



*Studio idrologico e idraulico a supporto
del Piano Operativo (serie A)*

novembre 2018

Q1 - studi idraulici

Relazione idrologica e idraulica

**DOC.
01/A**

PROVINCIA DI PRATO
Comune di Montemurlo

**STUDIO IDROLOGICO E IDRAULICO
A SUPPORTO DEL PIANO OPERATIVO
DEL COMUNE DI MONTEMURLO**

R01. RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA

WEST SYSTEMS s.r.l. – PHYSIS s.r.l. Ingegneria per l'Ambiente

Ing. David Settesoldi

Firenze

Ottobre 2018

INDICE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | PREMESSA | 5 |
| 2 | IL QUADRO CONOSCITIVO..... | 7 |
| 2.1 | <i>Gli studi esistenti</i> | 7 |
| 2.2 | <i>I dati territoriali</i> | 8 |
| 2.3 | <i>Modello digitale del terreno</i> | 8 |
| 2.4 | <i>Modello digitale delle scabrezze</i> | 9 |
| 2.5 | <i>Dati idrologici</i> | 10 |
| 3 | ANALISI IDROLOGICA | 13 |
| 3.1 | <i>Le curve di possibilità pluviometrica</i> | 14 |
| 3.2 | <i>Caratteristiche del modello afflussi-deflussi</i> | 17 |
| 3.2.1 | <i>Le fasi computazionali</i> | 17 |
| 3.2.2 | <i>Le caratteristiche geografiche</i> | 20 |
| 3.3 | <i>Implementazione del modello idrologico</i> | 24 |
| 3.4 | <i>Taratura del modello idrologico</i> | 25 |
| 3.4.1 | <i>Gli idrogrammi di piena per i diversi tempi di ritorno</i> | 27 |
| 4 | ANALISI IDRAULICA..... | 31 |
| 4.1 | <i>Il modello idraulico unidimensionale</i> | 31 |
| 4.2 | <i>Il modello di inondazione bidimensionale</i> | 32 |
| 4.3 | <i>Il modello di inondazione quasi-bidimensionale</i> | 37 |
| 4.4 | <i>La modellazione idraulica delle connessioni idrauliche</i> | 39 |
| 4.5 | <i>Definizione dei corsi d'acqua oggetto di studio</i> | 40 |
| 4.6 | <i>Schematizzazione dell'area di studio</i> | 40 |
| 4.7 | <i>Parametri del modello idraulico</i> | 41 |
| 5 | VERIFICA DELLO STATO ATTUALE..... | 43 |
| 5.1 | <i>Individuazione delle aree inondabili nello stato attuale</i> | 44 |
| 5.2 | <i>Aggiornamento della pericolosità idraulica nello stato attuale</i> | 44 |
| 5.3 | <i>Perimetrazione della magnitudo idraulica</i> | 44 |

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|---|----|
| Figura 2-1-Modello digitale Lidar 1x1m. | 9 |
| Figura 2-2-Modello digitale delle scabrezze. | 10 |
| Figura 2-3-Caposaldo sul ponte della Variante Pratese. | 11 |
| Figura 2-4-Sezione in corrispondenza del ponte della Variante Pratese (fonte rilievo Mazzetti 2008). | 12 |
| Figura 2-5-Scala di deflusso del Calice alla Variante Pratese | 12 |
| Figura 3-1 - Coefficienti a, n e m..... | 16 |
| Figura 3-2 – Modello digitale del terreno. | 21 |
| Figura 3-3 – Capacità di ritenuta..... | 22 |
| Figura 3-4 – Velocità filtrazione. | 23 |
| Figura 3-5 – Sezione in corrispondenza dell'idrometro del Calice alla Variante Pratese. | 26 |
| Figura 3-6 – Evento 06-03-2017..... | 26 |
| Figura 3-7 – Evento 08-12-2017..... | 27 |
| Figura 3-8 – Portate al colmo per i diversi tempi di ritorno | 30 |
| Figura 4-1 – Griglia di calcolo equazione di continuità..... | 34 |
| Figura 4-2 – Griglia di calcolo equazione di moto lungo X..... | 34 |
| Figura 4-3 – Griglia di calcolo equazione di moto lungo Y..... | 36 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|---|----|
| Tabella 3-1- Elenco delle variabili utilizzate dal modello afflussi-deflussi..... | 18 |
| Tabella 3-2 – Tabella parametri del modello..... | 25 |
| Tabella 3-3 – Eventi del Calice alla Variante Pratese..... | 25 |
| Tabella 3-4 – Stazioni pluviometriche..... | 25 |
| Tabella 3-5 – Parametri taratura del Calice alla Variante Pratese..... | 27 |
| Tabella 3-6 – Valori di portata al colmo valutati per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni per i bacini totali sottesi alle immissioni..... | 29 |
| Tabella 4-1– Elenco dei corsi d’acqua considerati..... | 41 |
| Tabella 4-2 – Parametri scale di deflusso..... | 42 |
| Tabella 4-3– Valori del coeff. di <i>Gauckler-Strickler</i> attribuiti ai corsi d’acqua analizzati..... | 43 |
| Tabella A-5-1 – Leggi di invaso delle aree di potenziale esondazione nello stato attuale..... | 48 |
| Tabella A-5-2 – Curve di invaso delle aree di potenziale esondazione nello stato attuale..... | 49 |
| Tabella A-5-3 – Caratteristiche delle portelle di collegamento stato attuale..... | 52 |
| Tabella A-5-4 – Caratteristiche delle idrovore stato attuale..... | 53 |

ELENCO ELABORATI

Elaborati tecnici

- R01 — Relazione idrologica e idraulica
- A01 — Tabulati verifiche idrauliche
- A02 — Sezioni fluviali e livelli idrometrici

Elaborati grafici

- T01 — Planimetria dei bacini idrografici e delle immissioni idrologiche [1:25.000]
- T02 — Carta sinottica delle sezioni fluviali, degli sfioratori, delle paratoie, delle idrovore, delle casse di espansione e del modello digitale del terreno [1:10.000]
- T03A — Profili longitudinali torrente Agna [varie]
- T03B — Profili longitudinali fosso Agnaccino, Calice, Calicino, Gramigneto e Poltronova [varie]
- T03C — Profili longitudinali torrente Bure [varie]
- T03D — Profili longitudinali fosso Bagnolo [varie]
- T03E — Profili longitudinali fosso Ficarello [varie]
- T03F — Profili longitudinali fosso Funandola e diversivo [varie]
- T03G — Profili longitudinali fosso Mendacione [varie]
- T03H — Profili longitudinali fosso Stregale, Selvavecchia e fosso Guardia [varie]
- T04 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione $Tr = 30$ anni [1:10.000]
- T05 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione $Tr = 200$ anni [1:10.000]
- T06 — Battenti di esondazione e velocità di propagazione $Tr = 500$ anni [1:10.000]
- T07 — Planimetria delle aree inondabili [1:10.000]
- T08 — Pericolosità idraulica ai sensi del 53/R [1:10.000]
- T09 — Pericolosità idraulica ai sensi del PGRA [1:10.000]
- T10 — Magnitudo ai sensi della L.R.41/2018 [1:10.000]

1 PREMESSA

A seguito dell'incarico affidato dal Comune di Montemurlo alla West Systems s.r.l. con Determinazione n. 635 del 12/12/2017, è stato redatto il presente studio di aggiornamento della pericolosità idraulica del territorio del comune di Montemurlo.

A seguito del suddetto incarico è stato redatto nel gennaio 2018 anche uno studio per la definizione e verifica di una ipotesi progettuale per la riduzione del rischio idraulico nella frazione di Oste.

Il presente studio recepisce le analisi sviluppate a seguito dell'incarico affidato dal Comune di Montemurlo alla West Systems s.r.l. con Determinazione n. 50/A del 09/12/2015 con il quale è stato redatto un primo aggiornamento della pericolosità idraulica a seguito della realizzazione, da parte del Comune di Montemurlo e della Provincia di Prato, di parte degli interventi di messa in sicurezza sui torrenti Ficarello.

Il presente studio utilizzerà i rilievi del terreno eseguiti con la tecnica del *laser scanning* (Lidar) con una risoluzione spaziale del modello idraulico più dettagliata rispetto agli studi ad oggi disponibili.

