



REGIONE TOSCANA GIUNTA REGIONALE

DIREZIONE DIFESA DEL SUOLO E PROTEZIONE CIVILE
SETTORE GENIO CIVILE VALDARNO SUPERIORE

SISTEMAZIONE IDRAULICA DEL TORRENTE CASTRO DALLA LOC. COGNAIA FINO AL PONTE DELLA PARATA E DEL TORRENTE BICCHIERAIA DALLA LOC. LA PACE ALLA CONFLUENZA NEL COMUNE DI AREZZO

CUP: D13H20000190002

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

CODICE PROGETTO: DODS2019AR0002

STUDIO IDROLOGICO IDRAULICO GENERALE IDR01 - RELAZIONE IDROLOGICA IDRAULICA

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:

ING. MARIANNA BIGIARINI

ASSOCIAZIONE TEMPORANEA DI PROFESSIONISTI

MANDATARIO



Via Aretina 167/b
Firenze (FI) 50136
tel. 055.6587050
info@studiohydrogeo.it

MANDANTE



Lungarno Guido Reni, 55
San Giovanni Valdarno (AR) 52027
tel. 055.9155832
info@ghea.it

MANDANTE



Viale Colombo, 9bis
Marina di Carrara (MS) 54033
tel. 0585.1812375
info@tecnocreo.it

MANDANTE



Via Masaccio, 242
Firenze (FI) 50132
tel. 055.577860
ing.cantinileonardo@gmail.com

REV.	DATA EMISSIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	DICEMBRE 2020	G.GAZZINI	G.GAZZINI	G.GAZZINI

Indice generale

1. PREMESSA	7
2. ANALISI DELLO STATO ATTUALE	8
3. LE OPERE DI PROGETTO	10
4. APPROCCIO METODOLOGICO	12
5. ANALISI IDROLOGICA	14
5.1 <i>ANALISI E MODELLAZIONE IDROLOGICA PRELIMINARE</i>	14
5.1.1 Modello Idrologico 0	15
5.1.2 Modello Idrologico 1	16
5.1.3 Modello Idrologico 2	17
5.1.4 Modello Idrologico 3	18
5.1.5 Modello Idrologico 4	19
5.1.6 Confronto Con Modellistica Piano Strutturale Arezzo	20
5.2 <i>MODELLO IDROLOGICO DI SUPPORTO AL PROGETTO</i>	23
5.2.1 Bacino idrografico di riferimento	23
5.2.1.1 Codifica dei Bacini	23
5.2.2 Modello idrologico	24
5.2.2.1 Input pluviometrici	24
5.2.2.2 Determinazione dei parametri idrologici	24
5.2.2.3 Idrogrammi di piena	26
6. MODELLISTICA IDRAULICA	30
6.1 <i>ANALISI IDRAULICA STATO ATTUALE</i>	30
6.1.1 Caratterizzazione topografica dei corsi d'acqua	30
6.1.2 Modello Idraulico del Tratto Tombato	35
6.1.2.1 Verifiche Idrauliche implementate	35
6.1.2.2 Risultati	36
6.1.3 Modello Idraulico Moto Permanente Torrenti Castro e Bicchieraia	37
6.1.3.1 Verifiche Idrauliche implementate	37
6.1.3.2 Risultati	37
6.1.4 Modello Idraulico Moto Vario Torrenti Castro e Bicchieraia	44
6.1.4.1 Verifiche Idrauliche implementate	45
6.1.4.2 Risultati	46
6.2 <i>VERIFICHE IDRAULICHE STATO DI PROGETTO</i>	48
6.2.1 Caratterizzazione del modello	48
6.2.2 Verifiche Idrauliche Implementate	49
6.2.2.1 Modello Idraulico del Tratto Tombato	49
6.2.2.2 Ipotesi di funzionamento Opera di Laminazione in Loc. San Firenze	50
6.2.3 Risultati	51
APPENDICE A – ANALISI IDROLOGICA IDRAULICA SUL TORRENTE VINGONE	53

A.1	PREMESSA.....	54
A.2	ANALISI IDROLOGICA.....	54
A.3	VERIFICHE IDRAULICHE STATO ATTUALE	55
APPENDICE B – MODELLISTICA IDROLOGICA Fondamenti Teorici		56
APPENDICE C – MODELLISTICA IDRAULICA - Fondamenti Teorici		63

Indice delle figure

Figura 2-1: Torrente Castro, tratto tombato dal Ponte della Parata (Largo I. Campioni) a Via Carlo Alberto dalla Chiesa.....	8
Figura 2-2: Tratti a geometria omogenea – Torrente Castro da Loc. Cognaia al Ponte della Parata.....	9
Figura 2-3: Tratti a geometria omogenea – Torrente Bicchieraia da Loc. La Pace alla Confluenza con il Torrente Castro.....	9
Figura 5-1: Sezioni di chiusura del Modello Idrologico 0.....	15
Figura 5-2: Confronti idrogrammi Torrente Castro per TR 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), per il Modello Idrologico 4 e per il modello Idrologico di supporto al Piano Strutturale di Arezzo.....	20
Figura 5-3: Confronti idrogrammi Torrente Bicchieraia per TR 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), per il Modello Idrologico 4 e per il modello Idrologico di supporto al Piano Strutturale di Arezzo.....	21
Figura 5-4: Confronti idrogrammi Borro del Peneto per TR 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), per il Modello Idrologico 4 e per il modello Idrologico di supporto al Piano Strutturale di Arezzo.....	21
Figura 5-5: Confronti idrogrammi Borro di Covole per TR 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), per il Modello Idrologico 4 e per il modello Idrologico di supporto al Piano Strutturale di Arezzo.....	21
Figura 5-6: Bacini oggetto di studio del Piano Strutturale del Comune di Arezzo.....	22
Figura 5-7: Bacini Idrografici afferenti al tratto di monte del Torrente Castro.....	23
Figura 5-8: Bacini Idrografici afferenti al Torrente Bicchieraia.....	23
Figura 5-9: Idrogrammi Bacino 1101 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	27
Figura 5-10: Idrogrammi Bacino 1102 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	27
Figura 5-11: Idrogrammi Interbacino 1103 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	27
Figura 5-12: Idrogrammi Bacino 1201 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	27
Figura 5-13: Idrogrammi Bacino 1202 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	28
Figura 5-14: Idrogrammi Bacino 1203 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	28
Figura 5-15: Idrogrammi Bacino 1204 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	28
Figura 5-16: Idrogrammi Bacino 1205 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	28
Figura 5-17: Idrogrammi Bacino 1206 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	29
Figura 5-18: Idrogrammi Bacino 1207 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	29
Figura 5-19: Idrogrammi Bacino 1202 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	29
Figura 5-20: Idrogrammi Bacino 1202 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h].....	29
Figura 6-1: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C1 – Dalla Cassa di Cognaia a Via Viviani ...	38
Figura 6-2: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C2 – Via Viviani.....	39
Figura 6-3: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – PONTE VIA F.REDI.....	39
Figura 6-4: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C3 – Dal Ponte di Via F. Redi al ponte di Via E. Calò.....	39
Figura 6-5: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – PONTE VIA E.CALÒ.....	39
Figura 6-6: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C4 – Dal Ponte di Via E. Calò al Ponte di Via Anconetana.....	40
Figura 6-7: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – PONTE VIA ANCONETANA.....	40
Figura 6-8: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C5 – Dal Ponte di Via Anconetana al Ponte del Pantanino.....	40
Figura 6-9: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – PONTE DEL PANTANINO.....	40
Figura 6-10: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C6 – Dal Ponte del Pantanino alla confluenza del T. Bicchieraia.....	41

Figura 6-11: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro –TRATTO C7 – Dalla confluenza del T. Bicchieraia al Ponte della Parata.....	41
Figura 6-12: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B1 – Dal ponte di Matignano al ponte privato	42
Figura 6-13. Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – PONTE PRIVATO	42
Figura 6-14: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B2 – Dal Ponte Privato alla passerella di Via Matignano	42
Figura 6-15: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B3 – Dalla passerella di Via Matignano al ponte di Vicchio	43
Figura 6-16: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – PONTE DI VICCHIO	43
Figura 6-17: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B4 – Dal ponte di Vicchio al ponte di Castelsecco.....	43
Figura 6-18. Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – PONTE DI CASTELSECCO.....	43
Figura 6-19: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B5 – Dal Ponte Castelsecco alla passerella di Via dell’Acropoli.....	44
Figura 6-20: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B6 – Dalla passerella di Via dell’Acropoli al Ponte di Viale Sanzio	44
Figura 6-21. Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – PONTE DI VIALE SANZIO.....	44
Figura 6-22: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B7 – Dal ponte di Viale R. Sanzio alla confluenza nel T. Castro	44
Figura A-1: Bacini Idrografici afferenti al Torrente Vingone (in rosso) ed al sistema Castro-Bicchieraia oggetto di studio (in verde)	54

Indice delle tabelle

Tabella 1-1: Elenco Elaborati	7
Tabella 5-1: Parametri Idrologici Modello 0 (ALTO)	15
Tabella 5-2: Modello Idrologico 0 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	15
Tabella 5-3: Modello Idrologico 0 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	15
Tabella 5-4: Modello Idrologico 0 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	16
Tabella 5-5: Modello Idrologico 0 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	16
Tabella 5-6: Parametri Idrologici Modello 1	16
Tabella 5-7: Modello Idrologico 1 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	17
Tabella 5-8: Modello Idrologico 1 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	17
Tabella 5-9: Modello Idrologico 1 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	17
Tabella 5-10: Modello Idrologico 1 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	17
Tabella 5-11: Parametri Idrologici Modello 2	17
Tabella 5-12: Modello Idrologico 2 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	17
Tabella 5-13: Modello Idrologico 2 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	18
Tabella 5-14: Modello Idrologico 2 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	18
Tabella 5-15: Modello Idrologico 2 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	18
Tabella 5-16: Parametri Idrologici Modello 3	18
Tabella 5-17: Modello Idrologico 3 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	19
Tabella 5-18: Modello Idrologico 3 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	19
Tabella 5-19: Modello Idrologico 3 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	19
Tabella 5-20: Modello Idrologico 3 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	19
Tabella 5-21: Parametri Idrologici Modello 4	19
Tabella 5-22: Modello Idrologico 4 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	19
Tabella 5-23: Modello Idrologico 4 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni.....	20
Tabella 5-24: Modello Idrologico 4 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	20
Tabella 5-25: Modello Idrologico 4 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni.....	20
Tabella 5-26: Confronto dei risultati in termini di portata al colmo di piena [m^3/s] ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), il Modello Idrologico 4 e ricavati dal Modello Idrologico a supporto al Piano Strutturale di Arezzo in riferimento all'evento con tempo di ritorno TR pari a 200 anni e durata $d=2h$	20
Tabella 5-27: Codifica dei bacini idrografici.....	24
Tabella 5-28: Parametri idrologici sottobacini ed interbacini dei Torrenti Castro e Bicchieraia	25
Tabella 5-29: Portate al colmo e volumi di piena per tempo di ritorno Tr 30 anni per i bacini, sottobacini ed interbacini dei Torrenti Castro e Bicchieraia	26
Tabella 5-30: Portate al colmo e volumi di piena per tempo di ritorno Tr 200 anni per i bacini, sottobacini ed interbacini dei Torrenti Castro e Bicchieraia.....	26
Tabella 6-1: Caratterizzazione geometrica Torrente Castro (tratto a cielo aperto).....	32
Tabella 6-2: Caratterizzazione geometrica Torrente Castro (Tratto Tombato)	33
Tabella 6-3: Caratterizzazione geometrica Torrente Bicchieraia	33
Tabella 6-4: Caratterizzazione geometrica Borro del Peneto	34
Tabella 6-5: Caratterizzazione geometrica Borro di Covole	34
Tabella 6-6: Caratterizzazione geometrica Borro delle Vinacce	34
Tabella 6-7: Torrente Castro – Scala di deflusso impostata come condizione al contorno di valle del tratto tombato	36
Tabella 6-8: Torrente Castro –Officiosità idraulica stato attuale tratto tombato urbano – Scala di deflusso alla sezione di imbocco.....	36

Tabella 6-9: Elenco degli input idrologici alla modellazione idraulica	46
Tabella 6-10: Scala di deflusso Ponte della Parata – Stato di progetto SP1-SP2-SP3-SP4	50
Tabella 6-11: Scala di deflusso Ponte della Parata – Stato di progetto SP5-SP6	50
Tabella 6-12: Ipotesi di funzionamento Opera di Laminazione di San Firenze.....	51

1. PREMESSA

La presente Relazione Idrologica Idraulica, redatta a supporto del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica denominato “SISTEMAZIONE IDRAULICA DEL TORRENTE CASTRO DALLA LOC. COGNAIA FINO AL PONTE DELLA PARATA E DEL TORRENTE BICCHIERAIA DALLA LOC. LA PACE ALLA CONFLUENZA NEL COMUNE DI AREZZO”, descrive le verifiche svolte sul reticolo idraulico del Torrente Castro e del Torrente Bicchieraia per la verifica dell’ufficiosità idraulica del corso d’acqua allo stato attuale e la valutazione di interventi progettuali, suddivisi in stralci funzionali, per la riduzione del rischio idraulico.

Lo Studio Idrologico Idraulico Generale si compone della seguente relazione idrologica idraulica e degli elaborati di testo e grafici a supporto della stessa e costituisce parte integrante del progetto, di cui si riporta l’elenco elaborati completo.

SISTEMAZIONE IDRAULICA DEL TORRENTE CASTRO DALLA LOC. COGNAIA FINO AL PONTE DELLA PARATA E DEL TORRENTE BICCHIERAIA DALLA LOC. LA PACE ALLA CONFLUENZA, NEL COMUNE DI AREZZO		
PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA		
Elenco Elaborati		
Studio Idrologico Idraulico Generale		
IDR01	---	Relazione Idrologica Idraulica
IDR02.A	---	Allegato 1 - Risultati Modello Idrologico
IDR02.B	---	Allegato 2 - Risultati Modello Idraulico
IDR03	1:2000	Stato Attuale - Modello Idraulico Tratto Tombato - Planimetria
IDR04	1:2000-1:200	Stato Attuale - Modello Idraulico Tratto Tombato - Profilo Longitudinale con Livelli Idrometrici
IDR05	1:100	Stato Attuale - Libretto Sezioni Tratto Tombato
IDR06	1:5000	Modello Idraulico Torrenti Castro e Bicchieraia - Planimetria
IDR07	1:2000-1:200	Stato Attuale - Modello Idraulico Torrenti Castro e Bicchieraia - Profilo Longitudinale con Livelli Idrometrici
IDR08.A	1:5000	Stato Attuale - Scenario Torrente Castro - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni
IDR08.B	1:5000	Stato Attuale - Scenario Torrente Castro - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR09.A	1:5000	Stato Attuale - Scenario Torrente Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni
IDR09.B	1:5000	Stato Attuale - Scenario Torrente Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR10.A	1:5000	Stato Attuale - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni
IDR10.B	1:5000	Stato Attuale - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR11	1:2000-1:200	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Modello Idraulico Torrenti Castro e Bicchieraia - Profili Longitudinali con Livelli Idrometrici
IDR12.A	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrente Castro - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni
IDR12.B	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrente Castro - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR13.A	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrente Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni
IDR13.B	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrente Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR14.A	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni
IDR14.B	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR15	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 2 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR16	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 3 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR17	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 4 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR18	1:5000	Stato di Progetto - Stralcio 5 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni
IDR19	1:2000-1:200	Stato di Progetto - Stralci 2-5 - Profili Longitudinali con Livelli Idrometrici TR200
Elaborati Progettuali - Stralcio Funzionale 1		
PP01A	---	Relazione Illustrativa
PP01B	---	Cronoprogramma
PP02	---	Relazione Geologica - Geotecnica
PP03	---	Relazione di Calcolo delle Strutture
PP04	---	Relazione di Prefattibilità Ambientale
PP05	---	Quadro Economico
PP06	---	Stima Sommaria dell’Intervento
PP07	1:5000	Inquadramento Generale Stato Attuale
PP08.A	1:2000	Planimetria delle Criticità allo Stato Attuale - Quadro 1
PP08.B	1:2000	Planimetria delle Criticità allo Stato Attuale - Quadro 2
PP09	1:5000	Planimetria Generale Stato di Progetto con suddivisione in Stralci
PP10	1:2000	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Generale
PP11.A	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Castro - Quadro A
PP11.B	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Castro - Quadro B
PP11.C	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Castro - Quadro C
PP11.D	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Castro - Quadro D
PP11.E	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Castro - Quadro E
PP11.F	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Bicchieraia - Quadro F
PP11.G	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Bicchieraia - Quadro G
PP11.H	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Bicchieraia - Quadro H
PP11.I	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Bicchieraia - Quadro I
PP11.L	1:500	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Planimetria Torrente Bicchieraia - Quadro L
PP12	1:250-1:250	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Libretto Sezioni Stato Sovrapposto
PP13.A	1:100	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Sezioni Tipologiche-Strutturali Torrente Castro
PP13.B	1:100	Stato di Progetto - Stralcio 1 - Sezioni Tipologiche-Strutturali Torrente Bicchieraia
PP14.A	1:2000	Planimetria Catastale - Quadro 1
PP14.B	1:2000	Planimetria Catastale - Quadro 2

Tabella 1-1: Elenco Elaborati

2. ANALISI DELLO STATO ATTUALE

Il territorio indagato interessa due corsi d'acqua:

- il Torrente Castro, da località Cognaia fino al ponte della Parata;
- il Torrente Bicchieraia, da località La Pace fino alla confluenza nel Torrente Castro.

Le indagini hanno riguardato anche il funzionamento idraulico del tratto tombato del Torrente Castro, di lunghezza pari a circa 1.6 km, che inizia in corrispondenza del ponte della Parata e si conclude in corrispondenza di Via C.A. dalla Chiesa, sottopassando l'abitato di Arezzo.

Nella tavola *PP07- Inquadramento Generale Stato Attuale* è riportata una corografia generale d'insieme dell'area oggetto di studio.

Tratto Tombato dal Ponte della Parata a Via C.A. dalla Chiesa

Il funzionamento idraulico del tratto tombato, che si estende per circa 1.6 km dal Ponte della Parata (in corrispondenza di Largo I. Campioni, poco a valle della confluenza del T. Bicchieraia nel T. Castro) fino a Via C.A. dalla Chiesa, risulta di fondamentale importanza non solo per la valutazione dell'efficienza dello stesso, ma anche poiché rappresenta la condizione al contorno di valle per i tratti d'alveo a cielo aperto oggetto di progettazione.

La geometria del tratto tombato, le cui sezioni sono pervenute tramite la Committenza, risulta estremamente variabile, con tratti realizzati in epoche e materiali diversi, bruschi cambiamenti di sezione ed interrimenti del fondo alveo. La geometria è consultabile nella Tavola IDR05 - Stato Attuale - Libretto Sezioni Tratto Tombato.

Il tratto tombato si inserisce in un contesto fortemente urbanizzato, rappresentato dal centro storico cittadino di Arezzo. Nella Tavola IDR03 - Stato Attuale - Modello Idraulico Tratto Tombato – Planimetria è riportata la caratterizzazione del piano campagna in corrispondenza del tombamento, distinta tra zone edificate (circa il 35% della lunghezza totale del tratto tombato), viabilità e parcheggi (circa il 55%), zone a verde (10% circa).

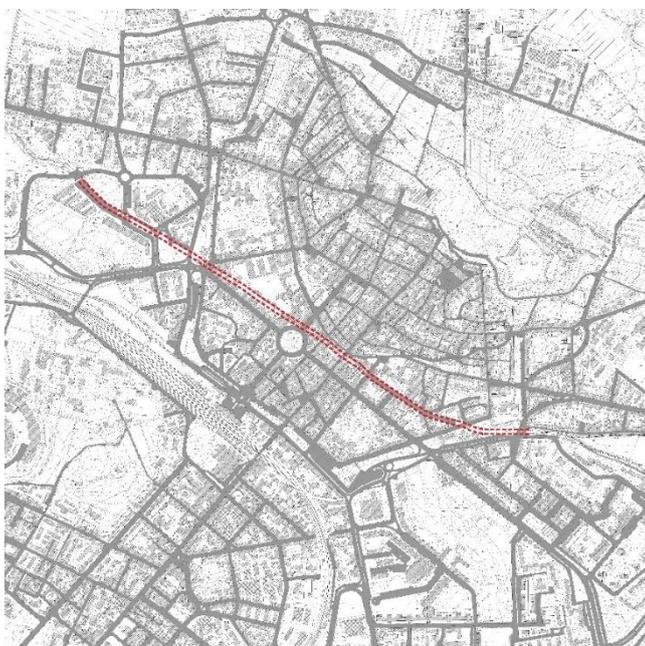


Figura 2-1: Torrente Castro, tratto tombato dal Ponte della Parata (Largo I. Campioni) a Via Carlo Alberto dalla Chiesa

Tratto Torrente Castro a cielo aperto da valle della Cassa di Cognaia al Ponte della Parata

Il rilievo del tratto a cielo aperto del Torrente Castro, fornito dalla Committenza, ha permesso di caratterizzare geometricamente il corso d'acqua, le infrastrutture e strutture idrauliche presenti e l'inserimento nel contesto urbano

attuale. Allo scopo, sono stati individuati tratti omogeni per caratteristiche fisiche ed idrauliche sulla base dei sopralluoghi (Figura 2-2), dell'analisi dei rilievi topografici e degli elementi noti del quadro conoscitivo. Per una maggiore descrizione dei tratti e delle singolarità si rimanda agli elaborati PP01A – Relazione Illustrativa e PP08.A - Planimetria delle Criticità allo Stato Attuale - Quadro 1.

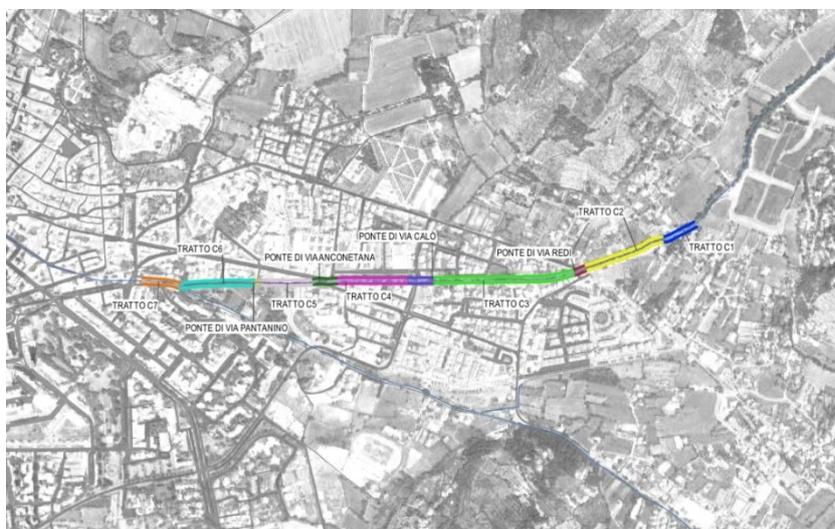


Figura 2-2: Tratti a geometria omogenea – Torrente Castro da Loc. Cognaia al Ponte della Parata

Tratto Torrente Bicchieraia da Loc. La Pace alla confluenza con il Torrente Castro

Il rilievo del tratto a cielo aperto del Torrente Bicchieraia, fornito dalla Committenza, ha permesso di caratterizzare geometricamente il corso d'acqua, le infrastrutture e strutture idrauliche presenti e l'inserimento nel contesto urbano attuale. Allo scopo, sono stati individuati tratti omogeni per caratteristiche fisiche ed idrauliche sulla base dei sopralluoghi (Figura 2-3), dell'analisi dei rilievi topografici e degli elementi noti del quadro conoscitivo. Per una maggiore descrizione dei tratti e delle singolarità si rimanda agli elaborati PP01A – Relazione Illustrativa e PP08.B - Planimetria delle Criticità allo Stato Attuale - Quadro 2.



Figura 2-3: Tratti a geometria omogenea – Torrente Bicchieraia da Loc. La Pace alla Confluenza con il Torrente Castro

3. LE OPERE DI PROGETTO

Il presente progetto di fattibilità prevede la realizzazione di una serie di interventi sui Torrenti Castro e Bicchieraia per la riduzione del rischio idraulico ingenerato sul territorio comunale di Arezzo ed ha le seguenti finalità:

- a. Riduzione delle aree allagabili in occasione di eventi di piena eccezionali;
- b. Riduzione del carico idraulico sulle infrastrutture e strutture idrauliche di contenimento;
- c. Incremento dell'efficienza idraulica dei corsi d'acqua ed individuazione di opere di difesa idraulica (casce di espansione/aree di laminazione controllata).

La soluzione progettuale proposta, frutto di un'articolata indagine conoscitiva e di una accurata valutazione delle alternative progettuali, prevede la realizzazione di una serie di interventi puntuali e diffusi che interessano il bacino del T. Castro.

Al fine di consentire una più rapida attuazione degli interventi, le opere di progetto sono state suddivise in 6 STRALCI FUNZIONALI, individuati nell'elaborato *PP09 - Planimetria Generale Stato di Progetto con suddivisione in Stralci*.

Il PRIMO STRALCIO FUNZIONALE riguarda la ricalibratura del reticolo del T. Castro e T. Bicchieraia, finalizzata all'incremento dell'efficienza idraulica dei 2 corsi d'acqua ed alla riduzione delle aree allagabili a monte del tratto tombato.

