



HydroGeo

Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio

Studio Tecnico Associato Ingg. G. Gazzini, T. Staiano, A. Benvenuti



Via Cardinal Latino, 20

50126 Firenze

Tel 055 6587050 - Fax 055 0676043

e-mail info@studiohydrogeo.it

STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO DI SUPPORTO AL PIANO OPERATIVO COMUNALE DI CARRARA E AGGIORNAMENTO AL PIANO DI GESTIONE RISCHIO ALLUVIONI

RELAZIONE IDROLOGICA - IDRAULICA

COMMITTENTE:



Comune di Carrara

Piazza 2 giugno, 1
54033 Carrara

PROGETTISTI:

ING. ANDREA BENVENUTI

PROGETTO

L 5 2 2

LOTTO

0 1

FASE

S 0 3

DOC

T

ELABORATO

R I I

REV

A

REV.

DATA EMISSIONE

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

A

Dicembre 2016

A.Benvenuti

A.Benvenuti

A.Benvenuti

Indice generale

1.	PREMESSA	3
2.	AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO.....	4
2.1	CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E RILIEVI TOPOGRAFICI.....	4
2.2	DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO	5
3.	APPROCCIO METODOLOGICO.....	6
3.1	MODELLAZIONE ANALITICA.....	6
3.2	MODELLAZIONE QUALITATIVA.....	7
4.	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO	8
4.1	CODIFICA DEI BACINI.....	9
4.2	PARAMETRI IDROLOGICI.....	10
4.3	EVENTI METEORICI	13
4.4	RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA (Q_{MAX}).....	13
5.	IMPLEMENTAZIONE MODELLO IDRAULICO.....	19
5.1	MODELLAZIONE ANALITICA.....	19
5.1.1	Caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua e dell'area di studio	19
5.1.2	Condizioni al contorno	20
5.1.3	Parametri del modello idraulico	21
5.2	MODELLAZIONE QUALITATIVA.....	21
6.	DETERMINAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITÀ IDRAULICA.....	23
	APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA.....	25
	A.1 MODELLISTICA IDROLOGICA.....	25
	A.1.1 Regime pluviometrico – Studio Regionale LSPP.....	25
	A.1.2 Calcolo della pioggia di progetto su un bacino idrografico	25
	A.1.3 Calcolo degli idrogrammi di progetto	26
	A.1.4 Modello di rifiuto del terreno SCS-Curve Number	29
	A.1.5 Modello dell'idrogramma unitario SCS.....	31
	A.1.6 Modello di stima del deflusso di base	31
	A.2 MODELLISTICA IDRAULICA	32
	A.2.1 Modellistica Monodimensionale Mike 11	32
	A.2.1.1 Modulo Idrodinamico (Hd)	32
	A.2.2 Descrizione Delle Condizioni Di Moto Simulate.....	32
	A.2.3 Equazioni Generali Di De Saint Venant.....	33
	A.2.4 Simulazione Delle Correnti Veloci Con L'approccio Dell'onda Dinamica.....	33
	A.2.5 Approssimazione Dell'onda Diffusiva.....	34
	A.2.6 Descrizione In Corrispondenza Di Strutture	34
	A.2.7 Resistenza D'attrito.....	34
	A.2.8 Condizioni Iniziali	35
	A.2.9 Metodo Di Soluzione e Condizioni al Contorno	35
	A.2.10 Modellistica bidimensionale Mike 21	35
	A.2.11 Modulo Idrodinamico (HD).....	35
	A.2.12 Modellistica Mike Flood	38
	ALLEGATO 1: RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDRAULICA	39

Indice delle tabelle

Tabella 2-1: Elenco dei corsi d'acqua oggetto di studio.	4
Tabella 2-2: Anno in cui sono stati effettuati i rilievi topografici per gruppi di corsi d'acqua.	4
Tabella 4-1: Riepilogo dei modelli idrologici utilizzati nelle diverse simulazioni effettuate.	8
Tabella 4-2: Elenco dei bacini e degli input idrologici alla modellazione idraulica. CM identifica le condizioni al contorno di monte, CP i contributi puntuali inseriti lungo l'asta fluviale e CD i contributi distribuiti.	10
Tabella 4-3: Tabella di associazione tra formazione geologica e Ks.	11
Tabella 4-4: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici utilizzati nella modellazione afflussi-deflussi di Nash e nel modello di infiltrazione a soglia Ia, Ks.	12
Tabella 4-5: Riepilogo parametri idrologici utilizzati nella modellazione afflussi-deflussi SCS-UH e modello di infiltrazione CN.	12
Tabella 4-6: Portate massime [mc/s] TR 30 anni per il modello Carrione-Lavello.	14
Tabella 4-7: Portate massime [mc/s] TR 200 anni per il modello Carrione-Lavello.	15
Tabella 4-8: Portate massime [mc/s] TR 500 anni per il modello Carrione-Lavello.	16
Tabella 4-9: Portate massime [mc/s] TR 30 anni per il modello Maestra-Parmignola.	17
Tabella 4-10: Portate massime [mc/s] TR 200 anni per il modello Maestra-Parmignola.	17
Tabella 4-11: Portate massime [mc/s] TR 500 anni per il modello Maestra-Parmignola.	18
Tabella 5-1: Riepilogo dei tombamenti nell'abitato di Carrara.	20
Tabella 5-2: Valori del coefficiente di Manning in base alla tipologia di uso del suolo.	21

1. PREMESSA

Lo Studio Hydrogeo Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio è stato incaricato dal Comune di Carrara di redigere lo "Studio Idrologico-Iraulico di supporto al Piano Operativo Comunale di Carrara e aggiornamento al Piano di Gestione Rischio Alluvioni".

Ai sensi del DPGR 53R/2011, vanno considerati gli elementi idrologico-idraulici necessari per caratterizzare la probabilità di esondazione dei corsi d'acqua in riferimento al reticolo d'interesse, definendo le pericolosità idrauliche come segue:

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

Ai fini dell'aggiornamento del PGRA *D.Lgs. 49/2010* le aree saranno classificate come segue:

- Aree a pericolosità da alluvione elevata (P3), che risultano allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- Aree a pericolosità da alluvione media (P2), con aree allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni;
- Aree a pericolosità da alluvione bassa (P1), caratterizzate da eventi alluvionali con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni.

Il presente studio si propone di definire la pericolosità idraulica all'interno del territorio comunale, valutando gli input idrologici e modellando i corsi d'acqua costituenti la rete idraulica superficiale.

L'impostazione dello studio prevede, in questa fase di aggiornamento del quadro conoscitivo, un unico scenario caratterizzante lo stato attuale del territorio in termini di pericolosità idraulica.

Il lavoro si articola nelle seguenti fasi operative:

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

2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO

2.1 CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E RILIEVI TOPOGRAFICI

L'ambito d'indagine comprende i principali corsi d'acqua che concorrono a definire il livello di pericolosità nell'area oggetto di studio. Come reticolo di riferimento è stato utilizzato quello pubblicato dalla Regione Toscana.

Nello specifico è stato scelto di sviluppare un modello idrologico idraulico analitico per le aste fluviali che interessano le aree urbane ed in particolare le zone oggetto di previsioni urbanistiche.

Si riporta di seguito l'elenco dei corsi d'acqua studiati analiticamente.

Nome del bacino	Nome del corso d'acqua	
Bacino Torrente Carrione	Torrente Carrione	
	Fosso di Monterosso	
	Fosso del Bugliolo	
	Fosso della Foce	
	Fosso dell'INPS	
	Fosso del Rio	
	Canale del Rio	
	Fosso del Burro	
	Aff. sx Torrente Carrione	Affluente sx Fosso del Burro
	Fosso di San Ceccardo	
	Fosso di Ficola	
	Fosso del Topo	
	Fosso di Bonascola	
	Fosso di Botria	
	Fosso di Monte Olivero	
	Fosso di Acquafiora	
	Fosso di S. Martino 1	
	Fosso di S. Martino 2	
	Fosso di Stabbio	
	Canale di Stabbio	
	Fosso Valenza	
	Canale di Fossola	
Fosso di Ficocchio		
Fosso della Costaccia		
Bacino Torrente Lavello	Torrente Lavello	
	Fosso di Belvedere 2	
Bacino Torrente Parmignola	Torrente Parmignola	
	Fosso di Bocco Barbuto	
Bacino Fosso Maestra	Fosso Maestra	
	Canale di Bolfano	
	Fosso dei Tre Canali	
	Fosso dei Due Canali	
	Fosso Macchia	
	Fosso Carlone 1	
	Fosso Carlone 2	

Tabella 2-1: Elenco dei corsi d'acqua oggetto di studio.

I corsi d'acqua oggetto di studio analitico sono riportati in *Tavola 3A – Modello Idraulico Carrione e Lavello – Planimetria* e *Tavola 3B – Modello Idraulico Parmignola e Maestra – Planimetria*.

La caratterizzazione geometrica delle aste fluviali di cui sopra deriva da una serie di rilievi topografici effettuati tra il 2008 e il 2016. Nella seguente tabella sono riportati per gruppi di corsi d'acqua l'anno/i del rilievo topografico.

Corsi d'acqua	Anno Rilievo
Torrente Carrione	2015
Affluenti Torrente Carrione	2016
Comprensorio del Fosso Maestra	2008
Torrente Parmignola e affluenti	2008, 2013
Torrente Lavello e affluenti	2014, 2016

Tabella 2-2: Anno in cui sono stati effettuati i rilievi topografici per gruppi di corsi d'acqua.

Al fine di completare l'analisi delle aree allagate per tutta l'estensione del territorio comunale, sulla restante parte del reticolo idrografico preso in esame è stato effettuato uno studio di tipo qualitativo.

2.2 DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO

Oltre ai dati necessari alla caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua, nell'ambito del presente lavoro sono stati consultati, utilizzati ed elaborati una serie di dati geografici, resi disponibili dalle Amministrazioni sovracomunali che li hanno realizzati, o ottenuti dall'analisi del materiale di studi e/o progetti svolti. In particolare sono stati utilizzati i seguenti dati:

- LIDAR (1x1 m) del Ministero dell'Ambiente, Fonte dei dati: Regione Toscana – “Rilievi LIDAR”;
- Shapefile della Carta Geologica Regionale. Fonte: Regione Toscana - DG Governo del Territorio - Sistema Informativo Territoriale ed Ambientale. Il dataset “Continuum Geologico - aggiornamento del 15/11/2013” è rilasciato con licenza CC BY 3.0 IT Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003).
- Shapefile della Carta Geologica Regionale. Fonte: Regione Liguria, per la parte che ricade all'interno del bacino del Torrente Parmignola. Lo strato informativo è ottenuto dal materiale del progetto “Studio Idraulico per la valutazione delle aree inondabili dal Torrente Parmignola e dai fossi del comprensorio della Fossa Maestra nel Comune di Carrara” redatto dallo Studio Physis nel Dicembre 2008. Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003).
- Shapefile dell'Uso e Copertura del Suolo. Fonte: Regione Toscana - Il dataset “Uso e copertura del suolo 2007-2013” è rilasciato con licenza CC BY 3.0 IT. Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003);
- Shapefile dell'Uso e Copertura del Suolo. Fonte: Regione Liguria, per la parte che ricade all'interno del bacino del Torrente Parmignola. Lo strato informativo è ottenuto dal materiale del progetto “Studio Idraulico per la valutazione delle aree inondabili dal Torrente Parmignola e dai fossi del comprensorio della Fossa Maestra nel Comune di Carrara” redatto dallo Studio Physis nel Dicembre 2008. Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003);
- Shapefile dei valori del Curve Number (CN) per la Regione Toscana redatto dal Prof. Ing. Fabio Castelli nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione Scientifica RT - UniFi “Attività B2: Modellazione idrologica caso pilota. Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC”. Il dataset è rilasciato in formato esri-shapefiles e dbf. I dati sono espressi nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Ovest (EPSG:3003);
- Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10000 e 1:2000 ove presente. Fonte: Regione Toscana - Carta Tecnica Regionale;
- Shapefile del Reticolo Idrografico, approvato da Regione Toscana con Legge regionale 27 dicembre 2012, n. 79; Fonte dei dati: Regione Toscana <http://www.regione.toscana.it/-/consorzi-di-bonifica-reticolo-idrografico-e-di-gestione>;
- Tavole di dettaglio del reticolo idrografico del Torrente Carrione ed affluenti in formato .pdf, relative al lavoro “Studi, verifiche di fattibilità e progetti preliminari per la definizione del programma di interventi per l'equilibrio idrogeologico del bacino del Torrente Carrione a seguito dell'evento alluvionale del Settembre 2003” redatto nel Luglio 2004 dal Prof. Ing. Carlo Viti;
- Griglie dei parametri caratteristici delle LSPP, a ed n, pubblicate dalla Regione Toscana nell'ambito dello Studio di Regionalizzazione delle Precipitazioni. Fonte: Regione Toscana <http://www.regione.toscana.it/-/nuovi-dati-sulla-regionalizzazione-delle-precipitazioni>;
- Implementazione modello idrologico distribuito per la Toscana-Bacino Toscana Nord – Accordo di collaborazione Scientifica tra Regione Toscana e Dipartimento Di Ingegneria Civile E Ambientale dell'Università Degli Studi di Firenze per attività di Ricerca per La mitigazione del Rischio Idraulico nella Regione Toscana – Prof. Fabio Castelli;
- Studi idrologici ed idraulici del Torrente Carrione a seguito dell'evento alluvionale del Novembre 2012 – Commissario Delegato ex L. 228/2012;
- Studio idraulico del Torrente Carrione con analisi dei possibili interventi per la mitigazione del rischio – DICCA Università di Genova Prof. Seminara.

3. APPROCCIO METODOLOGICO

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

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

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

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

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

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

Data la vastità dell'area oggetto di studio, sono stati utilizzati due approcci modellistici per la caratterizzazione delle pericolosità idrauliche: un approccio "analitico", che prevede una modellazione idraulica accoppiata 1D-2D di dettaglio con input idrologici derivanti dall'analisi idrologica; ed un approccio "qualitativo" che prevede una modellazione 2D estesa a tutto il territorio comunale in cui gli input idrologici impiegati sono i dati di pioggia.

3.1 MODELLAZIONE ANALITICA

La modellazione analitica prevede l'implementazione di due modelli idraulici distinti, ognuno dei quali ricomprende i corsi d'acqua tra i quali sussistono fenomeni di mutua interazione idraulica. Per questi modelli l'input idrologico è caratterizzato da idrogrammi di piena rappresentati da immissioni puntuali o distribuite a seconda delle caratteristiche dell'asta fluviale analizzata. Tale approccio modellistico, in cui viene studiata in dettaglio la propagazione dell'onda di piena lungo il reticolo fluviale ed i fenomeni esondativi sulle aree contermini, è definito "Modellazione Analitica".

Il primo dei due modelli idraulici sviluppati comprende i corsi d'acqua afferenti al bacino del Torrente Carrione e del Torrente Lavello (vedi Tabella 2-1) e verrà in seguito indicato con la dicitura "CL". Per la parte relativa al Torrente Carrione il modello si estende da alcune centinaia di metri a monte dell'abitato di Carrara fino alla foce, comprendendo anche gli affluenti di destra e sinistra idraulica. Per la parte relativa al Torrente Lavello viene simulata l'asta principale ed il suo maggiore affluente in destra idraulica, il Fosso Belvedere 2 (Tavola 3A – Modello Idraulico Carrione e Lavello – Planimetria).

Il secondo modello idraulico ricomprende i corsi d'acqua afferenti al bacino del Torrente Parmignola e del Fosso Maestra (vedi Tabella 2-1) e verrà in seguito indicato con la dicitura "MP". Per il Torrente Parmignola viene simulato il tratto che va dall'immissione del Fosso di Bocco Barbuto, a monte dell'attraversamento della Via Aurelia e della linea ferroviaria, fino alla foce. Con esso viene simulato anche il comportamento idraulico del Fosso di Bocco Barbuto. La modellazione relativa al Fosso Maestra si estende dall'area a monte della ferrovia fino alla foce e ricomprende anche i principali affluenti (Tavola 3B – Modello Idraulico Parmignola e Maestra – Planimetria).