Si procederà inoltre all'aggiornamento dello studio idrologico per la determinazione delle portate di piena sulla base dei seguenti studi:

- *Analisi di frequenza regionale delle precipitazioni estreme. Macroattività B - Modellazione idrologica. Attività B1 - Regionalizzazione precipitazioni*, studio redatto nell'ambito dell'accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e 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, finalizzata all'approfondimento dell'attuale quadro conoscitivo e alla definizione delle azioni di riduzione del rischio idraulico e idrogeologico (Caporali E., Chiarello V. e Rossi G., marzo 2014);¹
- *Implementazione modello distribuito per la Toscana MOBIDIC. Addendum: Parametrizzazione HMS. Macroattività B - Modellazione idrologica. Attività B2 – Modellazione idrologica caso pilota*, redatto nell'ambito dell'accordo di collaborazione scientifica tra Regione Toscana e 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, finalizzata all'approfondimento dell'attuale quadro conoscitivo e alla definizione delle azioni di riduzione del rischio idraulico e idrogeologico (Castelli F., novembre 2014)².

Sono state inoltre condotte delle nuove tarature del modello PIENE utilizzando i dati registrati dall'idrometro del Calice a Variante Pratese (codice TOS03004847-751559-4847).

Gli obiettivi del presente studio sono pertanto:

- Aggiornamento delle aree inondabili con l'inserimento nel modello delle opere idrauliche eseguite sul torrente Ficarello, con la determinazione del battente idraulico per tempi di ritorno trentennali, duecentennali, cinquecentennali;

¹ I risultati dell'Analisi di Frequenza Regionale sono archiviati nello spazio ServiziOnline della Regione Toscana: http://www.regione.toscana.it/cittadini/ambiente/difesa-del-suolo/-/asset_publisher/eoniZadAbVH6/content/nuovi-dati-sulla-regionalizzazione-delle-precipitazioni

² I parametri e i risultati derivanti dall'implementazione del modello idrologico distribuito per il territorio toscano sono archiviati nello spazio ServiziOnline della Regione Toscana: <http://www.regione.toscana.it/-/implementazione-di-modello-idrologico-distribuito-per-il-territorio-toscano>

- Aggiornamento della pericolosità idraulica ai sensi del regolamento 53/R, del Piano di Gestione del Rischio Idraulico (PGRA) e della L.R. 41/2018 della Regione Toscana. Il presente studio risulta articolato nelle seguenti fasi fondamentali:

FASE 1 - definizione del quadro conoscitivo: in tale fase sono stati acquisiti ed esaminati gli studi, la documentazione e i dati disponibili riguardanti il reticolo idrografico considerato. In particolare, dopo l'archiviazione delle informazioni ritenute utili allo svolgimento del presente studio, sono state individuate le integrazioni del quadro conoscitivo necessarie alla sua completa definizione. In particolare sono state individuate le sezioni fluviali integrative considerate indispensabili ai fini delle presenti simulazioni;

FASE 2 – analisi idrologica: per il bacino idrografico considerato sono state valutate le portate al colmo e gli idrogrammi di piena per i tempi di ritorno di 1, 2, 5, 10, 20, 30, 100, 200, e 500 anni e per le durate di 0.5, 1.0, 1.5, 3.5, 5.5 e 7.5 ore, utilizzando un modello idrologico a parametri distribuiti analogo a quello adottato per le indagini idrologiche a supporto del Regolamento Urbanistico;

FASE 3 – analisi idraulica: la modellazione degli eventi di piena è stata eseguita attraverso un modello unidimensionale di moto vario, che ha permesso di individuare i livelli idrici nelle sezioni fluviali considerate nonché le eventuali insufficienze idrauliche, accoppiato ad un modello bidimensionale per la stima dei battenti di esondazione limitatamente al territorio comunale di Montemurlo. Le verifiche idrauliche sono state condotte per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni e per le durate di 0.5, 1.0, 1.5, 3.5, 5.5 e 7.5 ore;

FASE 4 – valutazione della pericolosità idraulica e della compatibilità idraulica degli interventi previsti: sulla base dei battenti idrici ottenuti dal modello bidimensionale per lo stato attuale, sono state elaborate le nuove perimetrazioni delle aree inondabili ed è stata verificata l'efficienza degli interventi realizzati. Sulla base di tali perimetrazioni sono state perimetrare la pericolosità idraulica ai sensi del D.P.G.R. 53/R del 25 ottobre 2011, del PGRA. E' stata inoltre redatta la carta della magnitudo nelle definita dalla L.R.41/2018 della Regione Toscana.

Di seguito si illustrano i criteri e le attività svolte per le singole fasi sopra descritte.

2 IL QUADRO CONOSCITIVO

2.1 *Gli studi esistenti*

Nel presente lavoro sono stati consultati i seguenti studi idrologici e idraulici:

- **Comune di Montemurlo** (2007), *“Studio idrologico e idraulico di alcuni corsi d'acqua nel territorio comunale di Montemurlo”*.
Il suddetto studio ha condotto alla perimetrazione delle aree inondabili e alla definizione degli interventi di messa in sicurezza nel Comune di Montemurlo;
- **Comune di Montemurlo** (2008), *“Indagini idrologiche e idrauliche a supporto delle varianti Capoluogo, Mendacione e Sostegno alle Imprese, Comando Vigili Urbani e Alloggi Vigili del Fuoco al Piano Regolatore Generale vigente del Comune di Montemurlo”*.
Nel suddetto studio sono stati definiti gli interventi di messa in sicurezza necessari per la fattibilità di alcune Varianti allo Strumento Urbanistico del Comune di Montemurlo. Nel suddetto studio è stata redatta una nuova carta delle aree allagabili con tempo di ritorno di 200 anni a seguito degli interventi previsti;
- **Comune di Montemurlo** (2008), *“Definizione e verifica idraulica degli interventi di messa in sicurezza della frazione di Oste nel Comune di Montemurlo”*.
Nello studio vengono definiti e verificati gli interventi di messa in sicurezza della frazione di Oste connessi alle previsioni del Regolamento Urbanistico del Comune di Montemurlo;
- **Comune di Montemurlo** (2010), *“Studio idrologico e idraulico a supporto di una variante al regolamento urbanistico del comune di Montemurlo per un'area all'angolo tra via del Parugiano e via Zara”*.
Si tratta del progetto degli interventi idraulici necessari ai fini della messa in sicurezza dell'area oggetto di variante;
- **Comune di Montemurlo** (2011), *“Studio idrologico e idraulico a supporto di una variante al RU in un'area tra il torrente Bagnolo e il torrente Mendacione nel comune di Montemurlo”*.
Lo studio è finalizzato alla revisione delle aree inondabili alla luce degli interventi di messa in sicurezza realizzati dopo la redazione degli studi a supporto del Regolamento Urbanistico.

Nel presente lavoro sono stati consultati i seguenti progetti:

- **Comune di Montemurlo** (2008), *“Lotto 1: Diversivo fosso Funandola tra via Morecci e via Carducci”*;
- **Comune di Montemurlo** (2008), *“Progetto per l'adeguamento della sezione di deflusso di un tratto del fosso Stregale in loc. La Querce”*;
- **Comune di Montemurlo** (2009), *“Progettazione preliminare della cassa di espansione sul fosso di Selvavecchia nel comune di Montemurlo”*.
- **Comune di Montemurlo** (2009), *“Lotto 2: Adeguamento fosso Funandola lungo via Barzano”*;
- **Comune di Montemurlo** (2009), *“Adeguamento del f. Funandola in corrispondenza dell'attraversamento di via F.lli Rosselli”*;
- **Comune di Montemurlo** (2010), *“Adeguamento del f. Funandola in corrispondenza della SP82 Nuova Montalese”*.
- **Comune di Montemurlo** (2011), *“Aggiornamento della pericolosità idraulica nel territorio comunale di Montemurlo”*.
- **Comune di Montemurlo** (2012), *“Aggiornamento della pericolosità idraulica nel territorio comunale di Montemurlo”*.
- **Comune di Montemurlo** (2012), *“Intervento di manutenzione straordinaria relativo alla sistemazione idraulica del torrente Ficarello nei Comuni di Prato e Montemurlo”*.

