate Eocene	4.65
ol	a luoghi intercalazioni di materiale ligure in aC (olistostromi) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
Pag	argille azzurre e cinerine Plioc. inf.-medio	0
pb	("argille a palombini") argilliti e marne fogliettate con intercalazioni di calcari a palombini Cretaceo inf.	0
Pcg	conglomerati e ghiaie prevalentemente argillose, con sabbie e sabbie argillose (al tetto e laterale di Ps) Plioc. inf.-medio	0.775
pf	("pietraforte") arenarie calcaree alternate ad argilliti subordinatamente livelli di marne varietà ofiolitifera Cretaceo superiore-Eocene inf.	1.55
Ps	sabbie gialle, arenarie Pliocene inf.-medio	1.55
sc	("scaglia toscana") argilliti rosse e varicolori con intercalazioni di calcari silicei grigi, marne rosse e calcareniti; al tetto marne siltose grigie, subordinatamente varicolori; Cretaceo inf. p.p.-Oligocene	0
Vs	("sabbie del Tasso") sabbie con lenti di ciottoli e sabbie argillose Pleist. inf.	2.325
VVB	("formazione di Villa Babbiani") sabbie con tasche e lenti di ciottoli di "macigno" Pleist. inf.	2.325

Tabella 7-1: Valori  $K_s$  utilizzati nel presente studio

Osservando sperimentalmente le piogge intense è possibile affermare che, all'interno di una certa area, l'intensità di precipitazione durante l'evento piovoso varia da punto a punto, anche in maniera sensibile, e questa variazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'estensione dell'area considerata. Per questo alla precipitazione lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, è stato applicato un coefficiente di ragguaglio dipendente dall'area del bacino e dalla durata dell'evento, in linea con la trattazione riportata nella Regionalizzazione delle Portate di Piena della Regione Toscana, secondo la seguente formulazione:

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

dove  $t$  è la durata dell'evento,  $A$  è l'area del bacino sotteso e  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

Il parametro  $\alpha$  della formula sopra riportata dipende dal coefficiente  $a'$  della curva di possibilità pluviometrica a tre parametri.

Poiché le curve delle nuove LSPP sono rappresentate con la formula a due parametri nella formulazione  $h(t) = a t^n$ , al fine di determinare il corrispettivo valore di  $a'$  da utilizzare nella stima del coefficiente di ragguaglio, si è operato come segue:

- dalle nuove LSPP sono stati calcolati per ogni "Tr" e per ogni durata "D" l'altezza di pioggia "h";
- dalla formula a 3 parametri  $h = a' * t^{n'} * Tr^{m'}$  in campo logaritmico si ottiene  $\log(h) = \log(a') + n' * \log(t) + m' * \log(Tr)$ ;
- tramite regressione lineare, sulle altezze di pioggia  $h$ , funzione della durata e del tempo di ritorno, si ottengono i parametri  $a'$ ,  $m'$  ed  $n'$  della formula a 3 parametri.

Il coefficiente  $a'$  così calcolato è stato utilizzato per la determinazione del coefficiente di ragguaglio "Kr".

L'*Idrogramma Istantaneo Unitario* rappresenta l'idrogramma di piena causato da un evento impulsivo di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero. Ipotizzando un comportamento del sistema bacino idrografico lineare e stazionario, la risposta  $Q(t)$  ad una sollecitazione meteorica di intensità  $p(t)$ , supposta costante su tutti i punti del bacino (approccio di tipo integrato), è data dall'integrale di convoluzione fra ietogramma di pioggia efficace e IUH:

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

dove:

$Q(t)$  è la portata defluente;

$p(t) = A i(t)$ , con  $A$  area del bacino e  $i(t)$  intensità di pioggia netta ragguagliata sul bacino;

$U(t)$  è l'idrogramma unitario

$$\begin{cases} U(0) = 1 \\ U(t > 0) = 0 \end{cases} \int_0^\infty U(t) dt = 1$$

La caratterizzazione di un modello di formazione della piena basato su tale principio consiste quindi essenzialmente nella determinazione della forma della funzione  $U(t)$ , che può essere stimata fissandone la struttura sulla base di considerazioni teoriche, e stimandone i parametri o per taratura, utilizzando dati sperimentali contemporanei di afflussi sul bacino e deflussi nella sezione di chiusura, o sulla base di caratteristiche geomorfologiche del bacino. Uno dei più diffusi modelli concettuali utilizzati per determinare la forma della funzione  $U(t)$  è quello basato sull'ipotesi che il bacino idrografico si comporti come un insieme di  $n$  serbatoi lineari disposti in serie. L'espressione dell'idrogramma istantaneo unitario che ne deriva per un singolo serbatoio lineare è:

$$U(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}}$$

dove  $k$  è la costante del serbatoio che rappresenta il tempo caratteristico di svuotamento del serbatoio.

Supponendo che il bacino si comporti come una serie di  $n$  serbatoi, ciascuno con uguale tempo caratteristico  $k$ , la portata in uscita dall'intero bacino come risposta ad un input impulsivo distribuito sul bacino rappresenterà l'idrogramma istantaneo unitario del bacino alla sua chiusura, nota come *Idrogramma Istantaneo Unitario di Nash*:

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

dove la funzione  $\Gamma(n) = (n-1)!$ .

Il momento di primo ordine dell'IUH rispetto all'origine viene detto *tempo di ritardo (lag) Tl* ed è dato da:

$$Tl = \int_0^\infty U(t) t dt$$

In questo schema il tempo di ritardo è dato dal prodotto  $n*k$  (pari proprio alla media dell'idrogramma unitario). I parametri  $n$ ,  $k$  dell'IUH di Nash sono stati ricavati sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del reticolo idrografico, mediante le seguenti espressioni:

$$n = 3.29(Rb/Ra)^{0.78} Rl^{0.07}$$

$$k = 0.7(Ra/(Rb \cdot Rl))^{0.48} Lc/v$$

in unità congruenti, dove:

$R_b$  = rapporto di biforcazione;

$R_l$  = rapporto di lunghezza;

$R_a$  = rapporto di area;

$L_c$  = lunghezza del canale principale (dalla sorgente alla sezione di interesse);

$v$  = fattore cinematico legato alla velocità della piena ("media spazio-temporale di scorrimento dell'acqua o di propagazione dell'onda di piena").