Gli scenari simulati prevedono, per entrambi i modelli, eventi con tempi di ritorno pari a 30, 200 e 500 anni. Per il modello CL le durate di pioggia simulate sono 0,5, 1,0 e 3,25 ore, risultanti dalla modellistica idrologica le durate critiche che massimizzano le portate di piena dei bacini del Torrente Carrione, del Torrente Lavello e dei corsi d'acqua minori. Per il modello MP le durate di pioggia simulate sono pari a 1,0, 2,5 e 6,0 ore. La durata più breve massimizza i picchi di piena associati agli affluenti di monte del comprensorio del Fosso

Maestra, la seconda quelli del Torrente Parmignola e del bacino del Fosso Maestra alla sezione di chiusura, con l'ultima si massimizzano i volumi di piena del sistema. Quest'ultimo scenario è stato simulato per valutare il comportamento del comprensorio del Fosso Maestra quando lo scarico alla foce è impedito in occasione di forte mareggiate, in cui il deflusso verso mare è mantenuto dalla presenza di un impianto idrovoro.

3.2 MODELLAZIONE QUALITATIVA

Al fine di completare l'analisi delle aree allagate su tutta l'estensione del territorio comunale, è stato implementato un modello idraulico bidimensionale a carattere diffuso.

Quali input idrologici al modello sono stati utilizzati i dati di pioggia lorda.

Le aree allagabili risultanti da tale approccio modellistico serviranno a dare indicazioni sulle pericolosità idrauliche in tutte quelle zone in cui non è stato possibile effettuare lo studio analitico di dettaglio. Tale approccio non prevede uno studio dettagliato della propagazione della piena lungo il reticolo fluviale ed è definito "*Modellazione Qualitativa*".

Lo scenario di riferimento per l'implementazione del modello qualitativo è il tempo di ritorno TR 200 anni. Al fine di massimizzare gli effetti sia per le aree montane che per i fondivalle sono stati simulati eventi meteorici di durata pari a 1.0 e 3.0 ore.

4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO

I modelli idrologici utilizzati consentono la determinazione dei contributi idrologici al reticolo idraulico oggetto di studio analitico e sono composti da un modello per il calcolo delle perdite del bacino idrografico (modello di infiltrazione) e da un modello afflussi-deflussi per la trasformazione degli input pluviometrici, depurati dalle perdite succitate, in idrogrammi sollecitanti il reticolo idraulico.

Data la variabilità delle caratteristiche morfologiche ed idrologiche del territorio in esame, ed essendo disponibili diversi strumenti di modellazione idrologica, sono stati utilizzati tre diversi modelli idrologici a seconda delle caratteristiche del bacino in esame e dell'evento oggetto di analisi. Nello specifico per l'ottenimento degli idrogrammi di piena si sono utilizzati i seguenti modelli idrologici:

- MOBIDIC: modello idrologico a parametri distribuiti (Castelli et al., 2009);
- Modello di Nash a parametri concentrati con modello di infiltrazione asintotico a soglia (Nash, 1957; Rodriguez-Iturbe e Rinaldo, 1997);
- Modello SCS-UH a parametri concentrati con modello di infiltrazione Curve Number (Soil Conservation Service, 1972).

Il modello a parametri distribuiti MOBIDIC è stato impiegato per determinare gli idrogrammi di piena per le aste fluviali afferenti al bacino idrografico del Torrente Carrione. Tale scelta è supportata dallo studio redatto dal Prof. Ing. Fabio Castelli nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione Scientifica RT – UniFi “Attività B2: Modellazione idrologica caso pilota. Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC”, per il quale è stato appunto utilizzato il modello MOBIDIC per la determinazione delle portate di piena sul Torrente Carrione, che risulta massimizzata per una durata dell'evento di pioggia pari a 3.25 ore.

Le durate di pioggia che massimizzano le portate di piena per gli affluenti del Torrente Carrione variano tra 0.5 e 1.0 ore. A scopo cautelativo, per tali durate di pioggia, sono stati calcolati i contributi idrologici anche attraverso il modello di Nash a parametri concentrati con modello di infiltrazione a soglia. Tale approccio modellistico è stato impiegato anche per la determinazione degli idrogrammi relativi al Torrente Parmignola ed al Fosso di Bocco Barbuto (durata di pioggia critica pari a circa 2.5 ore), le cui caratteristiche geomorfologiche di torrenti montani sono simili a quelle degli affluenti del Torrente Carrione.

Il modello di infiltrazione asintotico a soglia richiede la stima di due parametri:

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

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

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

I bacini del Fosso Maestra e del Torrente Lavello sono caratterizzati da una ridotta parte montana adiacente ad una più ampia zona largamente pianeggiante e vengono ricondotti alla categoria “acque basse” o, più propriamente, di bonifica essendo solo la Fossa Maestra sotto idrovora e solo in determinate situazioni.

Il modello d'infiltrazione utilizzato è il Curve Number (CN), secondo cui le perdite dipendono dal parametro adimensionale CN stimato in funzione delle caratteristiche geopedologiche del bacino e dall'uso del suolo dello stesso. Per la trasformazione afflussi-deflussi è stato impiegato il modello SCS-Unit Hydrograph, il quale dipende da un unico parametro t_{lag} , proporzionale a tempo di corrivazione del bacino.

La modellazione idrologica dei bacini delle “acque basse” è stata effettuata in modo da ottenere dei picchi di piena in linea con quanto riportato nello studio redatto dal Prof. Ing. Fabio Castelli nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione Scientifica RT – UniFi “Attività B3: Implementazione modello idrologico distribuito per la Toscana – Bacino Toscana Nord”. In tale studio vengono infatti indicate delle relazioni che legano area del bacino scolante e portata di picco $Q_{max}(TR)$ al variare del tempo di ritorno dell'evento. È stata quindi effettuata una procedura di calibrazione sul parametro di capacità di ritenzione del suolo al fine di ottenere delle $Q_{max}(TR)$ equivalenti a quelle ricavate dalle relazioni riportate sul succitato studio.

In Tabella 4-1 si riporta un riepilogo dei modelli idrologici utilizzati per il calcolo degli idrogrammi di piena da impiegare nelle diverse simulazioni idrauliche (è necessario evidenziare che agli affluenti di destra del Torrente Carrione appartengono anche il Fosso di Torano ed il Torrente Gagnana che sono però esclusi dalla modellistica idraulica e figurano soltanto come input idrologici puntuali nel Torrente Carrione).

Modello Idraulico	Nome corso d'acqua	TR [anni]	Durate di pioggia [ore]				
			0.50	1.00	2.50	3.25	6.00
CL	Torrente Carrione	30, 200, 500	MOBIDIC	MOBIDIC	x	MOBIDIC	x
	Aff. sx Torrente Carrione	30, 200, 500	MOBIDIC - NASH,IA,Ks	MOBIDIC - NASH,IA,Ks	x	MOBIDIC	x
	Aff. dx Torrente Carrione	30, 200, 500	MOBIDIC - NASH,IA,Ks	MOBIDIC - NASH,IA,Ks	x	MOBIDIC	x
	Torrente Lavello ed affluenti	30, 200, 500	SCS-UH,CN	SCS-UH,CN	x	SCS-UH,CN	x
MP	Torrente Parmignola ed aff.	30, 200, 500	x	NASH,IA,Ks	NASH,IA,Ks	x	NASH,IA,Ks
	Fosso Maestra ed aff.	30, 200, 500	x	SCS-UH,CN	SCS-UH,CN	x	SCS-UH,CN

Tabella 4-1: Riepilogo dei modelli idrologici utilizzati nelle diverse simulazioni effettuate.

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

A valle della parametrizzazione idrologica sono state determinate le piogge insistenti su ogni bacino considerato (piogge lorde, non depurate dalle perdite), come riportato al Paragrafo 4.3.

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

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

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e α , β , γ sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

Il coefficiente di ragguaglio dipende quindi dallo scenario idrologico considerato.

Nello specifico, per le simulazioni che hanno mirato alla massimizzazione delle portate sul Torrente Carrione (durata di pioggia pari a 3.25 ore) è stato impiegato un K_r derivante da un areale pari all'estensione del bacino idrografico del Torrente Carrione. Per le simulazioni tese a massimizzare i picchi di piena degli affluenti del Torrente Carrione è stato impiegato un K_r pari ad 1.

Per il modello idraulico del Fosso Maestra e del Torrente Parmignola è stato impiegato, a scopo cautelativo, un K_r pari ad 1.

4.1 CODIFICA DEI BACINI

I bacini afferenti all'area di studio sono stati suddivisi in sottobacini e studiati dal punto di vista idrologico tenendo conto dei tratti fluviali simulati idraulicamente e della presenza di contributi laterali al reticolo di interesse. Per ogni sottobacino è stato quindi determinato un input idrologico di natura puntuale o distribuita a seconda delle caratteristiche del bacino analizzato. Tali input sono stati classificati da un codice alfanumerico di cinque caratteri per cui i primi due si riferiscono al modello idraulico ("CL" per il modello Carrione e Lavello e "MP" per il modello Fosso Maestra e Parmignola) ed gli altri tre alla progressione numerica da monte verso valle. I codici che iniziano per "P" si riferiscono ad immissioni puntuali relative ad idrovore.

Nella Tabella 4-2 *Errore*. L'origine riferimento non è stata trovata. si riporta l'elenco degli input idrologici (vedi *Tavola 3A – Modello Idraulico Carrione e Lavello – Planimetria* e in *Tavola 3B – Modello Idraulico Maestra e Parmignola – Planimetria* per la localizzazione planimetrica delle immissioni) suddiviso per bacini e corsi d'acqua. L'analisi idrologica è stata infatti svolta, per gli affluenti del Torrente Carrione, suddividendo il bacino principale in diversi bacini nei quali sono stati raggruppati corsi d'acqua con stesse caratteristiche geomorfologiche o scolanti sulla stessa asta fluviale principale (vedi *Tavole 2A, 2B, 2C, 2D – Idrologia*). Quando in seguito ci si riferirà a "bacini" si intenderanno gli aerali su cui è stato suddiviso il territorio (vedi *Tavole 2A, 2B, 2C, 2D – Idrologia*) che sono a loro volta composti da "sottobacini", associati a ciascun corso d'acqua, per ognuno dei quali è stato determinato un idrogramma di piena come input idrologico alla modellazione idraulica.

Bacino	Tipo immissione	Sezione	Codice	Corso d'acqua		
Bacino Torrente Carrione	Bacino Carrione alto	CM	00862_15	CL001	Torrente Carrione	
	Bacino Fosso di Torano	CP	00795_15	CL002	Fosso di Torano	
	Bacino Torrente Gragnana	CP	00727_15	CL003	Torrente Gragnana	
		CM	00011_16	CL004	Fosso di S. Martino 1	
		CM	00052_16	CL005	Fosso di S. Martino 2	
	Bacino di S. Martino	CM	00021_16	CL006	Fosso di Stabbio	
		CM	00024_16	CL007	Canale di Stabbio	
		CM	00076_16	CL008	Fosso di Monterosso	
		CM	00018PC16	CL009	Fosso del Bugliolo	
		CM	00039_16	CL010	Fosso della Foce	
		CM	00031_16	CL011	Fosso dell'INPS	
		CM	00029_16	CL012	Fosso del Rio	
	Bacino del Rio	CD	00006PC16 - 00001BC16	CL013	Interbac. Canale del Rio	
		CM	00010_16	CL014	Fosso del Burro	
		CM	00002_16	CL015	Aff. Fosso del Burro	
		CM	00008_16	CL016	Fosso di S. Ceccardo	
		CM	00046PB16	CL017	Fosso di Ficola	
		Bacino del Burro	CM	00165_16	CL018	Canale di Fossola
			CM	00090_16	CL019	Fosso di Valenza
			CD	00165_16 - 00001_16	CL020	Interbac. valle Canale di Fossola
		Bacino Fosso di Ficola	CM		CL021	Fosso del Topo
			CM	00082BC16	CL022	Fosso di Bonascola
	CM		00053_16	CL023	Fosso di Spondarella	
	CM		00050_16	CL024	Fosso di Botria	
	CM		00173_16	CL025	Fosso di Monte Olivero	
	CP			CL026	Fosso di Acquafiora	
	CP			CL027	Fosso di Montegreco	
	CD		00098PC16 - 00004BC16	CL028	Interbac. urbano Fosso Monte Olivero	
	CD		00098PC16 - 00004BC16	CL029	Interbac. collinare Fosso Monte Olivero	
	CM		00191_16	CL030	Fosso di Ficocchia	
Bacino di Bonascola	CM	00031_16	CL031	Fosso di Costaccia		
	CM	00276_14	CL032	Torrente lavello		
	CM	00116PB16	CL033	Fosso di Belvedere 2		
	CD	00202_14 - 00002_14	CL034	Interbac. Torrente Lavello		
	CP	00142_14	P001	Idrovora Torrente Lavello		
	CP	00100_14	P002	Idrovora Torrente Lavello		
	Bacino Fosso Maestra	CM	00271PC08	MP001	Fosso Maestra	
		CM	00200PA08	MP002	Fosso Tre Canali	
		CM	00101PC08	MP003	Canale di Bolfano	
		CD	00177_08 - 00136PB08	MP004	Interbac. monte Fosso Tre Canali	
CD		00134_08 - 00007_08	MP005	Interbac. valle Fosso Tre Canali		
CD		00268_06 - 00156PB06	MP006	Interbac. monte Fosso Maestra		
CM		00137_06	MP007	Fosso Due Canali		
CD		00137_06 - 00004_06	MP008	Interbac. Fosso Due Canali		
CD		00156PC06 - 00012_06	MP009	Interbac. valle Fosso Maestra		
CM		00138PB08	MP010	Fosso Macchia		
CD		00120PC03 - 00002_08	MP011	Interbac. Fosso Macchia		
CM		00189_08	MP012	Fosso Carlone 1		
CM		00051_08	MP013	Fosso Carlone 2		
CD		00102PC08 - 00005_08	MP014	Interbac. Fosso Carlone 1		
CP		00069_06	MP015	Aff. Valle Fosso Maestra		
CP		00038_06	MP016	Fosso Paradiso		
CP		00009_06	P003	Idrovora Fosso Maestra		
Bacino Torrente Parmignola		CM	00285_08	MP017	Torrente Parmignola	
	CM	00119_08	MP018	Fosso di Bocco Barbutto		

Tabella 4-2: Elenco dei bacini e degli input idrologici alla modellazione idraulica. CM identifica le condizioni al contorno di monte, CP i contributi puntuali inseriti lungo l'asta fluviale e CD i contributi distribuiti.

4.2 PARAMETRI IDROLOGICI

Per la caratterizzazione e definizione dei parametri idrologici impiegati nella modellazione attraverso MOBIDIC, si rimanda allo studio redatto dal Prof. Ing. Fabio Castelli nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione Scientifica RT – UniFi "Attività B2: Modellazione idrologica caso pilota. Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC".

Per tutti quei sottobacini i cui corsi d'acqua sono stati studiati idrologicamente per mezzo del modello di Nash, è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler (si veda l'Appendice A: Modellistica idrologico-idraulica per maggiori dettagli e la Tavola 2D – Idrologia – Gerarchizzazione). Per i reticoli di ordine almeno pari al secondo, sono stati quindi ottenuti i parametri geomorfologici k ed n .

Per gli altri sottobacini, caratterizzati da una singola asta fluviale, è stato considerato un n equivalente a quello del sottobacino limitrofo più simile per area e struttura geomorfologica (ad esempio simile lunghezza dell'asta principale o forma del bacino). Per il calcolo del parametro k è stato determinato un tempo di corrivazione t_c attraverso le formulazioni di Giandotti, Kirpich, Ventura e Pasini.

Dal tempo di corrivazione è possibile ottenere il valore di $t_{lag} = t_c/1.6$, che a sua volta è ottenibile dal prodotto di n e k . Si ottiene così $k = t_c/(1.6 \cdot n)$.

Lo stesso approccio è stato impiegato per gli interbacini, fatta eccezione per il calcolo del tempo di corrivazione degli interbacini urbani, per cui t_c è stato calcolato come somma del tempo di accesso alla tubazione e del tempo di percorrenza lungo di essa.

Per la stima delle perdite è stato adottato il metodo di infiltrazione asintotico a soglia. Il parametro la (mm), su ogni bacino, è stato determinato in funzione della percentuale di area boscata presente nel bacino considerato (derivata dall'Uso e Copertura del Suolo, vedi *Tavola 2B – Idrologia – Aree Boscate*).

Il parametro Ks (mm/h) è stato determinato a partire dalla Carta Geologica Regionale assegnando ad ogni formazione geologica un coefficiente di infiltrazione, secondo quanto riportato in Tabella 4-3 e calcolando un coefficiente medio per ogni bacino (vedi *Tavola 2A – Coefficiente di Infiltrazione a Saturazione*).