2.2 I dati territoriali

Per la redazione dello studio sono stati acquisiti i seguenti dati:

- cartografia C.T.R. 1:10.000 e 1:2.000 in formato vettoriale;
- modello digitale del terreno con passo 1m x 1m (messo a punto nell'ambito del progetto *Lidar*) fornito dalla Regione Toscana;
- sezioni fluviali per i tratti del t. Agna, fosso Agnaccino, t. Bagnolo, fosso Ficarello, fosso Funandola, fosso Mendancione, fosso Selvavecchia e fosso Stregale utilizzate negli studi precedentemente citati ricavate dai rilievi del Genio Civile di Prato, del comune di Montemurlo, del Consorzio di Bonifica Ombrone P.se – Bisenzio o da integrazioni condotte con apposite campagne topografiche nel corso degli stessi studi;
- sezioni fluviali del diversivo del fosso Funandola derivanti dal progetto del "*Lotto 1: Diversivo fosso Funandola tra via Morecci e via Carducci*" (Comune di Montemurlo, 2008);
- sezioni fluviali del diversivo del fosso Funandola derivanti dal progetto del "*Lotto 2: Adeguamento fosso Funandola lungo via Barzano*" (Comune di Montemurlo, 2009);
- sezioni fluviali del fosso Funandola relative al nuovo attraversamento di via F.lli Rosselli (Comune di Montemurlo, 2009);
- sezioni fluviali del fosso Funandola derivanti dal progetto esecutivo "*Adeguamento del f. Funandola in corrispondenza della SP82 Nuova Montalese*" (Comune di Montemurlo, 2010);
- sezioni fluviali del fosso Stregale derivanti dal "*Progetto per l'adeguamento della sezione di deflusso di un tratto del fosso Stregale in loc. La Querce*" (Comune di Montemurlo, 2008).
- Sezioni fluviali del fosso Ficarello con l'aggiunta delle due casse realizzate sullo stesso (Comune di Montemurlo, 2013).

Le sezioni fluviali desunte dai progetti degli interventi di messa in sicurezza sono state verificate mediante specifici rilievi speditivi eseguiti in situ.

2.3 Modello digitale del terreno

La modellazione idraulica bidimensionale è stata condotta sul modello digitale del Terreno Lidar fornito dalla Regione Toscana.

Il passo del modello digitale Lidar è 1x1 (Figura 2-1).

Il modello digitale copre completamente l'area di studio. Il DTM utilizzato per la modellazione idraulica, è il risultato per aggregazione del modello digitale lidar (riportato nella tavola T.01) con una risoluzione della maglia di 10 m x 10 m.

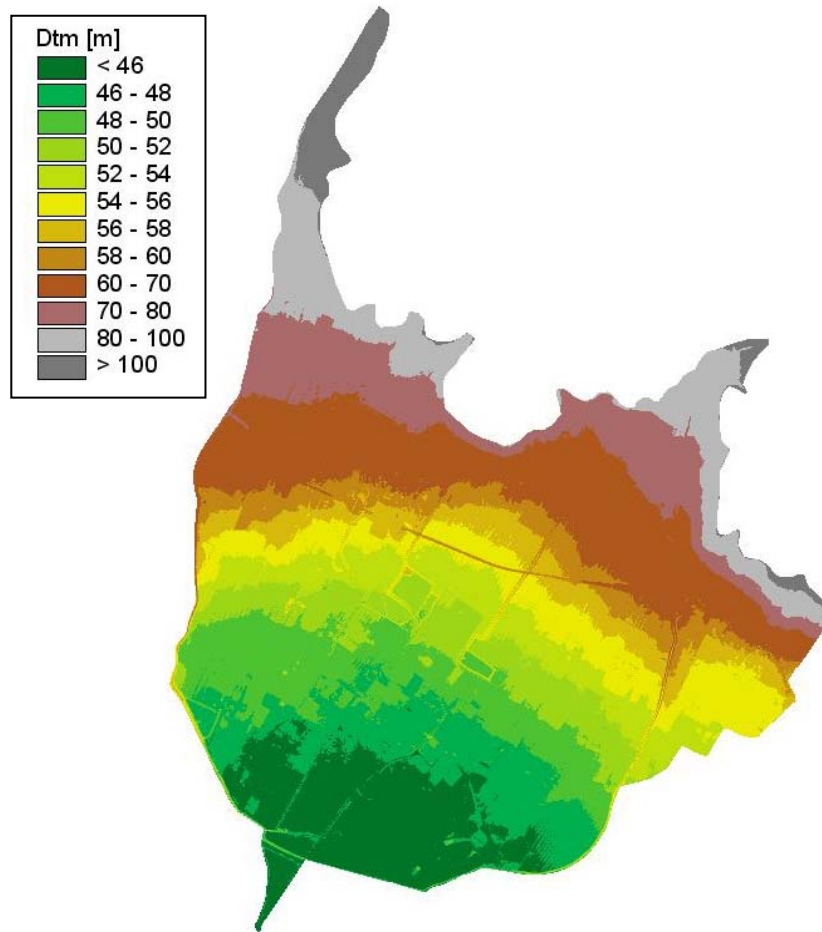


Figura 2-1-Modello digitale Lidar 1x1m.

2.4 **Modello digitale delle scabrezze**

La modellazione del modello digitale delle scabrezze è stata calcolata assegnando valori diversi a seconda della tipologia di soprasuolo. In particolare si distinguono due tipologie:

- Edifici: $2 \text{ [m}^{1/3}\text{s}^{-1}]$ di Gauckler-Strickler;
- Aree non edificate: $20 \text{ [m}^{1/3}\text{s}^{-1}]$ di G.S.

La cartografia degli edifici è stata ricavata dalla cartografia in scala 1:2000 estraendo i seguenti strati informativi:

Edifici ed altre strutture:

- | | |
|-----|--|
| 201 | UNIT. VOL. CIVILE/SOCIALE/AMMINISTRATIVO |
| 202 | UNIT. VOL. INDUSTRIALE/COMMERCIALE/CAPANNONE |
| 203 | UNIT. VOL. DI CULTO/CAMPANILE/TABERNAICOLO |
| 204 | EDIFICIO IN COSTRUZIONE |
| 205 | EDIFICIO RUDERE/SEMIDIROCCATO |
| 206 | CORPO AGGETTANTE/PORTICO/LOGGIATO |
| 207 | BARACCA/EDICOLA |
| 208 | TETTOIA/PENSILINA/LUCERNAIO |
| 209 | TENDONE PRESSURIZZATO |
| 210 | SERRA STABILE |

| | |
|-----|--|
| 211 | CASELLO/STAZIONE FERROVIARIA/FERMATA |
| 212 | CENTRALE ELETTRICA/SOTTOSTAZIONE ELETT./CABINA ELETT |
| 214 | LINEA CAMPO SPORTIVO |
| 215 | CAPANNONE VIVAISTICO |
| 216 | STALLA/FIENILE/ALLEVAMENTO |
| 217 | TORRE/CIMINIERA |

Il modello digitale delle scabrezze è stato da prima calcolato con passo 1x1 m e successivamente aggregato alla maglia 10 m x 10 m (Figura 2-2).

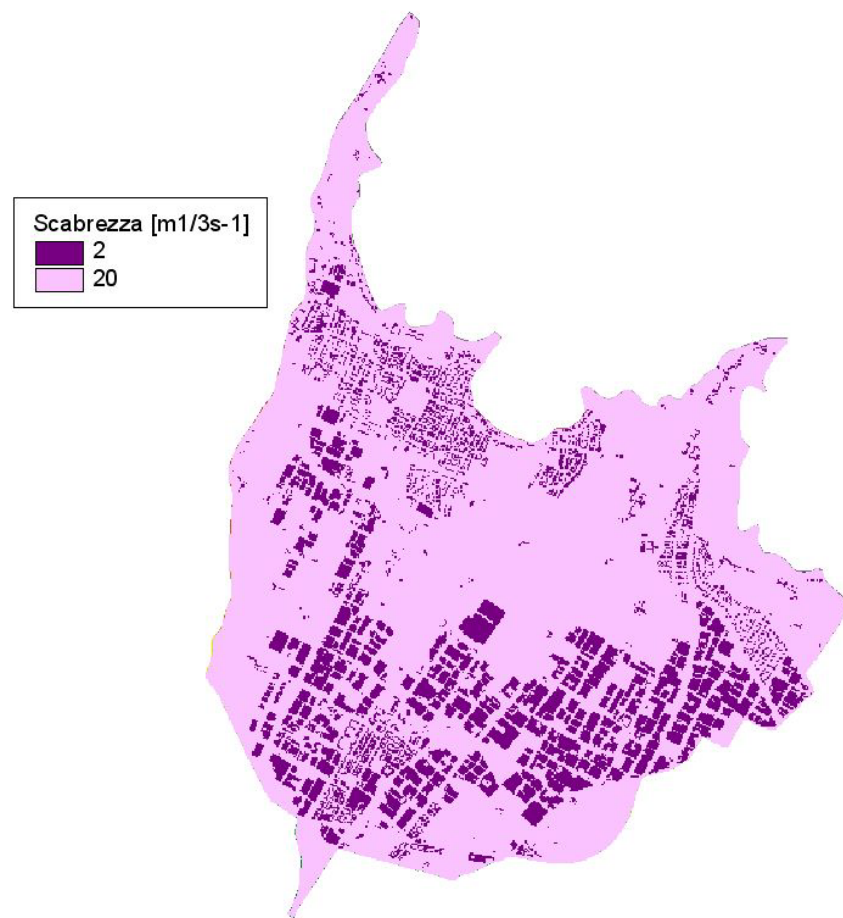


Figura 2-2-Modello digitale delle scabrezze.