I parametri geomorfologici sopra elencati permettono di rappresentare lo sviluppo della rete idrografica mediante una descrizione gerarchica e possono quindi essere calcolati, una volta ordinato il reticolo idrografico secondo il metodo di gerarchizzazione e classificazione geomorfologica di Horton e Strahler.

La gerarchizzazione di una rete idrografica si esegue attribuendo un ordine a ciascun segmento fluviale; un'asta che non nasce dalla confluenza di altre due è di primo ordine; un'asta di ordine  $n$  e un'asta di ordine  $n-1$  congiungendosi danno origine a un'asta di ordine  $n$ ; due aste di ordine  $n$  congiungendosi danno origine a un'asta di ordine  $n+1$ . Per ogni bacino idrografico esiste una relazione fra il numero dei rami fluviali aventi un certo ordine e l'ordine stesso: in genere, il valore del primo diminuisce all'aumentare del secondo.

L'organizzazione della rete idrografica e quindi il suo grado di gerarchizzazione possono essere espressi mediante parametri quantitativi che definiscono la geometria del reticolo idrografico e il suo grado di organizzazione gerarchica. Il parametro di base è il rapporto di biforcazione  $R_b$ , che esprime il rapporto fra il numero di segmenti fluviali di un certo ordine ed il numero dei segmenti dell'ordine immediatamente successivo. Considerando invece la lunghezza media delle aste di un certo ordine si ottiene il rapporto fra le lunghezze,  $R_l$ . Analogamente, si definisce anche il rapporto fra le aree,  $R_a$ .

I tre parametri appena descritti vengono determinati sulla base delle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} N_u &= R_b^{\omega-u} \\ \bar{L}_u &= \bar{L}_1 R_l^{u-1} \\ \bar{A}_u &= \bar{A}_1 R_a^{u-1} \end{aligned}$$

dove

$\omega$  è l'ordine massimo del reticolo;

$N_u$  il numero delle aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3, \dots$ ;

$\bar{L}_u$  la lunghezza media delle aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3, \dots$ ;

$\bar{A}_u$  l'area media sottesa da aste di ordine  $u$ , con  $u=1, 2, 3, \dots$

## A.2 MODELLISTICA IDRAULICA

Il modello idraulico è stato sviluppato attraverso il software HEC-RAS 5.0.2, brevemente descritto nei paragrafi seguenti.

### A.2.1 MODELLISTICA IDRAULICA MONODIMENSIONALE

La dinamica fluviale in alveo è stata modellata con schema monodimensionale in moto vario attraverso le equazioni di De Saint Venant. In particolare il modello di moto vario risolve in forma numerica le equazioni di continuità e della quantità di moto che risultano:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_L = 0 \\ \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QU}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial H}{\partial x} + S_f + S_h \right) \right) = 0 \end{cases}$$

in cui:

- $A$  = area della sezione liquida [m<sup>2</sup>];
- $Q$  = portata [m<sup>3</sup>/s];
- $q_L(x)$  = portata laterale (positiva se entrante) [m<sup>2</sup>/s];
- $H = z+h$  è la quota del pelo libero ( $z$  quota del fondo e  $h$  battente idraulico) [m];
- $g$  = accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>];
- $U$  = velocità media della corrente [m/s];
- $S_f$  = perdite di carico distribuite per unità di lunghezza [m/m];
- $S_h$  = perdite di carico concentrate [m/m].

Assumendo la gradualità spazio-temporale del fenomeno, la perdita di carico effettivo può essere stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{R^{4/3}A^2}$$

dove  $R$  [m] è il raggio idraulico ed  $n$  rappresenta il coefficiente di Manning [s/m<sup>1/3</sup>].

Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, si valutano le perdite di carico effettivo addizionali,  $S_h$ , mediante la formula:

$$S_h = \frac{d}{dx} \left( C \frac{Q^2}{2g} \frac{1}{A^2} \right)$$

in cui  $C$  è un coefficiente funzione della velocità, del battente e delle proprietà geometriche della sezione.

Per la risoluzione del sistema di equazioni è necessario conoscere le condizioni al contorno di ciascun tratto sia a monte che a valle. La condizione di valle può essere costituita da un idrogramma di livelli idrometrici, oppure da un legame funzionale tra portata e livelli ovvero una scala di deflusso.

A monte invece è necessario imporre una condizione sulla portata in ingresso attraverso un idrogramma di piena, che è stato ricavato sulla base dell'analisi idrologica.

Dal punto di vista numerico, il sistema di equazioni monodimensionali viene risolto con uno schema implicito alle differenze finite.

### A.2.2 MODELLISTICA BIDIMENSIONALE

La modellistica bidimensionale prevede la risoluzione numerica delle equazioni "Shallow Water", le quali risultano da un'approssimazione delle equazioni di Navier-Stokes in cui le velocità in direzione  $x$  e  $y$  sono mediate sulla verticale e l'effetto delle tensioni turbolente di Reynolds è simulato attraverso l'introduzione un parametro di viscosità turbolenta. Inoltre si assumono valide le seguenti ipotesi:

- scala spaziale verticale  $\ll$  scala spaziale orizzontale;
- fluido incomprimibile;
- componente verticale della velocità trascurabile;
- distribuzione della pressione idrostatica lungo la verticale.

L'equazione di continuità risulta:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} + q = 0$$

dove  $H(x,y,t) = z(x,y) + h(x,y,t)$  con  $z$  la quota del fondo ed  $h$  il battente idraulico,  $u$  e  $v$  rispettivamente le componenti lungo  $x$  e lungo  $y$  della velocità mediata sulla verticale e  $q$  il termine che tiene conto di possibili immissioni/rimozioni di portata.

L'equazione della quantità di moto risulta:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + fv \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \end{cases}$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $\nu_t$  è il coefficiente di viscosità turbolenta orizzontale,  $c_f$  è il coefficiente di resistenza ed  $f$  è il parametro di Coriolis. Il coefficiente di viscosità turbolenta è a sua volta calcolato come:

$$\nu_t = Dhu_s$$

in cui  $D$  è una costante empirica adimensionale e  $u_s$  è la velocità di attrito che può essere calcolata come segue:

$$u_s = \sqrt{gRS} = \frac{\sqrt{g}}{C} |U| = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}} |U|$$

con  $R$  il raggio idraulico,  $S$  la pendenza della linea dell'energia,  $n$  il numero di Manning ed  $|U|$  il modulo della velocità. I valori da assegnare alla costante  $D$  sono riportati in Tabella 7-2.