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi adottato è quello di Nash, i cui parametri n e k sono ricavati in funzione della classificazione geomorfologica di Horton-Strahler, per i corsi d'acqua con aste di ordine maggiore di 2, o con la suddetta metodologia per gli altri corsi d'acqua.

I bacini del Fosso Maestra e del Torrente Lavello, considerati come “acque basse”, sono stati studiati attraverso il modello SCS Curve Number per la stima delle perdite idrologiche ed il modello di trasformazione afflussi-deflussi dell'idrogramma unitario SCS (vedi *Tavola 2C – Idrologica – Planimetria del Curve Number*).

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

Tabella 4-3:Tabella di associazione tra formazione geologica e Ks

I risultati delle parametrizzazioni appena descritte sono riportati in Tabella 4-4.

Nome Sottobacino	k [ore]	n [-]	la [mm]	Ks [mm/h]	A [kmq]
Fosso di S. Martino 1	0.099	2.060	15.234	1.382	0.166
Fosso di S. Martino 2	0.080	2.359	15.234	1.382	0.071
Fosso di Stabbio	0.067	1.100	15.234	1.382	0.092
Canale di Stabbio	0.067	1.100	15.234	1.382	0.024
Fosso di Monterosso	0.126	2.224	12.593	1.683	0.216
Fosso del Bugliolo	0.126	2.224	12.593	1.683	0.277
Fosso della Foce	0.175	2.498	12.593	1.683	0.689
Fosso dell'INPS	0.070	1.625	12.593	1.683	0.064
Fosso del Rio	0.067	3.031	12.593	1.683	0.181
Interbac. Canale del Rio	0.100	2.862	6.560	0.748	0.353
Fosso del Burro	0.057	2.722	18.748	1.539	0.116
Aff. Fosso del Burro	0.057	2.722	18.748	1.539	0.030
Fosso di S. Ceccardo	0.057	2.722	18.748	1.539	0.025
Fosso di Ficola	0.174	2.790	17.506	1.507	1.108
Canale di Fossola	0.162	3.042	16.108	1.304	1.416
Fosso di Valenza	0.219	2.624	21.907	1.471	1.559
Interbac. valle Canale di Fossola	0.125	3.135	16.108	1.304	0.986
Fosso del Topo	0.096	2.483	14.644	0.939	0.168
Fosso di Bonascola	0.114	2.469	14.644	0.939	0.397
Fosso di Spondarella	0.064	2.986	14.644	0.939	0.170
Fosso di Botria	0.190	2.784	14.644	0.939	0.595
Fosso di Monte Olivero	0.088	2.593	14.644	0.939	0.388
Fosso di Acquafiora	0.094	2.060	14.644	0.939	0.259
Fosso di Montegreco	0.103	2.539	14.644	0.939	0.295
Interbac. urbano Fosso Monte Olivero	0.122	2.816	3.591	0.025	0.657
Interbac. collinare Fosso Monte Olivero	0.086	2.816	7.738	3.402	0.213
Fosso di Ficocchia	0.103	2.840	8.815	4.571	0.100
Fosso di Costaccia	0.103	2.840	8.815	4.571	0.137
Torrente Parmignola	0.500	2.940	17.700	1.849	11.245
Fosso di Bocco Barbuto	0.229	2.920	17.700	1.849	2.404

Tabella 4-4: Tabella di riepilogo dei parametri idrologici utilizzati nella modellazione afflussi-deflussi di Nash e nel modello di infiltrazione a soglia la, Ks.

Per quanto riguarda il Fosso Maestra ed il Torrente Lavello la cui analisi idrologica è stata implementata sul software HEC-HMS 4.2, il riepilogo degli input idrologici è riportato in Tabella 4-5.

Nome Sottobacino	t_{lag} [ore]	CN [-]	A [kmq]
Torrente Lavello (monte)	0.783	88.190	2.192
Fosso di Belvedere 2	0.642	83.400	1.730
Interbac. Torrente Lavello	1.967	87.117	1.904
Fosso Maestra (monte)	0.314	80.130	1.231
Fosso Tre Canali			0.345
Canale di Bolfano	0.438	81.650	1.118
Interbac. monte Fosso Tre Canali			0.279
Interbac. valle Fosso Tre Canali	0.677	87.850	0.189
Interbac. monte Fosso Maestra	0.538	88.220	0.119
Fosso Due Canali	0.715	84.160	0.808
Interbac. Fosso Due Canali	1.216	87.100	1.057
Interbac. valle Fosso Maestra	0.976	80.910	0.350
Fosso Macchia	1.146	82.760	0.565
Interbac. Fosso Macchia	0.809	79.980	0.249
Fosso Carlone 1	0.935	78.720	0.434
Fosso Carlone 2	0.729	74.680	0.354
Interbac. Fosso Carlone 1	0.670	75.960	0.163
Aff. Valle Fosso Maestra	1.487	83.080	0.607
Fosso Paradiso	0.986	81.950	0.504

Tabella 4-5: Riepilogo parametri idrologici utilizzati nella modellazione afflussi-deflussi SCS-UH e modello di infiltrazione CN.

4.3 EVENTI METEORICI

Gli eventi meteorici studiati fanno riferimento a tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni. Le durate degli eventi sono state scelte in modo da massimizzare i picchi di portata dei diversi bacini che interessano il territorio oggetto di analisi.

In generale, gli affluenti di destra e sinistra del Torrente Carrione hanno durate di pioggia critiche che variano da 0.5 a 1.0 ore, mentre per il Torrente Carrione la pioggia critica ha una durata pari a 3.25 ore. Il Torrente Lavello, alla sezione di chiusura, ha anch'esso una durata di pioggia critica intorno alle 3.00-3.25 ore.

Per il Torrente Parmignola, la durata critica alla sezione di chiusura è pari a 2.5 ore, tale durata di pioggia massimizza anche il picco di portata per il bacino della Fossa Maestra, mentre il Fosso di Bocco Barbutto ed i corsi d'acqua situati a monte del sedime ferroviario massimizzano le portate per durate di pioggia intorno ad 1.0 ora. Per il modello MP sono state inoltre implementate simulazioni con durata di pioggia pari a 6.0 ore, ipotizzando la chiusura delle portelle alla foce del Fosso Maestra e l'azionamento della pompa idrovora ($Q = 5.65 \text{ mc/s}$). La chiusura delle portelle si verifica in occasione di forti mareggiate ed è finalizzata ad evitare l'ingressione marina lungo l'asta fluviale. Pertanto il deflusso è assunto libero per eventi con durata di pioggia 1.0 e 2.5 ore ed ostacolato, con azionamento della pompa idrovora, per la simulazione con durata di pioggia pari a 6.0 ore

Nello specifico gli eventi meteorici studiati per i due modelli idraulici CL e MP sono pertanto:

1. Modello Carrione-Lavello: Tr 30, 200 e 500 anni, durate 0.5, 1.0 e 3.25 ore;
2. Modello Maestra-Parmignola: Tr 30, 200 e 500 anni, durate 1.0, 2.5 e 6.0 ore.

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

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

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

con: h = altezza di pioggia [mm]; t = durata [ore], a e n parametri caratteristici per i tempi di ritorno considerati.

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

4.4 RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA (Q_{MAX})

Per ognuno degli eventi meteorici, sono stati determinati i rispettivi idrogrammi di piena di cui si riportano in Tabella 4-6, Tabella 4-7, Tabella 4-8, Tabella 4-9, Tabella 4-10 e Tabella 4-11 i valori di portata massima, Q_{max} (mc/s).

Portate massime per il modello Torrente Carrione e Torrente Lavello per TR 30 anni.

Codice	Corso d'acqua	TR30 - 0.50h	TR30 - 1.00h	TR30 - 3.25h
CL001	Torrente Carrione	74.66	95.01	108.09
CL002	Fosso di Torano	75.80	95.85	104.73
CL003	Torrente Gragnana	45.09	51.59	56.10
CL004	Fosso di S. Martino 1	4.51	3.24	0.97
CL005	Fosso di S. Martino 2	2.01	1.40	0.36
CL006	Fosso di Stabbio	2.58	1.65	0.47
CL007	Canale di Stabbio	0.67	0.43	0.12
CL008	Fosso di Monterosso	5.34	4.26	1.28
CL009	Fosso del Bugliolo	6.87	5.49	1.64
CL010	Fosso della Foce	13.06	12.55	4.08
CL011	Fosso dell'INPS	1.92	1.24	0.38
CL012	Fosso del Rio	5.25	3.54	1.07
CL013	Interbac. Canale del Rio	8.80	6.51	2.09
CL014	Fosso del Burro	3.43	2.29	0.56
CL015	Aff. Fosso del Burro	0.88	0.58	0.14
CL016	Fosso di S. Ceccardo	0.73	0.48	0.12
CL017	Fosso di Ficola	17.78	18.71	4.73
CL018	Canale di Fossola	23.99	24.88	9.07
CL019	Fosso di Valenza	19.30	22.92	8.92
CL020	Interbac. valle Canale di Fossola	13.87	16.55	6.36
CL021	Fosso del Topo	4.40	3.23	0.72
CL022	Fosso di Bonascola	9.71	7.67	1.69
CL023	Fosso di Spondarella	4.94	3.27	0.72
CL024	Fosso di Botria	9.59	9.97	2.54
CL025	Fosso di Monte Olivero	10.66	7.60	1.66
CL026	Fosso di Acquafiora	7.35	5.01	1.11
CL027	Fosso di Montegreco	7.56	5.66	1.26
CL028	Interbac. urbano Fosso Monte Olivero	16.66	12.62	2.80
CL029	Interbac. collinare Fosso Monte Olivero	5.87	3.94	0.91
CL030	Fosso di Ficocchia	2.50	1.81	0.49
CL031	Fosso di Costaccia	3.42	2.46	0.66
CL032	Torrente lavello	14.50	18.50	15.40
CL033	Fosso di Belvedere 2	9.60	12.80	11.10
CL034	Interbac. Torrente Lavello	4.90	6.80	9.40
P001	Idrovora Torrente Lavello	0.60	0.60	0.60
P002	Idrovora Torrente Lavello	0.60	0.60	0.60

Tabella 4-6: Portate massime [mc/s] TR 30 anni per il modello Carrione-Lavello.

Portate massime per il modello Torrente Carrione e Torrente Lavello per TR 200 anni.

Codice	Corso d'acqua	TR200 - 0.50h	TR200 - 1.00h	TR200 - 3.25h
CL001	Torrente Carrione	103.42	135.29	159.92
CL002	Fosso di Torano	107.23	138.41	154.08
CL003	Torrente Gagnana	64.90	77.48	85.69
CL004	Fosso di S. Martino 1	6.40	4.54	1.47
CL005	Fosso di S. Martino 2	2.83	1.95	0.56
CL006	Fosso di Stabbio	3.55	2.31	0.73
CL007	Canale di Stabbio	0.92	0.60	0.19
CL008	Fosso di Monterosso	7.62	6.00	1.94
CL009	Fosso del Bugliolo	9.81	7.72	2.48
CL010	Fosso della Foce	18.96	17.88	6.18
CL011	Fosso dell'INPS	2.65	1.74	0.58
CL012	Fosso del Rio	7.33	4.96	1.62
CL013	Interbac. Canale del Rio	12.23	9.10	3.16
CL014	Fosso del Burro	4.81	3.20	0.88
CL015	Aff. Fosso del Burro	1.23	0.81	0.23
CL016	Fosso di S. Ceccardo	1.02	0.67	0.19
CL017	Fosso di Ficola	26.83	27.13	7.82
CL018	Canale di Fossola	35.72	35.83	13.53
CL019	Fosso di Valenza	30.49	34.36	13.88
CL020	Interbac. valle Canale di Fossola	20.87	24.37	9.50
CL021	Fosso del Topo	6.27	4.52	1.12
CL022	Fosso di Bonascola	13.96	10.76	2.66
CL023	Fosso di Spondarella	6.90	4.57	1.14
CL024	Fosso di Botria	14.15	14.35	3.98
CL025	Fosso di Monte Olivero	15.11	10.63	2.60
CL026	Fosso di Acquafiora	10.35	7.01	1.74
CL027	Fosso di Montegreco	10.79	7.93	1.98
CL028	Interbac. urbano Fosso Monte Olivero	23.00	17.58	4.40
CL029	Interbac. collinare Fosso Monte Olivero	8.20	5.56	1.42
CL030	Fosso di Ficocchia	3.55	2.57	0.71
CL031	Fosso di Costaccia	4.84	3.50	0.97
CL032	Torrente lavello	20.10	26.90	23.30
CL033	Fosso di Belvedere 2	12.70	18.60	17.20
CL034	Interbac. Torrente Lavello	6.80	9.90	14.30
P001	Idrovora Torrente Lavello	0.60	0.60	0.60
P002	Idrovora Torrente Lavello	0.60	0.60	0.60

Tabella 4-7: Portate massime [mc/s] TR 200 anni per il modello Carrione-Lavello.

Portate massime per il modello Torrente Carrione e Torrente Lavello per TR 500 anni.

Codice	Corso d'acqua	TR500 - 0.50h	TR500 - 1.00h	TR500 - 3.25h
CL001	Torrente Carrione	117.77	155.28	184.03
CL002	Fosso di Torano	122.52	158.55	177.56
CL003	Torrente Gagnana	74.78	89.89	99.61
CL004	Fosso di S. Martino 1	7.33	5.19	1.70
CL005	Fosso di S. Martino 2	3.24	2.23	0.64
CL006	Fosso di Stabbio	4.04	2.64	0.84
CL007	Canale di Stabbio	1.05	0.69	0.22
CL008	Fosso di Monterosso	8.76	6.86	2.24
CL009	Fosso del Bugliolo	11.27	8.83	2.87
CL010	Fosso della Foce	21.92	20.54	7.13
CL011	Fosso dell'INPS	3.02	1.99	0.66
CL012	Fosso del Rio	8.37	5.67	1.87
CL013	Interbac. Canale del Rio	13.95	10.39	3.65
CL014	Fosso del Burro	5.49	3.66	1.02
CL015	Aff. Fosso del Burro	1.41	0.92	0.26
CL016	Fosso di S. Ceccardo	1.16	0.76	0.22
CL017	Fosso di Ficola	31.34	31.30	9.24
CL018	Canale di Fossola	41.56	41.24	21.62
CL019	Fosso di Valenza	36.07	39.99	22.99
CL020	Interbac. valle Canale di Fossola	24.38	28.24	17.90
CL021	Fosso del Topo	7.20	5.17	1.31
CL022	Fosso di Bonascola	16.07	12.31	3.10
CL023	Fosso di Spondarella	7.88	5.22	1.33
CL024	Fosso di Botria	16.44	16.52	4.66
CL025	Fosso di Monte Olivero	17.32	12.15	3.04
CL026	Fosso di Acquafiora	11.84	8.00	2.03
CL027	Fosso di Montegreco	12.41	9.06	2.31
CL028	Interbac. urbano Fosso Monte Olivero	26.19	20.06	5.14
CL029	Interbac. collinare Fosso Monte Olivero	9.37	6.37	1.66
CL030	Fosso di Ficocchia	4.07	2.95	0.82
CL031	Fosso di Costaccia	5.56	4.01	1.11
CL032	Torrente lavello	23.10	31.20	27.20
CL033	Fosso di Belvedere 2	14.40	21.50	20.20
CL034	Interbac. Torrente Lavello	7.70	11.40	16.80
P001	Idrovora Torrente Lavello	0.60	0.60	0.60
P002	Idrovora Torrente Lavello	0.60	0.60	0.60

Tabella 4-8: Portate massime [mc/s] TR 500 anni per il modello Carrione-Lavello.

Portate massime per il modello Fosso Maestra, Torrente Parmignola per TR 30 anni.

