

**STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO DI SUPPORTO AL PIANO
OPERATIVO COMUNALE DI CARRARA.
AGGIORNAMENTO DELLA MODELLISTICA
IDROLOGICA-IDRAULICA, DELLA PERICOLOSITA' AI SENSI DEL
DPGR 53R/2011 E DEL PGRA E DEFINIZIONE DELLA MAGNITUDO
IDRAULICA AI SENSI DELLA LR 41/2018**

RELAZIONE IDROLOGICA - IDRAULICA

COMMITTENTE:



Comune di Carrara
Piazza 2 Giugno, 1
54033 Carrara

PROGETTISTI:

ING. ANDREA BENVENUTI

CODICE ELABORATO:

PROGETTO	LOTTO	FASE	DOC	ELABORATO	REV
L 6 7 7	0 1	S 0 3	T	R I I	A

REV.	DATA EMISSIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	Novembre 2019	A.Benvenuti	A.Benvenuti	A.Benvenuti

Indice generale

1. PREMESSA	3
2. AREA D'INDAGINE E QUADRO CONOSCITIVO	5
2.1 CORSI D'ACQUA OGGETTO DI STUDIO E RILIEVI TOPOGRAFICI.....	5
2.2 DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO.....	6
3. APPROCCIO METODOLOGICO	7
3.1 MODELLAZIONE ANALITICA.....	7
3.2 MODELLAZIONE QUALITATIVA.....	8
4. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO	9
4.1 CODIFICA DEI BACINI.....	10
4.2 PARAMETRI IDROLOGICI.....	11
4.3 EVENTI METEORICI.....	12
4.4 RISULTATI DELLA MODELLISTICA IDROLOGICA (Q_{MAX}).....	13
5. IMPLEMENTAZIONE MODELLO IDRAULICO	15
5.1 MODELLAZIONE ANALITICA.....	15
5.1.1 Caratterizzazione geometrica dei corsi d'acqua e dell'area di studio.....	15
5.1.2 Condizioni al contorno.....	16
5.1.3 Parametri del modello idraulico.....	17
5.2 MODELLAZIONE QUALITATIVA.....	18
6. DETERMINAZIONE DELLE AREE A PERICOLOSITÀ IDRAULICA	19
APPENDICE A: MODELLISTICA IDROLOGICO-IDRAULICA	21
A.1 MODELLISTICA IDROLOGICA.....	21
A.1.1 Regime pluviometrico – Studio Regionale LSPP.....	21
A.1.2 Calcolo della pioggia di progetto su un bacino idrografico.....	21
A.1.3 Calcolo degli idrogrammi di progetto.....	21
A.2 MODELLISTICA IDRAULICA.....	24
A.2.1 Modellistica Monodimensionale Mike 11.....	24
A.2.1.1 Modulo Idrodinamico (Hd).....	25
A.2.2 Descrizione Delle Condizioni Di Moto Simulate.....	25
A.2.3 Equazioni Generali Di De Saint Venant.....	25
A.2.4 Simulazione Delle Correnti Veloci Con L'approccio Dell'onda Dinamica.....	26
A.2.5 Approssimazione Dell'onda Diffusiva.....	26
A.2.6 Descrizione In Corrispondenza Di Strutture.....	26
A.2.7 Resistenza D'attrito.....	27
A.2.8 Condizioni Iniziali.....	27
A.2.9 Metodo Di Soluzione e Condizioni al Contorno.....	27
A.2.10 Modellistica bidimensionale Mike 21.....	28
A.2.11 Modulo Idrodinamico (HD).....	28
A.2.12 Modellistica Mike Flood.....	31

Indice delle tabelle

Tabella 2-1: Elenco dei corsi d'acqua oggetto di studio.	5
Tabella 2-2: Rilievi topografici.	5
Tabella 4-1: Riepilogo dei modelli idrologici utilizzati nelle diverse simulazioni effettuate.	9
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.	12
Tabella 4-5: Portate massime [mc/s] TR 30 anni.	13
Tabella 4-6: Portate massime [mc/s] TR 200 anni.	14
Tabella 5-1: Riepilogo dei tombamenti nell'abitato di Carrara.	16
Tabella 5-2: Valori del coefficiente di Manning associati alle sezioni fluviali.	17
Tabella 5-3: Valori del coefficiente di Manning in base alla tipologia di uso del suolo.	18

1. PREMESSA

Il presente studio costituisce un Aggiornamento dello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Operativo Comunale di Carrara, redatto dallo scrivente su affidamento del Comune di Carrara con Determinazione n. 26 del 25.02.2016.

A seguito della approvazione da parte della Regione Toscana della D.G.R.T. n. 902/2018 "Approvazione degli aggiornamenti degli studi idrologici relativi ai Bacini del Versilia, Carrione e Frigido" e dell'entrata in vigore della nuova LRT. 41/2018 "Disposizioni in materia di rischio alluvioni e di tutela dei corsi d'acqua in attuazione del D.Lgs. 23 febbraio 2010, n.49 (Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione del rischio alluvioni). Modifiche alla LR 80/2015 e alla 65/2014", il Comune ha provveduto mediante atto aggiuntivo (determinazione n. 358 del 15/03/2019) all'affidamento di un incarico finalizzato all'aggiornamento della modellistica idrologica e idraulica e delle carte dei battenti, delle velocità e delle pericolosità ai sensi del D.P.G.R. 53/R del 25.10.2011 e del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (P.G.R.A.) nonché alla definizione della magnitudo idraulica ai sensi della LRT. 41/2018.

Con Delibera n. 11 del 19 dicembre 2018, l'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale ha provveduto all'aggiornamento del reticolo principale delle UoM Toscana Nord, Toscana Costa e Ombrone, definito ai sensi dell'art. 5 della disciplina di PGRA, inserendo nel reticolo di riferimento contenuto nell'Allegato n. 4 della disciplina di PGRA, anche il Torrente Carrione dalla confluenza con il fosso Torano alla foce. Ciò comporta che le modifiche alle mappe delle aree a pericolosità idraulica da alluvione siano di competenza dell'Autorità di Distretto, ai sensi dell'art. 14 della Disciplina di Piano del PGRA.

Alla luce di quanto sopra, lo scrivente ha provveduto a redigere uno studio idrologico idraulico sul Torrente Carrione finalizzato all'aggiornamento delle mappe della pericolosità idraulica da alluvione fluviale ai sensi dell'art. 14 della Disciplina di Piano del PGRA dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale.