In particolare, l'intervento riguarda il tronco fluviale del Torrente Castro, dalla località Cognaia al Ponte della Parata, con adeguamento della sezione idraulica dimensionato sull'evento TR=200 anni, ed il tronco fluviale del Torrente Bicchieraia, dal ponte di loc. Matrignano alla confluenza nel T. Castro, dimensionato sull'evento TR=30 anni. Non sono previsti interventi sulle opere di attraversamento esistenti, se non una modesta ricavatura del fondo alveo laddove riscontrati evidenti fenomeni di sovralluvionamento e deposito di materiale. Fa eccezione il ponticello di Via del Pantanino sul T. Castro, che presenta criticità oltre che idrauliche anche strutturali evidenti, per il quale si prevede la demolizione con contestuale realizzazione di un breve tratto di viabilità per l'accesso alle abitazioni. Ai fini del non aggravio del rischio per le aree di valle, sul tratto terminale del T. Castro, dalla confluenza del T. Bicchieraia al ponte della Parata, è prevista la realizzazione di muri di centuriazione idraulica a sostituzione delle opere di sostegno esistenti.

Completano lo stralcio opere accessorie, quali piste di servizio e rampe di accesso a fiume lungo tutto il tratto di intervento.

L'obiettivo trapiantato da questo primo stralcio è l'assenza di esondazioni per eventi con TR=30 anni e la significativa riduzione delle aree allagate sugli eventi duecentennali. Le criticità residue riguardano gli attraversamenti, che presentano ancora funzionamento in pressione per eventi più gravosi, ed un maggior carico idraulico atteso sul tratto tombato, seppur modesto (portate di picco +9 m³/s e livelli massimi +40 cm circa per TR=200 anni all'imbocco della Parata rispetto allo stato attuale). Si precisa comunque che i livelli massimi attesi alla Parata risultano contenuti in alveo grazie alla realizzazione dei muri di centuriazione idraulica previsti nel tratto terminale.

Gli interventi inseriti nel secondo, terzo e quarto stralcio riguardano l'individuazione di aree di laminazione controllata all'interno del bacino del T. Castro finalizzate alla riduzione dei picchi di portata e dei volumi di piena ai fini della riduzione del carico idraulico atteso al tratto tombato ed alla diminuzione delle aree allagate, in termini di estensione e di battenti massimi attesi. In particolare:

- il SECONDO STRALCIO FUNZIONALE prevede la realizzazione di un'opera di laminazione sul Borro delle Vinacce, affluente in destra idraulica del T. Bicchieraia, in aree poste a monte della Via Anconetana (risultati attesi: portate di picco - 4 m³/s e livelli massimi -20 cm circa per TR=200 anni all'imbocco della Parata, e minori aree allagate rispetto al primo stralcio funzionale);
- il TERZO STRALCIO FUNZIONALE prevede la realizzazione di un'opera di laminazione sul T. Covole in loc. San Firenze, in aree poste a monte del Bivio Stoppe d'Arca (risultati attesi: portate di picco -2 m³/s e

livelli massimi -10 cm circa per TR=200 anni all'imbocco della Parata, e minori aree allagate rispetto al secondo stralcio funzionale);

- il QUARTO STRALCIO FUNZIONALE prevede la realizzazione di un'opera di laminazione sul T. Bicchieraia in loc. Pantanino e l'adeguamento della sezione idraulica del T. Bicchieraia nel tratto lungo Via dell'Acropoli fino al ponte di Via Sanzio per il contenimento delle portate attese per TR=200 anni, (portate -3 m³/s e livelli -15 cm circa per TR=200 anni all'imbocco della Parata, ed assenza di esondazioni per TR=200 anni).

Con la realizzazione dei primi 4 stralci funzionali dell'intervento, l'obiettivo traguardato è l'assenza di esondazioni per eventi duecentennali con un carico idraulico atteso sul tratto tombato leggermente inferiore rispetto allo stato attuale (portate di picco invariate pari a circa 115 m³/s, livelli massimi -4 cm circa per TR=200 anni all'imbocco della Parata rispetto allo stato attuale). Le criticità residue riguardano solo gli attraversamenti (funzionamento a bocca piena per i ponti di Via Calò e Via Anconetana sul T. castro e di Vicchio sul T. Bicchieraia, funzionamento in pressione per il ponte di Viale Sanzio sul T. Bicchieraia).

Gli ultimi due stralci funzionali prevedono interventi sul tombamento, con l'obiettivo di aumentare la capacità di smaltimento del tratto coperto.

In particolare:

- il QUINTO STRALCIO FUNZIONALE prevede la ricavatura del fondo alveo nel tratto di monte (circa 870 m) del tombamento, con lo scopo di aumentare la portata massima smaltibile a bocca piena dalla sezione minima (rif. Via Pietro Aretino, da Via Guadagnoli a Via Rodi) da Q = 80 m³/s a 100 m³/s (a fronte di una portata massima attesa al Ponte della Parata di circa 90 m³/s per eventi trentennali e 115 m³/s per eventi duecentennali);
- il SESTO STRALCIO prevede infine lo stombamento/adeguamento della sezione chiusa del tratto tombato a sezione minima (tratto lungo Via Pietro Aretino, fino all'incrocio con Via Rodi), con l'obiettivo di aumentare la portata massima smaltibile a bocca piena fino a Q=115 m³/s (portata di picco per eventi duecentennali).

La scansione temporale degli interventi dovrà rispettare la progressione degli stralci funzionali, così come indicata dalla numerazione degli stessi. Tutto ciò per dare compiutezza alle opere, privilegiando gli interventi che garantiscono i maggiori risultati in termini di costi/benefici per la di mitigazione del rischio idraulico senza comportare aggravii significativi nei tratti d'alveo e nelle aree contermini.

4. APPROCCIO METODOLOGICO

Al fine di verificare l'attuale livello di officiosità dei corsi d'acqua, definire analiticamente ogni criticità puntuale e/o diffusa del reticolo, progettare gli interventi necessari alla riduzione del rischio idraulico riscontrato e verificare l'efficacia degli interventi proposti, è stata sviluppata un'analisi idrologica-idraulica approfondita, descritta nei capitoli seguenti, che prevede:

- 1) **ANALISI IDROLOGICA** – finalizzata alla valutazione delle portate di piena da utilizzare in input alla modellazione idraulica. A tale scopo è stato sviluppato un modello idrologico di dettaglio, finalizzato alla determinazione degli idrogrammi di portata sintetici per assegnati tempi di ritorno attesi su varie sezioni di chiusura del bacino idrografico del Torrente Castro. La modellazione è stata effettuata in conformità con la metodologia adottata per la redazione degli studi idrologici-idraulici a supporto del Piano Strutturale.
- 2) **ANALISI IDRAULICA DELLO STATO ATTUALE** – finalizzata alla verifica del livello di officiosità idraulica attuale dei corsi d'acqua ed alla individuazione analitica delle criticità idrauliche puntuali e/o diffuse del reticolo.

Tale analisi è stata condotta in tre fasi:

- i. Implementazione di un modello idraulico monodimensionale a portata costante del tratto tombato, tramite il software Mike HYDRO (v. 2017) che consente la modellazione di tratti a geometria chiusa e variabile. Tale modellazione risulta di fondamentale importanza sia per la valutazione dell'officiosità idraulica del tratto tombato sia perché le risultanze costituiscono la condizione al contorno di valle dei modelli dei tratti di monte dei Torrenti Castro e Bicchieraia. Si precisa che il software Mike HYDRO non consente di per sé una modellazione in moto permanente, dunque è stato implementato come forzante un "idrogramma a gradini" con un set di portate costanti su intervalli temporali di 24 ore;
- ii. Implementazione di un modello idraulico monodimensionale in moto permanente dei tratti a cielo aperto dei Torrenti Castro e Bicchieraia a monte del tratto tombato tramite il software HEC-RAS 5.0.7 (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) al fine di valutare l'officiosità attuale dei corsi (suddivisi in tratti a sezione omogenea) ed individuare le criticità idrauliche degli attraversamenti;
- iii. Implementazione di un modello idraulico accoppiato, monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini potenzialmente allagabili tramite il software HEC-RAS 5.0.7 per la valutazione degli effetti indotti in alveo e nel territorio circostante, in termini di battenti da eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno).

I modelli, distinti ma al contempo strettamente correlati, hanno permesso di valutare il comportamento dei corsi d'acqua e la funzionalità delle opere idrauliche esistenti in occasione di eventi meteorici estremi e di stimarne officiosità e capacità di smaltimento in maniera analitica, permettendo così di individuare gli interventi di progetto necessari per la mitigazione del rischio idraulico.

- 3) **VERIFICA IDRAULICA DELLO STATO DI PROGETTO** – finalizzata alla verifica dell'efficacia degli interventi di progetto. Allo scopo, è stato sviluppato un modello idraulico accoppiato, monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini, sollecitato da eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno), per la valutazione dell'efficacia degli interventi proposti in termini di:
 - a. Riduzione delle aree allagate;
 - b. Riduzione del carico idraulico sulle infrastrutture e strutture idrauliche di contenimento;
 - c. Incremento dell'officiosità idraulica del corso d'acqua (casse di espansione di Cognaia e del T. Bicchieraia);
 - d. Individuazione e definizione del funzionamento idraulico di aree di laminazione all'interno del bacino di studio.

Gli interventi progettuali sono stati suddivisi in stralci funzionali come di seguito riportati:

1. Stralcio Funzionale 1: Ricalibratura della sezione idraulica del Torrente Castro (al fine di contenere i volumi per eventi con tempi di ritorno pari a 200 anni) e della sezione idraulica del Torrente Bicchieraia (al fine di contenere i volumi per eventi con tempi di ritorno pari a 30 anni);
2. Stralcio Funzionale 2: Realizzazione di bocca tarata sul Borro delle Vinacce;
3. Stralcio Funzionale 3: Realizzazione di Cassa di Espansione in Loc. San Firenze;
4. Stralcio Funzionale 4: Realizzazione di Area di Laminazione in Loc. Pantanino;
5. Stralcio Funzionale 5: Ricavatura del fondo alveo del tratto di monte del tombamento;
6. Stralcio Funzionale 6: Apertura del Tratto Tombato in corrispondenza in Via Pietro Aretino.

Per la definizione delle condizioni al contorno di valle di tale modello accoppiato, per ogni stralcio funzionale, è stato realizzato un modello idraulico monodimensionale 1D a portata costante sul tratto tombato, tramite il software Mike HYDRO (v. 2017), sollecitato con lo stesso set di portate costanti così come descritto allo stato attuale.

Ognuno degli stralci su menzionati è stato verificato per un evento pari a tempo di ritorno 200 anni (eccezion fatta per lo stralcio funzionale 1 che è stato verificato anche per un evento con tempo di ritorno 30 anni), tenendo conto dell'implementazione dello stralcio precedente.

L'individuazione degli interventi progettuali si è basata su analisi idrologiche-idrauliche di supporto atte a valutare l'efficienza di una pluralità di interventi possibili. Tra questi, è stata valutata la possibilità di realizzazione di un diversivo che convogliasse quota parte dei volumi d'esonazione nel Torrente Vingone. Le risultanze di tale valutazione sono riportate nell'Appendice A – Analisi idrologica idraulica sul TORRENTE VINGONE.

5. ANALISI IDROLOGICA

Il presente capitolo illustra i risultati della modellazione idrologica eseguita all'interno del bacino del Torrente Castro, finalizzata alla determinazione degli idrogrammi di piena attesi da utilizzare in input alla modellazione idraulica del corso d'acqua descritta al capitolo successivo.

L'analisi svolta ha previsto:

- Individuazione del bacino idrografico e del reticolo idraulico significativo;
- Determinazione degli input pluviometrici;
- Definizione del modello idrologico per la stima delle perdite e della trasformazione afflussi-deflussi e determinazione dei parametri idrologici;
- Determinazione della durata di pioggia critica;
- Calcolo degli idrogrammi di portata attesi su varie sezioni di chiusura del bacino idrografico.

5.1 ANALISI E MODELLAZIONE IDROLOGICA PRELIMINARE

A supporto delle verifiche idrauliche dello stato attuale e delle configurazioni progettuali è stata implementata, sia per il Torrente Castro sia per il Torrente Bicchieraia, un'analisi idrologica preliminare da confrontarsi con lo studio sopracitato. Tale analisi è stata svolta a partire dal modello ALTO che è stato redatto sulla base delle seguenti metodologie:

- Il modello di infiltrazione utilizzato è il modello di infiltrazione asintotico a soglia, il quale richiede la stima di due parametri:
 - o $I_a=I_a(t_a)$ [mm], volume unitario di perdita iniziale che il terreno assorbe durante i primi istanti di precipitazione;
 - o 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:
 - o n [-], numero di serbatoi lineari che rappresentano il bacino nella schematizzazione del modello di Nash;
 - o k [h], tempo caratteristico che rappresenta il tempo di svuotamento del serbatoio.

In particolare, a partire dal modello ALTO sono stati implementati dei modelli rappresentati i seguenti scenari idrologici:

- MODELLO IDROLOGICO 0: Parametri originali di ALTO;
- MODELLO IDROLOGICO 1: Parametri di n , k , I_a e K_s originali di ALTO e aggiornamento delle sole linee segnalatrici di Possibilità pluviometrica (2012);
- MODELLO IDROLOGICO 2: Parametri di I_a e K_s originali di ALTO e aggiornamento delle linee segnalatrici di Possibilità pluviometrica (2012) e dei parametri n e k di Nash;
- MODELLO IDROLOGICO 3: Parametri di n e n originali di ALTO e aggiornamento delle linee segnalatrici di Possibilità pluviometrica (2012) e dei parametri I_a e K_s secondo l'uso del Suolo messo a disposizione da Regione Toscana;
- MODELLO IDROLOGICO 4: Aggiornamento di tutti i parametri succitati.

I bacini oggetto di confronto sono stati indagati per vari eventi meteorici (durate = 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75, 3, 6, 9 e 12 ore) in riferimento ai tempi di ritorno 30 e 200 anni.

5.1.1 MODELLO IDROLOGICO 0

Sul modello ALTO sono stati individuati i bacini che avessero una corrispondenza con i sottobacini oggetto di studio. Sono stati individuati i seguenti bacini:

- CASTRO (Codice 55403);
- BICCHIERAIA (Codice 55403);
- PENETO (Codice 56262);
- COVOLE (Codice 56474).

le cui sezioni di chiusura sono individuate in Figura 5-1. I parametri adottati per la modellistica sono riassunti in Tabella 5-1.

NOME	la	Ks	n	k	a	n	m
CASTRO	15.884	0.000	2.847	0.575	22.218	0.278	0.216
BICCHIERAIA	13.090	0.000	2.197	0.681	21.812	0.277	0.217
PENETO	16.368	0.000	2.478	0.408	21.812	0.277	0.217
COVOLE	12.496	0.000	2.724	0.423	21.812	0.277	0.217

Tabella 5-1: Parametri Idrologici Modello 0 (ALTO)

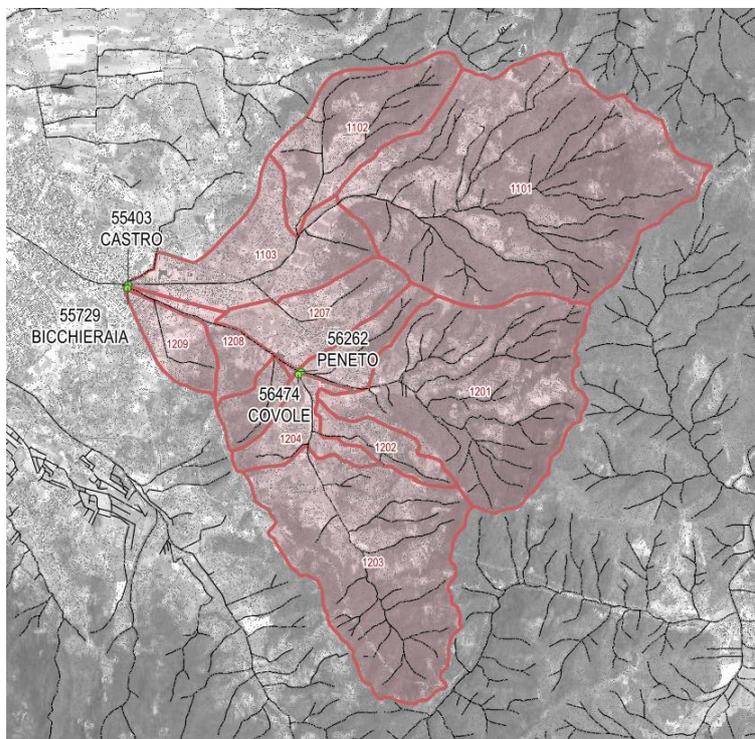


Figura 5-1: Sezioni di chiusura del Modello Idrologico 0

NOME	TR 30 anni - Q_{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	54.4	59.5	63.4	65.7	66.8	68.1	68.8	68.7	67.9	50.8	38.4	31.3
BICCHIERAIA	67.6	73.0	76.9	79.2	80.2	80.2	80.5	80.0	78.9	56.9	43.0	35.1
PENETO	36.2	37.9	39.0	39.7	39.5	38.8	37.7	36.3	34.8	22.2	16.6	13.5
COVOLE	42.6	44.7	45.3	45.0	45.0	44.3	43.1	41.6	40.0	25.6	19.2	15.6

Tabella 5-2: Modello Idrologico 0 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 30 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	416.2	460.3	498.5	532.6	563.2	591.4	617.3	641.4	664.1	866.5	1005.1	1113.6
BICCHIERAIA	506.1	555.5	598.4	636.5	670.8	702.3	731.4	758.5	783.9	1011.0	1166.5	1288.3
PENETO	182.0	200.8	217.1	231.5	244.5	256.4	267.4	277.6	287.2	372.5	430.7	476.2
COVOLE	238.7	260.4	279.3	296.0	311.1	324.9	337.6	349.4	360.5	459.4	526.9	579.6

Tabella 5-3: Modello Idrologico 0 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 200 anni - Q_{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	97.3	104.2	108.1	109.9	111.7	112.4	111.7	110.1	107.7	76.9	57.9	47.2
BICCHIERAIA	116.4	124.2	128.3	129.7	129.4	129.8	128.8	126.8	124.1	86.1	64.9	52.9
PENETO	63.7	64.5	65.8	65.4	63.8	61.6	59.0	56.3	53.6	33.5	25.0	20.4
COVOLE	71.6	73.7	73.5	72.7	71.6	69.5	67.0	64.2	61.4	38.7	28.9	23.6

Tabella 5-4: Modello Idrologico 0 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

NOME	TR 200 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	748.7	815.2	872.8	924.0	970.2	1012.6	1051.7	1088.0	1122.2	1427.1	1635.8	1799.3
BICCHIERAIA	879.3	954.0	1018.7	1076.1	1128.1	1175.6	1219.5	1260.4	1298.7	1641.4	1876.1	2059.9
PENETO	329.0	357.3	381.9	403.7	423.3	441.3	457.9	473.3	487.7	616.5	704.4	773.0
COVOLE	408.3	441.1	469.6	494.8	517.6	538.4	557.6	575.5	592.2	741.5	843.3	923.0

Tabella 5-5: Modello Idrologico 0 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

5.1.2 MODELLO IDROLOGICO 1

Nel Modello Idrologico 1 sono stati implementati, per i bacini di interessi, gli stessi parametri per i modelli di infiltrazione (I_a, K_s) e di formazione dell'onda di piena (n, k). La linea segnalatrice di probabilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla sua durata per un assegnato tempo di ritorno, è stata invece modificata sulla base delle risultanze dell'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). 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 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 LSPP è comunemente descritta da una legge di potenza del tipo:

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

con:

- h [mm], altezza di pioggia;
- t [ore], durata dell'evento meteorologico;
- 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.

I parametri quindi ottenuti sulla base di quanto sopra sono riassunti in Tabella 5-6.

NOME	I_a	K_s	n	k	a	n	m
CASTRO	15.884	0.000	2.847	0.575	18.786	0.236	0.285
BICCHIERAIA	13.090	0.000	2.197	0.681	18.379	0.226	0.285
PENETO	16.368	0.000	2.478	0.408	18.455	0.226	0.285
COVOLE	12.496	0.000	2.724	0.423	18.215	0.222	0.285

Tabella 5-6: Parametri Idrologici Modello 1

I risultati ottenuti per il Modello Idrologico 1 in termini di portate al colmo di piena e di volumi di piena per tutti gli eventi meteorologici indagati per entrambi i tempi di ritorno di riferimento sono riportati nelle seguenti tabelle.

NOME	TR 30 anni - Q_{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	65.9	70.4	73.4	75.0	75.3	76.0	75.9	75.1	73.8	52.6	38.9	31.3
BICCHIERAIA	79.8	84.3	87.0	88.0	87.9	87.4	86.8	85.4	83.7	57.4	42.3	33.9
PENETO	43.8	44.3	44.9	45.1	44.0	42.6	40.9	39.1	37.3	22.6	16.5	13.2
COVOLE	49.9	50.9	50.5	49.3	48.8	47.6	45.9	43.9	42.0	25.6	18.7	14.9

Tabella 5-7: Modello Idrologico 1 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 30 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	506.4	547.2	582.1	612.9	640.5	665.6	688.6	710.0	730.0	904.5	1020.7	1110.2
BICCHIERAIA	599.9	643.3	680.6	713.4	742.7	769.4	793.9	816.5	837.7	1022.1	1144.4	1238.2
PENETO	222.4	239.0	253.2	265.7	276.8	286.9	296.2	304.8	312.7	382.2	428.0	463.1
COVOLE	280.1	298.6	314.6	328.5	341.0	352.3	362.7	372.3	381.2	458.8	509.9	548.9

Tabella 5-8: Modello Idrologico 1 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 200 anni - Q_{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	103.7	111.2	115.4	117.2	119.3	120.0	119.2	117.4	115.0	82.3	62.2	50.9
BICCHIERAIA	122.1	130.1	134.4	135.7	135.4	135.7	134.6	132.3	129.4	89.7	67.7	55.2
PENETO	67.6	68.7	69.9	69.3	67.4	65.0	62.2	59.3	56.5	35.3	26.4	21.5
COVOLE	74.7	76.7	76.4	75.5	74.2	72.0	69.3	66.4	63.5	39.9	29.8	24.3

Tabella 5-9: Modello Idrologico 1 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

NOME	TR 200 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	798.4	870.6	933.5	989.4	1039.9	1086.3	1129.2	1169.2	1206.7	1543.8	1776.2	1959.0
BICCHIERAIA	923.0	1000.8	1068.3	1128.2	1182.4	1232.0	1277.9	1320.7	1360.8	1719.5	1965.8	2159.1
PENETO	351.0	381.0	406.9	429.9	450.7	469.7	487.2	503.5	518.8	655.2	748.4	821.3
COVOLE	426.4	460.1	489.3	515.1	538.4	559.8	579.4	597.7	614.9	767.6	871.9	953.3

Tabella 5-10: Modello Idrologico 1 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

5.1.3 MODELLO IDROLOGICO 2

Il modello idrologico 2 è stato ottenuto a partire dal Modello Idrologico1 ed aggiornando i parametri del modello di trasformazione afflussi-deflussi (n,k). Tali parametri sono stati aggiornati in virtù delle caratteristiche geomorfologiche del reticolo idrografico, determinate mediante una descrizione gerarchica e calcolati una volta ordinato il reticolo idrografico secondo il metodo di gerarchizzazione e classificazione geomorfologica di Horton e Strahler.

I parametri implementati nella modellazione sono riportati in Tabella 5-11.

NOME	la	Ks	n	k	a	n	m
CASTRO	15.884	0.000	3.014	0.574	18.786	0.236	0.285
BICCHIERAIA	13.090	0.000	2.962	0.566	18.379	0.226	0.285
PENETO	16.368	0.000	2.931	0.354	18.455	0.226	0.285
COVOLE	12.496	0.000	2.870	0.396	18.215	0.222	0.285

Tabella 5-11: Parametri Idrologici Modello 2

I risultati ottenuti per il Modello Idrologico 2 in termini di portate al colmo di piena e di volumi di piena per tutti gli eventi meteorologici indagati per entrambi i tempi di ritorno di riferimento sono riportati nelle seguenti tabelle.

NOME	TR 30 anni - Q_{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	64.3	67.7	70.8	73.1	73.9	73.8	73.8	73.5	72.6	52.5	38.9	31.3
BICCHIERAIA	77.8	81.6	84.6	86.0	86.1	86.3	85.7	84.5	82.7	57.8	42.6	34.1
PENETO	44.9	46.0	45.8	45.1	44.3	43.0	41.4	39.6	37.7	22.8	16.6	13.3
COVOLE	51.2	52.2	51.7	50.4	49.5	48.2	46.4	44.3	42.3	25.6	18.7	14.9

Tabella 5-12: Modello Idrologico 2 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 30 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	506.6	547.4	582.3	613.1	640.7	665.9	688.9	710.3	730.2	904.8	1021.1	1110.6
BICCHIERAIA	603.1	646.9	684.4	717.3	746.8	773.6	798.2	821.0	842.3	1027.7	1150.7	1245.0
PENETO	223.6	240.3	254.6	267.1	278.4	288.5	297.8	306.5	314.5	384.4	430.4	465.7
COVOLE	280.3	298.9	314.9	328.9	341.3	352.7	363.0	372.6	381.6	459.2	510.4	549.5

Tabella 5-13: Modello Idrologico 2 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 200 anni - Q _{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	100.6	106.7	112.1	115.0	116.0	116.6	116.7	115.7	113.8	82.2	62.3	50.9
BICCHIERAIA	118.1	126.2	131.0	132.8	133.6	134.1	133.0	130.8	127.9	90.3	68.0	55.5
PENETO	69.8	71.0	69.8	69.6	68.1	65.7	62.9	60.0	57.1	35.5	26.5	21.6
COVOLE	76.5	78.6	78.1	76.7	75.2	72.9	70.0	66.9	63.9	39.9	29.9	24.3

Tabella 5-14: Modello Idrologico 2 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

NOME	TR 200 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	798.6	871.0	933.8	989.7	1040.3	1086.7	1129.6	1169.6	1207.2	1544.4	1776.9	1959.8
BICCHIERAIA	928.1	1006.3	1074.1	1134.4	1188.9	1238.8	1284.9	1327.9	1368.2	1729.0	1976.6	2170.9
PENETO	353.0	383.1	409.2	432.3	453.2	472.3	489.9	506.3	521.7	658.8	752.5	825.9
COVOLE	426.8	460.5	489.7	515.6	539.0	560.3	580.0	598.3	615.5	768.4	872.7	954.1

Tabella 5-15: Modello Idrologico 2 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

5.1.4 MODELLO IDROLOGICO 3

Il Modello Idrologico 3 è stato ottenuto a partire dal Modello Idrologico1 ed aggiornando i parametri del modello di infiltrazione (I_a, K_s). Tali parametri sono stati aggiornati in virtù di quanto segue:

- Il volume unitario di perdita iniziale I_a è stato determinato in funzione della percentuale di area boscata presente nel bacino considerato (derivata dalla carta dell'Uso e Copertura del Suolo);
- Il coefficiente di infiltrazione a saturazione K_s è stato determinato con una duplice modalità:
 - o con riferimento al valore di conducibilità idraulica a saturazione (K_{sat}) per l'intero suolo (150 cm) stimato da Ing. Castelli e pubblicato nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze (di cui alla DGRT 1133/2012) dove si è proceduto ad effettuare un aggiornamento del modello Idrologico distribuito in uso presso il Centro Funzionale della Regione Toscana per la previsione degli eventi di piena in tempo reale (MOBIDIC);
 - o con riferimento alla metodologia adottata dal Modello ALTO, a partire dalla Carta Geologica Regionale aggiornata e andando ad assegnare ad ogni formazione geologica un coefficiente di infiltrazione (K_s) e calcolando un coefficiente medio per ogni bacino.