Codice	Corso d'acqua	TR30 - 1.00h	TR30 - 2.50h	TR30 - 6.00h
MP001	Fosso Maestra	10.20	8.50	5.40
MP002	Fosso Tre Canali	2.68	2.42	1.55
MP003	Canale di Bolfano	8.66	7.83	5.01
MP004	Interbac. monte Fosso Tre Canali	2.16	1.95	1.25
MP005	Interbac. valle Fosso Tre Canali	5.30	1.50	0.90
MP006	Interbac. monte Fosso Maestra	1.20	1.00	0.60
MP007	Fosso Due Canali	5.30	5.50	3.70
MP008	Interbac. Fosso Due Canali	5.50	6.60	4.90
MP009	Interbac. valle Fosso Maestra	1.40	1.90	1.50
MP010	Fosso Macchia	2.30	3.00	2.40
MP011	Interbac. Fosso Macchia	1.10	1.40	1.00
MP012	Fosso Carlone 1	1.50	2.10	1.70
MP013	Fosso Carlone 2	1.10	1.60	1.30
MP014	Interbac. Fosso Carlone 1	0.60	0.80	0.60
MP015	Aff. Valle Fosso Maestra	2.00	2.80	2.50
MP016	Fosso Paradiso	2.20	2.80	2.20
P003	Idrovora Fosso Maestra	5.65	5.65	5.65
MP017	Torrente Parmignola	89.34	101.59	66.40
MP018	Fosso di Bocco Barbuto	35.62	26.03	14.34

Tabella 4-9: Portate massime [mc/s] TR 30 anni per il modello Maestra-Parmignola.

Portate massime per il modello Fosso Maestra, Torrente Parmignola per TR 200 anni.

Codice	Corso d'acqua	TR200 - 1.00h	TR200 - 2.50h	TR200 - 6.00h
MP001	Fosso Maestra	15.80	13.50	8.50
MP002	Fosso Tre Canali	4.14	3.80	2.42
MP003	Canale di Bolfano	13.41	12.32	7.83
MP004	Interbac. monte Fosso Tre Canali	3.34	3.07	1.95
MP005	Interbac. valle Fosso Tre Canali	2.50	2.30	1.40
MP006	Interbac. monte Fosso Maestra	1.80	3.00	0.90
MP007	Fosso Due Canali	8.20	8.70	5.80
MP008	Interbac. Fosso Due Canali	8.30	10.20	7.60
MP009	Interbac. valle Fosso Maestra	2.20	3.00	2.30
MP010	Fosso Macchia	3.50	4.80	3.80
MP011	Interbac. Fosso Macchia	1.70	2.20	1.70
MP012	Fosso Carlone 1	2.30	3.40	2.80
MP013	Fosso Carlone 2	1.60	2.60	2.10
MP014	Interbac. Fosso Carlone 1	0.90	1.30	1.00
MP015	Aff. Valle Fosso Maestra	3.00	4.50	4.00
MP016	Fosso Paradiso	3.40	4.50	3.40
P003	Idrovora Fosso Maestra	5.65	5.65	5.65
MP017	Torrente Parmignola	135.62	151.33	100.23
MP018	Fosso di Bocco Barbuto	52.65	37.68	21.46

Tabella 4-10: Portate massime [mc/s] TR 200 anni per il modello Maestra-Parmignola.

Portate massime per il modello Fosso Maestra, Torrente Parmignola per TR 500 anni.

Codice	Corso d'acqua	TR500 - 1.00h	TR500 - 2.50h	TR500 - 6.00h
MP001	Fosso Maestra	18.80	16.10	10.00
MP002	Fosso Tre Canali	4.89	4.52	2.83
MP003	Canale di Bolfano	15.85	14.63	9.18
MP004	Interbac. monte Fosso Tre Canali	3.95	3.65	2.29
MP005	Interbac. valle Fosso Tre Canali	2.90	2.70	1.60
MP006	Interbac. monte Fosso Maestra	2.10	1.70	1.00
MP007	Fosso Due Canali	9.70	10.20	6.70
MP008	Interbac. Fosso Due Canali	9.80	12.00	8.90
MP009	Interbac. valle Fosso Maestra	2.60	3.60	2.80
MP010	Fosso Macchia	4.20	5.70	4.50
MP011	Interbac. Fosso Macchia	2.00	2.60	2.00
MP012	Fosso Carlone 1	2.80	4.10	3.30
MP013	Fosso Carlone 2	1.80	3.10	2.50
MP014	Interbac. Fosso Carlone 1	1.10	1.60	1.20
MP015	Aff. Valle Fosso Maestra	3.60	5.30	4.70
MP016	Fosso Paradiso	4.00	5.30	4.00
P003	Idrovora Fosso Maestra	5.65	5.65	5.65
MP017	Torrente Parmignola	158.67	175.80	116.59
MP018	Fosso di Bocco Barbuto	61.08	43.45	24.95

Tabella 4-11: Portate massime [mc/s] TR 500 anni per il modello Maestra-Parmignola.

5. IMPLEMENTAZIONE MODELLO IDRAULICO

L'implementazione della modellistica idraulica, è stata effettuata attraverso il Software MIKE del Danish Hydraulic Institute – DHI, certificato dalla F.E.M.A. (Federal Emergency Management Agency).

Per il caso in esame, sono state implementate modellistiche accoppiate con il modulo Mike Flood, monodimensionali in alveo e bidimensionali nelle aree contermini, determinando le aree allagate in termini di battenti e livelli idraulici. Il comportamento idraulico in alveo del reticolo idrografico di verifica è stato simulato attraverso un modello monodimensionale (MIKE 11) con la schematizzazione geometrica delle sezioni fluviali ricavata dal rilievo topografico. Le acque esondate e la loro propagazione sono state simulate con un modello bidimensionale (MIKE21), a partire dal modello digitale del terreno mutuato dai risultati delle indagini topografiche. MIKE FLOOD permette l'accoppiamento dei due modelli in modo totalmente dinamico, garantendo la conservazione di massa e quantità di moto tra i diversi sistemi. Per ulteriori dettagli si rimanda all'Appendice A.2.

5.1 MODELLAZIONE ANALITICA

Due modelli idraulici sono stati implementati in base alle interazioni tra i reticoli idraulici presenti sul territorio. Un primo modello è composto dai corsi d'acqua afferenti al reticolo del Torrente Carrione, per la zona che comprende l'abitato di Carrara fino alla foce, e dal reticolo del Torrente Lavello (modello "CL"). La prima sezione utile allo studio idraulico è situata a monte dell'abitato di Carrara ed il tratto del Torrente Carrione soggetto ad analisi si estende fino alla foce per circa 8.6 km. I corsi d'acqua inclusi nello studio comprendono quegli affluenti che interessano la parte urbana fino alla foce e sono riportati in Tabella 2-1 e Tabella 4-2 ed in *Tavola 3A - Modello Idraulico Carrione e Lavello – Planimetria*. In generale i bacini della parte montana presentano corsi d'acqua con alvei particolarmente incisi e versanti con pendenze elevate. I corsi d'acqua minori tendono a divenire tombati nella parte di valle in corrispondenza con l'area urbanizzata del territorio di Carrara. Da monte verso valle, in sponda destra si incontrano gli affluenti sotto elencati:

- Corsi d'acqua afferenti al Bacino di S. Martino, caratterizzati da aste assimilabili a canali fognari, per la maggior parte tombate e fortemente antropizzate.
- Fosso di Valenza e Canale di Fossola, sono due corsi d'acqua a regime torrentizio caratterizzati da forti pendenze e dalla presenza di muri d'argine lungo tutto il tratto urbano.
- I fossi di Costaccia e Ficocchia, tombati per la maggior parte del loro corso, che confluiscono tombati nel Carrione all'altezza della Via Aurelia.

Gli affluenti in sinistra idraulica sono riportati di seguito:

- Corsi d'acqua afferenti al Bacino del Rio, contraddistinti da forti pendenze e lunghi tratti tombati, che confluiscono tutti nel Canale del Rio prima della confluenza nel Carrione;
- Fosso del Burro e di S. Ceccardo sono due corsi d'acqua di estensione limitata anch'essi caratterizzati da forti pendenze.
- I corsi d'acqua del Bacino di Bonascola compongono un reticolo piuttosto complesso in cui si alternano tratti tombati a tratti a cielo aperto. Il fosso principale è il Monte Olivero, in cui confluiscono tutti gli altri affluenti.

Il Torrente Lavello viene studiato per il tratto che attraversa la zona industriale, adiacente a Via Dorsale, fino alla foce. Con esso viene studiato il Fosso di Belvedere 2, principale affluente in destra idraulica, per il tratto che va dalla via Aurelia fino alla confluenza (vedi *Tavola 3A – Modello Idraulico Carrione e Lavello – Planimetria*).

La modellazione idraulica monodimensionale si estende per un totale di circa 27 km di corsi d'acqua, mentre l'area coperta dal DTM, potenzialmente soggetta a modellazione bidimensionale, è pari circa a 19.2 kmq.

L'altro modello è composto dal Torrente Parmignola e dal Fosso di Bocco Barbuto e dal reticolo del comprensorio del Fosso Maestra (modello "MP").

Per il bacino del Torrente Parmignola viene studiato il tratto che si estende da monte degli attraversamenti sulla linea ferroviaria e sulla Via Aurelia fino alla foce, ed è caratterizzato da muri d'argine in destra e sinistra idraulica. Ad esso è stato aggiunto il tratto del Fosso di Bocco Barbuto che si estende da monte dell'abitato di Fossone Basso fino alla confluenza col Torrente Parmignola. Per la parte relativa al comprensorio del Fosso Maestra, il modello si estende da monte dell'attraversamento della linea ferroviaria e comprende, procedendo verso valle fino alla foce, il Canale di Bolfano, il Fosso dei Tre Canali, il Fosso Maestra, il Fosso dei Due Canali e tutti gli affluenti minori riportati in Tabella 2-1. Tale reticolo di canali è caratterizzato da pendenze molto basse, ad eccezione di un'area ridotta nella parte di monte, e da una bassa officiosità idraulica. (vedi *Tavola 3B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola – Planimetria*).

La modellazione idraulica monodimensionale si estende per un totale di circa 15 km di corsi d'acqua, mentre l'area coperta dal DTM, potenzialmente soggetta a modellazione bidimensionale, è pari circa a 12.9 kmq.

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

La caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua studiati è stata ricavata a partire dai rilievi riportati in Tabella 2-2.

Le sezioni fluviali utilizzate nella modellazione monodimensionale sono individuate attraverso un codice alfanumerico che contiene al proprio interno le seguenti informazioni:

(Esempio: sezione 01542PB03)

- 5 caratteri (Esempio: 00320) identificativo del codice della sezione, in questo caso è la 320.
- 2 caratteri (Esempio: PB) identificativo delle opere idrauliche; se non presenti si utilizzano i caratteri: __

- 2 caratteri (Esempio:03) identificativo dell'anno del rilievo topografico.

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

La caratterizzazione delle aree limitrofe al corso d'acqua, potenzialmente allagabili, è schematizzata attraverso un modello bidimensionale, per la cui caratterizzazione geometrica è stato utilizzato il rilievo Lidar della Regione Toscana.

Il rilievo Lidar originale ha dimensione della cella 1x1 metri. Nell'ambito della simulazione idraulica si è proceduto al ricampionamento dei dati Lidar con celle di dimensioni 5x5 metri per il modello CL e 4x4 metri per il modello MP.

I bacini del Rio e di Bonascola e, in parte quelli di S. Martino e Ficocchia, sono caratterizzati da reticoli complessi e da molteplici tratti tombati per cui la conoscenza delle caratteristiche delle opere risulta in alcuni casi ridotta per la difficoltà di effettuare rilievi in proprietà private o zone di difficile accesso, o perché tali tombature, sia realizzate da privati che dal Comune, sono spesso non segnalate o non autorizzate. Per queste ragioni, particolare attenzione è stata rivolta alla modellazione idraulica di tali corsi d'acqua, ricorrendo, ove necessario, a scelte modellistiche conservative che considerino la configurazione più sfavorevole al deflusso. Sono stati quindi utilizzati principalmente i dati ottenuti dal rilievo topografico, e dai progetti realizzati recentemente dall'Amministrazione Comunale, integrati, dove mancanti per le ragioni sopraesposte, dai dati riportati nel progetto "Studi, verifiche di fattibilità e progetti preliminari per la definizione del programma di interventi per l'equilibrio idrogeologico del bacino del Torrente Carrione a seguito dell'evento alluvionale del Settembre 2003" redatto nel Luglio 2004 dal Prof. Ing. Carlo Viti. Nei casi residui in cui non è stato possibile avere informazioni sulle pendenze dei tratti tombati, come regola generale, è stato assunto un valore pari allo 0.02, tale valore è stato scelto in base alle caratteristiche dei tombamenti limitrofi ed all'andamento altimetrico della zona circostante.

Tali tratti tombati sono evidenziati nella *Tavola 3A – Modello Idraulico Carrione e Lavello – Planimetria* ed in Tabella 5-1 è riportato un riepilogo delle caratteristiche dei tratti analizzati. La portata massima defluibile è stata cautelativamente calcolata assumendo un grado di riempimento massimo delle tubazioni pari al 70%, al fine di considerare la parziale ostruzione delle tubature dovuta alla presenza di detriti. È stato inoltre assunto un valore della resistenza idraulica di Gauckler-Strickler pari a 60 [$m^{1/3}/s$] per le ridotte caratteristiche qualitative delle tubazioni a causa della scarsa manutenzione.

Bacino	Corso d'acqua	D [mm]	B [mm]	H [mm]	i [-]	Q _{max} [m ³ /s]
Bacino del Rio	Fosso di Monterosso	1000			0.010	1.6
	Fosso di Bugliolo	800			0.015	1.1
	Fosso della Foce		2500	2000	0.020	22.5
	Fosso dell'INPS	300			0.020	0.1
	Fosso del Rio		1200	1900	0.020	7.5
Bacino di Bonascola	Fosso del Topo	800			0.030	1.5
	Fosso di Bonascola		2000	2200	0.025	20.9
	Fosso di Spondarella	1000			0.030	2.7
	Fosso di Botria		2000	2000	0.025	18.5
	Fosso di Monte Olivero	1000			0.050	3.5
	Fosso di Acquafiora	1000			0.030	2.7
	Fosso di Monte Greco	1800			0.030	15.0
Bacino di S. Martino	Fosso di S. Martino 2		1000	1150	0.020	3.1
Bacino di Ficocchia	Fosso di Costaccia	900			0.020	1.7
	Fosso di Ficocchia	500			0.020	0.3

Tabella 5-1: Riepilogo dei tombamenti nell'abitato di Carrara.

5.1.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

Le condizioni al contorno del modello idraulico 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;
- Idrogramma dei livelli alla foce, che in questo caso è rappresentato dal livello del mare costante, posto cautelativamente a 1m s.l.m.

La codifica delle immissioni e delle sollecitazioni idrologiche è riferita al modello Carrione-Lavello (CL) o Maestra-Parmignola (MP); il codice è così composto dal suffisso CL o MP seguito dal codice del corso d'acqua con numero progressivo da monte verso valle. In *Tavola 3A – Modello Idraulico Carrione e Lavello – Planimetria* ed in *Tavola 3B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola – Planimetria* sono riportati i punti di immissione puntuali con le relative codifiche. Per l'estensione delle immissioni distribuite si fa riferimento a quanto riportato in Tabella 4-2, in cui per ogni immissione sono riportate la sezione di monte e quella di valle lungo cui la portata è distribuita.

Nelle Tabelle da Tabella 4-6 a Tabella 4-11 sono riportati i massimi di portata Q_{max} [mc/s] associati agli idrogrammi impiegati come condizioni di monte alle aste fluviali o come immissioni puntuali e distribuite per i diversi tempi di ritorno (30, 200 e 500 anni) e per le diverse durate di pioggia: 0.5, 1.0 e 3.25 ore per il modello Carrione-Lavello e 1.0, 2.5 e 3.25 ore per il modello Maestra-Parmignola.

5.1.3 PARAMETRI DEL MODELLO IDRAULICO

Per ciò che attiene ai coefficienti di scabrezza da associare alle singole sezioni fluviali, attraverso il confronto con i parametri riportati in letteratura ed il supporto dei sopralluoghi effettuati, è stato possibile associare ad ogni corso d'acqua, il coefficiente di scabrezza, secondo Manning, più appropriato. Per il Torrente Carrione è stato utilizzato un coefficiente di Manning [$s/m^{1/3}$] variabile lungo l'asta fluviale, come riportato nella "Relazione Preliminare – Studio idraulico del Torrente Carrione con analisi dei possibili interventi per la mitigazione del rischio", redatto dal Prof. Ing. Giovanni Seminara e commissionato dalla Regione Toscana al Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica ed Ambientale dell'Università di Genova. Procedendo da monte verso valle, dalla sezione 00862__15 alla sezione 00727__15 il coefficiente di Manning è posto pari a $0.04 s/m^{1/3}$, tra la sezione 00717__15 e la sezione 00238PC15 pari a $0.033 s/m^{1/3}$ e tra la sezione 00230__15 e la 00001__15 pari a $0.029 s/m^{1/3}$. Per tutti gli altri corsi d'acqua è stato assunto un valore del coefficiente di Manning pari a $0.033 s/m^{1/3}$.