A tal fine sono stati considerati gli elementi idrologico-idraulici necessari per caratterizzare la probabilità di esondazione del corso d'acqua d'interesse (T. Carrione dalla confluenza con il fosso Torano alla foce), definendo la pericolosità idraulica secondo la seguente classificazione, ai fini dell'aggiornamento del PGRA D.Lgs. 49/2010:

- 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.

Con Seduta della Conferenza Operativa del 10/10/2019, l'Autorità di Distretto ha espresso parere positivo all'approvazione delle modifiche delle perimetrazioni delle aree a pericolosità da alluvione sul Torrente Carrione proposte.

Tutto ciò premesso, il presente studio si propone di aggiornare la pericolosità idraulica all'interno del territorio comunale, rivedendo gli input idrologici e modellando i corsi d'acqua costituenti la rete idraulica superficiale in un unico scenario caratterizzante lo stato attuale del territorio, che ricomprenda sia il reticolo principale (Torrente Carrione, di competenza dell'Autorità di Distretto Appennino Settentrionale, per il quale è stato mutuato il succitato studio di aggiornamento delle mappe di pericolosità del PGRA) che il reticolo secondario (di competenza del Genio Civile, ad integrazione e completamento del modello sviluppato sul Carrione).

Ai sensi del DPGR 53R/2011, la pericolosità idraulica del territorio è stata definita 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.

Ai fini dell'aggiornamento delle mappe del PGRA D.Lgs. 49/2010, le aree sono state 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.

Per tener conto dei condizionamenti idraulici di cui alla L.R. 41/2018 nella definizione dei criteri generali di fattibilità idraulica degli interventi, a partire dai risultati del modello idraulico implementato per la definizione delle aree soggette ad inondazione per eventi con TR=200 anni (scenario per alluvioni poco frequenti), si è proceduto infine alla definizione della magnitudo idraulica secondo la seguente classificazione:

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

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: aggiornamento degli input idrologici a seguito del Progetto di Approfondimento Conoscitivo per l'Idrologia dei Bacini del Carrione e del Frigido. Ricalibrazione modello idrologico MOBIDIC - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze - Prof. Fabio Castelli;
- modellazione idraulica: implementazione di un Modello Idraulico Unico comprendente tutti i corsi d'acqua costituenti la rete idraulica superficiale principale ed il territorio comunale potenzialmente soggetto ad allagabilità;
- analisi dei risultati con individuazione delle aree allagabili, perimetrazione delle aree a pericolosità idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 e delle aree a pericolosità da alluvione ai sensi del PGRA D.Lgs. 49/2010, definizione della magnitudo idraulica ai sensi della L.R. 41/2018.

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 ai sensi della L.R.79/2012.

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. 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 (rif. *Tavola 1 – Inquadramento*).

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	
	Aff. sx Torrente Carrione	Fosso di Monterosso
		Fosso del Bugliolo
		Fosso della Foce
		Fosso dell'INPS
		Fosso del Rio
		Canale del Rio
		Fosso del Burro
		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	
	Aff. dx Torrente Carrione	Fosso di Acquafiora
		Fosso di S. Martino 1
		Fosso di S. Martino 2
		Fosso di Stabbio
		Canale di Stabbio
Fosso Valenza		
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 sono riportati in *Tavola 3A – Modello Idraulico – 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.

Corso d'acqua	Anno Rilievo	Provenienza Rilievo
T. Carrione	2015	Commissario Delegato ex L.228/2012
Affluenti T. Carrione	2016	Hydrogeo
F. Maestra e affluenti	2003-2006-2008	Consorzio di Bonifica 1 Toscana Nord
T. Parmignola e affluenti	2006-2008-2013	Comune di Carrara
T. Lavello e affluenti	2014-2016	Comune di Carrara-Hydrogeo

Tabella 2-2: Rilievi topografici.

Ad esclusione delle sezioni di rilievo effettuate dal Commissario Delegato ex L. 228/2012 e da Hydrogeo Ingegneria, considerate attendibili e di certa e verificata provenienza, è stato effettuato un controllo della qualità delle sezioni impiegate mediante raffronto con i dati LIDAR (1x1 m) del Ministero dell'Ambiente, Fonte dei dati: Regione Toscana – "Rilievi LIDAR". In generale si osserva accordo tra le sezioni di rilievo e quelle ottenute da dati LIDAR; gli scostamenti massimi si verificano, per alcune sezioni, in corrispondenza dell'alveo, ma

tale discrepanza è dovuta al fatto che il rilievo LIDAR non considera i punti sotto il livello idrico, mentre c'è una buona corrispondenza sulle quote di sponda.

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);
- 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;
- 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;
- 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;
- Progetto di Approfondimento Conoscitivo per l'Idrologia dei Bacini del Carrione e del Frigido. Ricalibrazione modello idrologico MOBIDIC - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze – 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 ietogrammi sintetici definiti in base alle Curve di Possibilità Pluviometrica per preassegnata durata di pioggia e tempo di ritorno. Attraverso la modellistica idrologica, vengono definiti gli idrogrammi di piena nelle sezioni prescelte del corso d'acqua considerato.

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

L'approccio modellistico per la caratterizzazione della pericolosità idraulica di tipo "analitico" prevede una modellazione idraulica accoppiata 1D-2D di dettaglio con input idrologici derivanti dall'analisi idrologica. L'input idrologico è caratterizzato da idrogrammi di piena rappresentati da immissioni puntuali o distribuite lungo l'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".

A tal fine è stato implementato un Modello Idraulico Unico che ricomprende:

- il Torrente Carrione, dalla confluenza con il fosso Torano alla foce, ed i suoi affluenti principali;
- l'asta principale del Torrente Lavello ed il suo maggiore affluente in destra idraulica, il Fosso Belvedere 2;
- il Torrente Parmignola, da monte dell'attraversamento della Via Aurelia e della linea ferroviaria fino alla foce, ed il suo affluente Fosso di Bocco Barbuto;
- la Fossa Maestra, da monte della ferrovia fino alla foce, ed i suoi principali affluenti.

Il reticolo di studio del modello analitico è riportato in *Tavola 3A – Modello Idraulico – Planimetria*.

Gli scenari simulati riguardano eventi con tempi di ritorno pari a 30 e 200 anni. Le durate di pioggia simulate sono 0.5, 1.0, 2.5, 3.25 e 6 ore, risultanti dalla modellistica idrologica le durate critiche che massimizzano le portate di piena ed i volumi dei bacini del Torrente Carrione e dei corsi d'acqua minori, nonché la loro mutua interazione.

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 potenziali 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".