2.5 Dati idrologici

Sono stato acquisiti i dati per alcuni eventi significativi verificatisi nel bacino sotteso alla stazione del torrente Calice alla Variante Pratese per il periodo dal 01-03-2017 al 21-01-2018.

In particolare sono stati acquisiti i dati di altezza idrometrica e precipitazioni per i seguenti eventi:

- dal 06/03/2017 al 08/03/2017;

- dal 08/12/2017 al 17/12/2017.

La stazione è priva di scala di deflusso pertanto la stessa è stata ricostruita attraverso una modellazione di un tratto significativo del torrente Calice in moto permanente. È stato inoltre condotto un rilievo con strumentazione GPS in modalità RTK per il calcolo dello zero idrometrico.

Il calcolo dello zero idrometrico è stato condotto misurando il livello idrometrico in un dato istante in cui era nota anche la lettura dell'idrometro. Per il caposaldo posto sul ponte della Variante Pratese è stata misurata una quota di 47.33 m s.l.m (vedi [Figura 2-3](#)). In data 24-01-2018 è stato misurato un dislivello di 6.82 m tra il suddetto caposaldo e il pelo libero, allo stesso istante l'idrometro registrava un livello di 0.46m (vedi [Figura 2-4](#)). Pertanto la quota dello zero idrometrico è stata stimata pari a 40.05 m s.l.m.

Lo zero idrometrico stimato dal Centro Funzionale è di 39.98 m s.l.m. del tutto congruente con la stima effettuata come precedentemente descritto.



[Figura 2-3-Caposaldo sul ponte della Variante Pratese.](#)

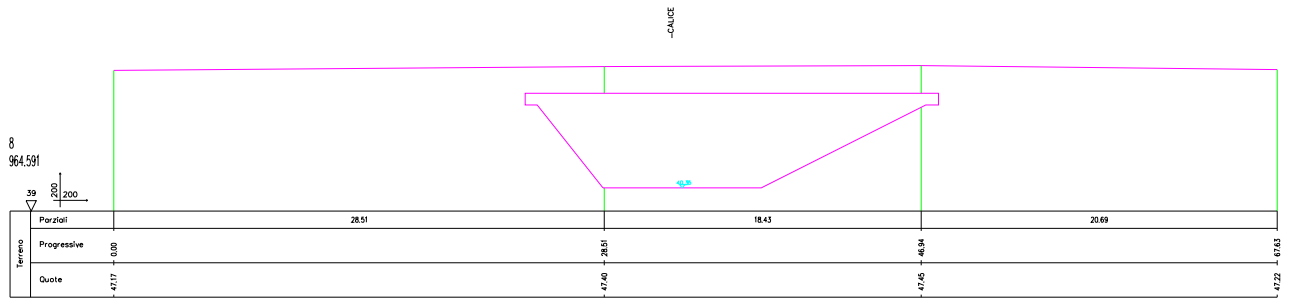


Figura 2-4-Sezione in corrispondenza del ponte della Variante Pratese (fonte rilievo Mazzetti 2008).

La scala di deflusso è riportata nella Figura 2-5

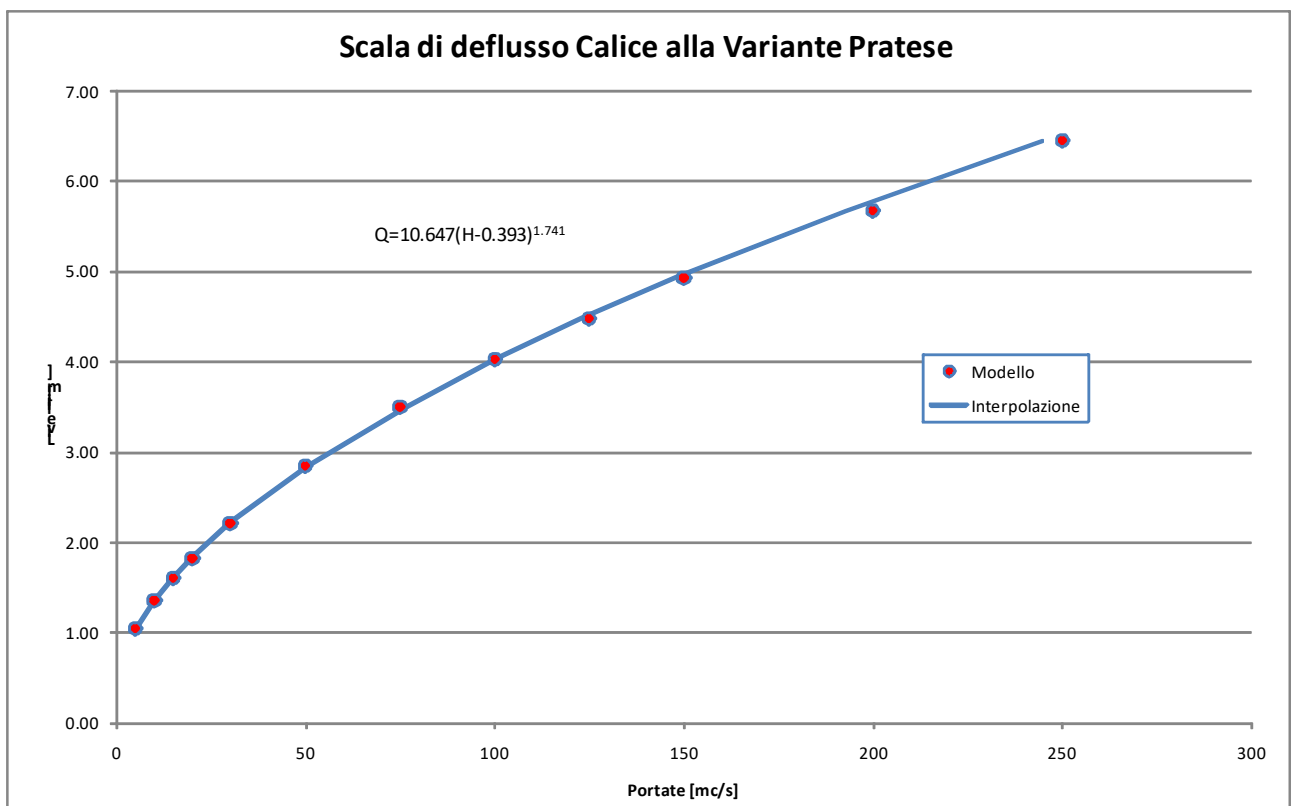


Figura 2-5-Scala di deflusso del Calice alla Variante Pratese

3 ANALISI IDROLOGICA

Obiettivo dell'analisi idrologica è fornire gli idrogrammi di piena per i bacini ricadenti nel comune di Montemurlo e oggetto del presente studio (vedere Elaborato T01).

L'analisi idrologica è stata condotta utilizzando le parametrizzazioni utilizzate nell'ambito dello "Studio idrologico e idraulico di alcuni corsi d'acqua nel territorio comunale di Montemurlo".

Sono state utilizzate le Curve di Possibilità pluviometrica ricavate nei recenti studi dell'Università di Firenze per conto della Regione Toscana.