Per quanto riguarda la scabrezza delle aree limitrofe al corso d'acqua, simulate dal modello bidimensionale, si è scelto di adottare una scabrezza variabile in base all'uso del suolo come riportato in Tabella 5-2.

Tipologia area	Manning n [$s/m^{1/3}$]
Aree a pascolo naturale e praterie	0.050
Aree a vegetazione boschiva ed arbustiva in evoluzione	0.050
Aree con vegetazione rada	0.050
Aree estrattive	0.029
Aree industriali e commerciali	0.020
Aree portuali	0.020
Aree ricreative e sportive	0.029
Aree verdi urbane	0.050
Boschi di conifere	0.050
Boschi di latifoglie	0.050
Boschi misti di conifere e latifoglie	0.050
Brughiere e cespuglieti	0.050
Cantieri, edifici in costruzione	0.020
Colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti	0.050
Colture temporanee associate a colture permanenti	0.050
Corsi d'acqua, canali e idrovie	0.020
Frutteti e frutti minori	0.050
Oliveti	0.050
Prati stabili	0.050
Reti stradali, ferroviarie e infrastrutture tecniche	0.020
Rocce nude, falesie, rupi e affioramenti	0.020
Seminativi irrigui e non irrigui	0.050
Sistemi colturali e particellari complessi	0.050
Specchi d'acqua	0.020
Spiagge, dune e sabbie	0.050
Vigneti	0.050
Zone residenziali a tessuto continuo	0.020
Zone residenziali a tessuto discontinuo e rado	0.029

Tabella 5-2: Valori del coefficiente di Manning in base alla tipologia di uso del suolo.

In merito alle perdite di carico nelle strutture, i coefficienti utilizzati sono stati ricavati dalla letteratura disponibile. Tali valori, nel nostro caso, influenzano il modello in corrispondenza degli attraversamenti fluviali e nelle connessioni idrauliche (esempio, sottoattraversamenti alla linea ferroviaria, carrabili), che generano una brusca variazione di sezione. In particolare si è utilizzato un coefficiente di contrazione di 0.5 e un coefficiente di espansione di 1.0.

5.2 MODELLAZIONE QUALITATIVA

Lo studio qualitativo prevede la simulazione 2D dell'area di interesse, considerando come input idrologico l'evento pluviometrico rappresentato dalle griglie di pioggia della Regione Toscana. Tramite il modulo di calcolo MIKE21 è infatti possibile simulare l'effetto

della pioggia su di un DTM tramite un'immissione puntuale di massa su ciascuna cella di calcolo del dominio con un tasso pari all'intensità di pioggia.

Le celle del DTM impiegato per tale simulazione, che ricomprende l'intero territorio comunale, deriva dal modello digitale del terreno a maglia 10x10 m della Regione Toscana.

Come scenari di riferimento sono stati assunti gli eventi con TR 200 anni e durate 1.0 e 3.0 ore. Con il modulo MIKE21 è stato possibile simulare l'evoluzione delle aree allagate per gli eventi studiati. È stato successivamente effettuato un inviluppo delle aree allagate derivanti dagli output delle simulazioni.

Nelle *Tavole 18A,18B – Planimetria della Pericolosità Idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 e PGRA D.Lgs. 49/2010* sono riportate le aree allagabili derivanti dallo studio qualitativo insieme alle perimetrazioni ottenute dallo studio analitico.

6. DETERMINAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITÀ IDRAULICA

L'implementazione della modellistica idraulica di tipo analitico fornisce, per ciascuno degli eventi studiati, i valori di massimo livello e portata in alveo per ciascuna sezione dei corsi d'acqua analizzati, ed i battenti e livelli idraulici nelle aree soggette ad allagamenti. I risultati sono riportati in Allegato 1: Risultati della modellistica idraulica.

Per ognuno dei due modelli idraulici analitici implementati Carrione-Lavello (CL) e Maestra-Parmignola (MP) e per ogni tempo di ritorno sono stati inviluppati i massimi livelli in alveo e i battenti nelle aree allagate. Con questa impostazione si restituiscono:

- Sezioni fluviali con inviluppo dei livelli idrometrici per TR=30-200-500 anni;
- Inviluppo dei battenti idrometrici massimi per TR=30-200-500 anni;
- Inviluppo delle velocità massime per TR=30-200-500 anni.

L'implementazione del modello integrato idrologico-idraulico di tipo analitico ha permesso la definizione delle aree a pericolosità idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011, che definisce le probabilità di esondazione come segue:

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

Ai fini dell'aggiornamento del PGRA le aree saranno classificate come segue:

- Aree a pericolosità da alluvione elevata (P3), che risultano allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- Aree a pericolosità da alluvione media (P2), con aree allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni;
- Aree a pericolosità da alluvione bassa (P1), caratterizzate da eventi alluvionali con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni.

Di seguito si riportano gli elaborati contenenti le informazioni relative all'output della modellazione idraulica di tipo analitico.

Tavola 4A - Modello Idraulico Carrione e Lavello - Libretto Sezioni con Livelli Idrometrici TR 30, 200 e 500 anni.

Tavola 4B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola - Libretto Sezioni con Livelli Idrometrici TR 30, 200 e 500 anni.

Tavola 5A - Modello Idraulico Carrione e Lavello - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni.

Tavola 5B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola - Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni.

Tavola 6A - Modello Idraulico Carrione e Lavello - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni.

Tavola 6B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola - Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni.

Tavola 7A - Modello Idraulico Carrione e Lavello - Battenti Idrometrici Massimi TR 500 anni.

Tavola 7B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola - Battenti Idrometrici Massimi TR 500 anni.

Tavola 8A - Modello Idraulico Carrione e Lavello - Velocità Massime TR 30 anni.

Tavola 8B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola - Velocità Massime TR 30 anni.

Tavola 9A - Modello Idraulico Carrione e Lavello - Velocità Massime TR 200 anni.

Tavola 9B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola - Velocità Massime TR 200 anni.

Tavola 10A - Modello Idraulico Carrione e Lavello - Velocità Massime TR 500 anni.

Tavola 10B - Modello Idraulico Maestra e Parmignola - Velocità Massime TR 500 anni.

Tavola 11A - Carta dei Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni - Quadro 1.

Tavola 11B - Carta dei Battenti Idrometrici Massimi TR 30 anni - Quadro 2.

Tavola 12A - Carta dei Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni - Quadro 1.

Tavola 12B - Carta dei Battenti Idrometrici Massimi TR 200 anni - Quadro 2.

Tavola 13A - Carta dei Battenti Idrometrici Massimi TR 500 anni - Quadro 1.

Tavola 13B - Carta dei Battenti Idrometrici Massimi TR 500 anni - Quadro 2.

Tavola 14 - Carta delle Velocità Massime TR 30 anni.

Tavola 15 - Carta delle Velocità Massime TR 200 anni.

Tavola 16 - Carta delle Velocità Massime TR 500 anni.

Tavola 17 - Planimetria della Pericolosità Idraulica Analitica ai sensi del DPGR 53R/2011.

L'implementazione della modellistica idraulica di tipo qualitativo estesa su tutto il territorio comunale di Carrara fornisce, per le aree afferenti ai corsi d'acqua non oggetto di studio analitico, un'indicazione di allagabilità del territorio laddove non è stato possibile sviluppare un modello di maggior dettaglio.

L'output di tale modellazione individua aree potenzialmente soggette ad allagamento per eventi TR 200 anni e indica la necessità di eseguire studi di maggior dettaglio qualora risulti necessaria una stima quantitativa dei battenti attesi per la fattibilità delle aree di trasformazione.

Le aree allagabili individuate dal modello qualitativo sono leggibili nelle tavole seguenti:

Tavola 18A - Planimetria della Pericolosità Idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 e del PGRA D.Lgs 49/2010 - Quadro 1.

Tavola 18B - Planimetria della Pericolosità Idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 e del PGRA D.Lgs 49/2010 - Quadro 2.

Per la lettura delle suddette tavole valgono le disposizioni riportate di seguito.

- a) Nel caso in cui si ricada all'interno delle perimetrazioni derivanti esclusivamente dalla "modellazione analitica" valgono le disposizioni del DPGR 53R/2011.
- b) Nel caso in cui si ricada all'interno di aree allagabili derivanti esclusivamente dalla "modellazione qualitativa" dovrà essere previsto uno studio di dettaglio dei corsi d'acqua di riferimento che definisca in maniera analitica i livelli di pericolosità nell'areale di interesse.
- c) Nel caso in cui si ricada all'interno di aree allagabili derivanti sia dalla "modellazione analitica" che dalla "modellazione qualitativa", dovrà essere tenuto in conto che la pericolosità della zona è ascrivibile sia ad uno o più corsi d'acqua studiato/i analiticamente, che a corso/i d'acqua analizzato/i dal punto di vista qualitativo; dovrà quindi essere previsto quanto riportato sia al punto a) che al punto b).
- d) Nel caso in cui si ricada all'esterno delle aree allagabili da entrambe le modellazioni ne deriva assenza di pericolosità idraulica.

APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA

A.1 MODELLISTICA IDROLOGICA

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

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

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

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

A.1.1 REGIME PLUVIOMETRICO – STUDIO REGIONALE LSPP

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

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

La previsione quantitativa dei valori estremi di pioggia in un determinato punto è stata effettuata anche attraverso la determinazione della curva o linea segnalatrice di probabilità pluviometrica (LSPP), cioè della relazione che lega l'altezza di precipitazione alla sua durata, per un assegnato tempo di ritorno.

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

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

con: h = altezza di pioggia [mm]; t = durata [ore], a e n parametri caratteristici per i tempi di ritorno considerati.

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

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

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

Dalle linee guida della Regione Toscana è possibile definire la metodologia di calcolo delle altezze di pioggia su un bacino idrografico. Per calcolare l'altezza di pioggia su un bacino idrografico è necessario individuare lo spartiacque del bacino imbrifero e, una volta scelto il tempo di ritorno, è possibile utilizzare due metodologie per la valutazione delle altezze di pioggia.

A. Utilizzo dei parametri a e n della LSPP - Noti i parametri a e n della LSPP per assegnato T_r , viene definita la durata t dell'evento. Per un bacino idrografico si usa $t=t_{cr}$ (tempo critico), solitamente assunto pari al tempo di corrivazione t_c . È possibile quindi trovare l'altezza di pioggia in ogni cella tramite la relazione:

$$h(t) = a t_c^n \quad (4)$$

con: h = altezza di pioggia [mm]; t_c = tempo di corrivazione [ore], a e n parametri caratteristici.

La stima dell'altezza di pioggia con l'equazione (4) può essere effettuata tramite software GIS con un *tool* tipo **Raster Calculator**. Una volta trovata l'altezza di pioggia h in ogni cella, per la durata e il tempo di ritorno stabilito, è sufficiente calcolare il valore medio sul bacino idrografico.

A.1.3 CALCOLO DEGLI IDROGRAMMI DI PROGETTO

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

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

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

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

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

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

dove:

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

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

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

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

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

In particolare per la stima del coefficiente I_a si è utilizzata la formula $I_a = 3.3 + 22S_b$

In cui S_b rappresenta la percentuale di superficie boscata presente sul bacino considerato.

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

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

Tabella A.1- 1: Valori Ks utilizzati nel presente studio

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

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

dove t è la durata dell'evento, A è l'area del bacino sotteso e α , β , γ sono parametri dipendenti dal bacino considerato.

Il parametro α della formula sopra riportata dipende dal coefficiente a' della curva di possibilità pluviometrica a tre parametri. Poiché le curve delle nuove LSPP sono rappresentate con la formula a due parametri nella formulazione $h(t) = a t^n$, al fine di determinare il corrispettivo valore di a' da utilizzare nella stima del coefficiente di ragguaglio, si è operato come segue:

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

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

L'Idrogramma Istantaneo Unitario rappresenta l'idrogramma di piena causato da un evento impulsivo di pioggia di volume unitario e durata tendente a zero. Ipotizzando un comportamento del sistema bacino idrografico lineare e stazionario, la risposta $Q(t)$ ad una

sollecitazione meteorica di intensità $p(t)$, supposta costante su tutti i punti del bacino (approccio di tipo integrato), è data dall'integrale di convoluzione fra ietogramma di pioggia efficace e IUH:

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

dove:

$Q(t)$ è la portata defluente;

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

$U(t)$ è l'idrogramma unitario

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} n &= 3.29(Rb/Ra)^{0.78} Rl^{0.07} \\ k &= 0.7(Ra/(Rb \cdot Rl))^{0.48} Lc/v \end{aligned}$$

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 $u=1, 2, 3, \dots$

A.1.4 MODELLO DI RIFIUTO DEL TERRENO 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 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.

Uso del suolo	TIPO DI COPERTURA		TIPO DI SUOLO			
	Trattamento o pratica	Condizione idrologica	A	B	C	D
Maggesi	a solchi dritti	-	77	86	91	94
Colture a solchi	a solchi dritti	cattiva	72	81	88	91
	a solchi dritti	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 dritti	cattiva	65	76	84	88
	a solchi dritti	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 dritti	cattiva	66	77	85	89
	a solchi dritti	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- 2: 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- 3: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e copertura (SCS,1986).

A.1.5 MODELLO DELL'IDROGRAMMA UNITARIO SCS

Per la modellazione della trasformazione afflussi-deflussi, è stato utilizzato il metodo dell'idrogramma unitario dell'SCS.

L'idrogramma Unitario SCS è un idrogramma adimensionale a picco singolo, che esprime la portata Q_t come porzione della portata di picco Q_p , per ogni istante t , frazione del tempo di picco T_p . L'SCS mette in relazione il picco ed il tempo di picco attraverso la formula:

$$Q_p = C \frac{A}{T_p}$$

in cui A rappresenta la superficie del Bacino e C il fattore di conversione (2.08). Il tempo di picco è in relazione con la durata della precipitazione netta

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag}$$

dove Δt è la durata della precipitazione netta e t_{lag} il tempo di ritardo del bacino, definito come l'intervallo temporale che separa il baricentro della distribuzione delle piogge dal baricentro dell'idrogramma unitario.

Il tempo di ritardo può essere stimato come:

$$t_{lag} = 0.6 t_c$$

Il tempo di corrivazione t_c è stato stimato con il metodo di Giandotti (Giandotti, 1934).

Il software HEC-HMS 4.1 permette inoltre di simulare in modo semplificato la propagazione monodimensionale dell'onda di piena attraverso il reticolo fluviale. Il modello impiegato è quello Muskingum-Cunge (Miller & Cunge, 1975), il quale si basa sulla combinazione dell'equazione di continuità con la formulazione diffusiva dell'equazione della quantità di moto per ottenere l'equazione seguente:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + c q_L$$

dove Q è la portata, c è la celerità di propagazione dell'onda di piena, μ è la diffusività idraulica e q_L rappresenta le immissioni laterali. L'equazione è quindi risolta con uno schema alle differenze finite.

A.1.6 MODELLO DI STIMA DEL DEFLUSSO DI BASE

Nella scelta del modello idrologico da adottare per la stima delle portate di piena, non è stato contemplato nessun tipo di modellazione dei deflussi di base.

Il motivo di tale scelta risiede nel fatto che il modello è finalizzato alla determinazione dei deflussi di piena a scala di evento e pertanto sono stati ritenuti trascurabili i contributi provenienti dai deflussi sotterranei, che, come noto, diventano una rilevante fonte di alimentazione del corso d'acqua soltanto durante i periodi di magra privi di precipitazioni.

A.2 MODELLISTICA IDRAULICA

L'implementazione della modellistica idraulica, è stata effettuata attraverso il Software MIKE del DANISH HYDRAULIC INSTITUTE – DHI, certificato dalla F.E.M.A. (Federal Emergency Management Agency).

Gli scriventi sono in possesso infatti della licenza MIKE FLOOD Chiave MZ 26392 che comprende i software MIKE 11 – MIKE 21 – MIKE FLOOD.

Il software Mike permette la modellazione monodimensionale dell'alveo (Mike 11), completamente bidimensionale dell'alveo e delle aree contermini (Mike 21), ma soprattutto permette di accoppiare con "link" bidirezionali le due simulazioni.