Il coefficiente di attrito  $c_f$  è ottenuto attraverso la formula di Manning:

$$c_f = \frac{n^2 g}{R^{4/3}} |U|$$

mentre il parametro di Coriolis è:

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

con  $\omega$  la velocità angolare della terra e  $\varphi$  la latitudine.

D	Intensità di mescolamento	Geometria e superficie
0.11 – 0.26	bassa	canali rettilinei, superfici lisce
0.30 – 0.77	moderata	meandri poco accentuati, irregolarità moderate
2.0 – 5.0	alta	meandri molto accentuati, superfici scabre

Tabella 7-2: Valori suggeriti da assegnare alla costante D.

Le equazioni “Shallow Water” possono essere ulteriormente semplificate quando, nell’equazione della quantità di moto, i termini associati all’accelerazione di gravità ed all’attrito sono predominanti rispetto a quelli inerziali. Attraverso opportune manipolazioni algebriche sostituendo la versione semplificata dell’equazione della quantità di moto nell’equazione di continuità, si ottiene la forma approssimata detta “Diffusion Wave Approximation”:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0$$

dove:

$$\beta = \frac{R(H)^{5/3}}{n|\nabla H|^{1/2}}$$

Le condizioni al contorno da assegnare sui bordi del dominio di calcolo possono essere di tre differenti tipologie:

- livello della superficie libera;
- gradiente della superficie libera in direzione perpendicolare al dominio di calcolo;
- portata che attraversa il bordo del dominio.

La griglia di calcolo è non strutturata e può essere utilizzato un approccio con “sotto-griglia” (Casulli, 2008) per cui le celle di calcolo hanno passo maggiore rispetto alla batimetria impiegata (Figura 7-1a) e contengono informazioni aggiuntive quali raggio idraulico e area bagnata delle varie facce e curva di invaso dei volumi. Tali grandezze possono essere pre-calcolate prima della simulazione per ridurre il tempo di calcolo. In questo modo si perdono i dettagli ad alta risoluzione, ma l’informazione derivante da essi rimane disponibile (Figura 7-1b, c).

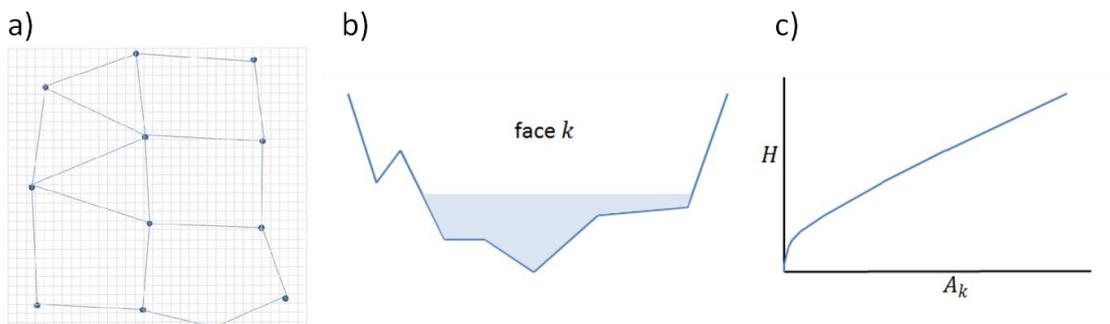


Figura 7-1: a) Esempio di “sotto-griglia”. b) Area bagnata associata ad una faccia della cella di calcolo k. c) Curva di invaso associata ad una cella di calcolo k.

Dal punto di vista della risoluzione numerica, viene impiegata una discretizzazione ibrida che combina differenze finite e volumi finiti. Nello specifico le differenze finite sono utilizzate per le derivate temporali mentre un’approssimazione ibrida viene impiegata per le derivate spaziali.

Per quel che riguarda le aree simulate attraverso celle di accumulo, il fenomeno non stazionario è descritto attraverso la sola legge d’invaso:

$$A_{ck} \frac{\partial h_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}(h_k, h_i)$$

dove  $A_{ck}$  e  $h_k$  rappresentano rispettivamente l’area e il livello idrico della cella  $k$ -esima,  $h_i$  il livello idrico nella generica cella  $i$ -esima circostante, e  $Q_{ki}$  la portata scambiata con detta cella.

Per accoppiare la modellazione monodimensionale a quella bidimensionale vengono utilizzate le cosiddette “Lateral Structure” che simulano il comportamento di uno stramazzo a cui possono essere associate diverse caratteristiche di funzionamento.

Quando una simulazione prevede inoltre la presenza di aree 2D e celle di accumulo, queste vengono messe in comunicazione da “2D/SA connection”, anch’essi oggetti che simulano il funzionamento idraulico di uno stramazzo.

## APPENDICE B: RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDRAULICA

Legenda:

- Sezione: codifica delle sezioni implementate nel modello idraulico;
- Q total: portata al colmo [mc/s];
- W.S.Elev: livello idrometrico [m slm];
- E.G. Elev: livello della linea dell'energia [m slm];
- Vel Chnl: velocità media del flusso [m/s];
- Froude # Chl: numero di Froude [-].