Il modello utilizzato, denominato PIENE, è un modello idrologico a parametri distribuiti che prevede la schematizzazione a celle del bacino, per ciascuna delle quali viene definito un set di parametri che ne caratterizzano la risposta idrologica.

Il suddetto modello a parametri distribuiti è in grado di simulare sia il fenomeno della formazione dell'onda di piena che quello del suo trasferimento a scala di bacino.

Per il suo funzionamento il modello a parametri distribuiti necessita delle seguenti basi cartografiche:

- modello digitale del terreno con maglia 10m x 10m geolitologica della Autorità di Bacino del Fiume Arno;
- mappa geolitologica ricavata a partire dalla cartografia del piano strutturale del comune di Montemurlo integrata per le parti non coperte con la cartografia geolitologica della Autorità di Bacino del Fiume Arno;
- mappa dell'uso del suolo ricavata a partire dalla cartografia del piano strutturale del comune di Montemurlo integrata per le parti non coperte con la cartografia dell'uso del suolo della Autorità di Bacino del Fiume Arno.

Le condizioni di portata sono state determinate con riferimento ai tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni. Gli idrogrammi di portata corrispondenti sono stati determinati per durate pari a 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.5, 5.5 e 7.5 ore.

Gli input di portata così determinati sono stati applicati al reticolo idrografico costituito dai seguenti corsi d'acqua:

- Torrente Agna
- Fosso Agnaccino
- Torrente Bagnolo
- Torrente Bure
- Torrente Calice
- Torrente Calicino
- Torrente Ficarello
- Fosso di Guardia
- Fosso Funandola
- Fosso Gramigneto
- Fosso Mazzaccheri
- Fosso Mazzone
- Fosso Mendacione
- Fosso Parugiano
- Fosso Poltronova
- Fosso Selvavecchia
- Fosso Stregale

3.1 Le curve di possibilità pluviometrica

Le curve di possibilità pluviometrica sono quelle dello studio di approfondimento condotto dalla Università di Firenze che utilizza i dati pluviometrici al 2012.

La curva di possibilità pluviometrica può essere espressa nella forma generica:

$$h = a t^n$$

dove:

- h altezza di pioggia in [mm/h];
- a coefficiente dipendente dal tempo di ritorno [mm/hⁿ];
- n esponente della curva di possibilità pluviometrica.

Lo studio fornisce i valori di a e n su una maglia di 1kmx1km su tutto il territorio regionale per vari tempi di ritorno.

Approssimando la curva di crescita, che dipende dal modello probabilistico utilizzato per la stima delle altezze di pioggia per le varie durate e per i vari tempi di ritorno, con un legge di potenza la curva di possibilità pluviometrica può essere espressa nella forma:

$$h = a' t^n T^m$$

dove:

- a' coefficiente [mm/hⁿ y^m];
- T tempo di ritorno in anni [y].
-

Di seguito si riportano i valori dei coefficienti a, n e m (Figura 3-1).

Tali coefficienti sono validi sia per durate superiori che inferiori all'ora.

La variabilità spazio-temporale della precipitazione è messa in conto attraverso un coefficiente di riduzione, K_r , del tipo:

$$K_r = \frac{h_A(A, t)}{h(t)}$$

dove $h_A(A, t)$ è l'altezza di pioggia di durata t raggugliata all'area A e $h(t)$ è l'altezza di pioggia di durata t nel centro di scroscio.

Il valore di K_r dipende da tre fattori:

- l'estensione dell'area investita dalla precipitazione;
- la durata considerata;
- l'altezza di pioggia.

Per la quantificazione di K_r si è fatto riferimento alla formula dell'USWB opportunamente modificata per tenere in conto delle caratteristiche peculiari della Regione Toscana:

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

dove α , β e γ sono i parametri della formula, t [h] la durata della precipitazione e A [km²] l'area del bacino.

Per la regione Toscana nell'ambito dello studio di regionalizzazione sono stati definiti i seguenti valori per i parametri:

- $\alpha = F_a \times a = 0.036 \times a$, dove a è il parametro della curva di possibilità
- $\beta = F_b = 0.25$
- $\gamma = F_c = 0.01$

Per il calcolo delle portate degli interbacini è stata utilizzata l'opzione globale che consente di mantenere congruente il volume complessivo della precipitazione procedendo da monte verso valle su un dato corso d'acqua.

Per il calcolo di K_r dell'interbacino K_a si procede pertanto al calcolo separatamente per la sezione di monte K_m e per la sezione di valle K_v procedendo pertanto al calcolo con la seguente formula:

$$K_a = \frac{K_v A_v - K_m A_m}{(A_v - A_m)}$$

dove: K_v = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di valle; A_v = area del bacino di valle; K_m = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di monte; A_m = area del bacino di monte

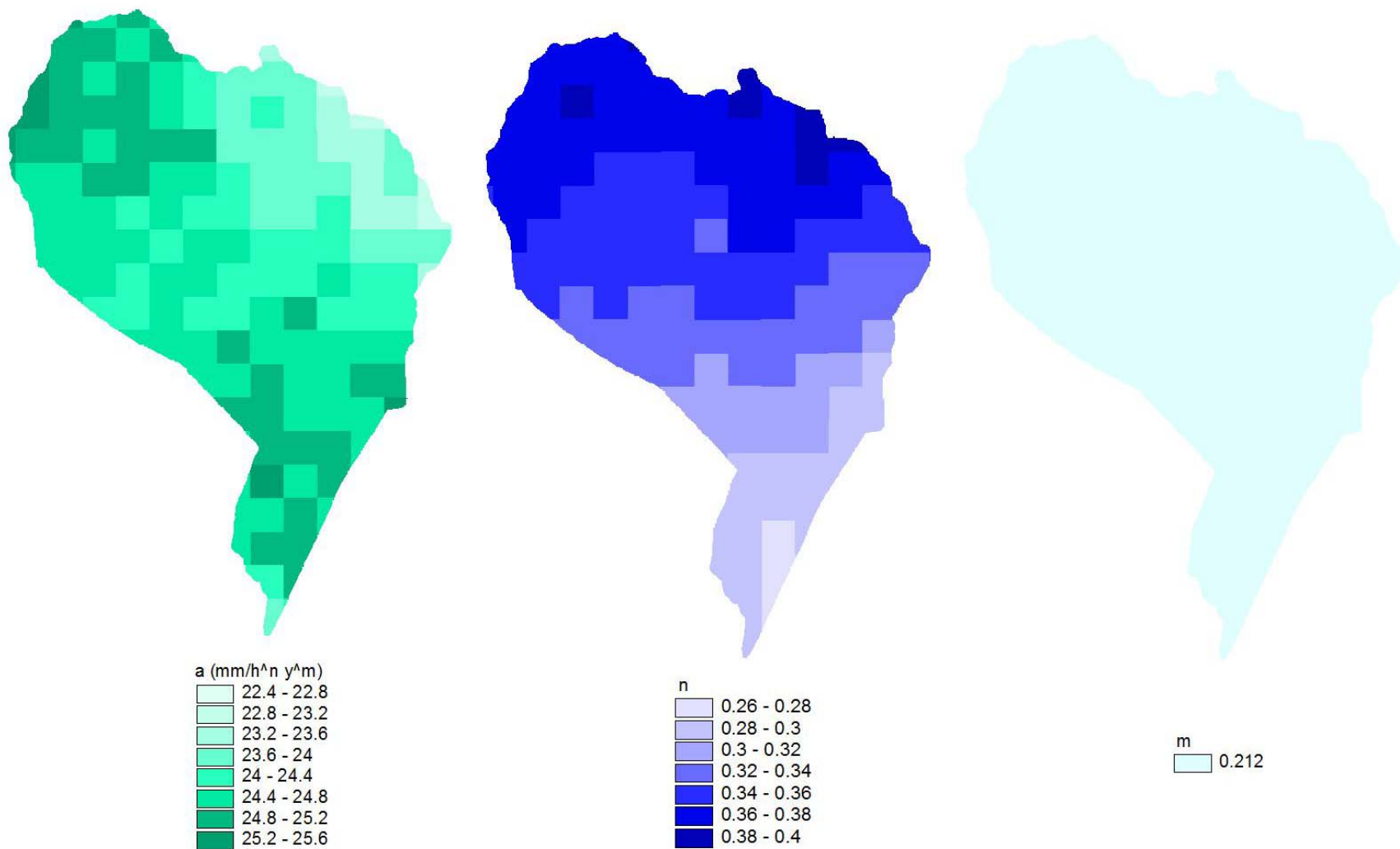


Figura 3-1 - Coefficienti a, n e m

3.2 Caratteristiche del modello afflussi-deflussi

Il modello idrologico utilizzato può essere classificato come distribuito in quanto i parametri sono definiti per ognuna delle singole celle. Dal punto di vista concettuale il modello valuta dapprima la formazione del deflusso superficiale mediante la simulazione del fenomeno dell'intercettazione e, successivamente, il trasferimento di tale deflusso sino alla sezione di chiusura.