Risultando i due valori molto simili, a favore di sicurezza si è scelto quello che tra i due risultasse inferiore.

I parametri implementati nella modellazione sono riportati in Tabella 5-16.

NOME	I_a	K_s	n	k	a	n	m
CASTRO	16.283	1.328	2.847	0.575	18.786	0.236	0.285
BICCHIERAIA	14.499	1.105	2.197	0.681	18.379	0.226	0.285
PENETO	18.357	1.267	2.478	0.408	18.455	0.226	0.285
COVOLE	14.066	1.108	2.724	0.423	18.215	0.222	0.285

Tabella 5-16: Parametri Idrologici Modello 3

I risultati ottenuti per il Modello Idrologico 3 in termini di portate al colmo di piena e di volumi di piena per tutti gli eventi meteorologici indagati per entrambi i tempi di ritorno di riferimento sono riportati nelle seguenti tabelle.

NOME	TR 30 anni - Q_{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	62.6	66.5	69.2	70.4	70.3	70.7	70.5	69.6	68.1	46.9	33.3	25.7
BICCHIERAIA	74.3	78.2	80.9	82.0	81.8	80.6	80.2	79.1	77.5	52.0	37.0	28.6
PENETO	40.0	40.9	41.1	41.1	40.5	39.5	37.9	36.3	34.6	20.3	14.2	10.9
COVOLE	46.4	47.5	47.4	46.5	45.7	44.5	42.9	41.2	39.3	23.3	16.3	12.6

Tabella 5-17: Modello Idrologico 3 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 30 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	480.3	516.0	546.0	571.7	594.3	614.4	632.4	648.8	663.7	777.9	833.9	863.1
BICCHIERAIA	556.3	595.0	627.5	655.5	680.0	701.9	721.6	739.5	755.8	882.9	947.7	984.2
PENETO	201.2	215.7	227.9	238.3	247.3	255.4	262.6	269.1	275.0	319.7	340.8	351.2
COVOLE	259.8	276.4	290.2	302.0	312.4	321.6	329.9	337.5	344.3	396.7	422.7	436.8

Tabella 5-18: Modello Idrologico 3 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 200 anni - Q_{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	100.4	107.3	111.1	112.8	114.4	114.9	114.0	112.2	109.5	76.7	56.7	45.3
BICCHIERAIA	116.6	124.4	128.3	129.7	129.3	129.5	128.5	126.4	123.6	84.4	62.4	49.9
PENETO	64.2	64.7	66.2	66.0	64.4	62.2	59.5	56.7	54.0	33.0	24.1	19.2
COVOLE	71.6	73.8	73.3	72.2	71.2	69.2	66.7	63.9	61.0	37.6	27.5	21.9

Tabella 5-19: Modello Idrologico 3 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

NOME	TR 200 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	772.2	839.5	897.3	948.2	993.8	1035.1	1072.9	1107.9	1140.5	1417.3	1589.4	1712.0
BICCHIERAIA	879.5	952.5	1015.1	1070.3	1119.8	1164.6	1205.7	1243.6	1278.9	1580.3	1769.2	1905.0
PENETO	329.8	357.7	381.6	402.5	421.2	438.1	453.6	467.9	481.1	592.7	661.1	709.3
COVOLE	406.2	437.8	464.9	488.6	509.9	529.1	546.7	562.9	577.9	705.6	784.7	841.1

Tabella 5-20: Modello Idrologico 3 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

5.1.5 MODELLO IDROLOGICO 4

Il Modello Idrologico 4 è stato ottenuto a partire dal Modello Idrologico 1 ed aggiornando i parametri sia per il modello di infiltrazione (I_a, K_s) sia per il modello di trasformazione afflussi-deflussi (n, k) così come descritto per i Modelli Idrologici 2 e 3. I parametri risultanti sono riportati in

NOME	I_a	K_s	n	k	a	n	m
CASTRO	16.283	1.328	3.014	0.574	18.786	0.236	0.285
BICCHIERAIA	14.499	1.105	2.962	0.566	18.379	0.226	0.285
PENETO	18.357	1.267	2.931	0.354	18.455	0.226	0.285
COVOLE	14.066	1.108	2.870	0.396	18.215	0.222	0.285

Tabella 5-21: Parametri Idrologici Modello 4

I risultati ottenuti per il Modello Idrologico 4, in termini di portate al colmo di piena e di volumi di piena per tutti gli eventi meteorologici indagati per entrambi i tempi di ritorno di riferimento, sono riportati nelle seguenti tabelle.

NOME	TR 30 anni - Q_{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	58.3	61.2	63.6	65.3	65.8	65.6	65.2	64.9	63.8	44.6	31.8	24.5
BICCHIERAIA	59.2	61.8	64.0	65.1	65.1	64.7	64.3	63.5	62.2	42.3	30.0	23.2
PENETO	33.1	34.2	34.2	33.3	32.8	32.1	30.9	29.5	28.2	16.4	11.5	8.8
COVOLE	39.4	40.3	40.1	39.2	38.3	37.2	35.8	34.3	32.7	19.2	13.5	10.4

Tabella 5-22: Modello Idrologico 4 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 30 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	459.0	492.9	521.4	545.9	567.4	586.5	603.6	619.1	633.3	741.9	795.1	822.7
BICCHIERAIA	457.6	488.7	514.9	537.4	557.2	574.7	590.5	604.9	618.0	719.7	771.5	800.5
PENETO	163.6	175.4	185.1	193.5	200.8	207.3	213.1	218.4	223.1	259.0	276.0	284.3
COVOLE	215.4	229.0	240.3	250.1	258.6	266.2	273.0	279.1	284.7	327.8	349.0	360.5

Tabella 5-23: Modello Idrologico 4 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 30 anni

NOME	TR 200 anni - Q _{max} [m ³ /s]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	93.0	98.2	102.9	105.4	106.2	106.4	106.4	105.3	103.3	73.0	54.0	43.2
BICCHIERAIA	92.2	98.2	101.7	103.1	103.4	103.8	103.0	101.3	98.9	68.6	50.6	40.5
PENETO	53.4	54.4	53.7	53.3	52.4	50.7	48.5	46.2	43.9	26.7	19.5	15.5
COVOLE	60.7	62.5	62.0	60.5	59.6	57.8	55.5	53.1	50.7	31.0	22.7	18.1

Tabella 5-24: Modello Idrologico 4 – Portate al colmo di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

NOME	TR 200 anni - Volumi [1000 m ³]											
	d=1 [h]	d=1.25 [h]	d=1.5 [h]	d=1.75 [h]	d=2 [h]	d=2.25 [h]	d=2.5 [h]	d=2.75 [h]	d=3 [h]	d=6 [h]	d=9 [h]	d=12 [h]
CASTRO	737.4	801.4	856.4	904.8	948.2	987.5	1023.5	1056.8	1087.7	1350.9	1514.5	1631.0
BICCHIERAIA	721.3	780.2	830.8	875.3	915.1	951.3	984.4	1014.9	1043.3	1285.6	1437.3	1546.2
PENETO	267.8	290.3	309.6	326.5	341.6	355.2	367.7	379.2	389.9	479.7	534.8	573.4
COVOLE	336.3	362.4	384.6	404.2	421.6	437.4	451.9	465.2	477.6	582.5	647.4	693.6

Tabella 5-25: Modello Idrologico 4 – Volumi di piena per tempo di ritorno TR 200 anni

5.1.6 CONFRONTO CON MODELLISTICA PIANO STRUTTURALE AREZZO

L'analisi idrologica preliminare sopra descritta è stata confrontata con i risultati della modellistica implementata nell'ambito degli studi idrologici-idraulici redatti a supporto del Piano Strutturale del Comune di Arezzo. Di fatto, è stata riscontrata una sostanziale concordanza di risultati, come evidenziato Tabella 5-26 dove si riportano le portate al colmo di piena, a titolo di esempio, l'evento meteorologico con tempo di ritorno TR pari a 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO originale), il Modello Idrologico 4 (LSPP, la, Ks, n e k aggiornati) ed il modello idrologico a supporto del PS del Comune di Arezzo.

NOME	MODELLO IDR.0 (ALTO)	MODELLO IDR. 4	MODELLO PS AREZZO
CASTRO	112	106	105
BICCHIERAIA	129	103	119
PENETO	64	52	44
COVOLE	72	60	55

Tabella 5-26: Confronto dei risultati in termini di portata al colmo di piena [m³/s] ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), il Modello Idrologico 4 e ricavati dal Modello Idrologico a supporto al Piano Strutturale di Arezzo in riferimento all'evento con tempo di ritorno TR pari a 200 anni e durata d=2h

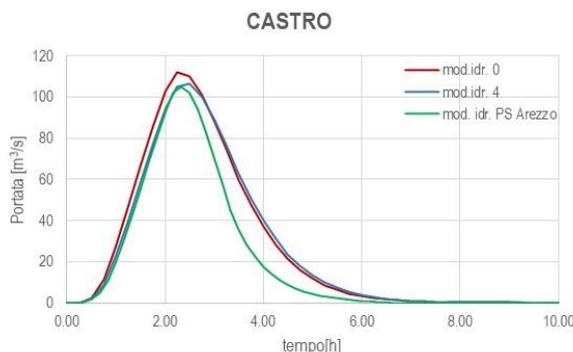


Figura 5-2: Confronti idrogrammi Torrente Castro per TR 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), per il Modello Idrologico 4 e per il modello Idrologico di supporto al Piano Strutturale di Arezzo

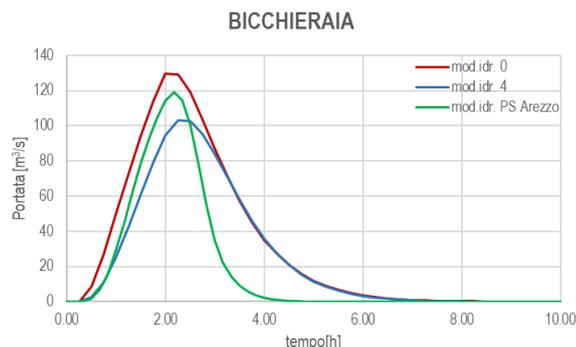


Figura 5-3: Confronti idrogrammi Torrente Bicchieraia per TR 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), per il Modello Idrologico 4 e per il modello Idrologico di supporto al Piano Strutturale di Arezzo

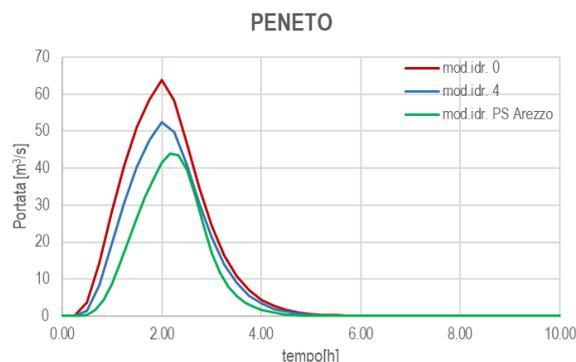


Figura 5-4: Confronti idrogrammi Borro del Peneto per TR 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), per il Modello Idrologico 4 e per il modello Idrologico di supporto al Piano Strutturale di Arezzo

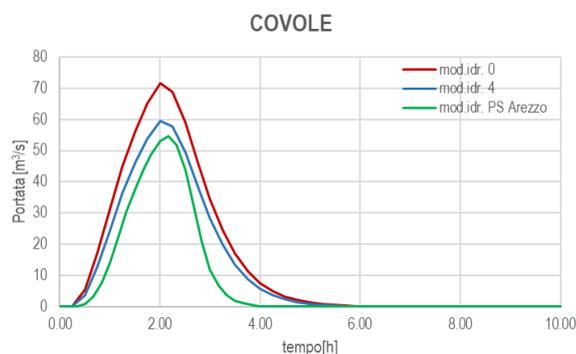


Figura 5-5: Confronti idrogrammi Borro di Covole per TR 200 anni e durata 2 ore ottenuti per il Modello Idrologico 0 (ALTO), per il Modello Idrologico 4 e per il modello Idrologico di supporto al Piano Strutturale di Arezzo

In virtù della conformità dei risultati, in accordo con la Committenza, per la modellazione idrologica di supporto alla valutazione delle criticità allo stato attuale ed alla progettazione si è mutuata la modellistica idrologica redatta a supporto del Piano Strutturale del Comune di Arezzo. È stato necessario rivalutare la suddivisione in sottobacini in virtù del diverso livello di dettaglio necessario per la redazione dello studio idrologico-idraulico oggetto della presente relazione. In Figura 5-6 sono riportati i bacini oggetto di studio del Piano Strutturale del Comune di Arezzo con evidenziato la porzione di bacino di interesse.

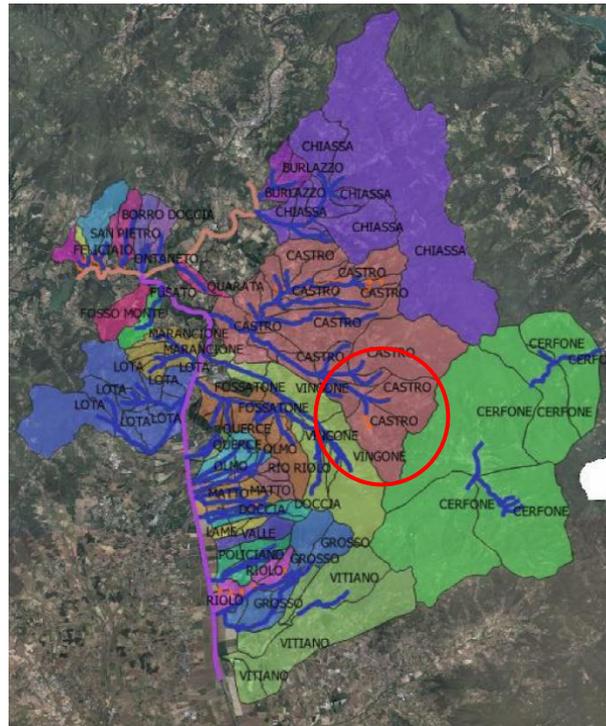


Figura 5-6: Bacini oggetto di studio del Piano Strutturale del Comune di Arezzo

5.2 MODELLO IDROLOGICO DI SUPPORTO AL PROGETTO

5.2.1 BACINO IDROGRAFICO DI RIFERIMENTO

Il Torrente Castro, a monte dell'imboccatura del tratto tombato, sottende un bacino idrografico di superficie complessiva pari a circa 27 km², di cui 12.5 km² afferenti al tratto di monte del Torrente Castro e circa 14.5 km² afferenti al Torrente Bicchieraia. Per l'individuazione dei bacini idrografici, del reticolo idraulico dei Torrenti Castro e Bicchieraia si rimanda all'elaborato IDR02.A - Allegato 1 - Risultati Modello Idrologico.

5.2.1.1 Codifica dei Bacini

I bacini del reticolo fluviale afferenti all'area di studio sono stati suddivisi in sottobacini ed interbacini e studiati dal punto di vista idrologico tenendo conto dei tratti fluviali simulati idraulicamente, della presenza di contributi laterali al reticolo di interesse e della conformazione del territorio latistante i corsi studiati. Sulla base di questo sono stati individuati bacini e sottobacini identificati da un codice di quattro caratteri:

- le prime due cifre rappresentano il codice del bacino di appartenenza;
- le ultime due cifre rappresentano l'eventuale presenza di sottobacini.

I sottobacini, riportati in Figura 5-7 e Figura 5-8 ed elencati in Tabella 5-27, sono consultabili nelle tavole grafiche nell'elaborato IDR02.A – Allegato 1 – Risultati Modello Idrologico.

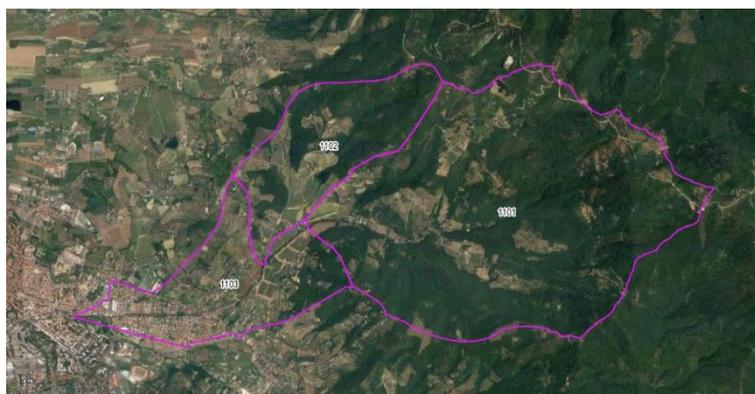


Figura 5-7: Bacini Idrografici afferenti al tratto di monte del Torrente Castro

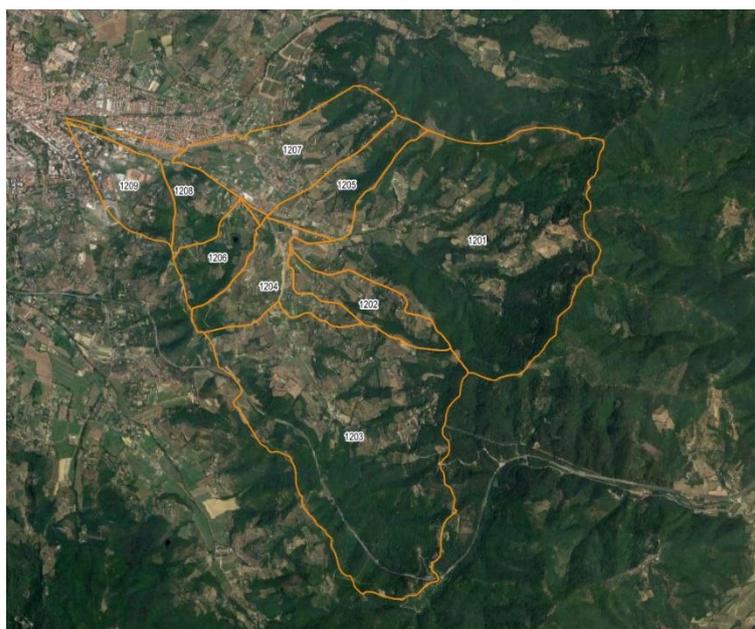


Figura 5-8: Bacini Idrografici afferenti al Torrente Bicchieraia

CODICE	BACINO	SOTTOBACINO/INTERBACINO
1101	TORRENTE CASTRO	BACINO TORRENTE CASTRO MONTE
1102		BACINO BORRO DI BALZANO
1103		INTERBACINO TORRENTE CASTRO
1201	TORRENTE BICCHIERAIA	BACINO BORRO DEL PENETO
1202		BACINO BORRO DELLE CASACCE
1203		BACINO FOSSO DI COVOLE
1204		INTERBACINO FOSSO DI COVOLE
1205		BACINO BORRO DELLA BAGNAROLA
1206		BACINO BORRO MARMORINO
1207		BACINO BORRO DELLE VINACCE
1208		INTERBACINO TORRENTE BICCHIERAIA
1209		BACINO BORRO DI CASTELSECCO

Tabella 5-27: Codifica dei bacini idrografici

5.2.2 MODELLO IDROLOGICO

Le sollecitazioni idrologiche ai modelli idraulici implementati sono state determinate come segue:

- Determinazione degli input pluviometrici;
- Definizione del modello idrologico per la stima delle perdite e la trasformazione afflussi-deflussi (*determinazione dei parametri idrologici*);
- Calcolo degli idrogrammi di piena per tempi di ritorno e durate di pioggia prefissati.

Di seguito viene illustrata la modellistica idrologica implementata per la determinazione degli idrogrammi di piena relativi ai corsi oggetto di interesse.

5.2.2.1 Input pluviometrici

Le sollecitazioni pluviometriche adottate nel presente studio sono state mutate quelle determinate per lo studio idrologico-idraulico redatto a supporto del Piano Strutturale del Comune di Arezzo.

5.2.2.2 Determinazione dei parametri idrologici

La determinazione dei parametri idrologici rappresentativi dei bacini idrografici oggetto di studio è stata effettuata in riferimento alla metodologia adottata nella modellistica idrologica redatta a supporto del Piano Strutturale del Comune di Arezzo. In tale studio, il modello numerico utilizzato per la determinazione dei contributi idrologici al reticolo idraulico oggetto di studio è composto da:

- un modello di infiltrazione (SCS-CN, *Soil Conservation Service Curve Number*);
- un modello afflussi-deflussi per la trasformazione degli input pluviometrici netti in idrogrammi sollecitanti il reticolo idraulico (*Metodo di Clark*).

5.2.2.2.1 Modello di Infiltrazione

Per il calcolo delle perdite di bacino è stato adottato il metodo del Curve Number (CN), modello di rifiuto del terreno sviluppato dal *Soil Conservation Service* degli Stati Uniti. Si tratta di un modello empirico che stima la predisposizione dei suoli a contribuire ai deflussi di piena mediante l'analisi di tre fattori: le caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali e degli strati geologici immediatamente sottostanti, l'uso del suolo e la copertura vegetale, lo stato di imbibimento del terreno all'inizio della sollecitazione meteorica. La definizione dei parametri CN è stata sviluppata da Regione Toscana in cui sono indicate sia l'uso del suolo che la classe litologica.

Nell'ambito del presente studio si è adottato, coerentemente con quanto adottato per il Piano Strutturale del Comune di Arezzo, il Curve Number CN corrispondente alla condizione di umidità antecedente AMC=III (di seguito indicato come CN III), ricavato tramite la seguente relazione:

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}}$$

Per tutti i dettagli teorici si rimanda alla APPENDICE B – MODELLISTICA IDROLOGICA FONDAMENTI TEORICI per maggiori approfondimenti.

5.2.2.2.2 Modello di Trasformazione afflussi-deflussi

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi, Metodo di Clark, richiede la stima di due parametri idrologici. t_c e R .

Per la stima di t_c [h] è stata utilizzata la formulazione di Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8 \sqrt{z}}$$

dove A è l'area del bacino [km²], L è la lunghezza dell'asta principale [km] e z è l'altezza media del bacino rispetto alla sezione di chiusura [m].

Il coefficiente di immagazzinamento (costante di ritardo) R è stato determinato tramite la seguente formulazione originale di Clark:

$$R = \frac{0.8 \cdot \left(\frac{L}{1.60934} \right)}{(i_B \cdot 100)^{0.5}}$$

dove L è la lunghezza principale dell'asta [km] ed i_B è la pendenza media del bacino.

Si rimanda alla APPENDICE B – MODELLISTICA IDROLOGICA FONDAMENTI TEORICI per maggiori approfondimenti.

5.2.2.2.3 Parametri idrologici

Una sintesi dei parametri idrologici utilizzati è riportata in Tabella 5-28.

CODICE	BACINO	AREA [km ²]	CN III	t_c [h]	R [h]	Hmax [m s.l.m.]	Hmin [m s.l.m.]	Hmed [m s.l.m.]	i_{max} [%]	i_{min} [%]	i_{med} [%]	L_{max} [km]
1101	TORRENTE CASTRO	8.14	77.73	1.31	0.36	960.00	293.87	565.69	111.16	0.00	29.30	3.93
1102		2.09	80.26	1.14	0.27	654.78	283.26	399.71	82.72	0.00	25.39	2.71
1103		2.23	83.63	1.49	0.16	460.00	260.85	302.85	83.98	0.00	12.46	1.17
1201	TORRENTE BICCHIERAIA	4.78	79.08	1.25	0.31	725.45	283.39	482.52	122.82	0.00	32.48	3.55
1202		0.57	80.38	0.73	0.20	557.10	282.18	388.06	91.46	0.00	24.27	1.99
1203		4.66	79.63	1.47	0.31	621.93	287.04	420.82	106.28	0.00	27.59	3.31
1204		0.78	85.56	0.96	0.10	434.70	279.03	318.29	62.29	0.00	16.20	0.85
1205		0.68	82.55	0.81	0.16	532.86	279.15	353.05	87.31	0.00	21.90	1.53
1206		0.49	85.40	0.68	0.13	434.49	275.66	346.22	70.92	0.00	22.24	1.20
1207		1.30	83.72	1.32	0.27	487.66	269.77	324.46	77.02	0.00	15.60	2.18
1208		0.58	86.99	0.88	0.12	409.49	260.79	300.46	68.56	0.00	14.41	0.91
1209		0.68	87.74	1.36	0.19	404.00	260.62	283.31	70.59	0.00	10.47	1.26

Tabella 5-28: Parametri idrologici sottobacini ed interbacini dei Torrenti Castro e Bicchieraia

Tutti i risultati della modellistica idrologica implementata sono riportati nell'elaborato IDR02.A – Allegato 1 – Risultati Modello Idrologico.