TR30 d=1.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	27.17	105.13	105.49	2.7	0.77
00103BB17	27.16	104.94	105.25	2.5	0.56
00103BC17	27.16	104.65	104.99	2.6	0.60
00100PB17	21.17	104.81	104.91	1.4	0.28
00100PC17	21.16	103.07	104.19	4.7	1.27
00092BB17	26.92	101.60	101.86	2.2	0.58
00092BC17	26.92	100.71	101.62	4.2	1.35
00089BB17	27.03	99.85	100.12	2.3	0.57
00089BC17	27.03	98.89	99.80	4.2	1.22
00085BB17	27.02	98.25	98.51	2.2	0.59
00085BC17	27.02	97.18	98.32	4.7	1.58
00078__17	27.03	93.84	94.54	3.7	1.18
00065__17	27.08	90.38	91.25	4.1	1.37
00063__17	26.64	89.81	90.15	2.6	0.80
00062BB17	24.66	89.71	90.06	2.6	0.83
00062BC17	24.66	88.87	89.57	3.7	1.14
00052BB17	21.06	86.12	86.55	2.9	0.83
00052BC17	21.06	85.40	86.37	4.4	1.37
00048__17	26.07	84.12	84.73	3.5	1.05
00045PB17	26.80	83.73	84.09	2.7	0.56
00045PC17	26.80	83.71	84.05	2.6	0.54
00044PB17	27.03	83.78	84.00	2.1	0.41
00044PC17	27.03	82.43	83.16	3.8	1.02
00042__17	27.03	82.18	82.92	3.8	1.20
00041__17	27.03	81.95	82.87	4.3	1.40
00038__17	27.03	81.00	81.52	3.2	0.98
00034BB17	27.03	80.53	80.71	1.9	0.59
00034BC17	27.03	80.11	80.27	1.8	0.40
00032PB17	27.03	80.11	80.23	1.5	0.35
00032PC17	27.03	79.09	79.53	2.9	0.79
00027__17	27.03	78.60	79.03	2.9	0.80
00021__17	27.00	78.10	78.13	2.0	0.47
00018PB17	27.01	78.08	78.11	2.4	0.44
00018PC17	27.01	78.05	78.08	2.4	0.46
00017__17	27.01	78.05	78.08	2.2	0.40
00014__17	27.32	78.05	78.06	1.6	0.28
00007PB17	-49.30	78.04	78.05	-2.4	0.34
00007PC17	-49.30	78.03	78.03	-2.1	0.30
00004__17	-49.32	78.03	78.03	-0.7	0.08

TR30 d=1.20 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	26.29	105.09	105.46	2.7	0.78
00103BB17	26.29	104.90	105.20	2.4	0.56
00103BC17	26.29	104.63	104.96	2.5	0.59
00100PB17	20.63	104.78	104.88	1.4	0.28
00100PC17	20.63	103.04	104.16	4.7	1.27
00092BB17	26.07	101.57	101.82	2.2	0.58
00092BC17	26.07	100.68	101.59	4.2	1.36
00089BB17	26.18	99.80	100.08	2.3	0.57
00089BC17	26.18	98.86	99.76	4.2	1.22
00085BB17	26.18	98.22	98.47	2.2	0.59
00085BC17	26.18	97.16	98.27	4.7	1.58
00078__17	26.19	93.81	94.51	3.7	1.18
00065__17	26.24	90.36	91.21	4.1	1.37
00063__17	25.90	89.80	90.13	2.6	0.80
00062BB17	24.09	89.69	90.04	2.6	0.83
00062BC17	24.09	88.85	89.54	3.7	1.14
00052BB17	20.75	86.10	86.53	2.9	0.83
00052BC17	20.75	85.38	86.36	4.4	1.38
00048__17	25.41	84.07	84.71	3.5	1.09
00045PB17	26.04	83.65	84.02	2.7	0.57
00045PC17	26.04	83.62	83.97	2.6	0.56
00044PB17	26.25	83.70	83.92	2.1	0.41
00044PC17	26.25	82.41	83.12	3.7	1.02
00042__17	26.25	82.16	82.88	3.8	1.19
00041__17	26.25	81.92	82.83	4.2	1.40
00038__17	26.25	80.98	81.49	3.2	0.98
00034BB17	26.25	80.51	80.68	1.9	0.59
00034BC17	26.25	80.06	80.22	1.7	0.40
00032PB17	26.25	80.06	80.18	1.5	0.35
00032PC17	26.25	79.06	79.49	2.9	0.79
00027__17	26.25	78.57	79.00	2.9	0.80
00021__17	26.17	78.10	78.13	2.0	0.46
00018PB17	26.16	78.08	78.11	2.3	0.43
00018PC17	26.16	78.05	78.08	2.3	0.44
00017__17	26.16	78.05	78.08	2.1	0.38
00014__17	26.43	78.05	78.06	1.6	0.27
00007PB17	-49.44	78.04	78.05	-2.4	0.35
00007PC17	-49.44	78.03	78.03	-2.1	0.30
00004__17	-49.45	78.03	78.03	-0.7	0.08

TR30 d=1.50 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	25.74	105.06	105.43	2.7	0.78
00103BB17	25.74	104.88	105.17	2.4	0.56
00103BC17	25.74	104.62	104.94	2.5	0.59
00100PB17	20.30	104.76	104.86	1.4	0.28
00100PC17	20.30	103.03	104.14	4.7	1.27
00092BB17	25.52	101.55	101.79	2.2	0.58
00092BC17	25.52	100.66	101.56	4.2	1.36
00089BB17	25.62	99.78	100.05	2.3	0.57
00089BC17	25.62	98.84	99.73	4.2	1.22
00085BB17	25.62	98.19	98.44	2.2	0.59
00085BC17	25.62	97.14	98.25	4.7	1.57
00078__17	25.63	93.80	94.49	3.7	1.18
00065__17	25.67	90.34	91.19	4.1	1.37
00063__17	25.39	89.78	90.11	2.5	0.80
00062BB17	23.69	89.68	90.02	2.6	0.84
00062BC17	23.69	88.83	89.52	3.7	1.14
00052BB17	20.53	86.09	86.52	2.9	0.83
00052BC17	20.53	85.37	86.34	4.4	1.38
00048__17	24.92	84.03	84.69	3.6	1.11
00045PB17	25.48	83.60	83.96	2.7	0.58
00045PC17	25.48	83.56	83.91	2.6	0.57
00044PB17	25.68	83.64	83.86	2.1	0.42
00044PC17	25.68	82.39	83.09	3.7	1.01
00042__17	25.68	82.15	82.86	3.7	1.19
00041__17	25.68	81.91	82.81	4.2	1.40
00038__17	25.67	80.96	81.46	3.1	0.98
00034BB17	25.67	80.49	80.66	1.9	0.59
00034BC17	25.67	80.03	80.18	1.7	0.40
00032PB17	25.67	80.02	80.14	1.5	0.35
00032PC17	25.67	79.04	79.47	2.9	0.79
00027__17	25.67	78.54	78.97	2.9	0.79
00021__17	25.63	78.10	78.13	2.0	0.46
00018PB17	25.64	78.08	78.11	2.2	0.42
00018PC17	25.64	78.05	78.08	2.3	0.43
00017__17	25.64	78.05	78.08	2.1	0.38
00014__17	25.87	78.05	78.06	1.5	0.26
00007PB17	-49.51	78.04	78.05	-2.4	0.35
00007PC17	-49.51	78.03	78.03	-2.1	0.30
00004__17	-49.50	78.03	78.03	-0.7	0.08