Il modello che simula il fenomeno dell'intercettazione calcola il deflusso superficiale di ciascuna cella, considerando sia la capacità di ritenuta del suolo che la velocità di infiltrazione a saturazione (percolazione). Il modello mette in conto anche la componente di deflusso ipodermico che raggiunge il reticolo con tempi maggiori rispetto al deflusso superficiale.

La capacità di ritenuta e la velocità di filtrazione a saturazione sono state ricavate dal DB idrologico realizzato nell'ambito dello studio condotti dalla Regione Toscana *Macroattività B – Modellazione idrologica – Attività B2 – Modellazione idrologica caso pilota e Implementazione modello distribuito Mobidic*.

La simulazione delle modalità di trasferimento del deflusso superficiale si basa sulla schematizzazione del fenomeno mediante una componente di tipo cinematico e una di tipo "serbatoio lineare" (modello tipo Clark).

L'applicazione di un modello a parametri distribuiti prevede la schematizzazione a celle del bacino, per ciascuna delle quali viene definito un set di parametri che ne caratterizzano la risposta idrologica.

Il modello necessita, quindi, di una serie di mappe relative alle grandezze idrologiche e geografiche.

Le mappe che forniscono la parametrizzazione dei processi di formazione e trasferimento dei deflussi sul bacino in esame sono:

1. *mappa dei puntatori*;
2. *mappa degli ordini di calcolo*;
3. *mappa dei bacini*;
4. *mappa delle velocità*;
5. *mappa dei tempi di trasferimento*;
6. *mappa della capacità di ritenuta (GRAV – contenuto di acqua gravimetrica)*
7. *mappa della velocità di filtrazione a saturazione (percolazione) (KSAT-150 conducibilità satura intero suolo)*

3.2.1 Le fasi computazionali

Il calcolo viene condotto per ciascuna cella e per tutti i passi temporali secondo le seguenti fasi:

- *intercettazione*: in questa fase si effettua una stima della quantità di acqua che viene comunque sottratta al deflusso superficiale;
- *suolo*: in questa fase si ricostruisce il bilancio idrologico del suolo, valutando la quantità d'acqua che va ad alimentare il volume profondo ed eventualmente la componente del deflusso ipodermico;
- *canale*: in questa fase si simula il trasferimento del deflusso superficiale e di quello ipodermico dalla singola cella alla sezione di chiusura.

Con riferimento alle variabili elencate nella Tabella 1 si riportano di seguito i principali calcoli effettuati dal programma per ciascuna cella costituente il bacino.

| Simbolo | Significato | U.M. |
|----------------------|--|-------------|
| P_{i_k} | valore dell'afflusso (precipitazione) per la singola cella al passo k-esimo | [mm/h] |
| Δt | passo temporale | [h] |
| Dx | passo spaziale | [m] |
| SC | valore della capacità di ritenuta del suolo (<i>storage capacity</i>) | [mm] |
| KL | valore della velocità di infiltrazione a saturazione | [mm/h] |
| RI | coefficiente moltiplicativo della capacità di ritenuta del suolo | [/] |
| IN | <i>coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione</i> | [/] |
| IP | coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica | [/] |
| T | valore dei tempi di trasferimento | [h] |
| $T_{c=CI T}$ | valore dei tempi di trasferimento o di risposta secondo lo schema cinematico | [h] |
| $T_{i=(1-CI) T/MT}$ | valore dei tempi di trasferimento secondo lo schema di trasferimento di invaso | [h] |
| MT | coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento | [/] |
| CI | coefficiente ripartizione cinematico-invaso | [/] |
| $\theta_{max}=RI SC$ | valore distribuito della capacità di ritenuta massima del suolo (volume utile del suolo) | [mm] |
| $K_s=IN KL$ | valore distribuito della velocità di infiltrazione a saturazione (o permeabilità) | [mm/h] |
| $\tau_c=T_c/MT$ | valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo cinematico | [h] |
| $\tau_i=T_i/MT$ | valore distribuito dei tempi di trasferimento secondo il metodo dell'invaso | [h] |
| $C_{s=1/\tau_i}$ | valore distribuito della costante di esaurimento del serbatoio lineare | [1/h] |
| α_o | frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale) | [/] |
| θ_o | contenuto di acqua nel suolo nello stato iniziale | [mm] |
| $K=IP(KL/SC)$ | coefficiente di deflusso ipodermico | [1/h] |
| θ_k | contenuto di acqua nel suolo al passo k-esimo | [mm] |
| I_{eff} | Infiltrazione effettiva | [mm/h] |
| Q_{1k} | contributo verso il reticolo al passo k-esimo | [mm/h] |
| φ_k | volume d'acqua invasata nel reticolo | [mm] |
| Q_k | contributo alla foce passo k-esimo | [mm/h] |

Tabella 3-1- Elenco delle variabili utilizzate dal modello afflussi-deflussi

- 1) L'afflusso sulla singola cella, P_{i_k} [mm/h] è determinato con il metodo dei topoieti;
- 2) Il suolo è assimilato a un serbatoio lineare che si riempie in ragione della precipitazione (di intensità costante sul passo di bilancio) e si svuota in ragione della percolazione, K_s [mm/h], e del deflusso ipodermico regolato dal parametro K [1/h].
- 3) L'equazione di continuità, da cui si ricava il contenuto di acqua nel suolo da un passo a quello successivo, è esprimibile in forma differenziale nel seguente modo:

$$\Delta \theta = \theta_{k+1} - \theta_k = \left(P_i - K_s - K \cdot \frac{\theta_{k+1} + \theta_k}{2} \right) dt$$

$$\Rightarrow \frac{\theta_{k+1}}{dt} + \frac{K}{2} \cdot \theta_{k+1} = \frac{\theta_k}{dt} - \frac{K}{2} \cdot \theta_k + P_i - K_s$$

$$\theta_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{K}{2} \right) \theta_k + Pi_k - K_s}{\frac{1}{dt} + \frac{K}{2}} \right)$$

- 4) Il contenuto di acqua nel suolo all'inizio θ_0 [mm] è uguale a $\alpha_0 \theta_{max}$ dove α_0 è il grado di saturazione iniziale. Il valore del contenuto di acqua nel suolo è limitato tra 0 e θ_{max} , pertanto si possono distinguere tre casi:

- *essiccamento del suolo:*

se $\theta_k/dt + Pi_k > K_s$ allora

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = \theta_k/dt + Pi_k - K_s$$

$$I_{eff} = K_s$$

altrimenti

$$\theta_{k+1} = 0$$

$$Q_{1k} = 0$$

$$I_{eff} = \theta_k/dt + Pi_k$$

- *saturazione del suolo:*

$$\theta_{k+1} = \theta_{max}$$

$$Q_{1k} = (\theta_k - \theta_{max})/dt + Pi_k - K_s$$

$$I_{eff} = K_s$$

- *caso intermedio:*

$$0 < \theta_{k+1} < \theta_{max}$$

$$Q_{1k} = (\theta_k - \theta_{k+1})/dt + Pi_k - K_s$$

$$I_{eff} = K_s$$

Il modello di trasferimento nel reticolo è costituito da una componente di invaso e da una componente cinematica poste in serie. La componente di invaso è caratterizzata dalla seguente espressione:

$$\varphi_{k+1} = \left(\frac{\left(\frac{1}{dt} - \frac{C_s}{2} \right) \varphi_k + Q_{1k}}{\frac{1}{dt} + \frac{C_s}{2}} \right)$$

dove C_s , [1/h] è il parametro del serbatoio calcolato come $1/\tau_i$ e φ_k il volume d'acqua nel reticolo (assunto inizialmente nullo). Il contributo verso la componente cinematica risulta

$$Q_k = C_s \frac{\varphi_{k+1} + \varphi_k}{2}$$

- 5) La componente cinematica trasla nel tempo il contributo Q_k di un fattore pari a τ_c .