Gli scenari di riferimento per l'implementazione del modello qualitativo sono i tempi di ritorno TR 30-200 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 due 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, aggiornamento 2018);
- Modello di Nash a parametri concentrati con modello di infiltrazione asintotico a soglia (Nash, 1957; Rodriguez-Iturbe e Rinaldo, 1997).

Il modello a parametri distribuiti MOBIDIC è stato impiegato per determinare gli idrogrammi di piena per l'asta principale del Torrente Carrione e per le aste fluviali afferenti ai bacini delle "acque basse", ovvero Fossa Maestra e del Torrente Lavello.

Per quanto attiene gli affluenti del Torrente Carrione, per le durate che massimizzano i picchi di portata ed i volumi del bacino complessivo (3.25 e 6 ore) è stato impiegato il modello a parametri distribuiti MOBIDIC, mentre per le durate di pioggia più brevi, che massimizzano le portate di piena degli affluenti, ovvero 0.5 e 1.0 ora, e per lo scenario di durata 2.5 ore (che massimizza gli effetti di mutua interazione nel tratto abitato), a scopo cautelativo, i contributi idrologici dei corsi d'acqua minori sono stati calcolati con il modello di Nash a parametri concentrati ed il 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 Barbutto, che presentano caratteristiche geomorfologiche di torrenti montani e pertanto simili a quelle degli affluenti del Torrente Carrione.

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).

Nome corso d'acqua	TR [anni]	Durata di pioggia [ore]				
		0.50	1.00	2.50	3.25	6.00
Torrente Carrione	30, 200	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC
Affluenti Torrente Carrione	30, 200	NASH,IA,Ks	NASH,IA,Ks	NASH,IA,Ks	MOBIDIC	MOBIDIC
Torrente Lavello e affluenti	30, 200	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC
Torrente Prmignola e affluenti	30, 200	NASH,IA,Ks	NASH,IA,Ks	NASH,IA,Ks	NASH,IA,Ks	NASH,IA,Ks
Fossa Maestra e affluenti	30, 200	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC	MOBIDIC

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 (durate di pioggia pari a 3.25-6.00 ore) è stato impiegato un K_r derivante da un areale pari all'estensione dell'intero bacino idrografico del Torrente Carrione. Per le simulazioni tese a massimizzare i picchi di piena degli affluenti del Carrione (0.50-1.00-2.50 ore) è stato impiegato un K_r pari a 1. Per il 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 bacino di appartenenza ("CL" per Carrione e Lavello e "MP" per Fossa Maestra e Parmignola) e 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 si riporta l'elenco degli input idrologici (evidenziati anche in *Tavola 3A – Modello Idraulico– Planimetria*, per la localizzazione planimetrica delle sole immissioni puntuali) suddiviso per bacini e corsi d'acqua.

BACINO	TIPO IMMISSIONE	CODICE	CORSO D'ACQUA	SEZIONE
BACINO TORRENTE CARRIONE	Carrione Alto	CM	CL001 TORRENTE CARRIONE	00862_15
	Torano	CP	CL002 FOSSO DI TORANO	00795_15
	Gragnana	CP	CL003 TORRENTE GRAGNANA	00727_15
	San Martino	CM	CL004 FOSSO DI S. MARTINO 1	00011_16
		CM	CL005 FOSSO DI S. MARTINO 2	00052_16
		CM	CL006 FOSSO DI STABBIO	00021_16
		CM	CL007 CANALE DI STABBIO	00024_16
	Rio	CM	CL008 FOSSO DI MONTEROSSO	00076_16
		CM	CL009 FOSSO DEL BUGLILOLO	00018PC16
		CM	CL010 FOSSO DELLA FOCE	00039_16
		CM	CL011 FOSSO DELL'INPS	00031_16
		CM	CL012 FOSSO DEL RIO	00029_16
	Burro	CD	CL013 CANALE DEL RIO INTERBAC.	00066PC16-00001BC16
		CM	CL014 FOSSO DEL BURRO	00010_16
		CM	CL015 FOSSO DEL BURRO AFFLUENTE	00002_16
	Ficola	CM	CL016 FOSSO DI SAN CECCARDO	00008_16
		CM	CL017 FOSSO DI FICOLA	00046PB16
	Fossola e Valenza	CM	CL018 CANALE DI FOSSOLA	00165_16
		CM	CL019 FOSSO DI VALENZA	00090_16
		CD	CL020 CANALE DI FOSSOLA INTERBAC.	00165_16-00001_16
	Bonascola	CM	CL021 FOSSO DEL TOPO	
		CM	CL022 FOSSO DI BONASCOLA	00082BC16
		CM	CL023 FOSSO DI SPONDARELLA	00053_16
		CM	CL024 FOSSO DI BOTRIA	00050_16
		CM	CL025 FOSSO DI MONTEOLIVERO	00173_16
		CP	CL026 FOSSO DI ACQUAFIORA	
		CP	CL027 FOSSO DI MONTEGRECO	
		CD	CL028 FOSSO DI MONTEOLIVERO INTERBAC. URBANO	00098PC16-00004BC16
		CD	CL029 FOSSO DI MONTEOLIVERO INTERBAC. COLLINARE	00098PC16-00004BC16
	Costaccia e Ficocchia	CM	CL030 FOSSO DI FICOCCHIA	00191_16
		CM	CL031 FOSSO DI COSTACCIA	00031_16
BACINO TORRENTE LAVELLO	CM	CL032 TORRENTE LAVELLO	00276_14	
	CM	CL033 FOSSO BELVEDERE 2	00116PB16	
	CP	CL033bis AFFLUENTE FOSSO BELVEDERE 2	00036PC16	
	CD	CL034 TORRENTE LAVELLO INTERBAC.	00202_14-00002_14	
	CP	P001 IDROVORA TORRENTE LAVELLO	00142_14	
	CP	P002 IDROVORA TORRENTE LAVELLO	00100_14	
BACINO FOSSA MAESTRA	CM	MP001 FOSSA MAESTRA	00271PC08	
	CM	MP002 FOSSO TRE CANALI	00200PA08	
	CM	MP003 CANALE DI BOLFANO	00101PC08	
	CD	MP004 FOSSO TRE CANALI INTERBAC. MONTE	00177_08-00136PB08	
	CD	MP005 FOSSO TRE CANALI INTERBAC. VALLE	00134_08-00007_08	
	CD	MP006 FOSSA MAESTRA INTERBAC. MONTE	00268_06-00156PB06	
	CM	MP007 FOSSO DUE CANALI	00137_06	
	CP	MP007bis FOSSO DUE CANALI INTERBAC. MONTE	00085_08	
	CD	MP008 FOSSO DUE CANALI INTERBAC. VALLE	00085_08-00004_08	
	CD	MP009 FOSSA MAESTRA INTERBAC. VALLE	000156PC06-00012_06	
	CM	MP010 FOSSO MACCHIA	00138PB08	
	CD	MP011 FOSSO MACCHIA INTERBAC.	00120PC03-00002_08	
	CM	MP012 FOSSO CARLONE 1	00189_08	
	CM	MP013 FOSSO CARLONE 2	00051_08	
	CD	MP014 FOSSO CARLONE 1 INTERBAC.	00102PC08-00005_08	
	CP	MP015 AFFLUENTE VALLE FOSSA MAESTRA	00069_06	
	CP	MP016 FOSSO PARADISO	00038_06	
BACINO TORRENTE PARMIGNOLA	CM	MP017 TORRENTE PARMIGNOLA	00285_08	
	CM	MP018 FOSSO DEL BOCCO BARBUTO	00119_08	
	CP	MP019 FOSSO DEL BOCCO BARBUTO AFFLUENTE	00033_08	
	CD	MP020 FOSSO DEL BOCCO BARBUTO INTERBAC.	00033_08-00008_08	