TR30 d=2.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	22.66	104.92	105.28	2.7	0.79
00103BB17	22.66	104.74	105.00	2.3	0.55
00103BC17	22.66	104.56	104.82	2.3	0.54
00100PB17	18.40	104.67	104.75	1.3	0.27
00100PC17	18.40	102.94	104.01	4.6	1.29
00092BB17	22.49	101.41	101.64	2.1	0.58
00092BC17	22.49	100.55	101.43	4.2	1.39
00089BB17	22.58	99.62	99.87	2.2	0.57
00089BC17	22.58	98.73	99.56	4.1	1.22
00085BB17	22.58	98.06	98.29	2.1	0.58
00085BC17	22.58	97.07	98.09	4.5	1.57
00078__17	22.58	93.71	94.35	3.6	1.18
00065__17	22.62	90.26	91.05	3.9	1.35
00063__17	22.55	89.71	90.01	2.4	0.78
00062BB17	21.44	89.61	89.93	2.5	0.84
00062BC17	21.44	88.74	89.41	3.6	1.13
00052BB17	19.34	86.04	86.46	2.9	0.83
00052BC17	19.34	85.32	86.28	4.3	1.40
00048__17	22.21	83.87	84.59	3.8	1.21
00045PB17	22.51	83.32	83.69	2.7	0.63
00045PC17	22.51	83.26	83.63	2.7	0.63
00044PB17	22.64	83.33	83.55	2.1	0.45
00044PC17	22.64	82.29	82.92	3.5	0.99
00042__17	22.64	82.06	82.72	3.6	1.17
00041__17	22.64	81.82	82.67	4.1	1.39
00038__17	22.64	80.87	81.34	3.0	0.98
00034BB17	22.64	80.39	80.56	1.8	0.59
00034BC17	22.64	79.83	79.98	1.7	0.41
00032PB17	22.64	79.83	79.94	1.5	0.36
00032PC17	22.64	78.92	79.32	2.8	0.80
00027__17	22.64	78.43	78.82	2.8	0.77
00021__17	22.64	78.10	78.13	1.8	0.42
00018PB17	22.64	78.08	78.11	2.0	0.38
00018PC17	22.64	78.05	78.08	2.0	0.38
00017__17	22.64	78.05	78.08	1.8	0.33
00014__17	22.50	78.05	78.06	1.3	0.22
00007PB17	-49.93	78.04	78.05	-2.5	0.35
00007PC17	-49.93	78.03	78.03	-2.2	0.30
00004__17	-49.91	78.03	78.03	-0.7	0.09

TR200 d=1.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	41.45	105.63	106.05	2.9	0.72
00103BB17	39.28	105.48	105.88	2.8	0.56
00103BC17	39.28	104.94	105.47	3.2	0.70
00100PB17	29.20	105.17	105.31	1.7	0.32
00100PC17	29.19	103.38	104.56	5.0	1.21
00092BB17	40.79	102.12	102.43	2.5	0.58
00092BC17	40.79	101.14	102.13	4.4	1.23
00089BB17	40.97	100.45	100.78	2.6	0.57
00089BC17	40.97	99.32	100.43	4.7	1.22
00085BB17	40.26	98.73	99.05	2.5	0.59
00085BC17	40.26	97.46	98.91	5.3	1.61
00078__17	40.64	94.17	95.05	4.2	1.19
00065__17	39.38	90.63	91.74	4.7	1.41
00063__17	36.88	90.05	90.48	2.9	0.84
00062BB17	33.04	89.95	90.35	2.8	0.83
00062BC17	33.04	89.15	89.90	3.8	1.15
00052BB17	25.97	86.33	86.81	3.1	0.83
00052BC17	25.97	85.68	86.58	4.2	1.22
00048__17	36.66	85.04	85.35	2.5	0.61
00045PB17	32.04	85.04	85.23	2.0	0.36
00045PC17	32.03	84.83	85.05	2.0	0.37
00044PB17	32.14	84.89	85.03	1.7	0.30
00044PC17	32.14	82.66	83.42	3.9	0.97
00042__17	36.23	82.43	83.27	4.1	1.20
00041__17	37.08	82.21	83.24	4.5	1.38
00038__17	38.32	81.33	81.92	3.4	0.96
00034BB17	38.38	80.91	81.10	1.9	0.55
00034BC17	38.38	80.77	80.94	1.8	0.38
00032PB17	38.37	80.78	80.91	1.6	0.32
00032PC17	38.37	79.50	80.02	3.2	0.78
00027__17	38.37	79.05	79.52	3.1	0.79
00021__17	37.23	78.55	78.78	2.1	0.46
00018PB17	37.22	78.35	78.69	2.9	0.5
00018PC17	37.22	78.05	78.08	3.4	0.6
00017__17	37.22	78.05	78.08	3.0	0.6
00014__17	37.44	78.05	78.06	2.3	0.4
00007PB17	-46.98	78.04	78.07	-2.3	0.3
00007PC17	-46.98	78.03	78.03	-2.0	0.3
00004__17	-47.00	78.03	78.03	-0.7	0.1