Il contributo complessivo alla sezione di chiusura avviene attraverso la convoluzione dei contributi delle singole celle.

Sulla base di quanto esposto, il modello necessita della definizione dei seguenti parametri validi su tutto il bacino:

- α_0 frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale) [/]
- RI coefficiente moltiplicativo della capacità di ritenuta del suolo [/]
- IN coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione [/]
- IP coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica [/]
- MT coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento [/]
- CI coefficiente ripartizione cinematico-invaso [/]

3.2.2 Le caratteristiche geografiche

Le basi di dati cartografici, in formato digitale (*grid*), sono costituite da:

- modello digitale del terreno con maglia 10m x 10m adeguata a consentire l'individuazione delle linee di impluvio ed una corretta individuazione dei bacini imbriferi (Figura 3-2);
- mappa della capacità di ritenuta ritenuta (Figura 3-3) e;
- mappa della velocità di filtrazione a saturazione (Figura 3-4).

La mappa dei "puntatori idrologici e dei tempi di trasferimento" sono stati elaborati a partire dal DTM 10×10 m. La mappa dei puntatori indica la direzione del deflusso superficiale e viene ricavato assumendo che ogni cella versi nella cella vicina a quota minore.

I tempi di trasferimento sono stati valutati nella ipotesi che la velocità di trasferimento nella singola sezione sia proporzionale all'area del bacino a monte elevata all'esponente 0.15 e alla pendenza locale elevata alla 0.2.

Il legame funzionale è quindi del tipo $v = 1.85 A^{0.15} J^{0.2}$, dove v è la velocità di trasferimento [m/s], A l'area del bacino [km²] e J la pendenza locale.

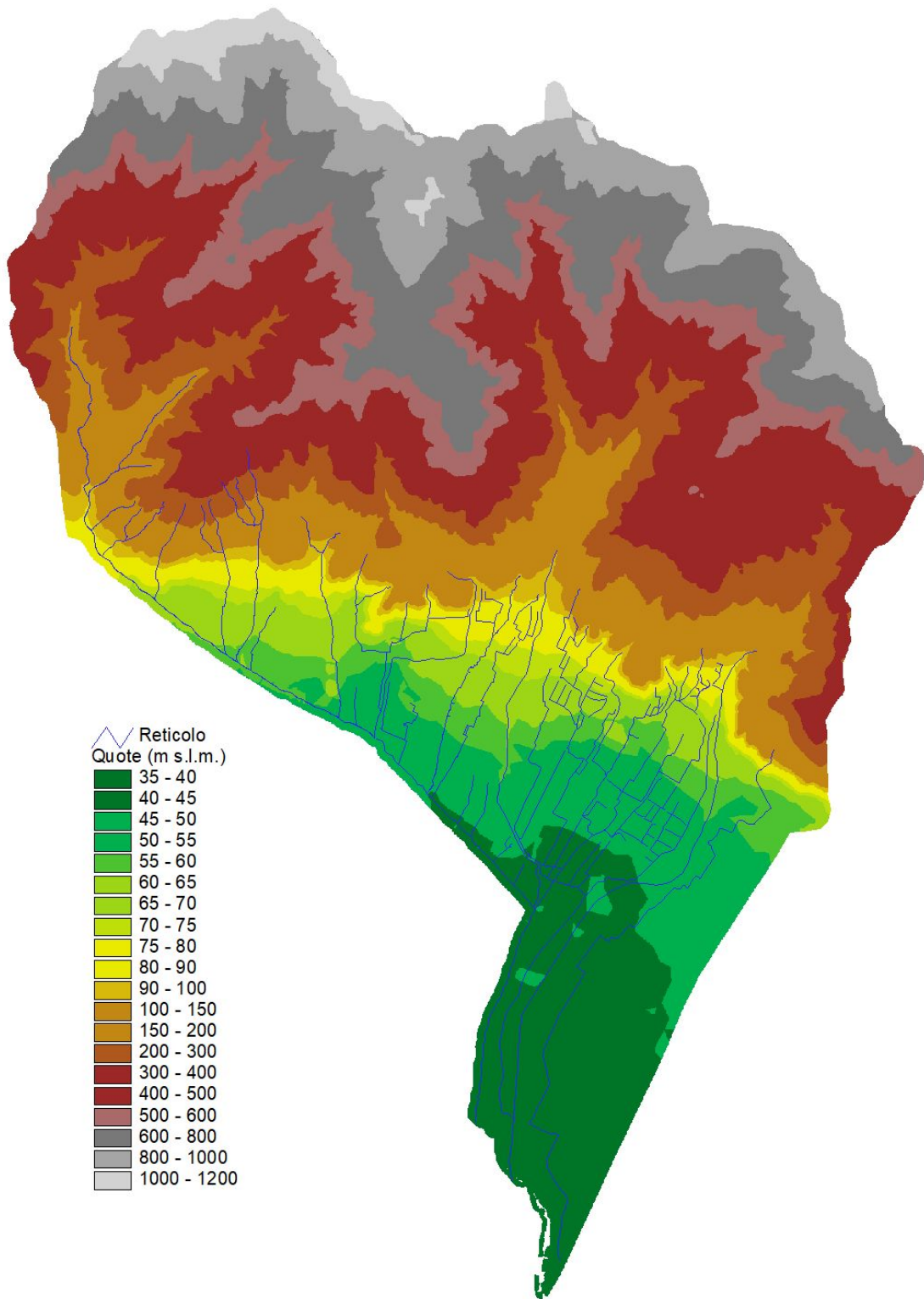


Figura 3-2 – Modello digitale del terreno.

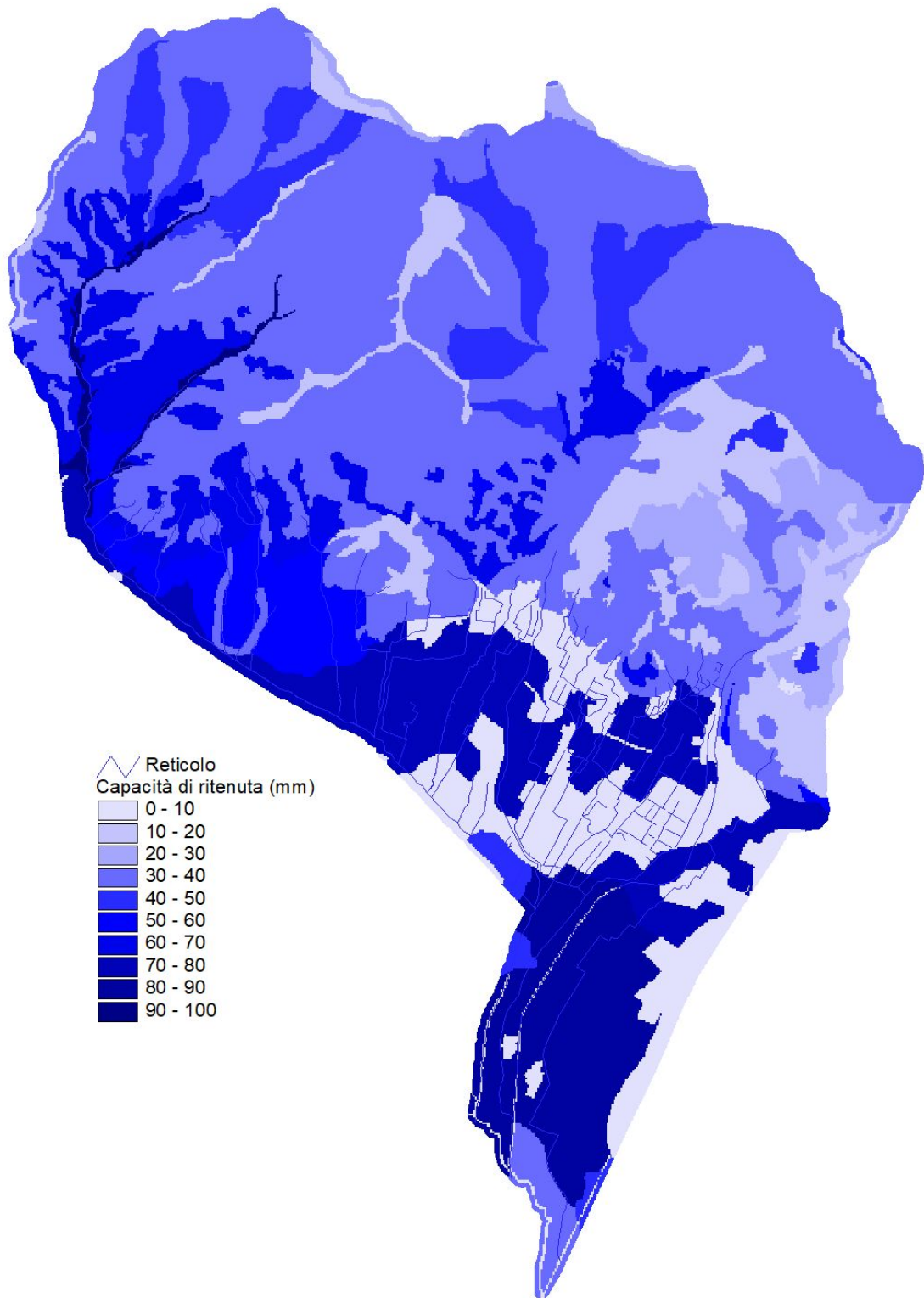


Figura 3-3 – Capacità di ritenuta.