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 all' "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 – 2014" ed al "Progetto di Approfondimento Conoscitivo per l'Idrologia dei Bacini del Carrione e del Frigido. Attività 3: Ricalibrazione modello idrologico MOBIDIC - Prof. Fabio Castelli – 2018". In particolare, per quanto attiene il Torrente Carrione, sono stati utilizzati gli idrogrammi di piena lungo l'asta principale (per tutte le durate) e sui principali affluenti (per le durate pari a 3.25 e 6 ore) in output al modello idrologico a parametri distribuiti MOBIDIC aggiornato al 2018; mentre per i bacini di bonifica (Fossa Maestra, Torrente Lavello e relativi affluenti) si è proceduto ad una nuova implementazione del modello MOBIDIC, definendo con maggior dettaglio i rami del reticolo e le aree scolanti dei singoli contributi idrologici, verificando la coerenza dei risultati ottenuti con le curve di regressione delle portate e dei volumi di piena individuate nello studio dell'Ing.Castelli del 2014.

Per tutti i sottobacini studiati idrologicamente per mezzo del modello di Nash, sono state mutate le analisi idrologiche effettuate nello Studio Idrologico Idraulico di supporto al Piano Operativo Comunale di Carrara, redatto dallo scrivente. In particolare, è stata effettuata una classificazione geomorfologica del reticolo fluviale secondo il criterio di Horton-Strahler (*Tavola 2A – Modello Idrologico - 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 l_a (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, rif. *Tavola 2C – Modello Idrologico – Aree Boscate*).

Il parametro K_s (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 (rif. *Tavola 2B – Coefficiente di Infiltrazione a saturazione*) e calcolando un coefficiente medio per ogni bacino.

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

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

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

Nome Sottobacino	k [ore]	n [-]	la [mm]	Ks [mm/h]	A [kmaq]
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.

4.3 EVENTI METEORICI

Gli eventi meteorici studiati fanno riferimento a tempi di ritorno di 30 e 200 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, nonché per valutare in maniera completa gli effetti di mutua interazione tra i corsi d'acqua principali ed i suoi affluenti in termini di allagabilità del territorio. Infine, si sono voluti valutare gli effetti attesi anche per scenari di pioggia di durata maggiore, che, pur ingenerando picchi di portata inferiori rispetto alle durate critiche, mettono in gioco volumi di piena maggiori, che potenzialmente potrebbero essere causa di maggiori esondazioni.

In definitiva gli eventi meteorici studiati quali input al modello idraulico sono pertanto:

- TR=30 e 200 anni, durate 0.5, 1.0, 2.5, 3.25 e 6 ore.

L'aggiornamento dell'analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme fino all'anno 2012, nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra Regione Toscana e Università di Firenze di cui alla DGRT 1133/2012, pubblicate dalla Regione Toscana costituisce la base dati più aggiornata su cui implementare le analisi idrologiche.

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 4-5 e Tabella 4-6, i valori di portata massima, Q_{max} (mc/s). Per i risultati completi (tabulati degli idrogrammi di piena) si rimanda all'Allegato 1 – Modellistica Idrologica.