TR200 d=1.20 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	39.88	105.59	106.00	2.8	0.72
00103BB17	38.20	105.44	105.82	2.8	0.56
00103BC17	38.20	104.91	105.42	3.2	0.70
00100PB17	28.39	105.13	105.28	1.7	0.31
00100PC17	28.39	103.35	104.53	5.0	1.21
00092BB17	39.34	102.07	102.37	2.5	0.58
00092BC17	39.34	101.10	102.08	4.4	1.24
00089BB17	39.50	100.39	100.72	2.5	0.57
00089BC17	39.50	99.28	100.37	4.6	1.22
00085BB17	38.97	98.69	99.00	2.5	0.59
00085BC17	38.97	97.43	98.85	5.3	1.61
00078__17	39.26	94.14	95.00	4.1	1.19
00065__17	38.20	90.61	91.69	4.6	1.41
00063__17	35.88	90.03	90.45	2.9	0.84
00062BB17	32.23	89.93	90.32	2.8	0.83
00062BC17	32.23	89.13	89.87	3.8	1.15
00052BB17	25.49	86.31	86.79	3.1	0.83
00052BC17	25.49	85.65	86.56	4.2	1.22
00048__17	35.61	85.01	85.31	2.4	0.61
00045PB17	31.45	85.00	85.20	2.0	0.36
00045PC17	31.44	84.81	85.02	2.0	0.37
00044PB17	31.87	84.86	84.99	1.7	0.30
00044PC17	31.86	82.64	83.40	3.9	0.98
00042__17	35.37	82.41	83.24	4.0	1.20
00041__17	36.08	82.18	83.21	4.5	1.39
00038__17	36.99	81.29	81.87	3.4	0.97
00034BB17	37.03	80.85	81.05	1.9	0.56
00034BC17	37.03	80.70	80.87	1.8	0.38
00032PB17	37.03	80.71	80.83	1.6	0.33
00032PC17	37.03	79.45	79.96	3.2	0.79
00027__17	37.02	78.98	79.46	3.1	0.80
00021__17	36.69	78.42	78.68	2.2	0.49
00018PB17	36.45	78.13	78.54	2.9	0.52
00018PC17	36.42	78.05	78.08	3.3	0.63
00017__17	36.42	78.05	78.08	3.0	0.54
00014__17	36.66	78.05	78.06	2.2	0.38
00007PB17	-47.25	78.04	78.05	-2.3	0.32
00007PC17	-47.25	78.03	78.03	-2.0	0.28
00004__17	-47.25	78.03	78.03	-0.7	0.08

TR200 d=1.50 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	38.61	105.56	105.96	2.8	0.72
00103BB17	37.29	105.40	105.78	2.7	0.56
00103BC17	37.29	104.88	105.39	3.2	0.70
00100PB17	27.73	105.10	105.24	1.7	0.31
00100PC17	27.73	103.32	104.50	5.0	1.22
00092BB17	38.11	102.02	102.33	2.4	0.58
00092BC17	38.11	101.06	102.04	4.4	1.25
00089BB17	38.27	100.34	100.67	2.5	0.57
00089BC17	38.27	99.25	100.32	4.6	1.22
00085BB17	37.86	98.65	98.96	2.4	0.59
00085BC17	37.86	97.41	98.81	5.2	1.61
00078__17	38.09	94.11	94.96	4.1	1.19
00065__17	37.21	90.59	91.66	4.6	1.41
00063__17	35.05	90.01	90.43	2.8	0.84
00062BB17	31.55	89.91	90.30	2.8	0.83
00062BC17	31.55	89.11	89.84	3.8	1.15
00052BB17	25.09	86.29	86.77	3.1	0.83
00052BC17	25.09	85.63	86.54	4.2	1.23
00048__17	34.73	84.98	85.28	2.4	0.61
00045PB17	30.98	84.97	85.16	1.9	0.36
00045PC17	30.97	84.79	84.99	2.0	0.36
00044PB17	31.63	84.83	84.97	1.7	0.30
00044PC17	31.63	82.62	83.39	3.9	0.99
00042__17	34.66	82.39	83.22	4.0	1.21
00041__17	35.26	82.16	83.18	4.5	1.40
00038__17	35.91	81.26	81.84	3.4	0.97
00034BB17	35.93	80.82	81.01	1.9	0.56
00034BC17	35.93	80.63	80.80	1.8	0.38
00032PB17	35.93	80.65	80.77	1.5	0.33
00032PC17	35.93	79.41	79.92	3.1	0.79
00027__17	35.92	78.94	79.42	3.1	0.80
00021__17	35.76	78.38	78.63	2.2	0.50
00018PB17	35.66	78.08	78.49	2.8	0.52
00018PC17	35.65	78.05	78.08	3.2	0.61
00017__17	35.65	78.05	78.08	2.9	0.53
00014__17	35.90	78.05	78.06	2.2	0.37
00007PB17	-47.47	78.04	78.05	-2.3	0.33
00007PC17	-47.47	78.03	78.03	-2.1	0.29
00004__17	-47.49	78.03	78.03	-0.7	0.08

TR200 d=2.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	33.79	105.40	105.78	2.7	0.72
00103BB17	33.47	105.22	105.58	2.6	0.56
00103BC17	33.47	104.78	105.23	3.0	0.67
00100PB17	25.07	104.99	105.11	1.6	0.30
00100PC17	25.07	103.23	104.38	4.9	1.23
00092BB17	33.43	101.86	102.14	2.4	0.59
00092BC17	33.43	100.92	101.87	4.3	1.29
00089BB17	33.57	100.14	100.45	2.5	0.57
00089BC17	33.57	99.11	100.11	4.4	1.22
00085BB17	33.49	98.50	98.78	2.4	0.59
00085BC17	33.49	97.32	98.62	5.0	1.60
00078__17	33.57	94.00	94.80	4.0	1.19
00065__17	33.30	90.51	91.50	4.4	1.40
00063__17	31.77	89.94	90.32	2.8	0.83
00062BB17	28.87	89.83	90.21	2.7	0.83
00062BC17	28.87	89.02	89.74	3.8	1.15
00052BB17	23.50	86.22	86.68	3.0	0.83
00052BC17	23.50	85.56	86.46	4.2	1.26
00048__17	31.28	84.85	85.13	2.4	0.61
00045PB17	29.51	84.81	85.00	2.0	0.37
00045PC17	29.51	84.66	84.86	2.0	0.37
00044PB17	30.53	84.69	84.83	1.7	0.31
00044PC17	34.46	82.59	83.54	4.3	1.11
00042__17	32.93	82.31	83.17	4.1	1.25
00041__17	31.97	82.07	83.07	4.4	1.41
00038__17	31.98	81.14	81.70	3.3	0.98
00034BB17	31.98	80.68	80.87	1.9	0.58
00034BC17	31.98	80.41	80.57	1.8	0.39
00032PB17	31.98	80.41	80.53	1.5	0.34
00032PC17	31.98	79.27	79.75	3.1	0.79
00027__17	31.98	78.78	79.25	3.1	0.81
00021__17	31.97	78.19	78.44	2.2	0.50
00018PB17	31.98	78.08	78.11	2.7	0.50
00018PC17	31.98	78.05	78.08	2.9	0.55
00017__17	31.98	78.05	78.08	2.6	0.47
00014__17	32.31	78.05	78.06	2.0	0.33
00007PB17	-48.41	78.04	78.05	-2.4	0.34
00007PC17	-48.41	78.03	78.03	-2.1	0.29
00004__17	-48.43	78.03	78.03	-0.7	0.08