L'implementazione di una modellistica esclusivamente bidimensionale necessita di informazioni topografiche di elevato dettaglio. Mentre nelle aree contermini ai corsi d'acqua è possibile l'utilizzo del Lidar, questo non lo è in alveo, in quanto il rilievo Laser Scanner non è in grado di rilevare quanto sotto al pelo libero.

Per quanto sopra, saranno implementate modellistiche accoppiate tramite Mike Flood, monodimensionali in alveo e bidimensionali nelle aree contermini, determinando di fatto le aree allagate in termini di battenti e velocità di propagazione.

Nei paragrafi successivi si riportano invece le caratteristiche tecnico scientifiche della modellistica mono e bidimensionale.

A.2.1 MODELLISTICA 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).

A.2.1.1 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.

A.2.2 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.

A.2.3 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 incompressibile 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).

A.2.4 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.

A.2.5 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:

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

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).

A.2.6 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 larga soglia

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

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 $Q = A(Z_1) \cdot Z_2$

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).

A.2.7 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:

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

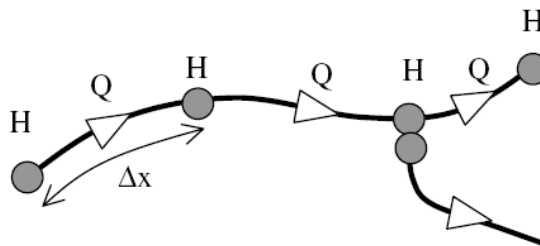
dove M è il coefficiente di Strickler, pari a $1/n$, essendo n il coefficiente di Manning.

A.2.8 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.

A.2.9 METODO DI SOLUZIONE E CONDIZIONI AL CONTORNO

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.

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).

A.2.10 MODELLISTICA BIDIMENSIONALE MIKE 21

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore.

A.2.11 MODULO IDRODINAMICO (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega q - fVV_x \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$ = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$ = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$ = coefficiente di scabrezza di Chezy;

G = accelerazione di gravità;

$f(V)$ = fattore d'attrito del vento;

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

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

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

ρ_w = densità dell'acqua;

x,y = coordinate spaziali;

t = tempo;

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

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y. La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h E \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h E \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

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

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h E \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} h E \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria (m³/s/m) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m³/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni planometriche della batimetria.

Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall' algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);

- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

A.2.12 MODELLISTICA MIKE FLOOD

Come già specificato Mike Flood permette l'accoppiamento tra modello monodimensionale in alveo e bidimensionale nelle aree contermini.

L'Accoppiamento dei modelli è dinamico:

- I modelli "girano" simultaneamente
- Ad ogni istante di simulazione avviene uno scambio di dati
- La mutua interazione è bidirezionale

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

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

Il corso d'acqua viene simulato attraverso sezioni fluviali, esistenti o di rilievo. Le acque esondate e la loro propagazione viene effettuata con un modello bidimensionale.

I risultati sono espressi in battenti e livelli nelle aree allagate.

ALLEGATO 1: RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDRAULICA

Fosso di San Martino 1

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00011_16	92.42	92.34	92.16	92.51	92.42	92.21	92.56	92.45	92.23	4.5	3.2	1.0	6.4	4.5	1.5	7.3	5.2	1.7
00009BB16	91.36	91.31	91.09	91.43	91.36	91.16	91.46	91.39	91.18	4.5	3.2	1.0	6.4	4.5	1.5	7.3	5.2	1.7
00009BC16	91.20	91.14	90.98	91.28	91.20	91.02	91.31	91.23	91.03	4.5	3.2	1.0	6.4	4.5	1.5	7.3	5.2	1.7
00009BD16	91.06	90.98	90.79	91.16	91.06	90.84	91.19	91.10	90.86	4.5	3.2	1.0	6.4	4.5	1.5	7.3	5.2	1.7
00008BB16	90.72	90.71	90.71	90.76	90.72	90.71	90.77	90.73	90.71	4.5	3.4	1.3	6.4	4.5	1.8	7.3	5.2	2.2
00008BC16	89.84	89.81	90.11	89.84	90.21	90.11	89.84	90.21	90.11	4.5	3.8	1.9	6.4	4.5	2.4	7.3	5.2	2.8
00008BD16	89.16	89.01	88.72	89.34	89.16	88.85	89.41	89.24	88.85	4.5	4.1	2.8	6.4	4.5	3.1	7.3	5.2	3.7
00007BB16	87.75	87.70	87.54	87.83	87.75	87.64	87.87	87.78	87.64	4.5	3.3	1.4	6.4	4.5	2.1	7.3	5.2	2.1
00007BC16	87.46	87.35	87.16	87.59	87.47	87.24	87.66	87.51	87.24	4.5	3.3	1.4	6.4	4.5	2.1	7.3	5.2	2.1
00006BB16	86.64	86.50	86.37	86.92	86.64	86.41	87.09	86.73	86.41	4.5	3.3	1.4	6.4	4.5	2.1	7.3	5.2	2.1
00006BC16	86.53	86.27	85.82	86.88	86.53	86.00	87.06	86.66	86.00	4.5	3.3	1.4	6.4	4.5	2.1	7.3	5.2	2.1
00005PB16	86.51	86.25	85.79	86.87	86.52	85.97	87.03	86.65	85.97	4.5	3.3	1.4	6.4	4.5	2.1	7.3	5.2	2.1
00005PC16	85.56	85.46	85.27	85.70	85.56	85.37	85.77	85.61	85.39	4.5	3.3	1.4	6.4	4.5	2.1	7.3	5.2	2.1
00002PB16	81.84	81.80	82.33	82.30	83.26	83.78	82.84	83.69	84.09	4.5	3.3	1.4	6.4	4.5	2.1	7.3	5.2	2.1
00002PC16	80.89	81.80	82.30	82.30	83.26	83.71	82.84	83.70	84.04	7.6	6.3	5.0	8.8	7.2	5.0	9.5	7.6	5.0

Fosso di Stabbio

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00021_16	81.28	81.19	81.00	81.37	81.26	81.05	81.41	81.29	81.07	2.6	1.7	0.5	3.6	2.3	0.7	4.0	2.6	0.8
00020_16	81.06	80.97	80.74	81.14	81.03	80.80	81.19	81.06	80.82	2.6	1.7	0.5	3.6	2.3	0.7	4.0	2.6	0.8
00019BB16	80.97	80.89	80.57	81.05	80.95	80.67	81.09	80.97	80.70	2.6	1.7	0.5	3.6	2.3	0.7	4.0	2.6	0.8
00019BC16	80.77	80.64	80.43	80.90	80.74	80.48	80.96	80.78	80.50	2.6	1.7	0.5	3.6	2.3	0.7	4.0	2.6	0.8
00019BD16	80.76	80.63	80.42	80.89	80.72	80.47	80.95	80.77	80.49	2.6	1.7	0.5	3.6	2.3	0.7	4.0	2.6	0.8
00017BB16	76.96	76.91	76.88	77.02	76.95	76.88	77.04	76.96	76.88	2.6	1.7	0.5	3.6	2.3	0.7	4.0	2.6	0.8
00017BC16	76.27	76.17	75.97	76.35	76.24	76.02	76.40	76.27	76.04	2.6	1.7	0.5	3.6	2.3	0.7	4.0	2.6	0.8
00016BA16	75.82	75.79	75.75	75.85	75.79	75.75	75.87	75.82	75.75	2.8	2.2	0.5	3.6	2.3	0.8	4.0	2.8	0.9
00016BB16	75.44	75.44	75.26	75.44	75.44	75.26	75.46	75.44	75.26	2.8	2.5	0.6	3.6	2.3	0.8	4.0	2.9	1.0
00016BC16	75.29	75.30	75.33	75.29	75.34	75.33	75.29	75.34	75.52	3.1	3.0	1.4	3.6	2.4	1.6	4.0	3.1	1.4
00016BD16	74.50	74.40	74.38	74.73	74.40	74.40	74.83	74.51	74.40	3.2	3.1	2.0	3.6	2.6	1.9	4.0	3.2	1.9
00005PB16	74.48	74.23	74.01	74.71	74.41	74.01	74.81	74.49	74.01	2.9	2.6	1.8	3.6	2.7	1.7	4.0	2.9	1.7
00005PC16	66.81	66.62	66.45	67.00	66.75	66.62	67.09	66.82	66.75	2.6	1.7	0.9	3.6	2.3	0.9	4.0	2.6	0.9
00002_16	66.60	66.53	66.40	66.68	66.58	66.61	66.71	66.61	66.74	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
00001PB16	66.61	66.54	66.40	66.68	66.58	66.61	66.71	66.61	66.74	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
00001PC16	64.08	64.45	64.67	64.61	65.02	65.43	64.81	65.32	65.75	1.6	1.6	1.4	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.5

Canale di Stabbio

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00024_16	76.19	75.84	76.11	76.43	76.12	76.11	76.54	76.21	76.09	0.7	0.4	0.1	0.9	0.6	0.2	1.1	0.7	0.2
00022BB16	76.20	75.86	75.14	76.44	76.13	75.14	76.55	76.22	75.17	0.7	0.4	0.3	0.9	0.6	0.3	1.1	0.7	0.3
00022BC16	76.20	75.86	75.04	76.45	76.14	75.05	76.56	76.22	75.05	0.7	0.4	0.5	0.9	0.6	0.5	1.1	0.7	0.5
00022BD16	75.01	74.89	74.74	75.11	74.97	74.75	75.15	75.02	74.77	0.7	0.4	0.9	0.9	0.6	0.9	1.1	0.7	0.8
00021PB16	74.92	74.82	74.70	75.01	74.89	74.71	75.05	74.93	74.73	0.7	0.4	0.8	0.9	0.6	0.8	1.1	0.7	0.8
00021PC16	73.77	73.77	73.77	73.77	73.77	73.77	73.77	73.77	73.77	0.7	0.4	0.3	0.9	0.6	0.3	1.1	0.7	0.3
00020_16	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	71.60	0.7	0.4	0.2	0.9	0.6	0.2	1.0	0.7	0.2
00013_16	60.67	61.07	61.37	61.26	61.90	62.67	61.51	62.41	63.03	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
00012PB16	76.19	75.84	76.11	76.43	76.12	76.11	76.54	76.21	76.09	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
00012PC16	76.20	75.86	75.14	76.44	76.13	75.14	76.55	76.22	75.17	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7

Fosso della Foce

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00039_16	136.95	136.94	136.76	137.06	137.04	136.81	137.11	137.09	136.83	13.06	12.55	4.08	18.96	17.88	6.18	21.92	20.54	7.13
00025PB16	132.20	132.10	130.48	132.87	132.82	130.88	133.03	132.95	131.06	13.03	12.54	4.08	18.84	17.83	6.18	21.65	20.34	7.13
00025PC16	124.93	124.91	124.57	125.12	125.10	124.67	125.21	125.17	124.71	12.98	12.51	4.08	18.89	17.91	6.18	21.74	20.41	7.13
00021_16	121.61	121.59	121.24	121.80	121.77	121.34	121.89	121.85	121.39	12.98	12.51	4.08	19.10	18.18	6.17	22.17	20.79	7.12
00019_16	120.48	120.46	120.11	120.69	120.66	120.21	120.78	120.74	120.25	12.98	12.51	4.08	19.11	18.17	6.17	22.17	20.79	7.12
00015BB16	118.44	118.42	117.92	118.78	118.73	118.04	118.94	118.87	118.10	12.98	12.51	4.90	19.12	18.14	6.17	22.18	20.78	7.12
00015BC16	118.43	118.40	117.90	118.77	118.72	118.02	118.93	118.86	118.08	12.98	12.51	4.92	19.12	18.14	6.17	22.18	20.78	7.12
00015BD16	118.45	118.43	117.93	118.78	118.73	118.06	118.94	118.87	118.11	12.98	12.51	4.93	19.12	18.14	6.17	22.18	20.78	7.12
00014PB16	118.49	118.47	117.96	118.82	118.76	118.08	118.97	118.90	118.14	12.98	12.51	5.89	19.12	18.14	6.17	22.18	20.78	7.12

Canale del Rio

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00006PC16	77.49	77.35	76.83	77.82	77.71	76.94	77.96	77.83	76.99	29.26	25.36	9.71	40.54	34.69	13.78	45.73	39.34	15.46
00004PB16	77.29	77.24	76.87	77.48	77.43	76.98	77.59	77.51	77.03	10.79	9.35	3.59	15.38	12.98	5.09	17.80	15.07	5.71
00004PC16	74.39	74.83	75.07	75.07	75.50	75.76	75.32	75.72	75.92	0.01	0.04	0.01	0.02	0.03	0.01	0.04	0.03	0.01
00004BC16	74.39	74.83	75.07	75.07	75.50	75.76	75.32	75.72	75.92	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01
00001BB16	74.39	74.83	75.07	75.07	75.49	75.72	75.32	75.68	75.91	5.38	3.10	0.05	11.30	10.02	0.05	15.76	17.31	0.07
00001BC16	74.39	74.83	75.07	75.07	75.50	75.73	75.32	75.69	75.91	5.49	3.14	0.05	11.56	10.21	0.05	16.07	17.68	0.07

Fosso del Burro

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00010_16	79.55	79.41	79.09	79.67	79.52	79.17	79.71	79.58	79.19	3.43	2.29	0.56	4.81	3.20	0.88	5.49	3.66	1.02
00009PB16	78.90	78.84	78.37	78.99	78.89	78.60	79.03	78.92	78.62	3.78	2.87	0.70	4.78	3.61	1.11	5.33	3.93	1.28
00009PC16	71.95	72.42	72.62	72.57	72.94	73.15	72.79	73.10	73.30	3.28	2.81	0.70	3.89	3.18	1.09	4.20	3.37	1.25

Affluente Fosso del Burro

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00002_16	81.22	81.16	81.04	81.27	81.21	81.08	81.29	81.23	81.08	0.88	0.58	0.14	1.23	0.81	0.23	1.41	0.92	0.26
00001_16	79.74	79.68	79.56	79.78	79.72	79.59	79.81	79.74	79.60	0.88	0.58	0.14	1.23	0.81	0.23	1.41	0.92	0.26
00000_16	79.29	79.18	78.71	79.38	79.27	78.86	79.42	79.30	78.90	0.84	0.58	0.14	1.14	0.78	0.23	1.31	0.87	0.26

Fosso di San Ceccardo

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00008_16	77.84	77.81	77.78	77.88	77.83	77.78	77.89	77.85	77.78	0.73	0.48	0.12	1.02	0.67	0.19	1.16	0.76	0.22
00007PB16	77.18	77.11	76.96	77.24	77.16	77.00	77.26	77.19	77.01	0.73	0.48	0.12	1.02	0.67	0.19	1.16	0.76	0.22
00007PC16	76.35	76.35	76.35	76.36	76.35	76.35	76.37	76.35	76.35	0.73	0.48	0.12	1.02	0.67	0.19	1.16	0.76	0.22
00005PB16	71.80	72.09	72.31	72.24	72.60	72.83	72.45	72.76	72.96	0.73	0.48	0.12	1.02	0.67	0.19	1.16	0.76	0.22

Fosso di Valenza

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00090_16	90.31	90.38	90.08	90.49	90.54	90.20	90.56	90.61	90.25	19.30	22.92	8.92	30.49	34.36	13.88	36.07	39.99	16.11
00080_16	75.32	75.40	75.05	75.56	75.63	75.19	75.66	75.72	75.25	19.29	22.92	8.91	30.48	34.36	13.87	36.07	39.98	16.10
00055_16	62.52	62.61	62.22	62.81	62.92	62.36	62.96	63.07	62.43	19.28	22.91	8.91	30.46	34.34	13.86	36.03	39.95	16.08
00046PB16	59.83	60.11	58.88	60.64	60.91	59.36	61.03	61.29	59.56	19.28	22.90	8.90	30.45	34.33	13.86	36.03	39.93	16.09
00046PC16	58.48	58.58	58.09	58.79	58.88	58.29	58.92	59.01	58.37	19.28	22.90	8.90	30.45	34.33	13.86	36.03	39.93	16.09
00033PB16	54.49	54.67	53.86	55.04	55.20	54.17	55.24	55.36	54.31	19.27	22.90	8.90	30.44	34.33	13.85	36.02	39.93	16.08
00033PC16	53.75	53.89	53.30	54.16	54.30	53.54	54.36	54.48	53.69	19.27	22.90	8.90	30.44	34.32	13.85	36.02	39.93	16.08
00025PB16	52.94	53.12	52.37	53.47	53.64	52.72	53.71	53.87	53.04	19.39	23.05	9.24	30.62	34.48	14.74	36.20	40.10	19.77
00025PC16	51.38	51.47	51.11	51.66	51.75	51.30	51.79	51.89	51.56	19.45	23.11	9.39	30.68	34.54	15.35	36.27	40.16	22.07
00015PB16	49.32	49.49	48.86	49.84	50.01	49.27	50.09	50.26	49.89	19.74	23.41	10.21	31.02	34.87	18.61	36.65	40.49	32.02
00015PC16	48.98	49.12	48.64	49.35	49.45	48.94	49.50	49.60	49.39	19.75	23.43	10.24	31.04	34.88	18.70	36.66	40.51	32.28
00003PB16	47.14	47.50	46.31	47.75	47.80	47.04	47.83	47.91	47.77	19.73	23.39	10.23	25.94	26.59	18.67	26.95	27.84	26.15
00003PC16	45.58	45.70	45.45	45.73	45.73	45.62	45.73	45.73	45.78	20.17	24.84	10.13	26.97	26.56	18.67	27.21	26.72	27.58
00002BB16	44.51	45.05	44.53	45.02	45.05	45.00	45.02	45.05	45.23	38.37	52.65	7.36	57.65	55.31	55.48	56.94	55.99	73.94
00002BC16	42.54	42.78	43.22	42.95	43.55	44.45	43.21	44.08	44.93	39.48	53.79	7.26	58.83	56.47	59.03	58.11	57.13	78.31