Codice	Corso d'acqua	TR30 - 0.50h	TR30 - 1.00h	TR30 - 2.50h	TR30 - 3.25h	TR30 - 6.00h
CL001	TORRENTE CARRIONE	62.5	76.2	89.5	89.2	78.7
CL002	FOSSO DI TORANO	64.9	78.6	87.3	85.4	72.4
CL003	TORRENTE GRAGNANA	40.6	48.6	54.5	53.6	46.2
CL004	FOSSO DI S. MARTINO 1	4.4	3.1	1.7	0.7	0.7
CL005	FOSSO DI S. MARTINO 2	2.0	1.3	0.7	0.7	0.6
CL006	FOSSO DI STABBIO	1.6	1.0	0.6	0.4	0.3
CL007	CANALE DI STABBIO	0.4	0.3	0.1	0.3	0.2
CL008	FOSSO DI MONTEROSSO	5.4	4.2	2.4	1.4	1.3
CL009	FOSSO DEL BUGLIOLO	6.9	5.4	3.1	1.8	1.6
CL010	FOSSO DELLA FOCE	13.1	12.7	7.5	4.5	4.0
CL011	FOSSO DELL'INPS	1.6	1.0	0.6	0.4	0.4
CL012	FOSSO DEL RIO	5.3	3.5	1.9	1.2	1.1
CL013	CANALE DEL RIO INTERBAC.	29.3	25.5	15.9	10.5	9.4
CL014	FOSSO DEL BURRO	3.4	2.2	1.2	0.5	0.5
CL015	FOSSO DEL BURRO AFFLUENTE	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1
CL016	FOSSO DI SAN CECCARDO	0.7	0.5	0.2	0.1	0.1
CL017	FOSSO DI FICOLA	17.6	18.7	11.6	4.7	4.3
CL018	CANALE DI FOSSOLA	23.9	24.7	15.4	8.0	6.8
CL019	FOSSO DI VALENZA	19.3	23.0	16.3	7.8	6.9
CL020	CANALE DI FOSSOLA INTERBAC.	13.8	16.6	12.6	5.6	4.8
CL021	FOSSO DEL TOPO	4.4	3.2	1.7	0.7	0.6
CL022	FOSSO DI BONASCOLA	9.8	7.6	4.1	1.6	1.4
CL023	FOSSO DI SPONDARELLA	5.0	3.2	1.7	0.7	0.6
CL024	FOSSO DI BOTRIA	9.6	9.9	6.2	2.4	2.1
CL025	FOSSO DI MONTEOLIVERO	10.7	7.5	4.0	1.5	1.4
CL026	FOSSO DI ACQUAFIORA	7.1	4.8	2.5	1.0	0.9
CL027	FOSSO DI MONTEGRECO	7.6	5.6	3.0	1.2	1.1
CL028	FOSSO DI MONTEOLIVERO INTERBAC. URBANO	16.6	12.6	6.8	2.6	2.3
CL029	FOSSO DI MONTEOLIVERO INTERBAC. COLLINARE	5.9	3.9	2.0	0.8	0.8
CL030	FOSSO DI FICOCCHIA	2.5	1.8	0.9	0.5	0.4
CL031	FOSSO DI COSTACCIA	3.5	2.5	1.2	0.7	0.6
CL032	TORRENTE LAVELLO	7.3	7.8	6.8	6.2	4.7
CL033	FOSSO BELVEDERE 2	4.0	4.2	3.7	3.4	2.7
CL033bis	AFFLUENTE FOSSO BELVEDERE 2	4.2	4.4	3.6	3.2	2.3
CL034	TORRENTE LAVELLO INTERBAC.	2.6	2.9	3.0	2.9	2.5
PO01	IDROVORA TORRENTE LAVELLO	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
PO02	IDROVORA TORRENTE LAVELLO	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
MP001	FOSSA MAESTRA	6.1	5.0	4.3	4.0	3.2
MP002	FOSSO TRE CANALI	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1
MP003	CANALE DI BOLFANO	8.2	7.2	6.0	5.7	4.8
MP004	FOSSO TRE CANALI INTERBAC. MONTE	4.1	3.6	2.9	2.7	2.2
MP005	FOSSO TRE CANALI INTERBAC. VALLE	2.8	2.4	2.0	1.9	1.5
MP006	FOSSA MAESTRA INTERBAC. MONTE	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3
MP007	FOSSO DUE CANALI	3.7	2.7	1.9	1.8	1.5
MP007bis	FOSSO DUE CANALI INTERBAC. MONTE	7.9	5.9	3.9	3.5	2.8
MP008	FOSSO DUE CANALI INTERBAC. VALLE	2.3	1.6	0.9	0.8	0.6
MP009	FOSSA MAESTRA INTERBAC. VALLE	5.2	4.0	2.3	2.0	1.3
MP010	FOSSO MACCHIA	1.6	1.3	0.9	0.9	0.8
MP011	FOSSO MACCHIA INTERBAC.	0.7	0.6	0.4	0.4	0.3
MP012	FOSSO CARLONE 1	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
MP013	FOSSO CARLONE 2	7.4	4.7	2.8	2.3	1.6
MP014	FOSSO CARLONE 1 INTERBAC.	6.5	3.9	1.8	1.4	0.9
MP015	AFFLUENTE VALLE FOSSA MAESTRA	6.9	4.7	2.7	2.3	1.7
MP016	FOSSO PARADISO	1.2	0.8	0.5	0.4	0.3
MP017	TORRENTE PARMIGNOLA	66.9	89.4	101.6	94.7	66.9
MP018	FOSSO DEL BOCCO BARBUTO	13.7	16.0	11.7	9.9	6.5
MP019	FOSSO DEL BOCCO BARBUTO AFFLUENTE	12.7	14.8	10.9	9.2	6.0
MP020	FOSSO DEL BOCCO BARBUTO INTERBAC.	3.9	4.6	3.4	2.9	1.9