TR500 d=1.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	48.43	105.79	106.27	3.1	0.73
00103BB17	43.74	105.67	106.09	2.9	0.56
00103BC17	43.74	105.07	105.65	3.4	0.72
00100PB17	32.58	105.31	105.47	1.8	0.33
00100PC17	32.58	103.50	104.70	5.1	1.19
00092BB17	46.37	102.30	102.63	2.6	0.58
00092BC17	46.36	101.31	102.30	4.4	1.19
00089BB17	46.77	100.67	101.02	2.6	0.57
00089BC17	46.77	99.48	100.65	4.8	1.22
00085BB17	45.16	98.89	99.23	2.6	0.59
00085BC17	45.16	97.55	99.10	5.5	1.62
00078__17	46.43	94.31	95.24	4.3	1.19
00065__17	44.49	90.72	91.92	4.9	1.42
00063__17	41.18	90.14	90.60	3.0	0.85
00062BB17	36.47	90.04	90.46	2.9	0.83
00062BC17	36.47	89.25	90.01	3.9	1.16
00052BB17	28.03	86.41	86.91	3.1	0.83
00052BC17	28.03	85.77	86.67	4.2	1.19
00048__17	41.28	85.15	85.49	2.6	0.63
00045PB17	34.74	85.17	85.39	2.0	0.36
00045PC17	34.74	84.92	85.16	2.2	0.38
00044PB17	33.23	85.01	85.15	1.6	0.29
00044PC17	33.22	82.75	83.48	3.8	0.92
00042__17	39.70	82.54	83.38	4.1	1.17
00041__17	41.11	82.33	83.35	4.5	1.33
00038__17	43.95	81.56	82.11	3.3	0.88
00034BB17	44.55	81.22	81.38	1.8	0.47
00034BC17	44.54	81.11	81.29	1.9	0.37
00032PB17	44.54	81.13	81.25	1.6	0.31
00032PC17	44.54	79.67	80.24	3.4	0.80
00027__17	44.54	79.18	79.72	3.3	0.83
00021__17	41.96	78.60	78.88	2.4	0.51
00018PB17	39.42	78.35	78.77	2.9	0.50
00018PC17	39.41	78.05	78.08	3.5	0.67
00017__17	39.43	78.05	78.08	3.2	0.58
00014__17	39.82	78.05	78.06	2.4	0.42
00007PB17	-45.83	78.04	78.05	-2.2	0.31
00007PC17	-45.83	78.03	78.03	-2.0	0.28
00004__17	-45.87	78.03	78.03	-0.7	0.08

TR500 d=1.20 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	46.51	105.75	106.21	3.0	0.73
00103BB17	42.57	105.63	106.04	2.9	0.56
00103BC17	42.57	105.03	105.61	3.4	0.72
00100PB17	31.69	105.27	105.43	1.8	0.33
00100PC17	31.69	103.47	104.66	5.1	1.19
00092BB17	44.96	102.25	102.58	2.5	0.58
00092BC17	44.96	101.27	102.26	4.4	1.20
00089BB17	45.30	100.61	100.96	2.6	0.57
00089BC17	45.30	99.44	100.60	4.8	1.22
00085BB17	43.94	98.86	99.18	2.5	0.59
00085BC17	43.94	97.53	99.06	5.5	1.62
00078__17	44.90	94.27	95.19	4.2	1.19
00065__17	43.13	90.70	91.88	4.8	1.42
00063__17	40.03	90.12	90.57	3.0	0.85
00062BB17	35.55	90.01	90.43	2.9	0.83
00062BC17	35.55	89.23	89.98	3.9	1.15
00052BB17	27.48	86.39	86.88	3.1	0.83
00052BC17	27.48	85.75	86.65	4.2	1.19
00048__17	40.04	85.12	85.45	2.6	0.62
00045PB17	34.05	85.14	85.35	2.0	0.36
00045PC17	34.04	84.90	85.13	2.1	0.38
00044PB17	32.94	84.98	85.12	1.6	0.29
00044PC17	32.94	82.73	83.46	3.8	0.93
00042__17	38.91	82.51	83.36	4.1	1.19
00041__17	40.17	82.30	83.32	4.5	1.35
00038__17	42.52	81.49	82.06	3.3	0.91
00034BB17	42.87	81.13	81.29	1.8	0.50
00034BC17	42.87	81.02	81.19	1.9	0.37
00032PB17	42.87	81.04	81.16	1.6	0.31
00032PC17	42.87	79.62	80.18	3.3	0.79
00027__17	42.86	79.14	79.67	3.2	0.82
00021__17	40.87	78.58	78.85	2.3	0.50
00018PB17	38.95	78.31	78.73	2.9	0.51
00018PC17	38.94	78.05	78.08	3.5	0.67
00017__17	38.96	78.05	78.08	3.2	0.58
00014__17	39.21	78.05	78.06	2.4	0.41
00007PB17	-46.21	78.04	78.05	-2.2	0.32
00007PC17	-46.21	78.03	78.03	-2.0	0.28
00004__17	-46.20	78.03	78.03	-0.7	0.08