5.2.2.3 Idrogrammi di piena

I modelli idrologici sopra descritti sono stati implementati sul codice di calcolo HEC-HMS ver. 4.3. Sono così stati ottenuti gli idrogrammi di piena risultanti dal modello idrologico sviluppato a supporto del progetto, sintetizzati nelle seguenti tabelle, Tabella 5-29 e Tabella 5-30, in cui si riportano i valori di portata di picco ed i volumi di piena (eventi con TR=30-200 anni, durata di pioggia d=0.5-1-2-3-4 [h]).

CODICE	BACINO	NOME	Tr 30 anni - d = 0.5 [h]		Tr 30 anni - d = 1 [h]		Tr 30 anni - d = 2 [h]		Tr 30 anni - d = 3 [h]		Tr 30 anni - d = 4 [h]	
			Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]	Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]	Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]	Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]	Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]
1101	TORRENTE CASTRO	BACINO TORRENTE CASTRO MONTE	18.50	76.38	25.80	113.04	29.60	161.52	28.20	196.38	25.60	224.52
1102		BACINO BORRO DI BALZANO	7.00	24.24	9.10	34.74	9.50	48.30	8.50	58.14	7.40	65.70
1103		INTERBACINO TORRENTE CASTRO	8.40	33.63	10.70	46.38	11.40	62.46	10.00	73.80	8.60	82.62
1201	TORRENTE BICCHIERAIA	BACINO BORRO DEL PENETO	13.10	50.52	17.60	73.32	19.60	103.14	18.00	124.56	16.00	141.66
1202		BACINO BORRO DELLE CASACCE	2.80	6.63	3.20	9.66	2.90	13.44	2.40	15.90	2.10	17.82
1203		BACINO FOSSO DI COVOLE	11.90	51.51	16.20	74.10	18.50	103.86	17.40	125.10	15.60	141.96
1204		INTERBACINO FOSSO DI COVOLE	5.10	13.56	5.80	18.30	4.80	24.18	3.90	28.38	3.30	31.74
1205		BACINO BORRO DELLA BAGNAROLA	3.80	9.45	4.40	13.26	3.80	17.94	3.10	21.24	2.70	23.82
1206		BACINO BORRO MARMORINO	3.90	8.37	4.10	11.34	3.10	15.18	2.50	17.64	2.10	19.74
1207		BACINO BORRO DELLE VINACCE	5.10	19.74	6.40	27.00	6.70	36.60	5.80	43.32	5.00	48.30
1208		INTERBACINO TORRENTE BICCHIERAIA	4.40	11.13	4.80	14.82	3.80	19.32	3.10	22.68	2.50	24.96
1209		BACINO BORRO DI CASTELSECCO	3.60	13.80	4.40	18.12	4.20	23.88	3.50	27.48	3.00	30.54
1100	TORRENTE CASTRO	TORRENTE CASTRO TOTALE	33.60	134.28	45.10	194.10	50.50	272.40	46.40	328.26	41.60	373.02
1200	TORRENTE BICCHIERAIA	TORRENTE BICCHIERAIA TOTALE	46.60	184.65	59.70	260.16	64.90	357.60	59.20	426.48	51.80	481.32

Tabella 5-29: Portate al colmo e volumi di piena per tempo di ritorno Tr 30 anni per i bacini, sottobacini ed interbacini dei Torrenti Castro e Bicchieraia

CODICE	BACINO	NOME	Tr 200 anni - d = 0.5 [h]		Tr 200 anni - d = 1 [h]		Tr 200 anni - d = 2 [h]		Tr 200 anni - d = 3 [h]		Tr 200 anni - d = 4 [h]	
			Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]	Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]	Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]	Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]	Q _{max} [m³/s]	V [1000 m³]
1101	TORRENTE CASTRO	BACINO TORRENTE CASTRO MONTE	33.90	141.03	47.80	213.18	54.60	310.98	50.70	382.62	45.50	440.70
1102		BACINO BORRO DI BALZANO	12.20	42.63	16.10	62.64	16.50	89.52	14.50	108.78	12.60	124.32
1103		INTERBACINO TORRENTE CASTRO	13.90	55.74	18.20	79.20	19.10	109.68	16.60	131.76	14.30	149.28
1201	TORRENTE BICCHIERAIA	BACINO BORRO DEL PENETO	23.40	90.57	31.90	134.82	35.00	194.16	31.60	237.60	27.80	272.34
1202		BACINO BORRO DELLE CASACCE	4.80	11.70	5.60	17.22	4.90	24.42	4.10	29.82	3.50	34.08
1203		BACINO FOSSO DI COVOLE	21.10	91.41	29.30	135.30	33.10	194.04	30.50	236.52	27.20	270.90
1204		INTERBACINO FOSSO DI COVOLE	8.20	21.84	9.40	30.42	7.80	41.52	6.30	49.38	5.30	55.68
1205		BACINO BORRO DELLA BAGNAROLA	6.40	15.96	7.40	22.86	6.30	32.10	5.20	38.52	4.40	43.68
1206		BACINO BORRO MARMORINO	6.20	13.53	6.50	18.96	5.00	25.86	4.00	30.90	3.30	34.74
1207		BACINO BORRO DELLE VINACCE	8.30	32.55	10.80	46.38	11.10	64.14	9.70	76.98	8.30	87.36
1208		INTERBACINO TORRENTE BICCHIERAIA	6.90	17.58	7.60	24.12	6.00	32.64	4.80	38.64	4.00	43.44
1209		BACINO BORRO DI CASTELSECCO	5.70	2.30	7.00	29.40	6.70	0.30	5.50	4.70	4.70	4.50
1100	TORRENTE CASTRO	TORRENTE CASTRO TOTALE	59.60	239.37	80.60	355.14	90.00	510.18	81.80	622.92	72.30	714.36
1200	TORRENTE BICCHIERAIA	TORRENTE BICCHIERAIA TOTALE	79.20	316.53	103.40	459.48	113.10	648.48	100.90	784.74	88.20	894.54

Tabella 5-30: Portate al colmo e volumi di piena per tempo di ritorno Tr 200 anni per i bacini, sottobacini ed interbacini dei Torrenti Castro e Bicchieraia

Dall'analisi dei risultati ottenuti, si evince che la durata di pioggia critica, che massimizza gli effetti sui bacini idrografici alla sezione di chiusura individuata alla Parata è pari a 2 ore, come si evince dalla lettura delle portate al colmo e volumi di piena ottenuti per i bacini complessivi del Torrente Castro (Codice 1100) e del Torrente Bicchieraia (1200). Nelle verifiche idrauliche sviluppate al capitolo seguente, la durata di pioggia di progetto è stata pertanto assunta pari a 2 ore, in modo tale da massimizzare gli effetti attesi sul bacino complessivo. Nelle figure seguenti si riportano i grafici degli idrogrammi di piena di durata 2 ore.

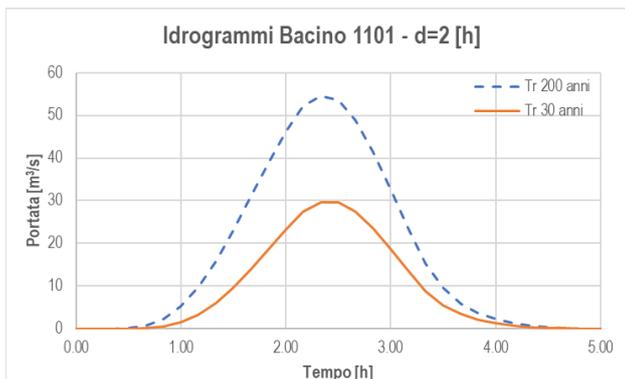


Figura 5-9: Idrogrammi Bacino 1101 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

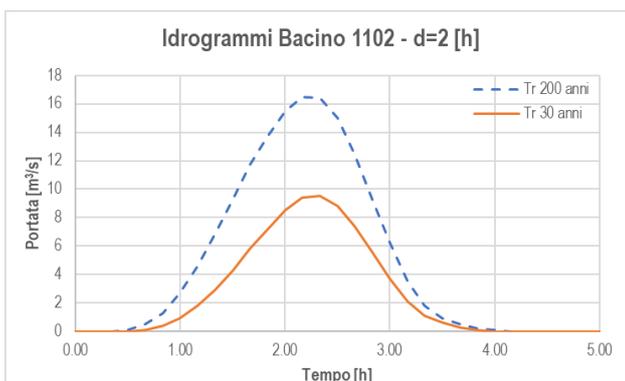


Figura 5-10: Idrogrammi Bacino 1102 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

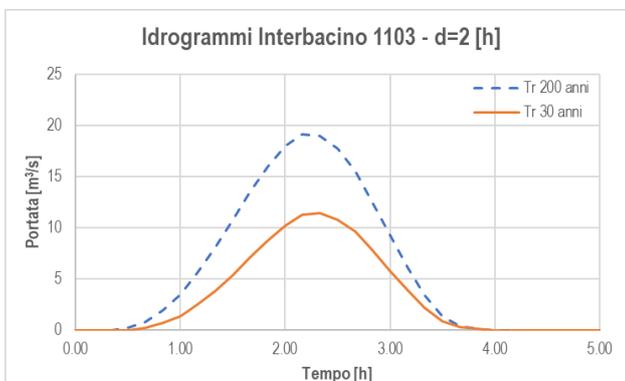


Figura 5-11: Idrogrammi Interbacino 1103 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

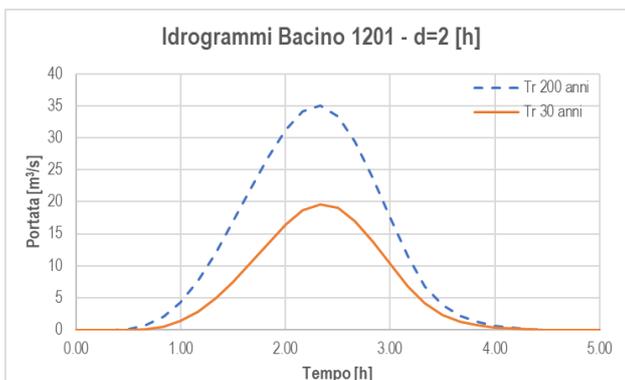


Figura 5-12: Idrogrammi Bacino 1201 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

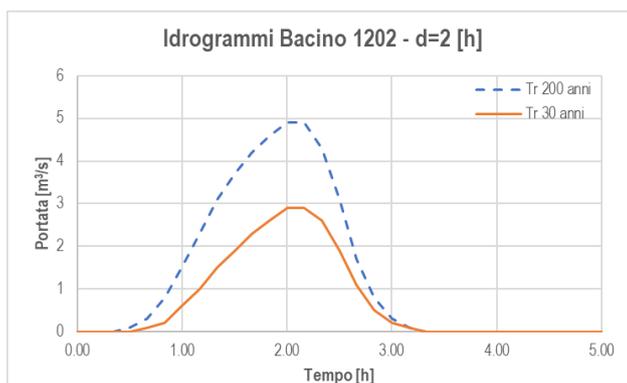


Figura 5-13: Idrogrammi Bacino 1202 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

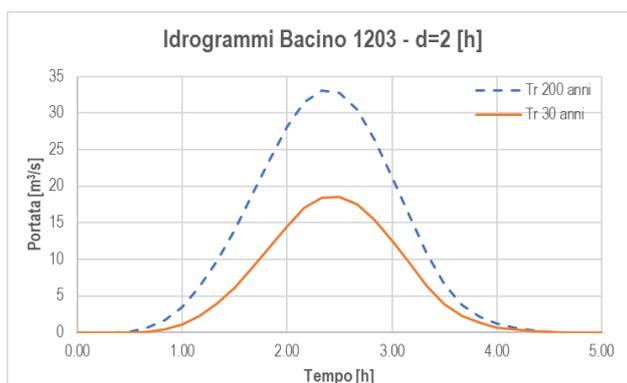


Figura 5-14: Idrogrammi Bacino 1203 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

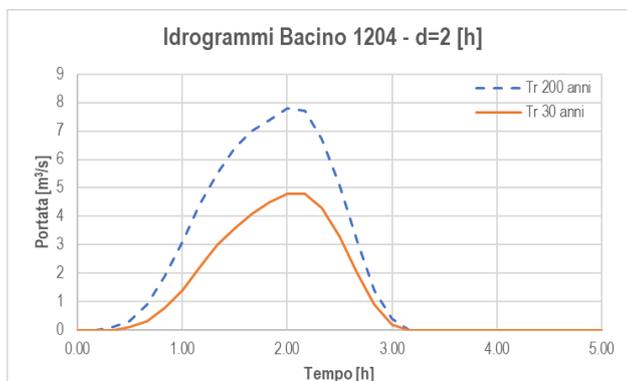


Figura 5-15: Idrogrammi Bacino 1204 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

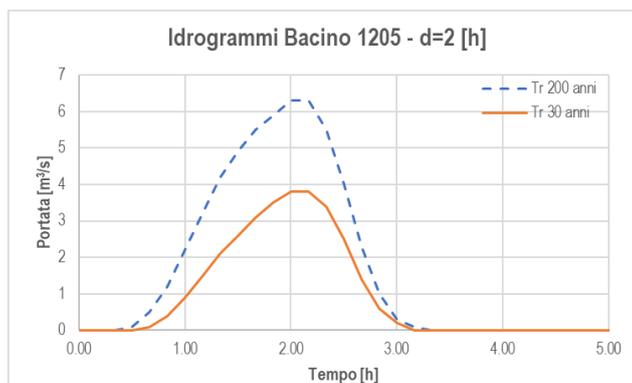


Figura 5-16: Idrogrammi Bacino 1205 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

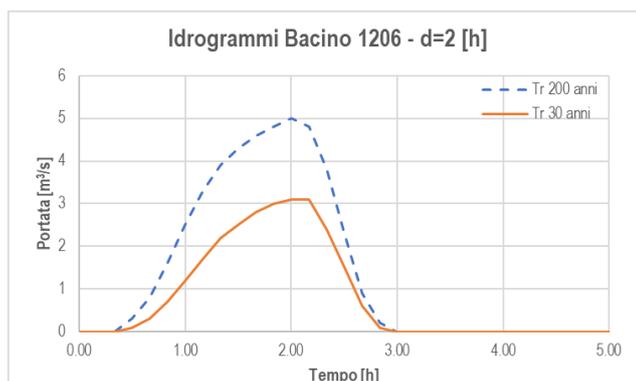


Figura 5-17: Idrogrammi Bacino 1206 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

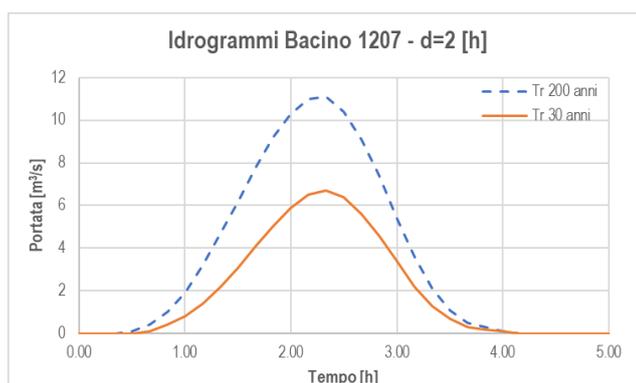


Figura 5-18: Idrogrammi Bacino 1207 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

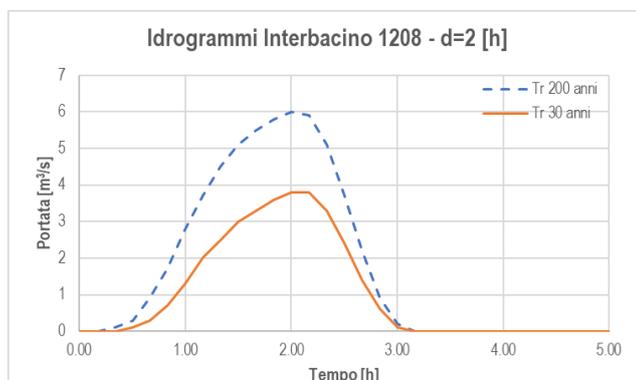


Figura 5-19: Idrogrammi Bacino 1202 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

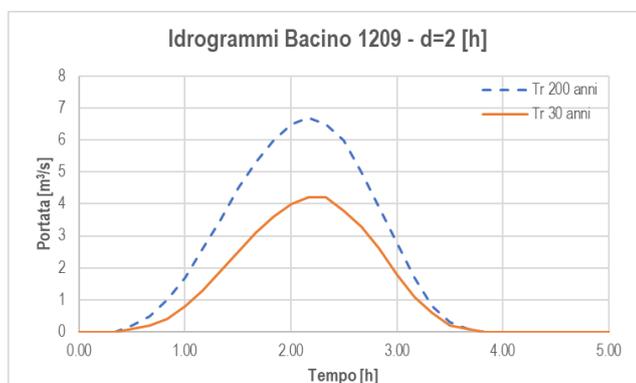


Figura 5-20: Idrogrammi Bacino 1202 per tempo di ritorno 30 e 200 anni, durata d=2 [h]

6. MODELLISTICA IDRAULICA

Nel presente capitolo si riportano i risultati delle analisi idrauliche svolte per valutare il comportamento dei corsi d'acqua e la funzionalità delle opere idrauliche allo stato attuale e delle verifiche idrauliche implementate per valutare l'efficacia degli interventi di progetto.

6.1 ANALISI IDRAULICA STATO ATTUALE

Al fine di verificare l'attuale livello di officiosità dei corsi d'acqua e definire analiticamente ogni criticità puntuale e/o diffusa del reticolo, è stata sviluppata una analisi idraulica approfondita dello stato di fatto che prevede l'implementazione dei seguenti modelli:

- Implementazione di un modello idraulico monodimensionale del tratto tombato, tramite il software Mike HYDRO (v. 2017) che, diversamente da HEC-RAS, consente la modellazione di tratti a geometria chiusa e variabile. Tale modellazione risulta di fondamentale importanza sia per la valutazione dell'officiosità idraulica del tratto tombato sia perché le risultanze costituiscono la condizione al contorno di valle dei modelli dei tratti a cielo aperto dei Torrenti Castro e Bicchieraia. Si precisa che il software Mike HYDRO non consente di per sé una modellazione in moto permanente, dunque è stato implementato come forzante un "idrogramma a gradini" con un set di portate costanti su intervalli temporali di 24 ore;
- Implementazione di un modello idraulico monodimensionale in moto permanente dei tratti a cielo aperto dei Torrenti Castro e Bicchieraia a monte del tratto tombato tramite il software HEC-RAS ver. 5.0.7 (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*) al fine di valutare l'officiosità attuale della sezione idraulica dei corsi ed individuare le criticità idrauliche degli attraversamenti;
- Implementazione di un modello idraulico accoppiato, monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini potenzialmente allagabili tramite il software HEC-RAS ver. 5.0.7 per la valutazione degli effetti indotti in alveo e nel territorio circostante, in termini di battenti su eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno).

I modelli, distinti ma al contempo strettamente correlati, hanno permesso di valutare il comportamento del corso d'acqua e la funzionalità delle opere idrauliche esistenti in occasione di eventi meteorici estremi e di stimarne officiosità e capacità di smaltimento in maniera analitica, permettendo così di individuare gli interventi di progetto necessari per la mitigazione del rischio idraulico.

6.1.1 CARATTERIZZAZIONE TOPOGRAFICA DEI CORSI D'ACQUA

La caratterizzazione geometrica dei Torrenti Castro e Bicchieraia, nei loro tratti a cielo aperto, e delle aree contermini è stata ricavata dalle seguenti campagne di indagini topografiche:

- Il "Rilievo cartotopografico di supporto al progetto di adeguamento della sezione idraulica del Torrente Castro e Bicchieraia a monte nel nucleo storico di Arezzo CIG – 7655352451" svolto tra novembre 2018 e gennaio 2019, che ha riguardato i Torrenti Castro e Bicchieraia a monte del tratto tombato per una lunghezza complessiva di circa 5475 m - di cui 3175 m sul T. Castro e 2300 m del T. Bicchieraia, ed un'area coperta da ortofoto e modello digitale del terreno di circa 83 ettari. La campagna di rilievo eseguita con GPS differenziale e stazione ha riguardato 79 sezioni idrografiche, di cui 28 sul T. Castro e 34 sul T. Bicchieraia - e n.10 attraversamenti;
- Il rilievo topografico eseguito sul tratto tombato del T. Castro a valle del tronco fluviale oggetto di intervento, di lunghezza pari a circa 1600 m, caratterizzato mediante n. 65 sezioni chiuse;
- Rilievo topografico integrativo eseguito nel maggio 2020 per la caratterizzazione geometrica dell'opera di presa della cassa di Cognaia e del T. Castro in prossimità della stessa.

A partire dalle campagne topografiche succitate, è stato possibile caratterizzare i seguenti tratti fluviali:

- Torrente Castro, tratto a cielo aperto: da monte della Cassa di Espansione di Cognaia fino al Ponte della Parata (Imbocco tratto tombato). Lunghezza complessiva del tratto 3.1 km.
In particolare, per il tratto in adiacenza alla Cassa di Cognaia (Lunghezza circa 1 km), sono state implementate le sezioni derivanti dal Progetto Esecutivo della Cassa, ad eccezione del tratto a cavallo dell'opera di sfioro di monte che è stato oggetto di rilievo nel Maggio 2020 (27 sezioni, codifica da 00978__13 a 00869__19)
Per il tratto oggetto di indagine da valle della Cassa di Cognaia fino all'imbocco del tombamento (Lunghezza circa pari a 2.1 km), le sezioni sono ricavate dal rilievo del 2019 (43 sezioni fluviali, codifica da 00869__19 a 00656__19);
- Torrente Castro, tratto tombato: dal Ponte della Parata (Largo I. Campioni) fino a Via Carlo Alberto Dalla Chiesa. A valle del tratto tombato sono state elaborate ulteriori 5 sezioni a cielo aperto estratte dai rilievi LiDAR resi disponibili da Regione Toscana, per complessivi 1.9 km (di cui circa 1.6 km coperto) (60 sezioni fluviali, codifica da 00655__13 a 00467__08);
- Torrente Bicchieraia: dal Ponte in Loc. Matignano fino alla confluenza nel T. Castro, lunghezza 2.3 km (39 sezioni fluviali con codifica da 00229__19 a 00003__19);
- Borro del Peneto: tratto oggetto di deviazione fino alla bocca tarata del progetto della Cassa della Bicchieraia, lunghezza circa 0.6 km (19 sezioni fluviali con codifica da 00068__17 a 00002PC17);
- Borro di Covole: da monte della nuova confluenza del Borro del Peneto fino al ponte in Località Matignano, lunghezza 0.5 km (18 sezioni fluviali con codifica da 00042__19 a 00001__17).

Poiché gli interventi di progetto, descritti nei capitoli successivi, riguardano anche il Borro delle Vinacce, affluente in destra del Torrente Bicchieraia, è stata elaborata anche la geometria del tratto terminale del borro per circa 0.2 km attraverso 7 sezioni fluviali (codifica da 00023__08 a 00004__19) estratte dai dati Lidar. L'attraversamento su Via Anconetana è stato invece oggetto di specifico rilievo eseguito durante i sopralluoghi.

Le sezioni fluviali utilizzate nella modellistica idraulica sono state codificate attraverso un codice alfanumerico che contiene al proprio interno le seguenti informazioni (*Esempio: sezione 00104PX17*):

- 5 caratteri (*Esempio: 00104*): identificativo del codice della sezione, in questo caso è la sezione 104, che individua la distanza progressiva dalla foce del corso d'acqua (metri x10);
- 2 caratteri (*Esempio: PX*): identificativo delle opere idrauliche; se non presenti si utilizzano i caratteri “__”
- 2 caratteri (*Esempio: 17*): identificativo dell'anno di esecuzione del rilievo topografico.

Per un immediato riscontro e facilità di lettura, nelle tabelle seguenti sono riportate le sezioni fluviali implementate per i tratti di corsi d'acqua oggetto di modellazione.