Tabella 4-5: Portate massime [mc/s] TR 30 anni

Codice	Corso d'acqua	TR200 - 0.50h	TR200 - 1.00h	TR200 - 2.50h	TR200 - 3.25h	TR200 - 6.00h
CL001	TORRENTE CARRIONE	91.4	114.7	137.5	137.3	121.9
CL002	FOSSO DI TORANO	94.5	117.0	132.8	130.5	112.0
CL003	TORRENTE GRAGNANA	59.2	72.2	82.3	81.3	70.9
CL004	FOSSO DI S. MARTINO 1	6.2	4.3	2.4	1.2	1.0
CL005	FOSSO DI S. MARTINO 2	2.8	1.9	1.1	1.0	1.0
CL006	FOSSO DI STABBIO	2.2	1.4	0.8	0.6	0.5
CL007	CANALE DI STABBIO	0.6	0.4	0.2	0.4	0.4
CL008	FOSSO DI MONTEROSSO	7.7	5.9	3.4	2.1	1.9
CL009	FOSSO DEL BUGLIUOLO	9.9	7.6	4.4	2.7	2.4
CL010	FOSSO DELLA FOCE	19.0	18.0	10.9	6.7	6.0
CL011	FOSSO DELL'INPS	2.1	1.4	0.8	0.6	0.6
CL012	FOSSO DEL RIO	7.4	5.0	2.8	1.7	1.6
CL013	CANALE DEL RIO INTERBAC.	40.7	34.9	21.6	14.4	13.3
CL014	FOSSO DEL BURRO	4.7	3.1	1.7	0.9	0.8
CL015	FOSSO DEL BURRO AFFLUENTE	1.2	0.8	0.4	0.2	0.2
CL016	FOSSO DI SAN CECCARDO	1.0	0.6	0.4	0.1	0.1
CL017	FOSSO DI FICOLA	26.6	27.1	16.8	7.6	6.9
CL018	CANALE DI FOSSOLA	35.4	35.7	22.1	11.9	10.3
CL019	FOSSO DI VALENZA	30.5	34.3	23.6	12.3	10.9
CL020	CANALE DI FOSSOLA INTERBAC.	20.8	24.4	18.2	8.4	7.2
CL021	FOSSO DEL TOPO	6.3	4.5	2.5	1.0	0.9
CL022	FOSSO DI BONASCOLA	14.1	10.7	5.9	2.4	2.2
CL023	FOSSO DI SPONDARELLA	6.9	4.5	2.5	1.0	0.9
CL024	FOSSO DI BOTRIA	14.1	14.3	9.0	3.7	3.3
CL025	FOSSO DI MONTEOLIVERO	15.2	10.5	5.7	2.4	2.2
CL026	FOSSO DI ACQUAFIORA	10.0	6.6	3.6	1.6	1.4
CL027	FOSSO DI MONTEGRECO	10.9	7.9	4.3	1.8	1.7
CL028	FOSSO DI MONTEOLIVERO INTERBAC. URBANO	23.0	17.6	9.7	4.1	3.7
CL029	FOSSO DI MONTEOLIVERO INTERBAC. COLLINARE	8.2	5.5	2.9	1.3	1.2
CL030	FOSSO DI FICOCCHIA	3.6	2.6	1.4	0.7	0.7
CL031	FOSSO DI COSTACCIA	4.9	3.5	2.6	1.0	1.0
CL032	TORRENTE LAVELLO	10.1	10.9	9.8	9.1	7.1
CL033	FOSSO BELVEDERE 2	5.4	5.9	5.3	5.0	3.9
CL033bis	AFFLUENTE FOSSO BELVEDERE 2	5.8	6.2	5.3	4.8	3.5
CL034	TORRENTE LAVELLO INTERBAC.	3.6	4.1	4.3	4.2	3.8
P001	IDROVORA TORRENTE LAVELLO	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
P002	IDROVORA TORRENTE LAVELLO	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
MP001	FOSSA MAESTRA	8.7	7.5	6.5	6.0	5.0
MP002	FOSSO TRE CANALI	1.8	1.7	1.8	1.8	1.7
MP003	CANALE DI BOLFANO	11.4	10.4	9.1	8.8	7.4
MP004	FOSSO TRE CANALI INTERBAC. MONTE	5.7	5.2	4.4	4.2	3.4
MP005	FOSSO TRE CANALI INTERBAC. VALLE	3.9	3.5	3.0	2.8	2.3
MP006	FOSSA MAESTRA INTERBAC. MONTE	0.8	0.7	0.6	0.6	0.5
MP007	FOSSO DUE CANALI	5.1	3.8	2.8	2.6	2.3
MP007bis	FOSSO DUE CANALI INTERBAC. MONTE	10.8	8.2	5.8	5.3	4.3
MP008	FOSSO DUE CANALI INTERBAC. VALLE	3.2	2.2	1.3	1.2	0.9
MP009	FOSSA MAESTRA INTERBAC. VALLE	7.2	5.7	3.4	2.9	2.1
MP010	FOSSO MACCHIA	2.3	1.8	1.3	1.2	1.1
MP011	FOSSO MACCHIA INTERBAC.	1.0	0.8	0.6	0.5	0.5
MP012	FOSSO CARLONE 1	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0
MP013	FOSSO CARLONE 2	10.5	7.1	4.2	3.6	2.7
MP014	FOSSO CARLONE 1 INTERBAC.	9.1	5.6	2.8	2.2	1.6
MP015	AFFLUENTE VALLE FOSSA MAESTRA	9.4	6.6	3.9	3.4	2.5
MP016	FOSSO PARADISO	1.6	1.1	0.7	0.6	0.5
MP017	TORRENTE PARMIGNOLA	102.8	135.7	151.2	140.5	100.2
MP018	FOSSO DEL BOCCO BARBUTO	20.7	23.7	17.0	14.4	9.7
MP019	FOSSO DEL BOCCO BARBUTO AFFLUENTE	19.2	22.0	15.8	13.4	9.0
MP020	FOSSO DEL BOCCO BARBUTO INTERBAC.	6.0	6.9	4.9	4.2	2.8

Tabella 4-6: Portate massime [mc/s] TR 200 anni

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, monodimensionale in alveo e bidimensionale 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

Il modello idraulico implementato è un modello unico che ricomprende:

- il Torrente Carrione, dalla confluenza con il fosso Torano alla foce, ed i suoi affluenti principali;
- l'asta principale del Torrente Lavello ed il suo maggiore affluente in destra idraulica, il Fosso Belvedere 2;
- il Torrente Parmignola, da monte dell'attraversamento della Via Aurelia e della linea ferroviaria fino alla foce, ed il suo affluente Fosso di Bocco Barbuto;
- la Fossa Maestra, da monte della ferrovia fino alla foce, ed i suoi principali affluenti.

Il tratto modellato del Torrente Carrione si estende da monte dell'abitato di Carrara fino alla foce, per circa 8.6 km. Gli affluenti del Torrente Carrione presi in esame nello studio comprendono i corsi d'acqua che interessano la parte urbana di Carrara fino alla foce. 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 sottoelencati:

- 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.

Per il bacino del Torrente Parmignola è stato 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 della Fossa 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, la Fossa 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.

La modellazione idraulica monodimensionale si estende per un totale di circa 42 km di corsi d'acqua, mentre l'area coperta dal DTM, potenzialmente soggetta a modellazione bidimensionale, è pari circa a 28 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. Tali modifiche al modello digitale del terreno sono state apportate al fine di conciliare l'accuratezza della descrizione della propagazione dell'onda di piena sulle aree allagabili e la realizzazione di simulazioni con tempi di calcolo compatibili con lo svolgimento dell'analisi. Il dominio di calcolo è stato inoltre modificato in modo da inserire gli edifici sull'area 2D. Tale inserimento comporta che le aree coperte da edifici non facciano parte del dominio di calcolo e su di esse non vengano risolte le equazioni del moto. Tale scelta è dovuta al fatto che, in occasione di eventi di piena, la presenza di un edificio di una certa altezza funge da barriera che tende ad ostacolare il flusso della corrente. A scala globale quindi, la presenza di edifici agisce come una sorta di macroscabrezza, mentre a scala della singola strada o infrastruttura, interferisce con le linee di flusso della corrente deviandola e condizionandone il percorso. Sono state infine apportate modifiche al DEM per inserire due attraversamenti del rilevato autostradale in destra idraulica del T. Carrione, che non erano presenti nel LIDAR originario.

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 – 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 riportata in *Tavola 3A – Modello Idraulico– Planimetria* per quanto riguarda i punti di immissione puntuali. 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.

In Tabella 4-5 e Tabella 4-6 sono riportati i massimi valori 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 e 200 anni) e per le diverse durate di pioggia: 0.5, 1.0, 2.5, 3.25 e 6 ore.

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 $s/m^{1/3}$, come riportato in Tabella 5-2.