Fosso del Topo

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00021PC16	34.45	34.41	34.10	34.71	34.51	34.22	35.15	34.62	34.28	1.50	1.50	0.72	1.50	1.50	1.12	1.50	1.50	1.31
00005PB16	34.29	34.20	33.54	34.63	34.39	33.71	35.09	34.53	33.77	1.70	1.60	0.72	2.53	1.66	1.20	4.07	2.06	1.41
00005PC16	34.24	34.15	33.23	34.48	34.34	33.44	34.64	34.44	33.53	1.76	1.61	0.72	3.04	1.78	1.21	5.05	2.45	1.42

Fosso di Bonascola

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00002PB16	37.43	37.14	35.80	37.98	37.75	36.04	38.21	37.92	36.15	13.17	10.42	2.49	18.70	16.42	3.77	18.12	17.96	4.64
00002PC16	37.23	36.99	35.65	37.73	37.47	35.92	37.98	37.66	36.04	13.15	10.42	2.51	19.16	16.81	3.77	18.09	18.41	4.71

Fosso di Spondarella

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00020PC16	45.08	44.83	44.23	45.63	45.06	44.35	45.69	45.28	44.41	2.70	2.70	0.72	2.70	2.70	1.14	2.70	2.70	1.33
00010PB16	45.06	44.78	44.15	45.62	45.04	44.28	45.68	45.26	44.34	3.06	2.80	0.72	3.21	3.04	1.14	3.21	3.15	1.33
00000PB16	42.77	42.39	41.40	43.30	43.01	41.66	43.42	43.17	41.78	4.74	3.28	4.06	5.87	4.81	6.79	5.87	5.38	7.80

Fosso di Monte Olivero

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00098PC16	45.47	45.25	44.09	46.01	45.81	44.35	46.05	45.98	44.46	17.29	17.67	6.57	21.85	22.05	9.82	24.14	24.22	11.22
00098BC16	45.46	45.23	44.06	46.00	45.80	44.32	46.04	45.96	44.43	17.55	17.85	6.58	22.27	22.35	9.84	24.55	24.58	11.24
00097_16	45.28	45.02	43.83	45.82	45.61	44.07	45.86	45.76	44.17	22.58	21.25	6.93	30.34	27.91	10.38	32.06	31.21	11.88
00080PB16	42.48	42.17	40.61	42.99	42.79	40.87	43.27	42.97	40.98	30.62	31.47	7.27	47.97	35.43	10.92	52.06	43.04	12.51
00080PC16	42.28	42.04	40.47	42.92	42.56	40.78	43.15	42.79	40.91	31.11	31.59	7.40	48.74	36.39	11.13	53.47	43.95	12.75
00074PB16	41.87	41.66	39.89	42.38	42.12	40.27	42.57	42.30	40.43	32.28	28.27	7.52	41.54	37.04	11.32	45.48	40.16	12.97
00074PC16	40.79	40.56	39.41	41.19	41.04	39.65	41.37	41.12	39.75	34.15	29.85	7.88	43.81	39.09	11.88	47.91	42.27	13.62
00055PB16	37.56	37.33	36.04	38.15	37.82	36.25	38.49	38.05	36.33	46.28	30.17	8.24	64.73	54.94	12.44	67.11	61.94	14.29
00055PC16	37.49	37.24	35.95	38.09	37.79	36.21	38.29	38.01	36.31	45.75	30.86	8.36	64.29	54.37	12.63	66.45	61.37	14.50
00036_16	36.27	36.13	34.54	36.58	36.42	34.87	36.72	36.53	35.01	55.42	46.13	11.62	77.57	65.35	17.76	89.41	73.84	20.49
00024PB16	35.91	35.77	33.81	36.18	36.05	34.21	36.28	36.14	34.38	46.60	43.42	11.86	52.96	49.79	18.14	56.27	52.04	20.93
00024PC16	34.41	34.32	33.38	34.64	34.51	33.60	34.79	34.61	33.69	47.25	44.02	11.90	53.74	50.27	18.20	57.28	52.77	21.00
00021BB16	33.78	33.68	32.65	34.05	33.89	32.87	34.22	34.03	32.98	50.35	46.64	12.71	60.03	54.00	19.55	66.68	58.20	22.58
00021BC16	33.76	33.66	32.48	34.03	33.88	32.79	34.21	34.02	32.92	51.12	47.32	12.87	61.20	55.01	19.81	67.95	59.32	22.88
00012_16	33.01	32.93	32.02	33.23	33.11	32.28	33.37	33.29	32.41	52.14	48.22	13.09	62.71	56.32	20.14	69.62	62.97	23.31
00010BB16	32.28	32.21	31.49	32.48	32.39	31.75	32.62	32.58	31.95	52.39	48.43	13.14	63.08	56.64	20.30	70.03	65.14	23.61
00010BC16	32.21	32.15	31.27	32.43	32.34	31.68	32.56	32.53	31.91	52.95	48.93	13.26	63.96	57.37	20.49	70.94	65.83	23.84
00004BB16	29.96	30.13	30.38	30.20	30.60	31.20	30.39	30.90	31.56	53.47	49.30	34.72	64.87	60.50	77.48	74.49	73.17	97.51
00004BC16	29.81	30.10	30.35	30.20	30.58	31.14	30.36	30.87	31.48	54.03	49.79	35.12	65.64	61.23	78.41	75.41	73.95	98.70

Fosso di Belvedere 2

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m ³ /s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h	0.5h	1.0h	3.25h
00116PB16	13.77	14.82	13.96	14.80	15.03	14.99	14.90	15.11	15.09	9.60	12.80	11.10	12.70	18.60	17.20	14.40	21.50	20.20
00116PC16	11.98	12.18	12.12	12.18	12.35	12.33	12.23	12.46	12.49	9.51	11.93	11.21	11.88	12.40	12.48	12.39	12.39	12.52
00111_16	11.44	11.63	11.57	11.63	12.04	11.99	11.72	12.30	12.37	9.50	11.87	11.10	11.89	12.34	12.51	12.54	12.27	12.57
00104PB16	10.74	11.05	10.94	11.03	11.86	11.78	11.26	12.16	12.24	9.50	12.06	11.10	11.87	19.58	16.30	14.39	18.57	19.01
00104PC16	10.42	10.67	10.57	10.65	11.68	11.57	10.88	12.09	12.18	9.50	12.07	11.10	11.86	19.84	16.54	14.49	18.90	19.36
00083PB16	9.67	10.05	9.89	10.02	11.56	11.43	10.40	12.00	12.09	9.50	12.01	11.10	11.83	16.70	16.46	14.49	17.78	18.00
00083PC16	8.67	9.20	9.01	9.18	9.84	9.82	9.57	9.93	9.95	9.48	11.94	11.09	11.80	16.83	16.57	14.16	17.79	18.00
00068PB16	7.94	8.63	8.38	8.60	9.30	9.28	9.06	9.37	9.38	9.45	11.87	11.07	11.79	15.24	15.09	13.64	15.85	15.99
00068PC16	7.50	7.66	7.61	7.66	7.69	7.69	7.69	7.69	7.69	9.45	11.88	11.07	11.79	12.69	12.68	12.53	12.71	12.70
00064PB16	7.42	7.59	7.53	7.59	7.62	7.62	7.62	7.62	7.62	8.02	9.43	8.95	9.38	9.69	9.70	9.67	9.73	9.68
00064PC16	6.72	6.81	6.78	6.81	6.82	6.82	6.82	6.82	6.82	6.61	7.35	7.08	7.33	7.49	7.50	7.49	7.52	7.49
00059PB16	6.73	6.84	6.81	6.84	6.85	6.86	6.85	6.85	6.86	5.99	6.59	6.39	6.57	6.68	6.69	6.70	6.69	6.68
00059PC16	6.04	6.08	6.06	6.08	6.08	6.08	6.08	6.09	6.09	6.83	7.61	7.39	7.60	7.69	7.72	7.71	7.65	7.72
00052_16	5.41	5.39	5.47	5.41	5.40	5.47	5.41	5.41	5.53	5.39	5.68	5.58	5.67	5.71	5.69	5.72	5.72	5.70
00036PB16	5.28	5.26	5.37	5.28	5.29	5.39	5.28	5.30	5.47	4.65	4.68	4.61	4.59	4.56	4.64	4.60	4.62	4.71
00036PC16	5.23	5.21	5.32	5.23	5.24	5.34	5.23	5.25	5.43	4.61	4.64	4.58	4.56	4.53	4.59	4.57	4.58	4.67
00016PB16	5.23	5.20	5.31	5.23	5.23	5.34	5.23	5.24	5.42	4.00	3.91	4.02	3.92	3.85	3.79	3.87	3.80	3.73
00016PC16	2.85	2.92	2.99	2.92	3.02	3.19	2.96	3.07	3.52	12.43	12.68	13.18	11.85	13.01	11.73	11.96	12.32	11.84
00016BC16	2.87	2.94	3.02	2.94	3.05	3.19	2.99	3.09	3.52	12.42	12.67	13.17	11.83	12.99	11.72	11.94	12.31	11.83
00008PB16	2.88	2.96	3.04	2.96	3.07	3.17	3.01	3.11	3.51	3.98	3.91	3.93	3.88	3.83	3.68	3.86	3.81	3.59
00008PC16	2.83	2.91	2.99	2.92	3.03	3.13	2.96	3.06	3.46	3.96	3.90	3.92	3.87	3.82	3.68	3.85	3.80	3.57
00001PB16	2.80	2.89	2.98	2.89	3.01	3.12	2.95	3.05	3.46	4.10	4.04	4.05	4.02	3.99	3.82	4.02	3.96	3.67
00001PC16	2.69	2.81	2.89	2.81	2.91	3.06	2.85	2.96	3.33	9.39	10.25	11.16	10.57	10.34	11.36	10.73	11.21	9.53

00164_06	2.46	2.47	2.45	2.47	2.57	2.76	2.48	2.68	2.89	4.3	4.2	3.1	4.4	4.4	4.8	4.4	5.0	4.8
00163PA06	2.46	2.47	2.45	2.47	2.57	2.76	2.48	2.69	2.89	4.3	4.3	3.1	4.3	4.4	4.8	4.5	5.0	4.8
00163PB06	2.46	2.47	2.45	2.47	2.57	2.76	2.48	2.69	2.89	4.3	4.3	3.1	4.3	4.4	4.8	4.5	5.0	4.8
00163PC06	2.43	2.44	2.43	2.44	2.55	2.74	2.45	2.66	2.87	4.2	4.2	3.0	4.3	4.3	4.6	4.4	4.8	4.6
00163PD06	2.43	2.44	2.43	2.44	2.55	2.74	2.45	2.66	2.87	4.3	4.2	3.0	4.4	4.4	4.7	4.4	4.8	4.7
00156PA06	2.46	2.47	2.45	2.46	2.57	2.75	2.47	2.70	2.87	7.6	7.6	4.9	7.7	8.0	8.7	7.7	8.6	8.6
00156PB06	2.44	2.45	2.43	2.44	2.55	2.74	2.45	2.68	2.87	7.7	7.7	5.0	7.8	8.2	8.8	7.9	8.9	8.7
00156PC06	2.42	2.42	2.40	2.42	2.53	2.72	2.42	2.66	2.85	11.2	11.2	6.9	11.1	11.3	12.7	11.0	12.8	12.4
00156PD06	2.38	2.38	2.39	2.38	2.52	2.72	2.39	2.64	2.85	11.2	11.2	7.0	11.2	11.5	12.7	11.0	12.9	12.5
00154_06	2.43	2.44	2.43	2.44	2.54	2.72	2.44	2.67	2.85	10.8	11.0	6.9	11.1	11.3	12.4	10.8	12.6	12.3
00147_06	2.38	2.38	2.39	2.38	2.53	2.72	2.39	2.64	2.85	8.5	8.2	7.2	8.4	8.9	8.9	8.5	9.5	9.2
00142_06	2.28	2.29	2.33	2.29	2.49	2.71	2.30	2.61	2.84	8.4	8.1	7.3	8.3	8.7	8.8	8.4	9.4	9.2
00139_06	2.16	2.21	2.31	2.17	2.47	2.70	2.20	2.58	2.84	8.4	8.2	7.2	8.3	8.7	8.8	8.4	9.4	9.2
00135_06	2.17	2.23	2.32	2.18	2.48	2.71	2.21	2.60	2.84	8.4	8.2	7.4	8.4	8.8	9.0	8.5	9.4	9.3
00127_06	2.15	2.21	2.30	2.17	2.45	2.70	2.20	2.57	2.84	5.7	5.5	5.6	5.8	7.4	8.8	5.8	8.2	9.3
00119_06	2.12	2.18	2.27	2.14	2.41	2.69	2.17	2.53	2.83	5.5	5.4	5.6	5.5	7.3	8.7	5.5	8.1	9.0
00111_06	2.04	2.11	2.20	2.07	2.31	2.69	2.10	2.44	2.83	5.4	5.4	5.6	5.4	7.3	7.4	5.4	8.0	7.4
00109PA06	2.04	2.12	2.20	2.08	2.32	2.69	2.11	2.44	2.83	5.4	5.3	5.6	5.4	7.2	7.4	5.4	8.0	7.4
00109PB06	2.04	2.12	2.20	2.08	2.32	2.69	2.11	2.44	2.83	5.4	5.3	5.6	5.4	7.2	7.4	5.4	8.0	7.4
00109PC06	2.01	2.08	2.17	2.04	2.27	2.68	2.07	2.40	2.81	5.4	5.3	5.6	5.4	7.2	7.4	5.4	8.0	7.4
00109PD06	2.00	2.08	2.16	2.04	2.27	2.68	2.07	2.40	2.81	5.4	5.3	5.6	5.4	7.2	7.4	5.4	8.0	7.4
00107_06	1.99	2.07	2.16	2.03	2.26	2.68	2.06	2.39	2.81	5.4	5.3	5.6	5.4	7.2	7.4	5.5	8.0	7.5
00097_06	1.95	2.04	2.15	2.00	2.27	2.68	2.03	2.40	2.82	5.4	5.3	4.4	5.3	5.3	5.1	5.4	5.4	5.2
00089_06	1.91	2.01	2.16	1.98	2.28	2.67	2.00	2.41	2.81	5.3	5.2	4.3	5.3	5.3	5.1	5.3	5.3	5.1
00080_06	1.89	2.00	2.15	1.96	2.28	2.68	1.99	2.41	2.82	5.4	6.5	6.9	5.4	7.1	7.0	5.2	8.3	6.9
00075_06	1.85	1.95	2.12	1.92	2.22	2.67	1.95	2.35	2.81	5.4	6.5	7.0	5.5	8.1	7.1	5.3	9.5	6.9
00069_06	1.75	1.86	2.09	1.82	2.14	2.66	1.86	2.28	2.80	7.0	8.0	7.7	7.8	9.4	9.7	8.0	10.5	10.3
00059_06	1.71	1.83	2.08	1.79	2.12	2.66	1.84	2.28	2.80	7.6	8.7	8.2	8.8	9.9	9.5	8.8	10.6	9.9
00058PA06	1.70	1.81	2.08	1.78	2.10	2.66	1.82	2.26	2.79	5.0	6.5	5.7	5.7	9.0	6.1	6.0	8.7	7.6
00058PB06	1.69	1.81	2.08	1.78	2.10	2.66	1.82	2.26	2.79	5.0	6.5	5.7	5.7	9.0	6.1	6.0	8.7	7.6
00058PC06	1.66	1.77	2.05	1.74	2.06	2.64	1.78	2.21	2.76	5.0	6.5	5.7	5.7	9.0	6.1	6.0	8.7	7.6
00058PD06	1.66	1.77	2.05	1.74	2.06	2.64	1.78	2.21	2.76	5.0	6.5	5.7	5.7	9.0	6.1	6.0	8.7	7.6
00057_06	1.65	1.76	2.05	1.73	2.05	2.64	1.77	2.21	2.76	5.0	6.5	5.7	5.7	9.0	6.1	6.0	8.7	7.6
00052_06	1.64	1.74	2.04	1.72	2.03	2.64	1.75	2.19	2.76	5.0	6.5	5.7	5.7	9.0	6.1	6.1	8.8	7.7
00047_06	1.64	1.73	2.04	1.72	2.02	2.64	1.75	2.19	2.75	5.0	6.5	5.6	5.7	9.0	6.2	6.1	9.2	8.1
00042_06	1.63	1.72	2.03	1.71	2.00	2.63	1.75	2.17	2.74	5.0	6.5	5.5	5.7	8.9	7.0	6.1	9.9	9.1
00038_06	1.61	1.70	2.03	1.69	1.99	2.62	1.72	2.15	2.72	5.6	6.7	5.7	6.4	9.8	10.4	6.9	11.8	14.4
00036PA06	1.61	1.69	2.03	1.69	1.98	2.61	1.72	2.13	2.70	5.6	6.7	5.7	6.4	10.1	11.5	6.9	12.5	16.8
00036PB06	1.61	1.69	2.03	1.69	1.98	2.61	1.72	2.13	2.70	5.6	6.7	5.7	6.4	10.1	11.5	6.9	12.5	16.8
00036PC06	1.58	1.67	2.00	1.66	1.95	2.58	1.69	2.10	2.67	5.7	6.7	5.7	6.4	10.1	11.5	6.9	12.5	16.8
00036PD06	1.58	1.67	2.00	1.66	1.95	2.58	1.69	2.10	2.67	5.7	6.7	5.7	6.5	10.1	11.5	6.9	12.5	16.8
00034_06	1.56	1.64	1.99	1.63	1.91	2.55	1.66	2.05	2.62	5.7	6.7	5.7	6.5	10.1	11.5	6.9	12.5	16.8
00025_06	1.54	1.62	1.99	1.62	1.89	2.56	1.65	2.04	2.61	5.8	6.7	5.7	6.6	10.1	10.1	6.9	12.5	14.5
00021_06	1.53	1.61	1.99	1.61	1.88	2.56	1.63	2.03	2.62	5.8	6.7	5.7	6.7	10.1	8.1	7.0	12.4	10.8
00017_06	1.47	1.55	1.97	1.55	1.81	2.55	1.57	1.95	2.62	5.8	6.8	5.9	6.7	10.0	6.3	7.0	12.4	7.0
00012_06	1.28	1.37	1.95	1.36	1.64	2.56	1.39	1.80	2.62	5.9	6.8	5.7	6.8	10.0	5.8	7.1	12.4	5.8
00010PA06	1.25	1.33	1.95	1.33	1.59	2.56	1.35	1.77	2.62	5.9	6.8	2.2	6.8	10.0	1.8	7.1	12.4	1.0
00010PB06	1.25	1.33	1.95	1.33	1.59	2.56	1.36	1.77	2.62	5.9	6.8	1.8	6.9	10.0	1.5	7.1	12.4	0.8
00010PC06	1.20	1.23	1.00	1.23	1.35	1.00	1.24	1.43	1.00	5.9	6.8	0.0	6.9	10.0	0.0	7.1	12.4	0.0
00010PD06	1.18	1.22	1.00	1.22	1.34	1.00	1.23	1.42	1.00	5.9	6.8	0.0	6.9	10.0	0.0	7.1	12.4	0.0
00009_06	1.17	1.19	1.00	1.19	1.27	1.00	1.20	1.32	1.00	5.9	6.8	0.0	6.8	10.0	0.0	7.1	12.4	0.0
00003_06	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	5.9	6.8	0.0	6.8	10.0	0.0	7.1	12.4	0.0