CODICE SEZIONE	RS HEC-RAS	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO	NOTE	CODICE SEZIONE	RS HEC-RAS	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO	NOTE
00978_13	72.00	9775.28	20		00830BB19	35.00	8302.9	12	
00972_13	71.00	9725.29	19		00830BC19	34.00	8301.9	12	
00967_13	70.00	9675.32	18		00825_19	33.00	8253.78	13	
00963_20	69.00	9627.64	[-]		00819_19	32.00	8196.92	14	
00962_20	68.00	9620.39	[-]		00814_19	31.00	8145.2	15	
00961_20	67.00	9606.95	[-]		00812PB19	30.00	8122.13	PONTE 5	Ponte Via F. Redi
00959_20	66.00	9590.38	[-]		00812PC19	29.00	8113.26	PONTE 5	
00957_20	65.00	9574.31	[-]		00810_19	28.00	8100.96	17	
00955_20	64.00	9556.69	[-]		00798_19	27.00	7986.94	18	
00954PB20	63.00	9544.14	[-]		00796_19	26.00	7961.57	19	
00954PC20	62.00	9537.2	[-]		00789_19	25.00	7891.4	20	
00952BB20	61.00	9528.28	[-]		00778_19	24.00	7788.2	21	
00952BC20	60.00	9527.28	[-]		00768_19	23.00	7683.83	22	
00943_13	57.00	9430.59	14		00760_19	22.00	7598.82	23	
00938_13	56.00	9378.46	13		00755PB19	21.00	7553.5	PONTE 4	Ponte Via E. Calò
00933_14	55.00	9325.68	12		00755PC19	20.00	7530.83	PONTE 4	
00930_13	54.00	9290.64	11		00750_19	19.00	7506.26	24	
00924_13	53.00	9250.08	10		00742_19	18.00	7423.26	25	
00918_13	52.00	9199.1	9		00733_19	17.00	7331.83	26	
00912_13	51.00	9133.52	8		00725_19	16.00	7258.64	27	
00911_13	50.00	9126.08	7		00722PB19	15.00	7225.36	PONTE 3	Ponte Via Anconetana
00905_13	49.00	9060.85	6		00722PC19	14.00	7189.58	PONTE 3	
00899_19	48.00	8995.56	1		00716_19	13.00	7167.91	28	
00890_19	47.00	8899.01	2		00708_19	12.00	7083.71	29	
00880_19	46.00	8800.38	3		00704_19	11.00	7045.27	30	
00876BB19	45.00	8759.6	4		00698_19	10.00	6987.27	31	
00876BC19	44.00	8758.6	4		00697PB19	9.00	6979.6	PONTE 2	Ponte Via del Partiarino
00869_19	43.00	8692.43	5		00697PC19	8.00	6974.11	PONTE 2	
00857_19	42.00	8571.27	6		00696_19	7.00	6962.67	32	
00852_19	41.00	8520.68	7		00686_19	6.00	6868.07	33	
00845_19	40.00	8455.2	8		00677_19	5.00	6770.81	34	
00844_19	39.00	8441.24	9		00673_19	4.00	6728.91	35	
00840BB19	38.00	8406.77	10		00669_19	3.00	6696.38	36	
00840BC19	37.00	8405.77	10		00663_19	2.00	6633.8	37	
00836_19	36.00	8368.51	11		00656_19	1.00	6566.19	38	

Tabella 6-1: Caratterizzazione geometrica Torrente Castro (tratto a cielo aperto)

CODICE SEZIONE	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO	TIPO SEZIONE	CODICE SEZIONE	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO	TIPO SEZIONE
00669_19	6696.38	36	Cielo Aperto	00567_13	5681.19	43A	Chiusa
00663_19	6633.8	37	Cielo Aperto	00562_13	5612.69	44	Chiusa
00656_19	6566.19	38	Cielo Aperto	00561_13	5608.4	44A	Chiusa
00655_13	6552.62	1	Chiusa	00560_13	5604.77	44B	Chiusa
00654_13	6542.56	2	Chiusa	00555_13	5547.63	47	Chiusa
00653_13	6541.56	2A	Chiusa	00554_13	5536.34	48	Chiusa
00651_13	6513.81	3	Chiusa	00549BB13	5489.87	49	Chiusa
00642_13	6424.74	4	Chiusa	00549BC13	5488.87	49	Chiusa
00640_13	6396.26	5	Chiusa	00548_13	5474.89	51	Chiusa
00638_13	6375.21	6	Chiusa	00547_13	5473.89	51A	Chiusa
00637_13	6366.92	7	Chiusa	00546_13	5459.4	52	Chiusa
00636_13	6360.07	7A	Chiusa	00545_13	5458.4	52A	Chiusa
00635_13	6354.99	8	Chiusa	00544_13	5428.94	53	Chiusa
00634BB13	6344.83	9	Chiusa	00543_13	5427.94	53A	Chiusa
00634BC13	6343.83	9	Chiusa	00541_13	5407.98	54	Chiusa
00633_13	6337.23	9A	Chiusa	00540_13	5400.9	54A	Chiusa
00632_13	6330.65	10	Chiusa	00539_13	5391.78	54B	Chiusa
00627_13	6274.31	11	Chiusa	00537_13	5372.59	58	Chiusa
00624_13	6241.84	12	Chiusa	00536_13	5371.59	59	Chiusa
00623_13	6240.84	12A	Chiusa	00528BB13	5280.76	60	Chiusa
00622_13	6221.88	13	Chiusa	00528BC13	5279.62	60	Chiusa
00611_13	6108.62	14	Chiusa	00525BB13	5252.95	61	Chiusa
00602_13	6017.36	15	Chiusa	00525BC13	5251.94	61	Chiusa
00597_13	5968.05	16	Chiusa	00504_13	5035.72	63	Chiusa
00594_13	5940.28	17	Chiusa	00495_13	4947.28	64	Chiusa
00593_13	5935.61	18	Chiusa	00492_13	4923.72	65	Chiusa
00592_13	5924.95	20	Chiusa	00489_08	4891.02	LIDAR_1	Cielo Aperto
00591_13	5908.68	22	Chiusa	00484_08	4841.55	LIDAR_2	Cielo Aperto
00588_13	5877.35	30	Chiusa	00480_08	4801.86	LIDAR_3	Cielo Aperto
00585_13	5850.41	36	Chiusa	00473_08	4732.49	LIDAR_4	Cielo Aperto
00582_13	5823.26	42	Chiusa	00467_08	4666.75	LIDAR_5	Cielo Aperto
00568_13	5682.03	43	Chiusa				

Tabella 6-2: Caratterizzazione geometrica Torrente Castro (Tratto Tombato)

CODICE SEZIONE	RS HEC-RAS	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO	NOTE	CODICE SEZIONE	RS HEC-RAS	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO	NOTE
00229_19	39.00	2294.19	69		00135_19	19.00	1351.88	55	
00221_19	38.00	2210.74	68		00133_19	18.00	1325.82	54	
00217PB19	37.00	2170.05	P12_Monte	Ponte Privato	00126_19	17.00	1260.91	53	
00217PC19	36.00	2163.32	P12_Valle		00118_19	16.00	1179.79	52	
00212_19	35.00	2120.05	67		00108_19	15.00	1075.23	51	
00206_19	34.00	2062.13	66		00096_19	14.00	959.37	50	
00199_19	33.00	1992.8	65		00088_19	13.00	880.87	49	
00195_19	32.00	1946.68	64		00081_19	12.00	814.69	48	
00194PB19	31.00	1936.72	P8_Monte	Ponte di Vicchio	00066_19	11.00	662.14	47	
00194PC19	30.00	1913.51	P8_Valle		00057_19	10.00	568.76	46	
00191_19	29.00	1908.79	63		00055PB19	9.00	554.78	P6_Monte	Ponte Via Sanzio
00183_19	28.00	1833.87	62		00055PC19	8.00	505.24	P6_Valle	
00177_19	27.00	1770.24	61		00049_19	7.00	491.17	45	
00168_19	26.00	1680.49	60		00043_19	6.00	425.11	44	
00165PB19	25.00	1654.48	P7_Monte	Ponte di Castelsecco	00034_19	5.00	341.52	43	
00165PC19	24.00	1647.64	P7_Valle		00029_19	4.00	285.54	42	
00163_19	23.00	1628.8	59		00016_19	3.00	156.33	41	
00157_19	22.00	1573.65	58		00007_19	2.00	65.39	40	
00150_19	21.00	1504.18	57		00003_19	1.00	26.59	39	
00144_19	20.00	1437.29	56						

Tabella 6-3: Caratterizzazione geometrica Torrente Bicchieraia

CODICE SEZIONE	RS HEC-RAS	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO
00068__17	19.00	686.32	11
00051PA17	18.00	535.19	10
00051PB17	17.00	528.93	10
00051PC17	16.00	517.89	10
00042__17	15.00	425.72	9
00037__17	14.00	371.44	8
00028PB17	13.00	287.51	7
00028PC17	12.00	282.01	7
00027__17	11.00	273.95	6
00022__17	10.00	222.22	5
00013__17	9.00	132.08	4
00009__17	8.00	88.72	3
00008PB17	7.00	77.94	3
00008PC17	6.00	72.8	3
00008PD17	5.00	64.37	3
00006__17	4.00	61.24	2
00004__17	3.00	40.71	1
00002PB17	2.00	19.71	0.8
00002PC17	1.00	5.71	0.8

Tabella 6-4: Caratterizzazione geometrica Borro del Peneto

CODICE SEZIONE	RS HEC-RAS	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO
00042__19	1800	454.2	18
00038__19	1700	414.24	17
00035__19	1600	384.03	16
00033__17	1500	363.09	CO_15
00030__17	1400	335.13	CO_14
00027__17	1300	301.59	CO_13
00024__17	1200	266.22	CO_12
00020__17	1100	227.57	CO_11
00018__17	1000	203.96	CO_10
00016__17	900	183.71	CO_09
00013__17	800	148.14	CO_08
00010__17	700	118.79	CO_07
00008__17	600	93.23	CO_06
00005__17	500	68.84	CO_05
00004__17	400	52.06	CO_04
00002PB17	300	39.99	CO_03
00002PC17	200	32.43	CO_02
00001__17	100	17.1	CO_01

Tabella 6-5: Caratterizzazione geometrica Borro di Covole

CODICE SEZIONE	RS HEC-RAS	DISTANZA PROG. [m]	CODICE RILIEVO	NOTE
00023__08	7	227.56	[-]	
00020__19	6	195.44	[-]	
00016__19	5	158.86	[-]	
00013PB19	4	134.79	[-]	Attraver. Via Anconetana
00013PC19	3	121.78	[-]	
00008__19	2	84.14	[-]	
00004__19	1	37.58	[-]	

Tabella 6-6: Caratterizzazione geometrica Borro delle Vinacce

Per la modellazione dei territori limitrofi ai corsi d'acqua è stato costruito un modello digitale del terreno a partire dalle informazioni plano-altimetriche derivanti con i voli Lidar resi disponibili da Regione Toscana.

Per quanto riguarda l'area destinata a Cassa di Espansione di Cognaia è stata modellata a partire dalle informazioni plano-altimetriche derivanti dal rilievo topografico effettuato tramite volo del drone. Il modello digitale del terreno in

corrispondenza della Cassa di Espansione sul Torrente Bicchieraia è stato invece ricavato sulla base degli elaborati progettuali forniti dalla Committenza.

Nei seguenti elaborati sono riportate le tracce di tutte le sezioni fluviali utilizzate, con relativa codifica alfanumerica, ed il modello digitale del terreno a maglia 5x5 metri utilizzato per la modellazione bidimensionale nelle aree contermini:

- IDR03 - Stato Attuale - Modello Idraulico Tratto Tombato – Planimetria;
- IDR06 - Modello Idraulico Torrenti Castro e Bicchieraia – Planimetria.

6.1.2 MODELLO IDRAULICO DEL TRATTO TOMBATO

A valle del tratto di intervento, il Torrente Castro si presenta tombato per circa 1.6 km in attraversamento al centro storico di Arezzo, in un contesto fortemente urbanizzato (rif. Tavola IDR03 - Stato Attuale - Modello Idraulico Tratto Tombato – Planimetria).

Il rilievo del tratto tombato e l'analisi delle aree poste al di sopra del tombamento stesso hanno permesso di caratterizzare geometricamente il tratto coperto e le interferenze fra il canale ed i manufatti presenti. Il tratto coperto si presenta a geometria fortemente variabile (rif. Tavola IDR05 - Stato Attuale – Libretto Sezioni Tratto Tombato) con tratti realizzati in epoche e materiali diversi, bruschi cambi di sezione ed evidenti interrimenti del fondo alveo. Il funzionamento idraulico del tombamento risulta di fondamentale importanza sia per la valutazione dell'efficienza idraulica dello stesso sia in quanto costituisce la condizione al contorno di valle per la modellistica idraulica implementata, sia allo stato attuale sia allo stato di progetto nei vari stralci, per i tratti di Torrente Castro e Torrente Bicchieraia oggetto di progettazione.

La notevole variabilità geometrica del tombamento ha richiesto l'utilizzo del software MIKE (modulo MIKE 11) del Danish Hydraulic Institute (DHI), certificato dalla F.E.M.A. (*Federal Emergency Management Agency*), tramite il quale è possibile modellare, in maniera affidabile e stabile, "Sezioni chiuse" in grado di rappresentare pertanto il tombamento e la variabilità della geometria delle sezioni.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'APPENDICE C – MODELLISTICA IDRAULICA FONDAMENTI TEORICI.

Il comportamento idraulico del tratto è stato simulato attraverso un modello monodimensionale con la schematizzazione geometrica di 65 sezioni chiuse del rilievo fornito dalla Committenza. A queste sono state aggiunte:

- N. 3 sezioni a cielo aperto a monte (codifica da 00669__19 a 00656__19) ricavate dal rilievo 2019 al fine di valutare l'efficienza idraulica all'imbocco del tratto tombato tramite la modellazione di sfiori a campagna;
- N. 5 sezioni a cielo aperto a valle (codifica da 00489__08 a 00467__08) ricavate dai dati Lidar, inserite a fini modellistici per poter definire la condizione al contorno di valle del tratto tombato.

6.1.2.1 Verifiche Idrauliche implementate

Nella sua configurazione attuale, è stata valutata la capacità di smaltimento del tratto tombato, ovvero la portata massima smaltibile a bocca piena dalla sezione chiusa.

A tale scopo è stato implementato un modello idraulico solo 1D sollecitato da un set di portate variabili da 10 e 150 m³/s.

Come condizione di valle è stata impostata la scala di deflusso riportata in Tabella 6-7, ottenuta impostando nella sezione di valle una pendenza di moto uniforme pari a 0.1% e una scabrezza pari a 0.03 di Manning. Si precisa che lungo l'alveo dell'intero tratto tombato è stato adottato lo stesso coefficiente di scabrezza 0.03 di Manning.

H [m s.l.m.]	Portata [m ³ /s]
243.11	0.00
243.39	0.11
243.68	0.71
243.96	2.24
244.24	4.84
244.53	8.57
244.81	13.50
245.09	19.70
245.38	27.16
245.66	35.86
245.94	45.79
246.22	56.91
246.51	69.20
246.79	82.67
247.07	97.31
247.36	113.13
247.64	130.20
247.92	148.60
248.21	168.61
248.49	190.27

Tabella 6-7: Torrente Castro – Scala di deflusso impostata come condizione al contorno di valle del tratto tombato

6.1.2.2 Risultati

I risultati del modello idraulico evidenziano la seguente officiosità idraulica:

- 1) Portata massima smaltibile a bocca piena dalla sezione minima (tratto iniziale di Via Pietro Aretino, da Via Guadagnoli a Via Rodi): $Q = 80 \text{ m}^3/\text{s}$;
- 2) Portata massima smaltibile a bocca piena dalla sezione di imbocco (Ponte della Parata): $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ (tratto iniziale di Via Pietro Aretino con funzionamento in pressione);
- 3) Portata massima smaltibile alla quota di estradosso della sezione di imbocco (Ponte della Parata): $Q = 115 \text{ m}^3/\text{s}$ (funzionamento in pressione su ampi tratti del tombamento).

I risultati hanno inoltre permesso la definizione delle condizioni al contorno di valle per i tronchi fluviali dei corsi d'acqua Torrente Castro e Torrente Bicchieraia posti a monte dell'opera ed oggetto di intervento. Di seguito si riporta la scala di deflusso in corrispondenza della sezione di imbocco del tratto coperto, utilizzata nelle verifiche idrauliche dei tratti aperti di monte.

H [m s.l.m.]	Portata [m ³ /s]
256.95	0.0
258.32	10.0
258.68	20.0
258.97	30.0
259.26	40.0
259.54	50.0
259.79	60.0
260.03	70.0
260.28	80.0
260.53	90.0
260.85	100.0
261.22	110.0
261.47	116.3
261.58	120.2
261.66	123.6
261.72	126.7

Tabella 6-8: Torrente Castro –Officiosità idraulica stato attuale tratto tombato urbano – Scala di deflusso alla sezione di imbocco

I profili dei livelli idrometrici relativi alle tre portate caratteristiche su menzionate sono riportati nella Tavola IDR04 - Stato Attuale - Modello Idraulico Tratto Tombato - Profilo Longitudinale con Livelli Idrometrici.

6.1.3 MODELLO IDRAULICO MOTO PERMANENTE TORRENTI CASTRO E BICCHIERAIA

Sul tratto a cielo aperto dei due corsi d'acqua oggetto di intervento è stato implementato un modello idraulico finalizzato all'individuazione delle criticità idrauliche attuali e alla definizione analitica dell'officiosità idraulica del reticolo (suddiviso in tratti omogenei per geometria e comportamento idraulico) e delle infrastrutture/opere idrauliche attualmente presenti.

L'implementazione del modello è stata effettuata attraverso il Software HEC-RAS 5.0.7 distribuito da US Army Corps of Engineers.

6.1.3.1 Verifiche Idrauliche implementate

Gli scenari geometrici implementati sono i seguenti:

- Stato Attuale: rappresenta l'attuale configurazione del corso d'acqua, comprensivo di tutte le opere idrauliche esistenti, e permette di ricavare informazioni dettagliate sulla officiosità idraulica del reticolo e delle opere; in particolare, le verifiche idrauliche eseguite su tale scenario geometrico hanno permesso l'individuazione delle principali criticità puntuali, ovvero gli attraversamenti che presentano evidenti problemi di insufficienza idraulica, provocando significativi fenomeni di rigurgito e rischio in termini di sicurezza delle strutture;
- Stato Attuale senza ponti: a partire dai risultati ottenuti dal modello geometrico Stato Attuale appena descritto, è stata ricostruita una geometria che riproduce l'attuale assetto geometrico del corso d'acqua, dalla quale sono state rimosse le strutture di tutti gli attraversamenti, sia sul Torrente Castro sia sul Torrente Bicchieraia. Le verifiche idrauliche eseguite su tale scenario geometrico hanno permesso l'individuazione officiosità della sezione idraulica del reticolo, non più condizionata dal rigurgito provocato dall'insufficienza degli attraversamenti critici.

Entrambi gli scenari geometrici sono stati sollecitati con un set di portate variabile da 5 a 120 m³/s. Si precisa che lungo l'alveo dell'intero tratto a cielo aperto è stato adottato un coefficiente di scabrezza pari a 0.04 di Manning.

6.1.3.2 Risultati

Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata graficamente nella Carta delle Criticità (elaborati PP08.A - *Planimetria delle Criticità allo Stato Attuale – Quadro 1* e PP08.B - *Planimetria delle Criticità allo Stato Attuale – Quadro 2*) che evidenzia:

- In doppia linea, con colori diversi, la suddivisione in tratti omogenei, per ognuno dei quali è stata stimata l'officiosità idraulica attesa, espressa come portata massima smaltibile dalla sezione idraulica a piene rive;
- il valore di portata massima smaltibile a pelo libero (filo intradosso) su tutti gli attraversamenti ed il valore di portata massima di deflusso in pressione (livello prossimo all'estradosso del ponte).

Dall'analisi dei risultati ottenuti dal modello, per entrambi gli scenari geometrici sopra descritti, si evince quanto segue.

6.1.3.2.1 Torrente Castro

Nel tratto di monte (Tratto C1) la sezione non presenta problematiche di natura idraulica e riesce a smaltire fino a 65 m³/s (valori superiori alla portata massima attesa per eventi con TR=200 anni).

In prossimità delle prime abitazioni presenti lungo Via Viviani (Tratto C2) la sezione idraulica si riduce bruscamente, diminuendo notevolmente la capacità di deflusso del tratto fluviale che scende fino a circa 35 m³/s (valori prossimi alla portata con TR=30 anni). Procedendo verso il ponte di Via Redi la sezione liquida aumenta, per cui l'officiosità idraulica del tratto raggiunge valori di portata di circa 55 m³/s.

Il Ponte di Via Redi, caratterizzato da una struttura ad arco con luce parzialmente schermata dalla presenza di strutture di contenimento dei resedi privati, non riesce a far defluire a pelo libero portate superiori a 50 m³/s. Il valore di portata massima di deflusso in pressione (livello prossimo all'estradosso del ponte) si aggira intorno ai 90-100 m³/s provocando fenomeni di rigurgito a monte di circa 30 cm.

Il Tratto C3, tra il ponte di Via Redi ed il ponte di Via Calò, riesce a far transitare fino a 50 m³/s e risente fortemente dell'inefficienza idraulica del ponte di valle (che innesca un rigurgito con innalzamenti del pelo libero a monte fino a 90 cm), caratterizzato da una struttura molto ribassata con altezza liquida utile ridotta, che non riesce a far defluire portate superiori a 35 m³/s (50 m³/s con funzionamento in pressione e livelli che raggiungono l'estradosso dell'opera).

Il Tratto C4 tra il ponte di via Calò ed il ponte di Via Anconetana presenta un'officiosità idraulica di circa 45 m³/s, e risulta anch'esso influenzato dai fenomeni di rigurgito causati dall'opera di attraversamento di valle. Il Ponte dell'Anconetana presenta infatti una luce di imbocco molto ridotta dovuta alla modesta differenza di quota tra il piano carrabile della viabilità ed il fondo alveo, ulteriormente compromessa dagli evidenti fenomeni di interrimento. Dall'opera di attraversamento transitano non più di 25 m³/s a piena luce. Il valore di portata massima di deflusso in pressione è di circa 40 m³/s con sovralti del pelo libero nel tratto di monte superiori al metro.

A valle del ponte dell'Anconetana (Tratto C5) la sezione fluviale presenta una criticità idrauliche molto evidenti già per bassi valori di portata (circa 15-20 m³/s), dovuti principalmente alle basse quote del piano campagna in sinistra idraulica (area agricole del Pantanino). La presenza di aperture e accessi a fiume a quote prossime al fondo alveo sono causa di ulteriori criticità idrauliche.

Il Ponte del Pantanino, oltre alle evidenti problematiche di natura strutturale, ha marcati problemi di insufficienza idraulica, con portate massime smaltibili a pelo libero di circa 20 m³/s.

A valle del ponte fino alla confluenza del T. Bicchieraia (Tratto C6) la sezione riesce a far defluire portate fino a circa 40 m³/s, per la modesta capacità della sezione liquida e le modeste altezze della sponda in sinistra idraulica. A valle della confluenza del T. Bicchieraia fino all'imbocco del tombamento al ponte della Parata (Tratto C7), la portata massima smaltibile è di circa 80 m³/s con livelli che raggiungono il piano stradale delle viabilità poste in destra e sinistra idraulica. I muri presenti lungo Va Castellucci e Via Beato Angelico presentano infatti varchi ed interruzioni, che ne precludono la tenuta idraulica.

Si precisa che le analisi svolte non hanno valutato l'officiosità idraulica della passerella pedonale privata su Via Viviani in quanto non è nota la geometria dell'opera e della sezione fluviale.

Le figure di seguito danno un riscontro dei risultati appena descritti.

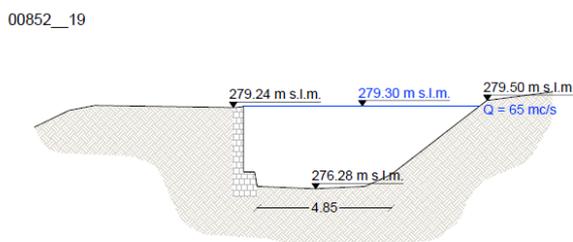


Figura 6-1: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C1 – Dalla Cassa di Cognaia a Via Viviani

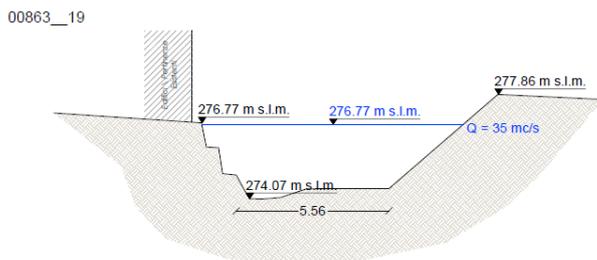


Figura 6-2: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C2 – Via Viviani

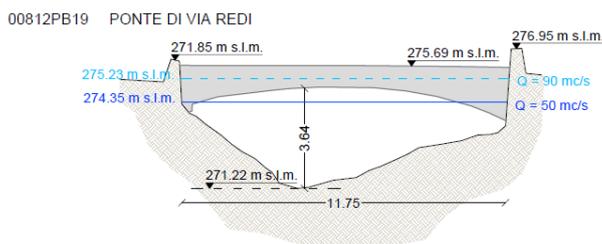


Figura 6-3: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – PONTE VIA F.REDI

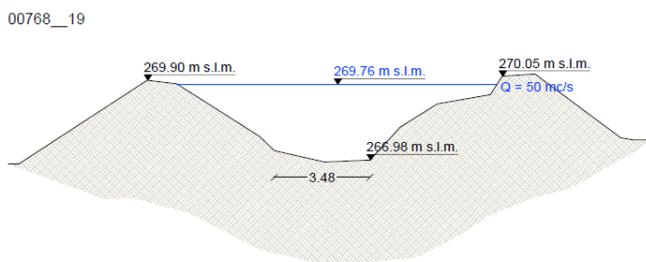


Figura 6-4: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C3 – Dal Ponte di Via F. Redi al ponte di Via E. Calò

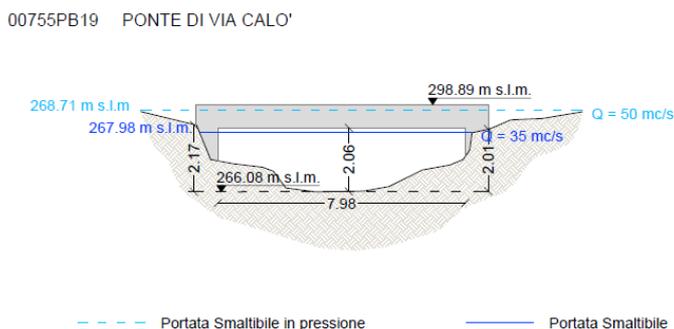


Figura 6-5: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – PONTE VIA E.CALÒ

00733__19

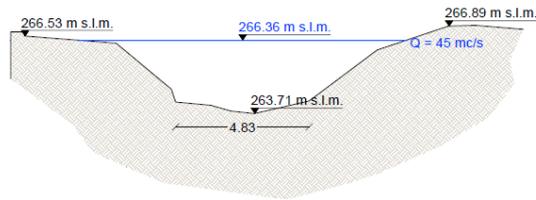


Figura 6-6: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C4 – Dal Ponte di Via E. Calò al Ponte di Via Anconetana

00722PB19 PONTE DI VIA ANCONETANA

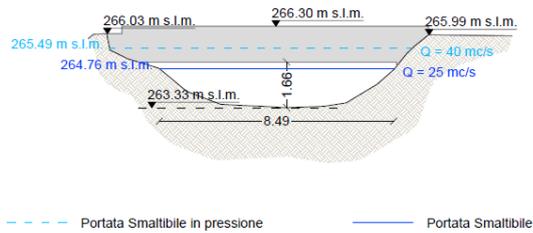


Figura 6-7: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – PONTE VIA ANCONETANA

00698__19

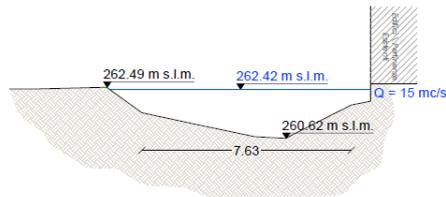


Figura 6-8: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C5 – Dal Ponte di Via Anconetana al Ponte del Pantanino

00697PB19 PONTE DI VIA PANTANINO

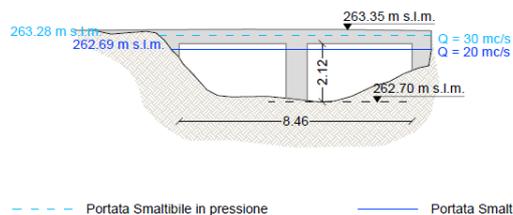


Figura 6-9: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – PONTE DEL PANTANINO

00686__19

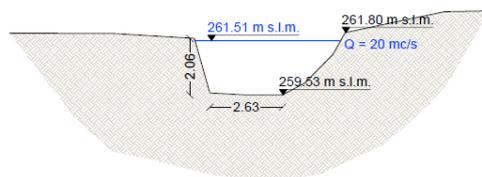


Figura 6-10: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro – TRATTO C6 – Dal Ponte del Pantanino alla confluenza del T. Bicchieraia

00663__19

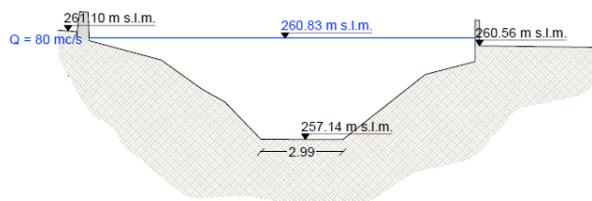


Figura 6-11: Risultati Modello 1D stato attuale T. Castro –TRATTO C7 – Dalla confluenza del T. Bicchieraia al Ponte della Parata

6.1.3.2.2 TORRENTE BICCHIERAIA

Il Ponte di Matignano, nella sua configurazione di progetto (intervento di risagomatura e ricavatura della sezione da progetto della cassa della Bicchieraia) riesce a far transitare circa $65 \text{ m}^3/\text{s}$ a pelo libero (a fronte di una portata idraulica di circa $60 \text{ m}^3/\text{s}$ sull'evento duecentennale attesa una volta ultimata la realizzazione della cassa di espansione a monte).