Corso d'acqua	Da sezione	A sezione	n [$s/m^{1/3}$]
Torrente Carrione	00862__15	00727__15	0.04
	00717__15	00238PC15	0.033
	00230__15	00001__15	0.029
Fosso di Monterosso	00076__16	00075PB16	0.033
Fosso del Bugliolo	00018PB16	00014PB16	0.033
Fosso della Foce	00039__16	00014PB16	0.033
Fosso dell'INPS	00031__16	00029PB16	0.033
Fosso del Rio	00029__16	00028PB16	0.033
Canale del Rio	00006PC16	00001BC16	0.033
Fosso del Burro	00010__16	00009PC16	0.033
Affluente sx Fosso del Burro	00002__16	00000__16	0.033
Fosso di San Ceccardo	00008__16	00005PB16	0.033
Fosso di Ficola	00046PB16	00001__16	0.033
Fosso del Topo	00021PC16	00005PC16	0.033
Fosso di Bonascola	00002PB16	00002PC16	0.033
Fosso di Botria	00050__16	00000PB16	0.033
Fosso di Monte Olivero	00098PC16	00004BC16	0.033
Fosso di S. Martino 1	00011__16	00002PC16	0.033
Fosso di S. Martino 2	00052__16	00051PB16	0.033
Fosso di Stabbio	00021__16	00001PC16	0.033
Canale di Stabbio	00024__16	00012PC16	0.033
Fosso Valenza	00090__16	00002BC16	0.033
Canale di Fossola	00165__16	00001__16	0.033
Fosso di Ficocchio	00191__16	00001PB16	0.033
Fosso della Costaccia	00031__16	00021PB16	0.033
Torrente Lavello	00276__14	00000__14	0.033
Fosso di Belvedere 2	00116PB16	00001PC16	0.033
Torrente Parmignola	00285__06	00000__08	0.033
Fosso di Bocco Barbuto	00119__08	00008__08	0.033
Fosso Maestra	00271PC08	00003__06	0.033
Canale di Bolfano	00101PC08	00006PC08	0.033
Fosso dei Tre Canali	00200PA08	00007__06	0.033
Fosso dei Due Canali	00137__06	00004__06	0.033
Fosso Macchia	00138PB08	00002__08	0.033
Fosso Carlone 1	00189__08	00005__08	0.033
Fosso Carlone 2	00051__08	00004__08	0.033

Tabella 5-2: Valori del coefficiente di Manning associati alle sezioni fluviali

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 5-3 e nella *Tavola 3B – Modello Idraulico – Distribuzione spaziale dei valori di scabrezza*.

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 5-3: Valori del coefficiente di Manning in base alla tipologia di uso del suolo.

I manufatti, quali ponti e tombamenti, presenti sui corsi d'acqua oggetto di studio sono stati modellati come composizione di due oggetti, un "culvert" e di un "weir", come suggerito da DHI Italia.

Tramite il "culvert" si inseriscono nel modello le informazioni geometriche dell'opera (lunghezza longitudinale e geometria dell'apertura) che determinano le caratteristiche del moto per livelli idrici che vanno dal fondo alveo fino all'estradosso. Tali informazioni permettono infatti di ricavare una specifica scala di deflusso sia per portate positive che per potenziali portate negative.

L'oggetto "weir" viene utilizzato per inserire nel modello le informazioni geometriche dell'opera (larghezza e quota "di sfioro") che intervengono a determinare il campo di moto in caso di sormonto della stessa.

In merito alle perdite di carico nelle strutture, i coefficienti utilizzati sono rispettivamente pari a 0.5 per la sezione di monte e 1.0 per quella di valle, sia per flusso positivo che negativo (tali valori sono quelli di default suggeriti da DHI).

Il valore del coefficiente di Manning [s/m^{1/3}] per le opere è stato assunto pari a 0.025.

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, derivano dal modello digitale del terreno a maglia 10x10 m della Regione Toscana.

Come scenari di riferimento sono stati assunti gli eventi con TR=30 e 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 involucro delle aree allagate derivanti dagli output delle simulazioni.

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 velocità nelle aree soggette ad allagamento.

Per ogni tempo di ritorno sono stati inviluppati i massimi livelli in alveo e i battenti e le velocità nelle aree allagate risultanti dalle simulazioni idrauliche svolte sulle varie durate di pioggia. Con questa impostazione si restituiscono:

- Sezioni fluviali con inviluppo dei livelli idrometrici per TR=30-200 anni (*Tavola 3C – Modello Idraulico – Libretto Sezioni con Livelli Idrometrici TR=30-200 anni*);
- Inviluppo dei battenti idrometrici massimi nelle aree allagate per TR=30-200 anni (*Tavola 4A – Modello Idraulico – Battenti Idrometrici Massimi TR=30 anni; Tavola 4B – Modello Idraulico – Battenti Idrometrici Massimi TR=200 anni*);
- Inviluppo delle velocità massime nelle aree allagate per TR=30-200 anni (*Tavola 5A – Modello Idraulico – Velocità Massime TR=30 anni; Tavola 5B – Modello Idraulico – Velocità Massime TR=200 anni*).

Per le sezioni dei corsi d'acqua si riportano inoltre i risultati in forma tabellare di tutte le simulazioni, in termini di livelli e portate massime, in *Allegato 2 – Modellistica Idraulica*.

L'implementazione del modello idrologico-idraulico di tipo analitico ha permesso la definizione delle aree a pericolosità idraulica su base analitica, riportate in *Tavola 6*, in cui vengono rappresentate:

- Aree allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- Aree allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni.

Tali aree allagate derivanti dalla modellistica analitica sono state la base di partenza per la definizione della carta delle aree a pericolosità idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 (*Tavole 8A, 8B*).

In tale carta sono state inoltre inserite:

- le aree a pericolosità idraulica media (I2), caratterizzate da eventi alluvionali con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni, mutate dal vigente PGRA, nonché le aree a pericolosità idraulica molto elevata (I4) ed elevata (I3) presenti nel previgente Piano Strutturale Comunale del 2012 relativamente alla parte montana del Torrente Carrione e dei suoi principali affluenti, Torano e Gragnana, a monte del tratto oggetto di studio analitico;
- le porzioni di territorio che sono state oggetto di esondazione in occasione dell'evento alluvionale del 2014, in ottemperanza a quanto previsto nell'art. 5 della Disciplina di Piano del PGRA. A tal fine è stata introdotta la classe di pericolosità I3*, ovvero aree interessate da eventi alluvionali recenti, che ricomprende le aree allagate in occasione dell'evento del 2014 nonché tutte le aree intercluse prossime al T. Carrione, in modo tale da tener conto delle fragilità del tratto pensile.

In definitiva nella carta della pericolosità idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 (*Tavole 8A e 8B*), si ritrovano:

- Aree a pericolosità idraulica molto elevata (I4), allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni (da modello analitico e dal previgente PS 2012 per il tratto montano di Carrione, Torano e Gragnana);
- Aree a pericolosità idraulica elevata (I3), allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni (da modello analitico e dal previgente PS 2012 per tratto montano di Carrione, Torano e Gragnana);
- Aree a pericolosità idraulica elevata (I3*), interessate da eventi alluvionali recenti (2014);
- Aree a pericolosità idraulica media (I2), caratterizzate da eventi alluvionali con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni, (mutate dal vigente PGRA).