TR500 d=1.50 h						TR500 d=2.00 h					
Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl	Sezione	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Froude # Chl
00105__17	44.89	105.72	106.16	3.0	0.72	00105__17	39.22	105.58	105.98	2.8	0.72
00103BB17	41.55	105.58	105.99	2.8	0.56	00103BB17	37.73	105.42	105.80	2.7	0.56
00103BC17	41.56	105.00	105.56	3.3	0.71	00103BC17	37.73	104.89	105.40	3.2	0.70
00100PB17	30.92	105.24	105.40	1.8	0.32	00100PB17	28.05	105.12	105.26	1.7	0.31
00100PC17	30.92	103.44	104.63	5.0	1.20	00100PC17	28.05	103.34	104.51	5.0	1.21
00092BB17	43.69	102.21	102.53	2.5	0.58	00092BB17	38.71	102.04	102.35	2.4	0.58
00092BC17	43.69	101.23	102.22	4.4	1.21	00092BC17	38.71	101.08	102.06	4.4	1.25
00089BB17	43.97	100.56	100.91	2.6	0.57	00089BB17	38.87	100.36	100.69	2.5	0.57
00089BC17	43.97	99.40	100.55	4.7	1.22	00089BC17	38.87	99.26	100.34	4.6	1.22
00085BB17	42.84	98.82	99.14	2.5	0.59	00085BB17	38.41	98.67	98.98	2.4	0.59
00085BC17	42.84	97.51	99.01	5.4	1.62	00085BC17	38.41	97.42	98.83	5.3	1.61
00078__17	43.59	94.24	95.15	4.2	1.19	00078__17	38.67	94.13	94.98	4.1	1.19
00065__17	41.98	90.68	91.83	4.8	1.42	00065__17	37.70	90.60	91.67	4.6	1.41
00063__17	39.07	90.10	90.54	3.0	0.85	00063__17	35.47	90.02	90.44	2.9	0.84
00062BB17	34.78	89.99	90.41	2.9	0.83	00062BB17	31.89	89.92	90.31	2.8	0.83
00062BC17	34.78	89.20	89.96	3.8	1.15	00062BC17	31.89	89.12	89.85	3.8	1.15
00052BB17	27.02	86.37	86.86	3.1	0.83	00052BB17	25.29	86.30	86.78	3.1	0.83
00052BC17	27.01	85.73	86.63	4.2	1.20	00052BC17	25.29	85.64	86.55	4.2	1.23
00048__17	39.00	85.10	85.42	2.5	0.62	00048__17	35.18	84.99	85.29	2.4	0.61
00045PB17	33.45	85.11	85.31	2.0	0.36	00045PB17	31.21	84.99	85.18	1.9	0.36
00045PC17	33.45	84.88	85.10	2.1	0.38	00045PC17	31.21	84.80	85.01	2.0	0.36
00044PB17	32.70	84.95	85.09	1.6	0.29	00044PB17	31.75	84.84	84.98	1.7	0.30
00044PC17	32.70	82.71	83.45	3.8	0.94	00044PC17	31.75	82.63	83.40	3.9	0.98
00042__17	38.19	82.49	83.33	4.1	1.19	00042__17	35.04	82.40	83.23	4.0	1.21
00041__17	39.32	82.27	83.30	4.5	1.37	00041__17	35.70	82.17	83.20	4.5	1.39
00038__17	41.30	81.43	82.01	3.4	0.93	00038__17	36.49	81.27	81.86	3.4	0.97
00034BB17	41.46	81.05	81.22	1.9	0.52	00034BB17	36.52	80.84	81.03	1.9	0.56
00034BC17	41.46	80.94	81.12	1.9	0.37	00034BC17	36.52	80.67	80.84	1.8	0.38
00032PB17	41.46	80.96	81.08	1.6	0.32	00032PB17	36.52	80.68	80.80	1.5	0.33
00032PC17	41.46	79.59	80.13	3.3	0.79	00032PC17	36.52	79.43	79.94	3.2	0.79
00027__17	41.45	79.11	79.62	3.2	0.81	00027__17	36.51	78.96	79.44	3.1	0.80
00021__17	39.91	78.55	78.82	2.3	0.50	00021__17	36.27	78.40	78.66	2.2	0.49
00018PB17	38.49	78.27	78.70	2.9	0.51	00018PB17	36.10	78.11	78.52	2.9	0.52
00018PC17	38.48	78.05	78.08	3.5	0.66	00018PC17	36.11	78.05	78.08	3.3	0.62
00017__17	38.49	78.05	78.08	3.1	0.57	00017__17	36.11	78.05	78.08	2.9	0.54
00014__17	38.71	78.05	78.06	2.4	0.41	00014__17	36.35	78.05	78.06	2.2	0.38
00007PB17	-46.44	78.04	78.05	-2.2	0.32	00007PB17	-47.35	78.04	78.05	-2.3	0.33
00007PC17	-46.44	78.03	78.03	-2.0	0.28	00007PC17	-47.35	78.03	78.03	-2.0	0.29
00004__17	-46.40	78.03	78.03	-0.7	0.08	00004__17	-47.33	78.03	78.03	-0.7	0.08

Tabella 7-3: Risultati della modellistica idraulica monodimensionale in alveo per ogni evento simulato

Sezione	Tr30	Tr200	Tr500
00105__17	105.13	105.63	105.79
00103BB17	104.94	105.48	105.67
00103BC17	104.65	104.94	105.07
00100PB17	104.81	105.17	105.31
00100PC17	103.07	103.38	103.5
00092BB17	101.6	102.12	102.3
00092BC17	100.71	101.14	101.31
00089BB17	99.85	100.45	100.67
00089BC17	98.89	99.32	99.48
00085BB17	98.25	98.73	98.89
00085BC17	97.18	97.46	97.55
00078__17	93.84	94.17	94.31
00065__17	90.38	90.63	90.72
00063__17	89.81	90.05	90.14
00062BB17	89.71	89.95	90.04
00062BC17	88.87	89.15	89.25
00052BB17	86.12	86.33	86.41
00052BC17	85.4	85.68	85.77
00048__17	84.12	85.04	85.15
00045PB17	83.73	85.04	85.17
00045PC17	83.71	84.83	84.92
00044PB17	83.78	84.89	85.01
00044PC17	82.43	82.66	82.75
00042__17	82.18	82.43	82.54
00041__17	81.95	82.21	82.33
00038__17	81	81.33	81.56
00034BB17	80.53	80.91	81.22
00034BC17	80.11	80.77	81.11
00032PB17	80.11	80.78	81.13
00032PC17	79.09	79.5	79.67
00027__17	78.6	79.05	79.18
00021__17	78.1	78.55	78.6
00018PB17	78.08	78.35	78.35
00018PC17	78.05	78.05	78.05
00017__17	78.05	78.05	78.05
00014__17	78.05	78.05	78.05
00007PB17	78.04	78.04	78.04
00007PC17	78.03	78.03	78.03
00004__17	78.03	78.03	78.03

Tabella 7-4: Inviluppo dei livelli idrometrici