Il tratto subito a valle del ponte (Tratto B1) presenta una sezione idraulica stretta ed incassata e riesce a far transitare senza esondazioni circa $40\text{-}45 \text{ m}^3/\text{s}$ (portate attese prossime agli eventi trentennali). Stessi valori di portata sono quelli transitabili a pelo libero dalla luce del Ponte Privato, che risulta sensibilmente ridotta dalla presenza di un evidente riporto di terreno in sinistra idraulica, e nel tratto successivo B2, in cui la sezione risulta molto stretta e con capacità di deflusso modesta.

A valle della passerella pedonale di Via Matignano (Tratto B3), la sezione si amplia e riesce a far transitare fino a $60 \text{ m}^3/\text{s}$ circa, valore transitabile a luce piena anche sotto il ponte di Vicchio.

Il successivo Tratto B4 presenta un'officiosità idraulica di circa $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

Il Ponte di Castel secco presenta una luce molto ampia a monte, ma una riduzione importante a valle poiché è presente in destra idraulica un evidente riporto in terra che ostruisce parzialmente la sezione idraulica. Subito a valle del ponte è presente un salto di fondo. Il funzionamento idraulico, fortemente influenzato dalla presenza di tali opere, si traduce in una portata massima smaltibile dal ponte a luce piena di circa $55 \text{ m}^3/\text{s}$.

A valle dell'opera di attraversamento (Tratto B5) il corso d'acqua prosegue con una sezione idraulica con caratteristiche più naturali, con la testa sponda in sinistra idraulica a quote sensibilmente inferiori alla destra idraulica (muro di sostegno lungo Via Anconetana); l'officiosità idraulica del tratto raggiunge valori di portata di circa $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nel tratto successivo (Tratto B6), la sezione idraulica si presenta speculare rispetto al tratto precedente, con muro di sostegno della viabilità (Via dell'Acropoli) in sinistra e sponda naturale di altezza modesta in destra idraulica. Anche le portate massime smaltibili sono analoghe (circa $45 \text{ m}^3/\text{s}$).

In prossimità del Ponte di Viale R. Sanzio, il comportamento idraulico del corso d'acqua risente sensibilmente dell'inefficienza idraulica della struttura, caratterizzata da una altezza liquida utile ridotta dovuta alle quote del piano stradale, che non riesce a far defluire portate superiori a $45 \text{ m}^3/\text{s}$ ($55 \text{ m}^3/\text{s}$ con funzionamento in pressione e livelli

che raggiungono l'estradosso dell'opera, con rigurgito a monte che induce ad innalzamenti del pelo libero superiori ai 50 cm).

Il tratto terminale, fino alla confluenza nel T. Castro (*Tratto B7*), riesce a far defluire portate fino a circa 40 m³/s, per la modesta capacità della sezione liquida e le modeste altezze della sponda in destra idraulica.

Si precisa che le analisi svolte non hanno valutato l'efficienza idraulica delle passerelle pedonali di Via di Matignano e di Via dell'Acropoli né la passerella ciclopedonale del Parco Marchionna in quanto non sono note le geometrie delle opere e delle sezioni fluviali.

Le figure seguenti illustrano i risultati delle verifiche di efficienza idraulica sul T. Bicchieraia appena descritte.

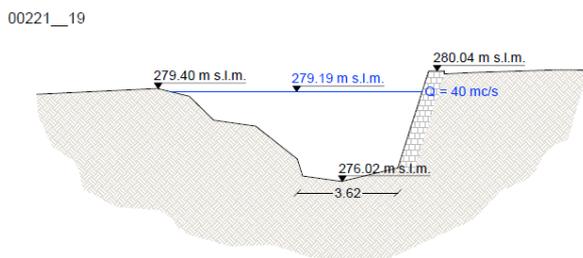


Figura 6-12: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B1 – Dal ponte di Matignano al ponte privato

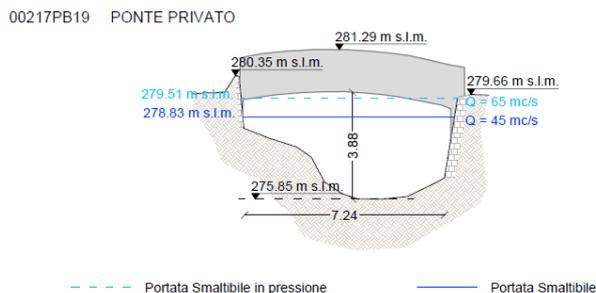


Figura 6-13: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – PONTE PRIVATO

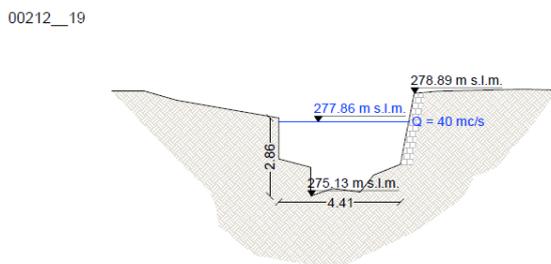


Figura 6-14: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B2 – Dal Ponte Privato alla passerella di Via Matignano

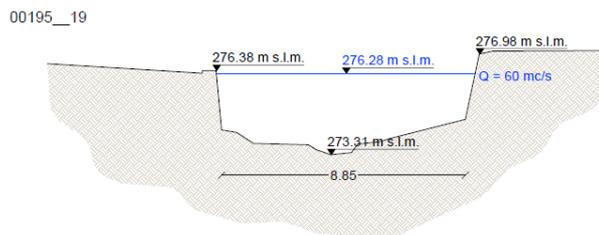


Figura 6-15: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B3 – Dalla passerella di Via Matignano al ponte di Vicchio

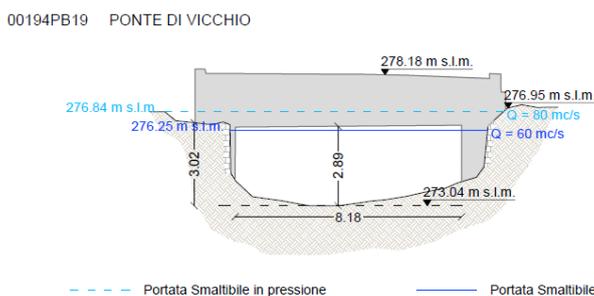


Figura 6-16: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – PONTE DI VICCHIO

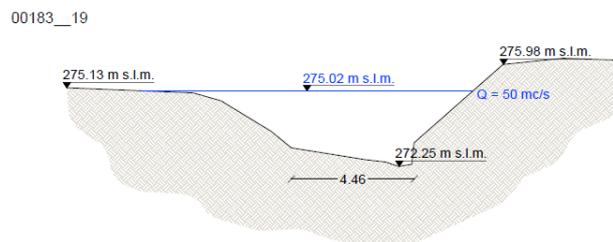


Figura 6-17: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B4 – Dal ponte di Vicchio al ponte di Castelsecco

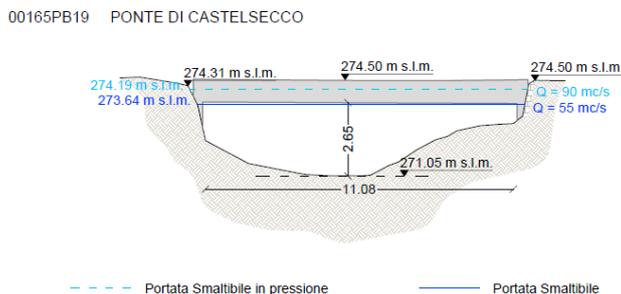


Figura 6-18. Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – PONTE DI CASTELSECCO

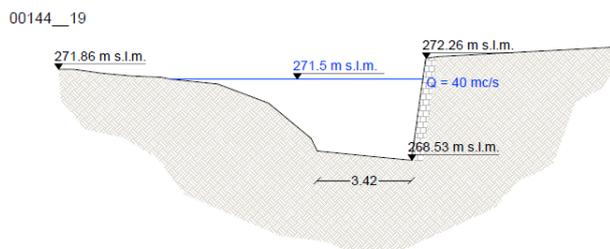


Figura 6-19: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B5 – Dal Ponte Castelsecco alla passerella di Via dell'Acropoli

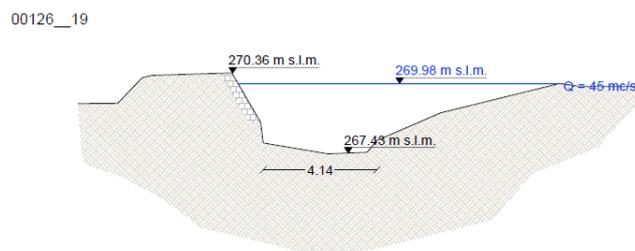


Figura 6-20: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B6 – Dalla passerella di Via dell'Acropoli al Ponte di Viale Sanzio

00055PB19 PONTE DI VIALE SANZIO

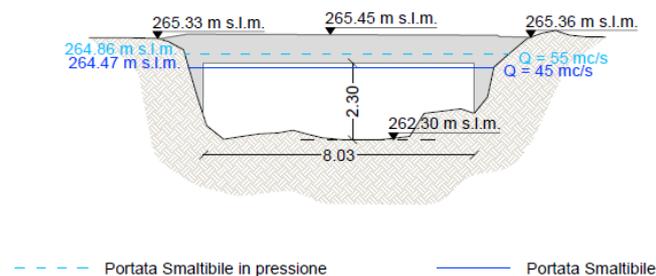


Figura 6-21. Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – PONTE DI VIALE SANZIO

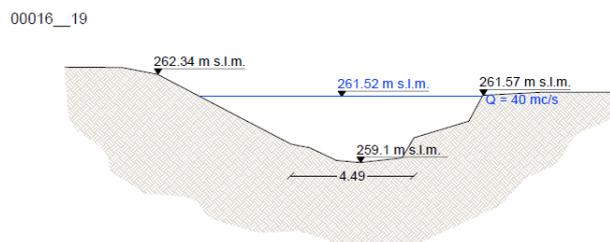


Figura 6-22: Risultati Modello 1D stato attuale T. Bicchieraia – TRATTO B7 – Dal ponte di Viale R. Sanzio alla confluenza nel T. Castro

6.1.4 MODELLO IDRAULICO MOTO VARIO TORRENTI CASTRO E BICCHIERAIA

Al fine di valutare il comportamento allo stato attuale dei due corsi d'acqua e la funzionalità delle opere idrauliche esistenti in occasione di eventi meteorici estremi, è stato implementato un modello idraulico di tipo accoppiato, monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini potenzialmente allagabili, cimentato su eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno (TR 30 e 200 anni), mutuati dall'Analisi Idrologica descritta nel § 5.2 - Modello Idrologico di supporto al progetto.

I risultati di tale modellazione danno importanti indicazioni in merito all'attuale allagabilità del territorio, al funzionamento idraulico delle casse di espansione di monte (Cassa di Cognaia e Cassa sul Torrente Bicchieraia) ed alle portate attese in ingresso al tombamento, e forniscono un'importante base di partenza per valutare l'efficacia degli interventi di progetto.

Gli scenari di verifica implementati, e di seguito descritti, sono il risultato della combinazione fra scenari idrologici e scenari geometrici: i primi consentono di individuare le sollecitazioni al reticolo idrografico schematizzato in funzione della probabilità di accadimento dell'evento meteorico simulato e della durata dello stesso; i secondi rappresentano le configurazioni territoriali che saranno cimentate alle sollecitazioni calcolate.

Nel caso in esame è stato costruito lo scenario geometrico dello Stato Attuale, che rappresenta l'attuale configurazione del territorio e permette di ricavare informazioni dettagliate sulla pericolosità idraulica delle aree oggetto di intervento e sulla funzionalità delle opere idrauliche esistenti.

Nello modello geometrico Stato Attuale sono state inserite le sezioni di rilievo dei Torrenti Castro e Bicchieraia e le seguenti strutture idrauliche:

- Ponti: le strutture degli attraversamenti presenti lungo i corsi d'acqua sono state inserite nel modello 1D;
- Casse di espansione: le opere delle casse di espansione sono state modellate inserendo gli sfioratori laterali/strutture in linea nel modello 1D direttamente collegati alle aree 2D. La stima della propagazione delle acque sfiorate in cassa avviene nel modello bidimensionale.
- Collegamenti alveo-terreno: il trasferimento dei volumi d'esondazione dall'alveo alle aree allagate viene garantito con l'inserimento di soglie sfioranti, assimilabili a stramazzi in parete grossa, con funzionamento bidirezionale, in condizioni di deflusso libero oppure rigurgitato in funzione dei livelli a monte e a valle dello stramazzo.

Il territorio potenzialmente soggetto ad allagabilità dal sistema fluviale oggetto di studio, modellato tramite un DTM ricavato da Lidar, ricomprende un areale complessivo di circa 5.28 Km², con una risoluzione generale della cella di calcolo della mesh assegnata pari a 5 x 5 m. Il reticolo modellato, le sezioni e le opere dell'arte implementate (con relativa codifica), il dominio dell'area 2D ed il modello digitale del terreno sono consultabili nella tavola IDR06 - Modello Idraulico Torrenti Castro e Bicchieraia – Planimetria. All'interno dello stesso elaborato sono anche riportati i contributi idrologici implementati nella modellistica secondo quanto riassunto nella Tabella 6-9 nel successivo paragrafo.

6.1.4.1 Verifiche Idrauliche implementate

A partire dall'analisi idrologica si è scelto di sollecitare il sistema idraulico con i seguenti scenari:

- **SCENARIO CASTRO**: Eventi sintetici con tempi di ritorno TR=30 e 200 anni critici (durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore) solo sul reticolo del Torrente Castro;
- **SCENARIO BICCHIERAIA**: Eventi sintetici con tempi di ritorno TR=30 e 200 anni critici (durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore) solo sul reticolo del Torrente Bicchieraia;
- **SCENARIO CASTRO-BICCHIERAIA**: Eventi sintetici con tempi di ritorno TR=30 e 200 anni critici (durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore) sul sistema Castro - Bicchieraia;

Le condizioni al contorno dei modelli idraulici analitici sono rappresentate da:

- Sollecitazioni idrologiche in testa ad ogni tratto simulato idraulicamente;
- Immissioni idrologiche puntuali in corrispondenza delle confluenze con corsi d'acqua non oggetto di simulazione idraulica;
- Immissioni idrologiche distribuite, nel caso di contributo derivante da un interbacino che non presenta un reticolo idrografico di riferimento;
- Condizioni al contorno di valle.

In Tabella 6-9 si riporta l'elenco degli input idrologici utilizzati nella modellistica idraulica. La tabella riporta il codice dell'immissione, il tipo di immissione (CM contributi di monte, CP contributi puntuali, CD i contributi distribuiti) e la codifica del bacino che lo genera.

BACINO	CORSO D'ACQUA	TIPO IMMISSIONE	CODICE IMMISSIONE	DESCRIZIONE IMMISSIONE	RS	SEZIONE
TORRENTE CASTRO (1100)	CASTRO	CM	1101	Monte Cassa Cognaia	72	00878_13
		CP	1102	Fosso Biazzano	48	00899_19
		CD	1103	Castro Interbacino	47 - 5	00890_19 - 00677_19
		CP	---	Affluente Cappuccini	4	00673_19
TORRENTE BICCHIERAIA (1200)	PENETO	CM	1201	Peneto monte cassa	19	00068_17
		CP	1202	Borro delle Casacce	8	00009_17
	COVOLE	CM	1203+1204	Covole monte cassa	1800	00042_19
		CP	1205	Borro della Bagnarola	39	00229_19
	BICCHIERAIA	CP	1206	Borro Marmorino	33	00199_19
		CP	1207	Borro delle Vinacce	16	00118_19
		CD	1208	Interbacino Bicchieraia	29 - 1	00191_19 - 00003_19
		CP	1209	Borro di Castelsecco	6	00043_19

Tabella 6-9: Elenco degli input idrologici alla modellazione idraulica

Relativamente alla condizione al contorno di valle è stata implementata la scala di deflusso alla sezione di imbocco del tratto tombato, riportata in Tabella 6-8, derivante dalla modellazione 1D descritta al paragrafo 6.1.2 Modello Idraulico del Tratto Tombato.

Si precisa che lungo l'alveo dei corsi d'acqua è stato adottato un coefficiente di scabrezza pari a 0.04 di Manning. Alle celle del modello idraulico bidimensionale è stato invece associato un valore di scabrezza pari a 0.06 di Manning.

6.1.4.2 Risultati

Si sintetizzano di seguito le risultanze delle verifiche implementate:

- Per eventi con tempo di ritorno TR pari a 30 anni:
 - sul Torrente Castro si verificano fenomeni di esondazione solo nel tratto terminale, più diffuse in sinistra idraulica (zone depresse del Pantanino), più contenute in destra (Via Trento e Trieste). I ponti di Via Anconetana e del Pantanino sono causa di evidenti fenomeni di rigurgito a monte. La cassa di espansione di Cognaia entra in funzione e lamina le portate di piena attese, passando dai circa 30 m³/s di monte ai 12 m³/s a valle dell'opera di sfioro. I volumi sfiorati allagano i moduli della cassa, ma non si verificano portate in uscita dallo sfioratore di scarico terminale (rif. tavola IDR08.A - Stato Attuale - Scenario Torrente Castro - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni). All'imbocco del tratto tombato sono attesi dal reticolo del T. Castro circa 35 m³/s;
 - Sul Torrente Bicchieraia, le esondazioni interessano i territori in destra idraulica, a valle della confluenza del Borro delle Vinacce. Il borro stesso è causa di allagamenti per insufficienza della sezione di attraversamento della Via Anconetana (rif. tavola IDR09.A - Stato Attuale - Scenario Torrente Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni). Si registrano fenomeni di rigurgito a monte dei ponti di Via Castel-secco e di Viale Sanzio. La bocca tarata della cassa della Bicchieraia lamina le portate di picco da 20 m³/s a monte a 15 mc/s a valle circa. All'imbocco del tratto tombato sono attesi dal reticolo del T. Bicchieraia circa 50 m³/s;
 - Nello scenario combinato Castro-Bicchieraia si verifica un leggero aggravio nella zona del Pantanino in termini di battenti massimi registrati, ed una portata attesa all'imbocco del tombamento di circa 85 m³/s (rif. tavola IDR10.A - Stato Attuale - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni).
- Per eventi con tempo di ritorno TR pari a 200 anni:
 - Le esondazioni da T. Castro sono diffuse su tutto il tratto di intervento e si verificano sia in destra che in sinistra idraulica, a causa dell'inadeguatezza della sezione fluviale ma soprattutto per le criticità dovute agli attraversamenti. La cassa di espansione di Cognaia lamina le portate di piena attese a monte,

passando da 55 m³/s a 15 m³/s circa a valle dell'opera di sfioro. Parte dei volumi invasati vengono reimmessi in alveo a valle dello sfioratore di scarico terminale, che restituisce circa 24 m³/s (rif. tavola *IDR08.B - Stato Attuale - Scenario Torrente Castro - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni*). All'imbocco del tratto tombato sono attesi dal reticolo del T. Castro circa 40 m³/s.

- Anche sul T. Bicchieraia si verificano esondazioni estese che interessano i territori in destra e sinistra idraulica, (rif. tavola *IDR09.B - Stato Attuale - Scenario Torrente Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni*). La bocca tarata della cassa della Bicchieraia lamina le portate di picco da 35 m³/s a monte a 22 m³/s a valle circa. All'imbocco del tratto tombato sono attesi dal reticolo del T. Bicchieraia circa 70 m³/s.

Nello scenario combinato Castro-Bicchieraia si verifica un aggravio delle aree allagate nel tratto di valle, con una portata attesa all'imbocco del tombamento di circa 115 m³/s (rif. tavola *IDR10.B - Stato Attuale - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni*).

6.2 VERIFICHE IDRAULICHE STATO DI PROGETTO

6.2.1 CARATTERIZZAZIONE DEL MODELLO

Per la valutazione del comportamento idraulico degli interventi di progetto proposti e degli effetti attesi sul territorio sugli eventi di piena eccezionali (eventi sintetici per assegnati tempi di ritorno) è stata sviluppata una modellazione idraulica dedicata.

L'implementazione del modello è stata effettuata attraverso il software HEC-RAS ver. 5.0.7 distribuito da US Army Corps of Engineers. È stata implementata una modellistica accoppiata, monodimensionale in alveo e bidimensionale per il territorio circostante, che permette di determinare battenti, livelli e velocità di propagazione in alveo e nelle aree allagate.

Il comportamento idraulico in alveo del reticolo idrografico di verifica è stato simulato attraverso un modello monodimensionale con la schematizzazione geometrica delle sezioni fluviali ricostruita per lo stato di progetto (la cui geometria è consultabile nell'elaborato PP12 - Stato di Progetto - Stralcio 1 - Libretto Sezioni Stato Sovrapposto). Le acque esondate e la loro propagazione sono state simulate con un modello bidimensionale, a partire dal modello digitale del terreno mutuato dal modello idraulico dello stato attuale. Il software HEC-RAS 5.0.7 permette l'accoppiamento dei due modelli in modo totalmente dinamico, garantendo la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi.

Per lo Stato di Progetto sono stati ricostruiti 5 scenari geometrici, a partire dallo scenario Stato Attuale in cui sono stati inseriti gli interventi di progetto. In particolare, sono stati geometrizzati:

- STATO DI PROGETTO SP1: rappresenta lo stato di progetto PRIMO STRALCIO, in cui sono state inserite le geometrie di progetto delle sezioni fluviali nei tratti di intervento, eliminate le strutture oggetto di demolizione (ponte del Pantanino) e modificati i collegamenti alveo-terreno con le nuove quote di testa sponda di progetto; come condizione al contorno di valle si è utilizzata la scala di deflusso al Ponte della Parata ricavata dal modello monodimensionale del tombamento nella sua configurazione attuale in assenza di esondazioni a monte per la presenza dei muri di centuriazione idraulica di progetto (la scala di deflusso relativa è riportata in Tabella 6-10);
- STATO DI PROGETTO SP2: rappresenta lo stato di progetto SECONDO STRALCIO, costruito a partire dalla geometria dello Stato di Progetto SP1, in cui sono stata inserita l'opera di laminazione sul Borro delle Vinacce. Tale opera è stata simulata mediante la riduzione della luce libera dell'attraversamento di Via Anconetana (bocca tarata) e scollegando i terreni posti a monte della viabilità dai corsi d'acqua;
- STATO DI PROGETTO SP3: rappresenta lo stato di progetto TERZO STRALCIO, costruito a partire dalla geometria dello Stato di Progetto SP2, in cui è stata inserita l'opera di laminazione sul Borro di Covole, in Loc. San Firenze Il comportamento idraulico della cassa di progetto è stato stimato mediante un modello idrologico dedicato, sviluppato mediante il software HEC-HMS ver. 4.3, che ha permesso di stimare la portata in uscita dall'opera, sollecitata dall'input idrologici attesi sul bacino di monte del B. di Covole, mediante la definizione di una legge di invaso (la relazione portata in ingresso/portata deviata in cassa è riportata in Tabella 6-12);
- STATO DI PROGETTO SP4: rappresenta lo stato di progetto QUARTO STRALCIO, costruito a partire dalla geometria dello Stato di Progetto SP3, in cui è stata inserita l'opera di laminazione in Loc. Pantanino (ipotizzando sull'area un abbassamento del p.c. di circa 1-1.5 m rispetto alle quote del terreno attuali ed inserendo uno sfioro in sponda destra sul T. Bicchieraia e simulato andando a modificare il modello digitale del terreno) e simulato l'adeguamento della sezione di progetto alla portata duecentennale del T. Bicchieraia dalla confluenza del B. delle Vinacce fino al ponte di Via Sanzio (togliendo dal modello idraulico le connessioni alveo-terreno);

- **STATO DI PROGETTO SP5**: rappresenta lo stato di progetto finale, ovvero del QUINTO E SESTO STRALCIO, costruito a partire dalla geometria dello Stato di Progetto SP4, ma utilizzando come condizione al contorno di valle la scala di deflusso al Ponte della Parata ricavata dal modello monodimensionale del tombamento nella sua configurazione di progetto (ricavatura del fondo alveo e stombamento/adequamento della sezione chiusa nel tratto a sezione minima, rif. Tabella 6-11).