In analogia, ai fini dell'aggiornamento del PGRA, le aree allagate sono state classificate come segue (*Tavole 9A e 9B*):

- Aree a pericolosità da alluvione elevata (P3), allagabili per eventi con tempo di ritorno inferiore a 30 anni;
- Aree a pericolosità da alluvione media (P2), allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 30 e 200 anni;
- Aree a pericolosità da alluvione media (P2*), interessate da eventi alluvionali recenti (2014);
- Aree a pericolosità da alluvione bassa (P1), allagabili per eventi con tempo di ritorno compreso tra 200 e 500 anni.

Infine, al fine di poter tener conto dei condizionamenti idraulici di cui alla L.R. 41/2018 nella definizione dei criteri generali di fattibilità idraulica degli interventi, è stata redatta la carta della magnitudo idraulica.

Ai sensi della L.R. 41/2018, vengono infatti introdotti i seguenti concetti:

“**scenario per alluvioni frequenti**”: lo scenario di cui all'articolo 6, comma 2, lettera c), del d.lgs. 49/2010, individuato negli atti di pianificazione di bacino e definito dai medesimi atti con riferimento al tempo di ritorno non inferiore a trenta anni;

“**scenario per alluvioni poco frequenti**”: lo scenario di cui all'articolo 6, comma 2, lettera b) del d.lgs. 49/2010, individuato negli atti di pianificazione di bacino e definito dai medesimi atti con riferimento al tempo di ritorno non inferiore a duecento anni;

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

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

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

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

A partire dai risultati del modello idraulico analitico implementato per la definizione delle aree soggette ad inondazione per eventi con TR=200 anni (scenario per alluvioni poco frequenti), sono stati incrociati i dati relativi agli inviluppi dei battenti idrometrici e delle velocità massime attese sul territorio allagato e definita la carta della magnitudo idraulica, riportata in Tavola 11 nella quale è riportato altresì il perimetro del territorio urbanizzato.

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.

Le aree potenzialmente soggette ad allagamento sulla base della modellazione idraulica di tipo qualitativo non rientrano nella disciplina del DPGR 53R/2011 e del PGRA, e saranno normate nell'ambito dello strumento urbanistico individuando condizionamenti di carattere idraulico per la fattibilità degli interventi di trasformazione urbanistica ed edilizia.

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

Tavola 7A - Planimetria della Pericolosità Idraulica Qualitativa - Quadro 1

Tavola 7B - Planimetria della Pericolosità Idraulica Qualitativa - 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” si dovrà tener conto degli approfondimenti di natura idraulica indicati nelle NTA dello strumento urbanistico comunale.
- 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 non sono necessari ulteriori approfondimenti idraulici.

Si precisa infine che:

- e) per le aree perimetrate classe di pericolosità I3* nella carta della pericolosità idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 (Tavole 8A e 8B), si assume un battente idraulico convenzionale pari a 10 cm;
- f) per le aree a pericolosità idraulica molto elevata (I4) ed elevata (I3) della carta della pericolosità idraulica ai sensi del DPGR 53R/2011 (Tavola 8B) mutate dal previgente PS 2012, ovvero relative alla parte montana del Torrente Carrione e dei suoi principali affluenti, Torano e Gragnana, a monte del tratto oggetto di studio analitico, si assume come riferimento un battente pari a 2 m (rif. art. 18 L.R. 41/2018), ovvero si dovrà tener conto degli approfondimenti di natura idraulica indicati nelle NTA dello strumento urbanistico comunale.

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 (Tr evento di pioggia = Tr 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 Tr , 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).

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

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	(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 verdastrì o grigi, calcareniti minute e arenarie calcarifere Cret. sup.-Eocene inf.	4.65
fVR	(formazione di Villa a Radda) argilloscisti talora siltosi,prevalentemente rossi, con pochi strati calcari marnosi verdastrì o arenarie calcarifere, intercalati nella parte alta di pf o al tetto di questa Cretaceo sup.-Eocene inf.	0
mg	argille con lenti di gesso e di salgemma Messiniano sup.	0
Nu	calcareniti e calciruditi grigie, gradate Eocene	4.65
ol	a luoghi intercalazioni di materiale ligure in aC (olistostromi) Aquitaniano-Langhiano superiore	1.55
Pag	argille azzurre e cinerine Plioc. inf.-medio	0
pb	("argille a palombini") argilliti e marne fogliettate con intercalazioni di calcari a palombini Cretaceo inf.	0
Pcg	conglomerati e ghiaie prevalentemente argillose, con sabbie e sabbie argillose (al tetto e laterale di Ps) Plioc. inf.-medio	0.775
pf	("pietraforte") arenarie calcaree alternate ad argilliti subordinatamente livelli di marne 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 K_s utilizzati nel presente studio

Osservando sperimentalmente le piogge intense è possibile affermare che, all'interno di una certa area, l'intensità di precipitazione durante l'evento piovoso varia da punto a punto, anche in maniera sensibile, e questa variazione è tanto maggiore quanto maggiore è l'estensione dell'area considerata. Per questo alla precipitazione lorda, calcolata rispetto alla sezione di calcolo, è stato applicato un coefficiente di ragguglio 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 ragguglio, si è operato come segue:

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

Il coefficiente a' così calcolato è stato utilizzato per la determinazione del "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 raggugliata 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:

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

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

in unità congruenti, dove:

R_b = rapporto di biforcazione;

R_l = rapporto di lunghezza;

R_a = rapporto di area;

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

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

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

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

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

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

$$N_u = R_b^{\omega-u}$$

$$\bar{L}_u = \bar{L}_1 R_l^{u-1}$$

$$\bar{A}_u = \bar{A}_1 R_a^{u-1}$$

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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:

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

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 $Q = A(Zj1) \cdot Zj2$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

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.

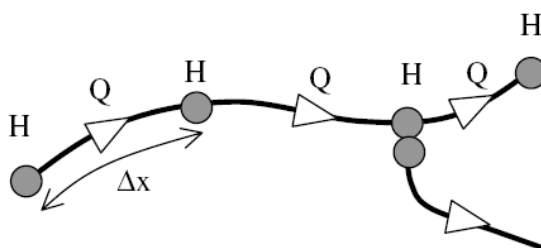
A.2.8 CONDIZIONI INIZIALI

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:

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

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

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

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:

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

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:

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

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria (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 planaltimetriche 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'algorithm 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.