Fosso Carlone 2

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h
00051_08	2.13	2.15	2.14	2.15	2.40	2.98	2.16	2.58	2.98	1.1	1.6	1.3	1.6	2.6	2.1	1.8	3.1	2.5
00046_08	1.97	1.97	2.00	1.97	2.35	2.93	1.99	2.56	2.93	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	6.5	0.9	1.2	1.7
00043_08	1.89	1.90	2.00	1.89	2.22	2.95	1.99	2.43	2.95	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.9
00041_08	1.87	1.89	2.00	1.88	2.22	2.72	1.99	2.39	2.74	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.6
00040PA08	1.85	1.88	2.00	1.86	2.23	2.78	1.99	2.38	2.78	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.9	0.8	0.8	0.8
00040PB08	1.83	1.86	2.00	1.84	2.23	2.76	1.98	2.38	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	2.0	0.8	0.8	0.8
00040PC08	1.78	1.82	2.01	1.82	2.19	2.66	1.96	2.35	2.74	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	0.8	0.8	0.8
00040PD08	1.80	1.83	2.01	1.82	2.20	2.68	1.96	2.35	2.74	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.2	0.8	0.8	0.8
00038_08	1.78	1.83	2.01	1.82	2.18	2.72	1.97	2.34	2.74	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	2.9	0.8	0.8	0.8
00037PA08	1.77	1.82	2.01	1.82	2.17	2.69	1.96	2.33	2.74	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.9	0.8	0.9	0.8
00037PB08	1.77	1.82	2.01	1.82	2.17	2.70	1.96	2.32	2.74	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	1.6	0.9	0.9	0.8
00037PC08	1.74	1.80	2.01	1.81	2.15	2.68	1.96	2.30	2.75	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	1.3	0.9	1.1	0.8
00037PD08	1.74	1.80	2.01	1.81	2.14	2.67	1.96	2.30	2.75	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.3	0.8	1.1	0.8
00035_08	1.74	1.80	2.01	1.81	2.14	2.64	1.96	2.29	2.75	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.1	0.8	1.1	0.8
00030_08	1.71	1.80	2.01	1.81	2.13	2.63	1.95	2.29	2.75	0.8	0.8	0.8	0.8	1.4	0.8	0.8	2.0	1.4
00026_08	1.68	1.80	2.01	1.80	2.12	2.61	1.93	2.28	2.74	0.8	0.8	0.8	0.8	2.0	0.8	1.2	2.8	1.6
00023PA08	1.67	1.80	2.01	1.80	2.13	2.60	1.92	2.28	2.74	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	0.8	1.2	2.0	1.1
00023PB08	1.67	1.80	2.01	1.80	2.13	2.60	1.92	2.28	2.74	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	0.8	1.2	2.0	1.1
00023PC08	1.65	1.80	2.02	1.79	2.12	2.62	1.89	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	0.8	1.2	2.0	1.1
00023PD08	1.65	1.80	2.02	1.79	2.12	2.62	1.89	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	0.8	1.2	2.0	1.1
00021_08	1.65	1.80	2.02	1.79	2.12	2.62	1.90	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	0.8	1.2	2.0	1.1
00020PA08	1.65	1.80	2.02	1.79	2.12	2.62	1.90	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	0.8	1.2	2.0	1.1
00020PB08	1.65	1.80	2.02	1.79	2.12	2.62	1.90	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	0.8	1.2	2.0	1.0
00020PC08	1.64	1.80	2.03	1.78	2.11	2.63	1.88	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	0.8	1.2	2.0	1.0
00020PD08	1.64	1.80	2.03	1.78	2.11	2.63	1.88	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	0.8	1.2	2.0	1.0
00019_08	1.64	1.80	2.03	1.77	2.12	2.64	1.87	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.7	0.8	1.2	2.0	1.0
00014_08	1.64	1.80	2.03	1.77	2.11	2.63	1.87	2.27	2.76	0.8	0.8	0.8	0.8	1.8	0.8	1.2	2.0	1.0
00004_08	1.64	1.80	2.03	1.77	2.11	2.63	1.86	2.27	2.76	0.5	0.4	0.2	0.5	1.2	0.2	0.6	1.3	0.1

00052_13	3.18	3.19	3.14	3.20	3.21	3.19	3.21	3.22	3.19	77.8	78.2	74.7	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00049_13	3.12	3.13	3.08	3.14	3.15	3.13	3.15	3.16	3.13	77.8	78.2	74.7	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00046_13	3.08	3.08	3.04	3.09	3.10	3.08	3.11	3.11	3.09	77.8	78.2	74.7	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00043_13	3.01	3.02	2.97	3.03	3.03	3.02	3.04	3.05	3.02	77.8	78.2	74.7	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00040_13	2.96	2.97	2.92	2.98	2.98	2.97	2.99	3.00	2.97	77.8	78.2	74.8	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00037_13	2.91	2.92	2.88	2.93	2.94	2.92	2.94	2.95	2.93	77.8	78.2	74.8	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00034PA08	2.79	2.80	2.77	2.81	2.81	2.80	2.82	2.82	2.80	77.8	78.2	75.7	79.0	79.6	78.2	79.9	80.6	78.5
00034PB08	2.79	2.80	2.77	2.80	2.81	2.80	2.81	2.82	2.81	77.8	78.2	75.8	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00034PC08	2.73	2.74	2.71	2.75	2.75	2.74	2.76	2.76	2.74	77.8	78.2	75.8	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.8
00032_08	2.67	2.67	2.64	2.68	2.69	2.67	2.69	2.70	2.68	77.8	78.2	75.5	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00031_08	2.62	2.62	2.59	2.63	2.64	2.62	2.64	2.65	2.63	77.8	78.2	75.4	79.0	79.6	78.1	79.9	80.6	78.5
00030_08	2.54	2.55	2.52	2.56	2.57	2.55	2.57	2.58	2.55	77.7	78.1	74.9	78.9	79.5	78.0	79.7	80.4	78.4
00029_08	2.52	2.53	2.49	2.54	2.54	2.53	2.54	2.55	2.53	77.5	77.8	74.8	78.6	79.2	77.8	79.4	80.0	78.1
00028_08	2.42	2.43	2.39	2.43	2.44	2.43	2.44	2.45	2.43	77.2	77.5	74.6	78.2	78.8	77.4	79.0	79.6	77.8
00027_08	2.35	2.35	2.32	2.36	2.37	2.35	2.37	2.38	2.36	77.2	77.5	74.6	78.2	78.8	77.4	79.0	79.6	77.8
00025_08	2.29	2.30	2.27	2.31	2.32	2.30	2.32	2.32	2.30	76.5	76.8	73.9	77.5	78.0	76.7	78.2	78.8	77.1
00023_08	2.17	2.17	2.14	2.18	2.19	2.17	2.19	2.20	2.18	74.6	74.9	72.3	75.6	76.1	74.9	76.3	76.8	75.2
00021_08	2.05	2.05	2.02	2.06	2.07	2.05	2.07	2.08	2.06	73.7	74.0	71.5	74.6	75.1	74.0	75.2	75.8	74.3
00017_08	1.98	1.99	1.96	1.99	2.00	1.99	2.00	2.01	1.99	73.4	73.9	71.4	74.4	74.9	73.9	75.0	75.6	74.2
00016_08	1.91	1.92	1.89	1.93	1.93	1.92	1.93	1.94	1.92	73.4	73.9	71.4	74.4	74.9	73.9	75.0	75.6	74.2
00010_08	1.64	1.65	1.62	1.65	1.66	1.65	1.66	1.67	1.65	73.4	73.9	71.4	74.5	75.0	73.9	75.1	75.7	74.2
00007_08	1.42	1.43	1.40	1.43	1.44	1.43	1.44	1.44	1.43	73.4	74.0	71.4	74.5	75.0	73.9	75.2	75.7	74.2
00005_08	1.18	1.19	1.17	1.19	1.19	1.19	1.19	1.20	1.19	73.4	74.0	71.4	74.5	75.0	73.9	75.2	75.7	74.2
00003_08	1.04	1.04	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	73.4	74.0	71.4	74.5	75.0	73.9	75.2	75.7	74.2
00000_08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	73.4	74.0	71.4	74.5	75.0	73.9	75.2	75.7	74.2

Fosso di Bocco Barbuto

Sezione	Livelli [m s.l.m.]									Portate [m3/s]								
	TR30			TR200			TR500			TR30			TR200			TR500		
	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h	1.0h	2.5h	6.0h
00119_08	29.24	28.94	28.49	29.84	29.29	28.78	29.96	29.45	28.90	35.6	26.0	14.3	52.7	37.7	21.5	61.1	43.5	25.0
00094_08	21.49	21.49	21.49	21.95	21.95	21.95	22.15	22.15	22.15	35.6	26.0	14.3	52.6	37.7	21.5	61.1	43.4	25.0
00086_08	20.23	20.02	19.65	20.54	20.28	19.91	20.61	20.38	20.00	35.6	26.0	14.3	52.6	37.7	21.5	58.9	43.4	25.0
00082_08	19.43	19.30	19.12	19.62	19.46	19.24	19.67	19.52	19.30	32.8	24.8	14.6	46.9	34.6	21.1	51.1	39.3	24.2
00075_08	18.20	18.16	18.11	18.25	18.21	18.12	18.26	18.23	18.12	23.7	20.8	17.6	28.0	24.3	18.7	29.0	25.8	19.5
00072_08	17.24	17.22	17.20	17.28	17.25	17.25	17.30	17.26	17.25	18.0	16.6	16.2	19.6	18.2	16.2	20.0	18.8	16.2
00069_08	16.80	16.79	16.77	16.83	16.81	16.79	16.84	16.82	16.80	10.5	10.5	10.9	10.5	10.5	10.9	10.5	10.5	10.9
00067_08	16.66	16.66	16.63	16.74	16.69	16.65	16.77	16.71	16.66	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
00066PB08	16.68	16.67	16.65	16.75	16.71	16.67	16.79	16.73	16.68	8.0	8.0	7.7	8.0	8.0	7.7	8.0	8.0	7.7
00066PC08	16.64	16.64	16.61	16.72	16.67	16.63	16.75	16.69	16.64	7.8	7.8	7.4	7.8	7.8	7.5	7.8	7.8	7.6
00062_08	16.52	16.52	16.49	16.61	16.56	16.51	16.66	16.58	16.52	7.5	7.5	7.4	7.6	7.5	7.5	7.6	7.5	7.6
00060_08	16.41	16.40	16.35	16.54	16.46	16.39	16.59	16.50	16.40	7.5	7.5	7.4	7.6	7.5	7.5	7.6	7.5	7.6
00057_08	16.25	16.23	16.13	16.42	16.32	16.22	16.46	16.37	16.23	7.5	7.5	7.4	8.0	7.5	7.5	8.4	7.7	7.6
00053_08	16.09	16.05	15.87	16.18	16.12	16.03	16.20	16.15	16.06	7.5	7.5	7.4	9.1	7.9	7.5	9.9	8.5	7.6
00049_08	16.06	16.01	15.72	16.16	16.10	15.97	16.19	16.13	16.01	8.0	8.0	8.2	8.0	8.0	8.6	8.2	8.0	8.7
00045_08	16.00	15.94	15.60	16.11	16.05	15.89	16.15	16.08	15.94	10.5	10.1	9.3	10.6	10.5	10.1	10.6	10.5	10.3
00033_08	15.59	15.54	15.26	15.69	15.69	15.57	15.71	15.71	15.64	16.1	14.5	12.0	17.0	15.6	14.1	17.4	15.9	14.6
00022_08	15.10	15.06	14.52	15.32	15.31	14.88	15.40	15.39	14.99	22.2	20.5	14.3	22.6	22.2	18.6	22.3	22.2	19.5
00015_08	14.62	14.59	14.09	14.84	14.85	14.48	14.93	14.94	14.61	26.7	24.2	14.3	29.0	27.6	20.2	29.5	27.8	21.9
00008_08	13.95	14.05	13.53	14.36	14.47	14.02	14.53	14.64	14.17	26.7	24.2	14.3	29.1	27.5	21.4	29.6	27.7	23.6