6.2.2 VERIFICHE IDRAULICHE IMPLEMENTATE

Per quanto riguarda gli scenari di verifica implementati, questi sono il risultato della combinazione fra scenari idrologici e scenari geometrici di progetto. Sono stati implementati i seguenti:

- **STATO DI PROGETTO SP1**:
 - **SCENARIO CASTRO**: Eventi sintetici con tempi di ritorno TR 30 e 200 anni critici (durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore) solo sul reticolo del T. Castro;
 - **SCENARIO BICCHIERAIA**: Eventi sintetici con tempi di ritorno TR 30 e 200 anni critici (durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore) solo sul reticolo del T. Bicchieraia;
 - **SCENARIO CASTRO-BICCHIERAIA**: Eventi sintetici con tempi di ritorno TR 30 e 200 anni critici (durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore) sul sistema Castro- Bicchieraia.
- STATI DI PROGETTO da SP2 a SP5:
 - **SCENARIO CASTRO-BICCHIERAIA**: Evento sintetico con tempo di ritorno TR 200 anni critico (durata dell'evento di pioggia pari a 2 ore) sul sistema Castro- Bicchieraia.

Le condizioni al contorno dei modelli idraulici analitici sono rappresentate da:

- Sollecitazioni idrologiche in testa ad ogni tratto simulato idraulicamente;
- Immissioni idrologiche puntuali in corrispondenza delle confluenze con corsi d'acqua non oggetto di simulazione idraulica;
- Immissioni idrologiche distribuite, nel caso di contributo derivante da un interbacino che non presenta un reticolo idrografico di riferimento;
- Condizioni al contorno di valle.

Le sollecitazioni idrologiche, classificate per tipologia di immissione (CM contributi di monte, CP contributi puntuali, CD i contributi distribuiti), sono riportate in Tabella 6-9.

Si precisa che lungo l'alveo dei corsi d'acqua è stato adottato un coefficiente di scabrezza pari a 0.04 di Manning. Alle celle del modello idraulico bidimensionale è stato invece associato un valore di scabrezza pari a 0.06 di Manning.

Le altre condizioni al contorno, a supporto dei vari stralci progettuali, sono state ottenute tramite le modellazioni descritte nei paragrafi seguenti.

6.2.2.1 Modello Idraulico del Tratto Tombato

Relativamente alla condizione al contorno di valle è stata implementata la scala di deflusso alla sezione di imbocco del tratto tombato. A partire dal modello 1D realizzato per lo stato attuale e descritto nel paragrafo 6.1.26.1.2 - Modello Idraulico del Tratto Tombato, implementato tramite il software MIKE (modulo MIKE 11) del Danish Hydraulic Institute (DHI), certificato dalla F.E.M.A. (*Federal Emergency Management Agency*), sono state definite le scale di deflusso da inserire come condizioni al contorno di valle per le verifiche idrauliche degli stralci di progetto sopra descritti.

Le configurazioni di progetto analizzate sono le due seguenti:

- STRALCI DI PROGETTO da 1 a 4: sono stati rimossi gli sfiori del tratto a cielo aperto modellato a monte del tratto tombato, a simulare la presenza di muri di centuriazione idraulica di progetto;
- STRALCI DI PROGETTO 5 e 6: è stato riprofilato il fondo alveo per il tratto iniziale del tombamento per una lunghezza di 870 metri, con una pendenza del 6‰.

Entrambe le configurazioni geometriche sono state sollecitate con un set di portate variabili da 10 e 150 m³/s costanti per intervalli di tempo di 24h.

Come condizione di valle è stata impostata la scala di deflusso riportata in Tabella 6-7, ottenuta impostando nella sezione di valle una pendenza di moto uniforme pari a 0.1% e una scabrezza pari a 0.03 di Manning. Si precisa che lungo l'alveo dell'intero tratto tombato è stato adottato lo stesso coefficiente di scabrezza.

Si sono quindi ottenute le scale di deflusso riportate in Tabella 6-10 (Condizione al contorno di valle per gli stralci di progetto da 1 a 4) ed in Tabella 6-11 (Condizione al contorno di valle per gli stralci di progetto 5 e 6).

H [m s.l.m.]	Portata [m ³ /s]
256.95	0
258.34	10
258.70	20
259.01	30
259.30	40
259.57	50
259.82	60
260.05	70
260.27	80
260.50	90
260.80	100
261.15	110
261.65	120
262.21	130

Tabella 6-10: Scala di deflusso Ponte della Parata – Stato di progetto SP1-SP2-SP3-SP4

H [m s.l.m.]	Portata [m ³ /s]
256.95	0
257.46	10
257.82	20
258.13	30
258.41	40
258.67	50
258.93	60
259.19	70
259.44	80
259.70	90
259.98	100
260.31	110
260.61	120
260.99	130

Tabella 6-11: Scala di deflusso Ponte della Parata – Stato di progetto SP5-SP6

6.2.2.2 Ipotesi di funzionamento Opera di Laminazione in Loc. San Firenze

Per la stima degli effetti indotti dalla realizzazione di un'area di laminazione sul Borro del Covole in loc. San Firenze, è stato inserito nel modello idrologico sviluppato con il codice di calcolo HEC-HMS ver. 4.3 distribuito da US Army Corps of Engineers, la seguente relazione portata in ingresso/portata deviata in cassa, derivante da una analisi

morfologica dei terreni interessati dall'intervento ed ipotizzando un funzionamento analogo a quello della cassa di espansione della Bicchieraia, mutuato dal progetto esecutivo dell'opera.

Portata Ingresso [m ³ /s]	Portata Deviata [m ³ /s]
0.00	0.00
10.00	0.30
15.00	3.50
20.00	6.00
25.00	9.00
33.00	13.00
38.00	19.00
40.00	22.00
44.00	22.00
50.00	22.00

Tabella 6-12: Ipotesi di funzionamento Opera di Laminazione di San Firenze

6.2.3 RISULTATI

Si sintetizzano di seguito le risultanze delle modellazioni di progetto.

- Verifiche stato di progetto SP1 (PRIMO STRALCIO FUNZIONALE):
 - Sul T. Castro non si verificano fenomeni di esondazione per tempo di ritorno $TR \leq 200$ anni (rif. tavola IDR12.A - Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrente Castro - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni e tavola IDR12.B - Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrente Castro - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni). All'imbocco del tratto tombato sono attesi dal reticolo del T. Castro circa 35 m³/s per TR= 30 anni e circa 65 m³/s per TR= 200 anni.
 - Sul T. Bicchieraia non si verificano fenomeni di esondazione per tempo di ritorno $TR \leq 30$ anni (ad eccezione delle aree a monte della Via Anconetana interessate dalle esondazioni del Borro delle Vinacce, rif. tavola IDR13.A - Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrente Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni), mentre nello scenario duecentennale si hanno esondazioni molto più contenute rispetto allo stato attuale che riguardano principalmente le aree in destra idraulica a valle della confluenza del B. delle Vinacce (rif. tavola IDR13.B - Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrente Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni). All'imbocco del tratto tombato sono attesi dal reticolo del T. Bicchieraia circa 57 mc/s per TR= 30 anni e circa 72 m³/s per TR= 200 anni.
 - Nello scenario combinato Castro-Bicchieraia la portata attesa all'imbocco del tombamento è circa 88 m³/s per TR= 30 anni e circa 123 m³/s per TR= 200 anni (rif. IDR14.A - Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni e tavola IDR14.B - Stato di Progetto - Stralcio 1 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni).
- Verifiche stato di progetto SP2 (SECONDO STRALCIO FUNZIONALE):
 - Rispetto allo stato di progetto SP1, sul sistema combinato Castro-Bicchieraia nello scenario duecentennale le aree allagate permangono per estensione quasi immutate, pur presentando battenti leggermente inferiori. L'opera di laminazione sul Borro delle Vinacce abbassa le portate di picco da 10 m³/s a 2 m³/s circa. La portata attesa all'imbocco del tombamento di circa 119 m³/s (rif. IDR15 - Stato di Progetto - Stralcio 2 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni).
- Verifiche stato di progetto SP3 (TERZO STRALCIO FUNZIONALE):
 - Rispetto allo stato di progetto SP2, si osserva una decisa diminuzione delle aree allagate per l'evento duecentennale (rif. IDR16 - Stato di Progetto - Stralcio 3 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni). Con la realizzazione della cassa di espansione sul T. Covole in loc. San Firenze si attende infatti una riduzione delle sollecitazioni idrauliche sul T. Bicchieraia di circa 13 m³/s. La portata attesa all'imbocco del tombamento si riduce ulteriormente ed è stimata pari a circa 117 m³/s.

- Verifiche stato di progetto SP4 (QUARTO STRALCIO FUNZIONALE):
 - Con la realizzazione degli interventi previsti nel quarto stralcio funzionale, si ha una sostanziale assenza di fenomeni di esondazione non controllati per eventi $TR \leq 200$ anni dal sistema Castro-Bicchieraia (rif. *IDR17 - Stato di Progetto - Stralcio 4 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni*). La portata attesa all'imbocco del tombamento è stimata pari a circa 114 m³/s.

- Verifiche stato di progetto SP5 (QUINTO E SESTO STRALCIO FUNZIONALE):
 - Con la realizzazione degli interventi previsti nel quinto e sesto stralcio funzionale, oltre all' assenza di fenomeni di esondazione, si ottiene anche una netta diminuzione del carico idraulico atteso nel tratto tombato (rif. *IDR18 - Stato di Progetto - Stralcio 5 - Scenario Torrenti Castro e Bicchieraia - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni*). La portata attesa all'imbocco del tombamento è stimata pari a circa 115 m³/s con livelli idrometrici in alveo più bassi di circa 80 rispetto allo stato attuale.

***APPENDICE A – ANALISI IDROLOGICA IDRAULICA
SUL TORRENTE VINGONE***

A.1 PREMESSA

Durante il percorso progettuale sono state valutate numerose alternative progettuali.

Prima fra tutte la possibile realizzazione di uno scolmatore da realizzarsi a monte del tratto tombato; bypass in grado di deviare una aliquota della "portata di progetto" tale da rendere idoneo idraulicamente il tombamento stesso, a seguito nell'incremento dell'efficienza idraulica dei due corsi d'acqua a monte.

Ebbene, la determinazione delle portate massime smaltibili dal tombamento, ha messo in luce come tale aliquota dovesse essere di fatto non marginale, ma predominante rispetto alla portata massima di progetto. A fronte, infatti, di una portata stimata per l'evento duecentennale critico di circa 160 mc/sec (circa 65 mc/s dal T. Castro e 95 mc/s dal T. Bicchieraia), il tombamento risulta in grado, al massimo, di far transitare 80 mc/sec (sezione minima).

È evidente quindi che lo scolmatore, ipotizzato per non intervenire sul tombamento esistente in modo sostanziale e prevedendo la sola ricalibratura dei corsi d'acqua a monte, avrebbe rappresentato una nuova via d'acqua, di dimensioni idonee al transito di 80-100 mc/sec.

Tale intervento comporta innanzitutto problematiche dovute all'individuazione degli spazi di ingombro della sezione idraulica di progetto (che avrà dimensioni non trascurabili), ai costi di esproprio, alla realizzabilità degli attraversamenti viari necessari lungo il nuovo tracciato (che dovranno rispettare la normativa vigente, con particolare riferimento ai franchi di sicurezza).

Tuttavia, nodo cruciale si è rivelata l'individuazione di un corpo idrico recettore in grado di smaltire le portate attese in sicurezza idraulica.

Allo scopo, è stata condotta una analisi idrologica-idraulica sul Torrente Vingone, al fine di stimare la portata naturale attesa sul corso d'acqua e l'efficienza delle sezioni fluviali e delle strutture ed infrastrutture presenti lungo il suo tracciato. Tale analisi è di seguito descritta.

A.2 ANALISI IDROLOGICA

In analogia con quanto fatto sul bacino del T. Castro, per la stima degli input idrologici attesi sul bacino del T. Vingone è stato acquisito il modello idrologico di supporto al PS di Arezzo, a partire dal quale è stata rivalutata la suddivisione in sottobacini in virtù degli obiettivi della presente analisi.

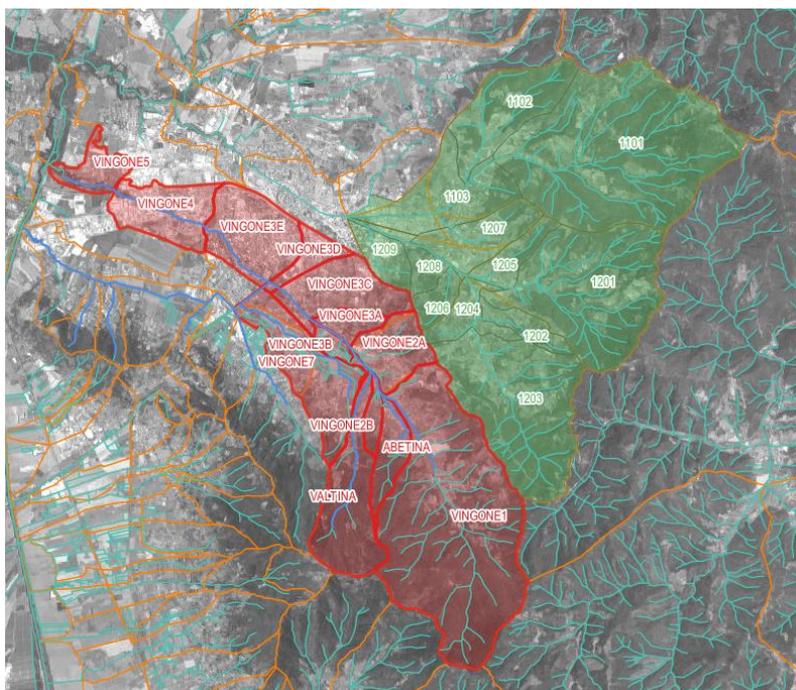


Figura A-1: Bacini Idrografici afferenti al Torrente Vingone (in rosso) ed al sistema Castro-Bicchieraia oggetto di studio (in verde)

Per ciascun sottobacino sono stati stimati i parametri idrologici e determinate le portate attese per eventi sintetici con TR=30-200 anni di durata variabile tra 0.5 e 4 ore tramite codice di calcolo HEC-HMS ver. 4.3. La durata critica per il bacino del T. Vingone è risultata pari a 2 ore, come per il bacino T. Castro e Bicchieraia.

Si sintetizzano di seguito i valori di portata massima attesa su alcune sezioni di chiusura significative per le successive analisi idrauliche:

- Superstrada Due Mari: Q30=65 mc/s, Q200=109 mc/s;
- Ponte della ferrovia: Q30=85 mc/s, Q200=142 mc/s;
- Ponte Viale Caduti di Cefalonia e Corfù: Q30=96 mc/s, Q200=158 mc/s.

A.3 VERIFICHE IDRAULICHE STATO ATTUALE

Le verifiche idrauliche sviluppate sul T. Vingone hanno come finalità la stima della capacità di smaltimento del tratto urbano del corso d'acqua, dall'opera di attraversamento della Superstrada Due Mari fino alla linea ferroviaria Arezzo-Sinalunga. Dal confronto tra portate massime smaltibili dal corso d'acqua e dagli attraversamenti presenti con le portate attese per eventi sintetici critici (TR30-200 anni durata 2 ore) è possibile, infatti, stimare se il corso d'acqua è in grado di ricevere e smaltire in sicurezza eventuali surplus di portata dal bypass.

L'analisi svolta è stata implementata mediante il software HEC-RAS 5.0.7. mutuando la geometria delle sezioni dallo studio di supporto al PS di Arezzo, e cimentando il modello in moto permanente su un set di portate variabili tra 10 e 150 mc/s.

Il modello ha permesso di stimare l'efficienza idraulica del reticolo e soprattutto delle infrastrutture/opere idrauliche attualmente presenti lungo il tracciato.

Una sintesi dei risultati è riassunta di seguito:

- L'attraversamento della Superstrada Due Mari garantisce il deflusso di portate di piena fino a circa 60 mc/s (funzionamento in pressione), a fronte di una portata idrologica stimata di circa 65 mc/s per l'evento trentennale e di circa 109 mc/s sull'evento duecentennale; il valore di portata idraulica smaltibile in pressione è stato comunque assunto come massimo apporto dal bacino di monte;
- Gli attraversamenti su Via Gentileschi e Via Leonardo da Vinci sono in grado di smaltire portate di circa 75-80 mc/s (funzionamento in pressione);
- In corrispondenza del ponte della ferrovia (ipotetico punto di confluenza del bypass) la portata massima smaltibile a bocca piena è di 80 mc/s, pari circa alla portata attesa per eventi trentennali (portata idraulica transitabile dal ponte della Due Mari + contributi idrologici dei sottobacini di valle); l'opera riesce a far transitare in pressione la portata attesa per eventi duecentennali (circa 97 mc/s).
- Al ponte di Via Veneto transitano a bocca piena circa 65 mc/s, mentre le portate attese sono circa 87 mc/s e 103 mc/s rispettivamente per TR=30 e 200 anni.
- I ponti a valle garantiscono il deflusso delle portate attese per eventi duecentennali pur con franchi ridotti (ponte Via Colombo $Q_{smalt}=115$ mc/s $Q_{200}=104$ mc/s; ponte Via Tortaia $Q_{smalt}=130$ mc/s $Q_{200}=106$ mc/s; ponte Viale Don Minzoni $Q_{smalt}=160$ mc/s $Q_{200}=112$ mc/s; ponte Viale Caduti di Cefalonia e Corfù $Q_{smalt}=160$ mc/s $Q_{200}=121$ mc/s).

Tutto ciò premesso, risulta evidente che il T. Vingone presenta di per se stesso criticità nello smaltimento delle portate attese, soprattutto nel tratto tra la Superstrada Due Mari e il ponte di Via Veneto. In ragione di ciò si evince che il T. Vingone non si presta ad accogliere contributi aggiuntivi di portata.

Sono state condotte ulteriori valutazioni circa la possibilità di adeguamento delle sezioni di attraversamento critiche, che, in virtù del contesto fortemente urbanizzato in cui sono inserite e dei vincoli normativi a cui gli interventi sarebbero soggetti, hanno dato risultati modesti in termini di aumento di efficienza idraulica, che non permettono il convogliamento di ulteriori portate.

APPENDICE B – MODELLISTICA IDROLOGICA FONDAMENTI TEORICI

MODELLISTICA IDROLOGICA ANALISI PRELIMINARI

MODELLO DI INFILTRAZIONE - METODO DELL'INFILTRAZIONE A SOGLIA

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, di tipo puntuale (registrazioni pluviometriche) sull'area d'interesse, che dovranno essere, in generale, interpolate per ottenere l'andamento delle precipitazioni lorde al suolo nello spazio e nel tempo, in termini di afflussi per unità di area. 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 le dimensioni 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*.

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].

I valori di I_a e K_s , nel lavoro di regionalizzazione, sono calcolati in funzione dell'uso del suolo e dalla geologia dei bacini, resi indipendenti dalle dimensioni del bacino idrografico.

In particolare, per la stima del coefficiente I_a si è utilizzata la formula:

$$I_a = 3.3 + 22 S_b$$

in cui S_b rappresenta la percentuale di superficie boscata presente sul bacino considerato, ricavata a partire dalla carta dell'uso del suolo (cod. 311-312-313).

MODELLO DI FORMAZIONE DELL'ONDA DI PIENA - MODELLO DI NASH E GIUH

L'*Idrogramma Istantaneo Unitario* (IUH) 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

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

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*:

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

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

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

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

In questo schema il tempo di ritardo è dato dal prodotto nk (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:

$$\begin{aligned} n &= 3.29 \left(\frac{R_b}{R_a}\right)^{0.78} R_l^{0.07} \\ k &= 0.7 \left(\frac{R_a}{R_b \cdot R_l}\right)^{0.48} \frac{L_c}{v} \end{aligned}$$

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

ω 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 $u=1, 2, 3, \dots$

Lo studio di Regionalizzazione delle Portate di Piena, attraverso la taratura sistematica dei dati relativi ad eventi registrati nei 42 bacini strumentati dal Servizio Idrografico, ha fornito una relazione fra i valori di TI ed i parametri geomorfologici:

$$TI = 0.42 \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^{0.3} R_l^{-0.41} \frac{L_{mc}}{A^{0.075}} \quad [h]$$

dove A è l'area del bacino espressa in $[km^2]$ e L_{mc} la lunghezza del reticolo in $[km]$, calcolata come cumulata delle lunghezze medie per i vari ordini gerarchici.

Nel presente studio, la metodologia adottata, in sintesi, è la seguente.

Per tutti i bacini, caratterizzati da aste fluviali di ordine maggiore o uguale a 2, è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler.

Sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del reticolo idrografico, sono stati derivati i parametri n e k del modello di Nash, utilizzando le seguenti formulazioni:

$$\begin{aligned} n &= 3.29 (R_b/R_a)^{0.78} R_l^{0.07} \\ TI &= 0.42 \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^{0.3} R_l^{-0.41} \frac{L_{mc}}{A^{0.075}} = nk \end{aligned}$$

Per i bacini caratterizzati da una sola asta e per gli interbacini, si è proceduto come segue:

n è stato considerato pari al valore associato al sottobacino che lo ricomprende;

TI è stato calcolato a partire dalla stima del tempo di corrivazione T_c attraverso la formulazione di Giandotti, stimando $TI = T_c/1.6$.

MODELLISTICA IDROLOGICA IMPLEMENTATA

MODELLO DI INFILTRAZIONE: METODO SCS-CURVE NUMBER

Per il calcolo delle perdite di bacino è stato adottato il metodo del Curve Number, modello di rifiuto del terreno sviluppato dal Soil Conservation Service degli Stati Uniti.

Si tratta di un modello empirico che stima la predisposizione dei suoli a contribuire ai deflussi di piena mediante l'analisi di tre fattori: le caratteristiche di permeabilità dei terreni superficiali e degli strati geologici immediatamente sottostanti, l'uso del suolo e la copertura vegetale, lo stato di imbibimento del terreno all'inizio della sollecitazione meteorica.

La relazione fondamentale per la stima della precipitazione efficace è la seguente:

$$\begin{cases} P_{eff} = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} & P \geq I_a \\ P_{eff} = 0 & P < I_a \end{cases}$$

dove P_{eff} è la precipitazione efficace cumulata al tempo t , P è la precipitazione totale cumulata allo stesso istante, I_a è la perdita iniziale ed S è il fattore di ritenzione potenziale, ovvero il massimo volume specifico di acqua che il terreno può trattenere in condizioni di saturazione.

Con l'introduzione di I_a si vuol tenere conto di quel complesso di fenomeni, quali l'intercettazione da parte della vegetazione e l'accumulo nelle depressioni superficiali del terreno, che ritardano il verificarsi del deflusso superficiale. I due parametri I_a ed S si dovranno determinare mediante operazioni di taratura del modello. Dall'analisi di risultati ottenuti dall' SCS in numerosi piccoli bacini sperimentali americani, è stata proposta una relazione empirica che lega i 2 parametri:

$$I_a = cS$$

con c posto pari a 0.2.

In questo modo è possibile definire il deflusso netto in funzione dell'afflusso meteorico, una volta fissato il valore di S . Il parametro S dipende dalla possibilità di infiltrazione dell'acqua in condizioni di terreno già saturato, dall'insieme delle condizioni del suolo (uso, trattamento della superficie, drenaggio) e dal contenuto di umidità iniziale dello stesso (AMC, Antecedent Moisture Condition). L'effetto di tutti questi fenomeni viene rappresentato globalmente introducendo un parametro adimensionale, il Curve Number (CN), legato ad S tramite la relazione:

$$S = S_0 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

dove S_0 è una costante di scala dimensionale, che riflette l'unità di misura adottata. Nel sistema metrico, $S_0 = 254$ [mm].

Il parametro CN è un numero adimensionale che varia da 100, per corpi idrici, a circa 30, per suoli permeabili con elevati tassi di infiltrazione, che dipende, innanzitutto, dalle caratteristiche idrologiche del suolo (struttura, tessitura e permeabilità).

Per identificare il tipo idrologico di suolo bisogna analizzare le caratteristiche geopedologiche del bacino. L'SCS ha classificato il suolo in quattro gruppi:

- Gruppo A: suoli aventi scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla, ghiaie profonde molto permeabili. Capacità di infiltrazione molto elevata.
- Gruppo B: suoli aventi moderata potenzialità di deflusso. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A e con maggiore aliquota di argilla e limo. Elevate capacità di infiltrazione anche in condizioni di saturazione.
- Gruppo C: suoli aventi potenzialità di deflusso moderatamente alta. Suoli contenenti considerevoli quantità di

argilla e colloidali. Scarsa capacità di infiltrazione.

- Gruppo D: suoli con potenzialità di deflusso molto elevata. Argille con elevata capacità di rigonfiamento, suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie. Scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.

Una volta individuato il tipo idrologico di suolo, per determinare il CN occorre analizzare la tipologia di uso del suolo stesso.

Nelle tabelle seguenti si riportano i valori caratteristici del parametro CN, che si ottengono per combinazione delle caratteristiche idrologiche del suolo, secondo i 4 tipi idrologici A-B-C-D a permeabilità decrescente, e delle caratteristiche di uso prevalente del suolo stesso.

Per quanto riguarda l'influenza dello stato di imbibimento del suolo all'inizio dell'evento meteorico, l'SCS individua tre classi caratterizzate da differenti condizioni iniziali (*AMC, Antecedent Moisture Condition*) a seconda del valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei cinque giorni precedenti l'evento meteorico:

- *AMC I*: potenziale di scorrimento superficiale minimo. Suolo asciutto.
- *AMC II*: potenziale di scorrimento medio. Suolo mediamente umido.
- *AMC III*: potenziale di scorrimento massimo. Suolo saturo.

La categoria a cui fare riferimento si può individuare in base alla precipitazione totale dei 5 giorni precedenti quello dell'evento meteorico ed in base alla stagione, vegetativa o non vegetativa.

I valori di CN ricavati dalle tabelle seguenti si riferiscono a condizioni di saturazione del terreno medie (*AMC II*).

I parametri richiesti dal modello distribuito SCS Curve Number sono un valore dell'indice CN per ogni interbacino in cui è stato discretizzato il bacino, e le condizioni iniziali, ovvero le perdite iniziali espresse come rapporto con la ritenzione potenziale (I_a/S , *initial abstraction ratio*, in genere posto pari a 0.2), da specificare per ogni sottobacino.

TIPO DI COPERTURA			TIPO DI SUOLO			
Uso del suolo	Trattamento o pratica	Condizione idrologica	A	B	C	D
Maggesi	a solchi diritti	-	77	86	91	94
Colture a solchi	a solchi diritti	cattiva	72	81	88	91
	a solchi diritti	buona	67	78	85	89
	a reggipoggio	cattiva	70	79	84	88
	a reggipoggio	buona	65	75	82	86
	a re. e terrazze	cattiva	66	74	80	82
	a re. e terrazze	buona	62	71	78	81
Grani piccoli	a solchi diritti	cattiva	65	76	84	88
	a solchi diritti	buona	63	75	83	87
	a reggipoggio	cattiva	63	74	82	85
	a reggipoggio	buona	61	73	81	84
	a re. e terrazze	cattiva	61	72	79	82
	a re. e terrazze	buona	59	70	78	81
Legumi seminati folti o prati in rotazione	a solchi diritti	cattiva	66	77	85	89
	a solchi diritti	buona	58	72	81	85
	a reggipoggio	cattiva	64	75	83	85
	a reggipoggio	buona	55	69	78	83
	a re. e terrazze	cattiva	63	73	80	83
	a re. e terrazze	buona	51	67	76	80
Pascoli	-	cattiva	68	79	86	89
	-	discreta	49	69	79	84
	-	buona	39	61	74	80
	a reggipoggio	cattiva	47	67	81	88
	a reggipoggio	discreta	25	59	75	83
	a reggipoggio	buona	6	35	70	79
Prati	-	buona	30	58	71	78
Boschi	-	cattiva	45	66	77	83
	-	discreta	36	60	73	79
	-	buona	25	55	70	77
Aziende agricole	-	-	59	74	82	86
Strade sterrate	-	-	72	82	87	89
Strade pavimentate	-	-	74	84	90	92

Tabella A.1- 1: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e copertura (SCS, 1986)

TIPO DI COPERTURA		TIPO DI SUOLO			
		A	B	C	D
Aree residenziali					
Area media dei lotti:	Area impermeabile (%)				
1/8 acro o meno	65	77	85	90	92
1/4 acro	38	61	75	83	87
1/3 acro	30	57	72	81	86
1/2 acro	25	54	70	80	85
1 acro	20	51	68	79	84
Parcheggi pavimentati, tetti, viali d'accesso		98	98	98	98
Strade urbane ed extraurbane					
Pavimentate, a dorso di mulo e con fognatura		98	98	98	98
in ghiaia		76	85	89	91
sterrate		72	82	87	89
Aree commerciali e professionali (impermeabili per l'85%)		89	92	94	95
Distretti industriali (impermeabili per il 72%)		81	88	91	93
Spazi aperti, prati, parchi, campi da golf, cimiteri					
in buone condizioni: copertura erbosa sul 75% o più		39	61	74	80
in discrete condizioni: copertura erbosa sul 50-75%		49	69	79	84

Tabella A.1- 2: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e copertura (SCS, 1986)

MODELLO DI FORMAZIONE DELL'ONDA DI PIENA - MODELLO DI CLARK E IUH

Nelle ipotesi adottate da Clark il bacino si intende schematizzato come composto di due elementi: una serie di canali lineari posti in parallelo tra loro, come nel caso del modello cinematico, e, all'uscita di questi, un serbatoio lineare. L'idrogramma unitario istantaneo dell'intero sistema sarà pari all'integrale di convoluzione tra l'IUH del modello cinematico, pensato come idrogramma in ingresso, e l'IUH del sistema dal serbatoio lineare:

$$h(t) = \int_0^t \frac{1}{R} e^{-\frac{t-\tau}{R}} \frac{1}{S} \frac{dA}{d\tau} d\tau$$

sapendo che per $t > t_c$ la derivata $dA/d\tau$ si annulla e si ottiene:

$$h(t) = \int_0^{t_0} \frac{1}{R} e^{-\frac{t-\tau}{R}} \frac{1}{S} \frac{dA}{d\tau} d\tau$$

Una semplificazione del Modello di Clark si può ottenere ipotizzando che la curva aree-tempi sia di tipo lineare. Nel caso di un bacino rettangolare, ad esempio, sappiamo che $A = A(t) = \frac{S}{t_c} t$ per t appartenente all'intervallo $(0, t_c)$.

Quindi, per $t \leq t_c$ l'IUH del Modello di Clark semplificato sarà dato da:

$$h(t) = \int_0^{t_0} \frac{1}{R t_c} e^{-\frac{t-\tau}{R}} d\tau = \frac{1}{t_c} \left(1 - e^{-\frac{t}{R}}\right)$$

ed invece per $t > t_c$:

$$h(t) = \int_0^{t_0} \frac{1}{R t_c} e^{-\frac{t-\tau}{R}} d\tau = \frac{1}{t_c} e^{-\frac{t}{R}} \left(e^{\frac{t}{R}} - 1\right)$$

Quindi, nel caso del modello di Clark semplificato secondo le ipotesi del bacino rettangolare, esso è completamente determinato una volta noti i due parametri t_c , tempo di corrvazione del bacino, e R , costante di tempo di immagazzinamento del serbatoio lineare.

APPENDICE C – MODELLISTICA IDRAULICA FONDAMENTI TEORICI

MODELLISTICA IDRAULICA

MODELLISTICA IDRAULICA MONODIMENSIONALE - MIKE 11

MIKE 11 è un software in grado di simulare il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Sviluppato a partire dagli anni '70 dal DHI (Danish Hydraulic Institute), rappresenta lo stato dell'arte nella modellistica matematica in ambito fluviale e riferimento nell'ambito della modellistica idrodinamica monodimensionale.

Caratteristiche del codice sono la velocità di calcolo e l'efficienza del robusto motore di simulazione idrodinamica (risolve le equazioni complete del De St.Venant), la struttura logica e sequenziale per l'inserimento e gestione dei dati di input (geometrie, serie storiche ecc.) ed i molteplici strumenti di interpretazione e visualizzazione dei risultati, in grado di garantire un'ottima rappresentazione degli studi condotti (rappresentazione di sezioni, profili, piani quotati, anche in ambiente GIS).

Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico HD rappresenta il cuore del codice di calcolo MIKE 11 ed è in grado di simulare il flusso idrico monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. Attraverso l'utilizzo di HD è possibile simulare:

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

L'adozione del programma di simulazione MIKE 11 consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

Descrizione delle Condizioni di Moto Simulate

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

- Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
- Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle e quindi simulare i fenomeni di rigurgito.
- Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

Equazioni generali di De Saint Venant

MIKE 11, risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- il fluido (acqua) è incomprimibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità;
- la pendenza del fondo è piccola;
- le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

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

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

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

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

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

dove:

A = area della sezione bagnata (m²);

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

g = accelerazione di gravità (m s⁻²);

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

Q = portata (m³/s);

R = raggio idraulico (m);

α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;

q = portata laterale addotta (m² s⁻¹).

Simulazione delle correnti veloci con l'approccio dell'onda dinamica

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

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

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

Approssimazione dell'onda diffusiva

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare, nelle equazioni generali di De Saint Venant, tutti i termini legati alla quantità di moto:

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

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine $\frac{\partial h}{\partial x}$. Per ragioni di stabilità questo termine viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

Descrizione in corrispondenza di strutture

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. Sono diversi i tipi di strutture che possono essere simulate:

Tipo 1. Stramazzo a soglia larga: Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

Tipo 2. Relazione Q-h: Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

Tipo 3. Tombino: Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". Il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso: il codice calcola in automatico una relazione Q-h che contempla tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

Tipo 4. Relazione Q-t: E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Tipo 5. Relazione $Q = A(Z_{11}) \cdot Z_{12}$: Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

Tipo 6. Strutture mobili: E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

Tipo 7. Ponti: In MIKE 11 possono essere utilizzate diverse formulazioni da letteratura per il calcolo del deflusso attraverso i ponti e del conseguente effetto di rigurgito. In particolare, sono implementati i modelli della FHWA (Federal Highway Administration USA, WSPRO method) e della USBPR (US Bureau of Public Roads), modelli per la simulazione della presenza delle pile (Nagler e Yarnell), modelli per il libero deflusso attraverso ponti ad arco (Biery & Delour, HR method). Tutti i precedenti metodi di calcolo possono essere integrati con il calcolo del moto in pressione e con il calcolo del sormonto della struttura (tombini e stramazzi).

Resistenza d'attrito

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

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

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

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

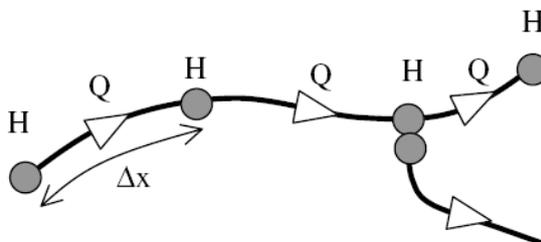
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

Condizioni Iniziali

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

Metodo di Soluzione

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).



La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;
- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

Condizioni al Contorno

In MIKE 11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

Il software utilizzato per la modellazione idraulica è HEC-RAS 5.0.7 distribuito da US Army Corps of Engineers. Il modello permette di effettuare analisi idrauliche monodimensionali, bidimensionali ed accoppiate monodimensionali. Nel presente studio è stata adottata una modellazione di tipo bidimensionale, in cui sia i deflussi in alveo che la propagazione delle piene sulle aree inondabili è schematizzata attraverso un moto 2D

MODELLISTICA IDRAULICA – HEC RAS

MODELLISTICA IDRAULICA MONODIMENSIONALE IN MOTO PERMANENTE

La modellistica idraulica di moto permanente consente di trasformare le portate associate agli eventi di piena, definiti nella fase di modellazione idrologica, in livelli idrometrici nelle sezioni fluviali.

Per la trasformazione delle portate in livelli idrometrici viene utilizzato il software *HEC-RAS 5.0.7 (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System)*, prodotto e reso disponibile gratuitamente dall'*USACE (United States Army Corps of Engineering)*.

La procedura di calcolo si basa sulla risoluzione, con un metodo alle differenze finite, dell'equazione di moto permanente gradualmente variato, ricavata dal bilancio dell'energia secondo lo schema monodimensionale. Tale equazione è espressa dalla seguente forma differenziale:

$$\frac{dH}{dx} = -S_f$$

con:

$$H = z + y + \frac{\alpha V^2}{2g}$$

in cui:

- H è il carico totale della corrente nella sezione generica di ascissa x , misurato rispetto ad un riferimento orizzontale;
- S_f è la perdita di carico unitaria dovuta alle resistenze continue;
- z è la quota del fondo alveo rispetto ad un riferimento orizzontale;
- y è la profondità della corrente misurata dal fondo dell'alveo;
- V è la velocità media della corrente nella sezione generica di ascissa x ;
- α è il coefficiente di ragguglio delle altezze cinetiche;
- g è l'accelerazione di gravità.

Passando alle differenze finite, l'equazione del profilo liquido tra due sezioni distanti Δx diventa:

$$H_2 - H_1 = -S_{fm} \cdot \Delta x$$

in cui:

- H_1 è il carico totale della corrente nella sezione iniziale;
- H_2 è il carico totale della corrente nella sezione finale;
- S_{fm} è la perdita di carico unitaria dovuta alle resistenze continue media tra le due sezioni.

Quindi, per sostituzione, si ottiene:

$$z_1 + y_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} - z_2 - y_2 - \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \frac{J_1 + J_2}{2} \cdot \Delta x = 0$$

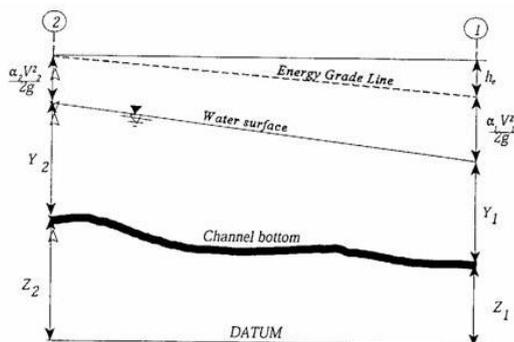
ovvero:

$$z_1 + y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - z_2 - y_2 - \frac{Q^2}{2gA_2^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{Q^2 n^2}{A_1^2 R_1^{4/3}} + \frac{Q^2 n^2}{A_2^2 R_2^{4/3}} \right) \cdot \Delta x = 0$$

dove:

- Q è la portata;
- A_1 è l'area liquida della corrente nella sezione iniziale;
- A_2 è l'area liquida della corrente nella sezione finale;
- n è il coefficiente di scabrezza di Manning;
- R è il raggio idraulico della sezione (rapporto tra area liquida e contorno bagnato).

I termini del bilancio energetico fra due sezioni trasversali del corso d'acqua sono schematicamente rappresentati nella seguente figura.



Essendo le caratteristiche geometriche di una data sezione funzione della sola altezza liquida, l'equazione non lineare appena trovata permette di determinare la quota liquida nella sezione terminale di un tratto di corrente di lunghezza Δx una volta che sia nota la quota liquida in corrispondenza della sezione iniziale o viceversa (*condizione al contorno*).

La determinazione del profilo liquido di moto permanente relativo ad un tronco fluviale richiede quindi:

- la suddivisione il tronco di interesse in una successione finita di tratti delimitati da sezioni di cui sia nota la geometria;
- l'immissione del valore di portata liquida in ingresso alla sezione di monte ed eventuali variazioni dovute a immissioni localizzate o distribuite;
- l'imposizione delle condizioni al contorno nelle sezioni estreme del tronco in esame.

A partire dunque dalle condizioni al contorno, l'applicazione reiterata dell'equazione dell'energia permette di determinare la quota del pelo liquido in ogni sezione. In particolare, il modello consente di adottare uno dei seguenti schemi di calcolo:

- Corrente lenta (*subcritical flow*), applicabile quando la corrente è ovunque lenta, ossia con un'altezza liquida superiore alla critica in ogni sezione di calcolo; in tal caso la condizione al contorno è richiesta in corrispondenza dell'estremo di valle del tronco fluviale considerato.
- Corrente veloce (*supercritical flow*), applicabile quando la corrente è ovunque veloce, ossia in presenza di un'altezza liquida inferiore alla critica in tutte le sezioni di calcolo; in tal caso la condizione al contorno va imposta sulla sezione di monte del tratto in esame.
- Corrente mista (*mixed flow*), utilizzata quando all'interno del tronco esaminato si verificano transizioni da un tipo di corrente all'altro (es. risalto idraulico), che danno luogo ad una successione di tratti con differenti caratteristiche di moto. Tale schema richiede una condizione al contorno in corrispondenza di entrambe le sezioni estremità (monte e valle).

Va inoltre osservato che, per la soluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia, le perdite di carico sono dovute alla *scabrezza*, quindi determinate tramite l'equazione di Manning, e in corrispondenza di brusche variazioni di velocità, dovute ad irregolarità d'alveo, tramite appositi coefficienti di *espansione/contrazione* della vena fluida moltiplicatori della variazione di energia cinetica.

Le irregolarità idrauliche (salti di fondo, confluenze, sbarramenti, etc) nelle quali si viene a determinare un brusca variazione nel profilo del pelo libero della corrente, sono modellate attraverso la conservazione della spinta totale (equazione dei momenti).

In definitiva, i dati da inserire per la costruzione e la successiva implementazione della modellistica idraulica di moto permanente con il software HEC-RAS sono riassunti di seguito.

- 1 *Dati geometrici* relativi alle sezioni trasversali ed alle eventuali strutture presenti (ponti, traverse, sfioratori);
- 2 *Coefficiente di scabrezza* di Manning e *coefficienti di contrazione/espansione*, per il calcolo delle perdite energetiche, rispettivamente, distribuite e concentrate, in corrispondenza di ogni sezione fluviale. Dall'attendibilità di questi dati, definiti sulla base di sopralluoghi e confronti diretti con i valori riportati in letteratura, dipende il grado di risoluzione della simulazione. Le disposizioni tecniche individuano nel testo di Ven Te Chow il riferimento per la scelta delle scabrezze idrauliche in funzione delle caratteristiche della sezione. Tale testo tratta la determinazione del coefficiente di scabrezza in modo esaustivo, descrivendo i fattori che influenzano i coefficienti, e presentando una serie di valori plausibili per sezioni idrauliche con differenti caratteristiche;
- 3 *Portata liquida in ingresso* alla sezione di monte ed eventuali contributi dovuti a *immissioni laterali* sulla base dei risultati della modellistica idrologica.
- 4 *Condizioni al contorno* per le sezioni estreme del tronco in esame, secondo lo schema di calcolo adottato. Le scelte possibili comprendono:
 - *Known Water Surface Elevation*, per cui si immette un valore noto dell'altezza d'acqua;
 - *Critical depth*, si assume il valore di altezza critica calcolato dal programma;
 - *Normal depth*, prevede la definizione del valore della cadente della linea dei carichi totali, che in prima approssimazione può essere approssimabile con la pendenza del tratto di canale;
 - *Rating curve*, che permette la definizione per punti della scala di deflusso.

Attraverso la discretizzazione dell'equazione di moto nel dominio spaziale, la soluzione viene definita solo in corrispondenza delle sezioni trasversali in cui il corso d'acqua è stato schematizzato e non con continuità su tutto il dominio. Il grado di risoluzione conseguibile deriva quindi dalla densità delle sezioni fluviali rilevate.

Dall'esame dei battenti idrici risultanti dalla modellistica idraulica di moto permanente si evidenziano le eventuali sezioni fluviali insufficienti.

MODELLISTICA IDRAULICA MONODIMENSIONALE IN MOTO VARIO

La *modellistica idraulica di moto vario* consente di trasformare le portate, associate agli eventi di piena definiti nella fase di modellazione idrologica, in livelli idrometrici nelle sezioni fluviali. Nel caso in cui l'alveo inciso e le aree golenali risultino insufficienti al transito dell'onda di piena, la modellistica adottata deve consentire la stima dei volumi tracimati, utile alla definizione del livello di *rischio idraulico* nei territori interessati dalle esondazioni del corso d'acqua.

Per la trasformazione delle portate in livelli viene utilizzato il software HEC-RAS ver. 5.0.7 (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), prodotto e reso disponibile gratuitamente dall'USACE (*United States Army Corps of Engineering*).

Nella simulazione di moto vario il software utilizza il motore di calcolo UNET (Unsteady NETwork model), che risolve le equazioni complete di De S. Venant, discretizzando le equazioni nel dominio spazio-temporale mediante uno schema di risoluzione implicito alle differenze finite. La soluzione viene definita 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). Il grado di risoluzione che si ottiene deriva quindi dalla densità delle sezioni rilevate e dal passo temporale adottato. Si ipotizza che il moto sia *gradualmente variato*, ovvero che, in corrispondenza di ciascuna sezione, vi sia una distribuzione idrostatica delle pressioni. In prossimità di singolarità, dove il moto diventa rapidamente variato (improvvisi variazioni spaziali, ponti, etc.), il programma utilizza in automatico, invece dell'equazione dell'energia, l'equazione dell'equilibrio delle spinte o altre equazioni empiriche.

Si ricorda che le equazioni di De S. Venant descrivono il flusso non stazionario monodimensionale delle correnti a superficie libera e vengono utilizzate per descrivere i fenomeni di trasferimento e laminazione dell'onda di piena. Si riportano rispettivamente l'equazione di continuità per fluidi incomprimibili e l'equazione del moto per le correnti gradualmente variate,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q(x) = 0$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - J$$

in cui:

- A è l' area della sezione liquida [m²];
- Q la portata [m³/s];
- q(x) la portata laterale (positiva se entrante) [m²/s];
- H il carico totale della corrente [m];
- g l'accelerazione di gravità [m/s²];
- U la velocità media della corrente [m/s];
- J le perdite di carico effettivo per unità di lunghezza;
- x l'ascissa corrente lungo l'alveo [m];
- t il tempo [s].

La soluzione delle equazioni di moto monodimensionale gradualmente variato presenta talvolta problemi di stabilità, specialmente in presenza di passaggi da corrente lenta a veloce e viceversa. I principali fattori che contribuiscono all'instabilità della soluzione sono:

- brusche variazioni delle caratteristiche delle sezioni;
- brusche variazioni di pendenza longitudinale;
- caratteristica dell'onda di piena;
- opere come argini, soglie sfioranti, luci a battente, sfioratori che provochino variazioni brusche nella geometria dell'alveo o delle condizioni del moto.

La prima equazione ha subito per questo ulteriori affinamenti al fine di rendere le soluzioni più stabili. In particolare, si vanno ad aggiungere opportune equazioni per la stima delle dissipazioni energetiche, sia di carattere concentrato che distribuito. Assumendo la gradualità spazio-temporale del fenomeno, la perdita di carico effettivo distribuita può essere stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

$$J = \frac{U|U|}{gC^2 R}$$

ove, oltre ai simboli già noti, R è il raggio idraulico e C il coefficiente di resistenza esprimibile nella forma:

$$C = \frac{KsR^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{g}}$$

ove Ks [m^{1/3}s⁻¹] è il coefficiente dimensionale di Gauckler-Strickler.

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

$$\Delta H = \frac{Q^2}{2g} \xi \Delta (\alpha / A^2)$$

ove α è il coefficiente di ragguaglio della energia cinetica e ξ può assumere valori compresi tra 0.1 e 0.8 maggiori nel caso di allargamento della sezione e minori nel caso di restringimento.

I dati da inserire per la costruzione del modello idraulico in HEC-RAS sono: i dati geometrici relativi alle sezioni trasversali ed alle eventuali strutture aggiuntive (ponti, traverse, sfioratori). Per ogni sezione devono essere immessi

inoltre i valori del *coefficiente di scabrezza di Manning*, per il calcolo delle perdite energetiche distribuite, e dei *coefficienti di contrazione/espansione* per quelle concentrate, definiti sulla base di sopralluoghi e confronti diretti con i valori riportati in letteratura. Dall'attendibilità di questi dati dipende maggiormente il grado di risoluzione della simulazione.

Al fine di implementare le simulazioni idrauliche, devono essere definite le *condizioni al contorno* (Boundary Conditions), di monte e di valle, del sistema esaminato. La condizione al contorno di *monte* è nota dalla modellazione idrologica; il software HEC-RAS consente di inserire:

- un idrogramma delle portate;
- un idrogramma dei livelli idrometrici;
- una condizione mista costituita dall'andamento temporale di livelli e portate.

Come condizione al contorno di *valle* possono essere inserite, oltre alle tre precedenti:

- una scala di deflusso;
- un'altezza di moto uniforme.

Una stima accettabile della condizione di valle può essere ricavata attraverso la modellistica idraulica in moto permanente; scelto un set di portate significativo ed avendo a disposizione ulteriori sezioni a valle del tratto di studio, è possibile implementare un modello in moto permanente che consenta di definire, seppure in condizioni stazionarie, la relazione livelli-portate in alveo per la sezione di interesse.

Infine, l'implementazione del codice di calcolo necessita della conoscenza delle *condizioni iniziali* del sistema, in termini di portata liquida, mediante le quali il programma avvia la simulazione in moto vario.

MODELLISTICA IDRAULICA BIDIMENSIONALE IN MOTO VARIO

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 ed 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 sia \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 l componente lungo x e lungo y della velocità mediata sulla verticale e q il termine che tiene di conto di possibili immissioni/rimozioni di portata.

L'equazione della quantità di moto risulta:

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

dove g è l'accelerazione di gravità, ν_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:

$$\nu_t = D h u_s$$

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 0 1.

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:

$$f = 2\omega \sin \phi$$

con ω la velocità angolare della terra e ϕ 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 A.2.1: 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 A-2 1) 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 A-2 1b, c).

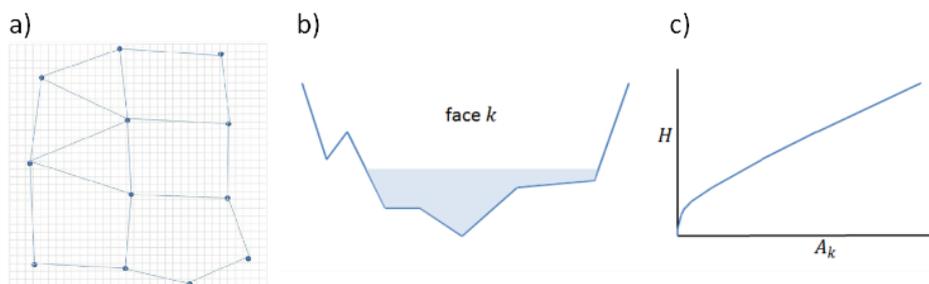


Figura A-2.1: a) Esempio di "sotto-griglia". b) Area bagnata associata ad una faccia della cella di calcolo k. c) Curva di invaso associata ad una cella di calcolo k.

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.