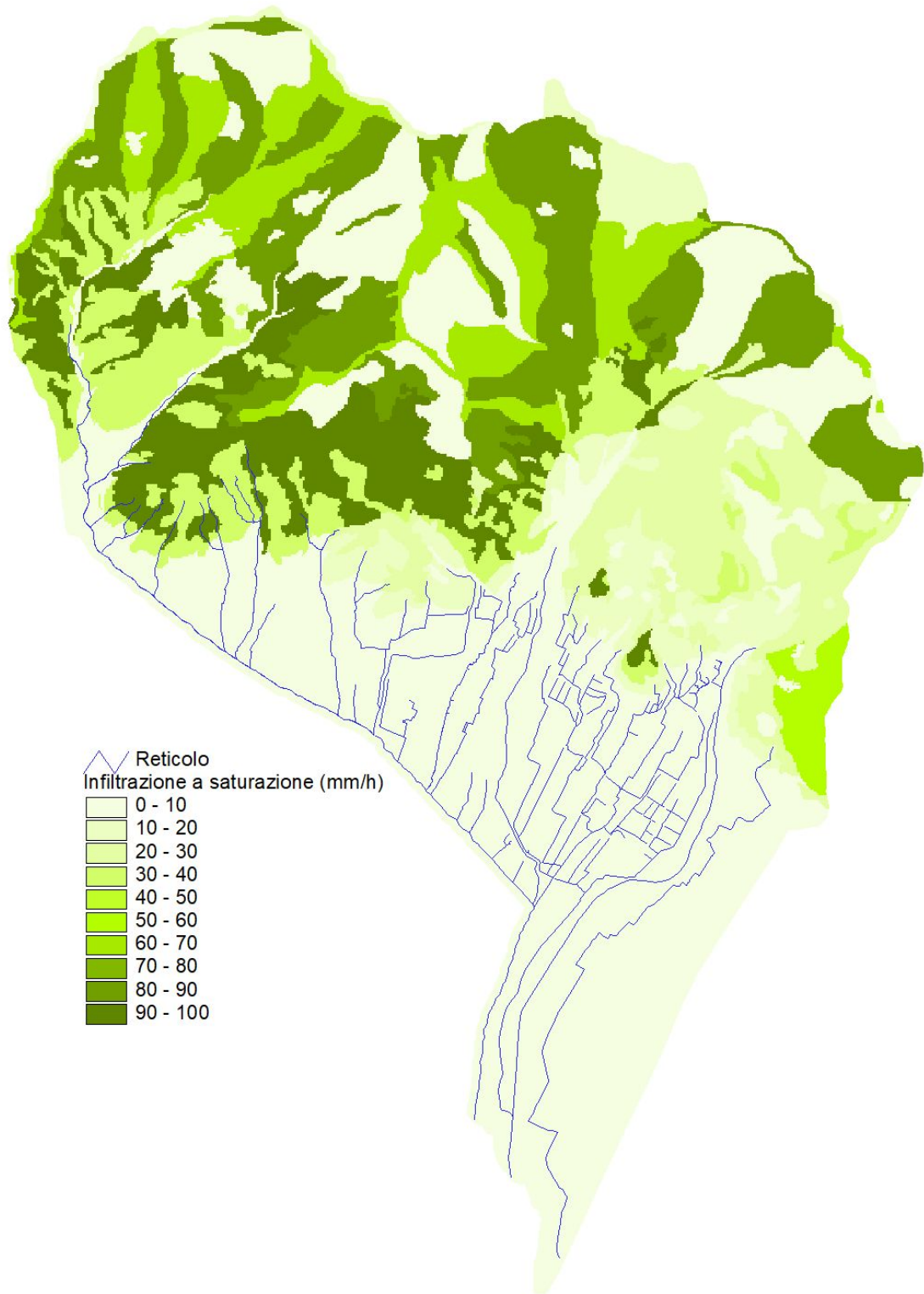


Figura 3-4 – Velocità filtrazione.

3.3 Implementazione del modello idrologico

Il modello idrologico prima descritto è stato implementato per ricavare gli ideogrammi di piena per i diversi tempi di ritorno e per le diverse durata sia dei bacini complessivi che degli interbacini.

La variabilità spazio-temporale della precipitazione è messa in conto attraverso un coefficiente di riduzione, K_r , del tipo:

$$K_r = \frac{h_A(A, t)}{h(t)}$$

dove $h_A(A, t)$ è l'altezza di pioggia di durata t ragguagliata all'area A e $h(t)$ è l'altezza di pioggia di durata t nel centro di scroscio.

Il valore di K_r dipende da tre fattori:

- l'estensione dell'area investita dalla precipitazione;
- la durata considerata;
- l'altezza di pioggia.

Per la quantificazione di K_r si è fatto riferimento alla formula dell'USWB opportunamente modificata per tenere in conto delle caratteristiche peculiari della Regione Toscana:

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

dove α , β e γ sono i parametri della formula, t [h] la durata della precipitazione e A [km²] l'area del bacino.

Per la regione Toscana nell'ambito dello studio di regionalizzazione sono stati definiti i seguenti valori per i parametri:

- $\alpha = F_a \times a = 0.036 \times a$, dove a è il parametro della curva di possibilità;
- $\beta = F_b = 0.25$;
- $\gamma = F_c = 0.01$.

Per il calcolo delle portate degli interbacini è stata utilizzata l'opzione globale che consente di mantenere congruente il volume complessivo della precipitazione procedendo da monte verso valle su un dato corso d'acqua.

Per il calcolo di K_r dell'interbacino K_a si procede pertanto al calcolo separatamente per la sezione di monte K_m e per la sezione di valle K_v procedendo pertanto al calcolo con la seguente formula:

$$K_a = \frac{K_v A_v - K_m A_m}{(A_v - A_m)}$$

dove:

- K_v = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di valle;
- A_v = area del bacino di valle;
- K_m = coefficiente di ragguaglio areale per il bacino di monte;
- A_m = area del bacino di monte.

I parametri del modello idrologico sono riportati nella [Tabella 3-2](#). Tali parametri sono stati ricavati in fase di taratura.

| Acque Alte | | |
|------------|--|------|
| α_o | frazione di volume di suolo inizialmente occupata da acqua (stato di umidità iniziale) [/] | 0.20 |
| Rl | coefficiente moltiplicativo della capacità di ritenuta del suolo [/] | 1.00 |
| IN | coefficiente moltiplicativo della velocità di infiltrazione a saturazione [/] | 0.03 |
| IP | coefficiente moltiplicativo della componente ipodermica [/] | 0.20 |
| MT | coefficiente moltiplicativo della velocità di trasferimento [/] | 1.85 |
| CI | coefficiente ripartizione cinematico-invaso [/] | 0.35 |

Tabella 3-2 – Tabella parametri del modello.

3.4 Taratura del modello idrologico

Il modello idrologico è stato tarato su 2 eventi significativi registrati nella stazione idrometrica del Calice a Variante Pratese (codice TOS03004847-751559-4847) i cui periodi di osservazione sono riportati nella Tabella 3-3. La stazione sottende un bacino di circa 91.7 kmq.

Inoltre, sono state utilizzate le precipitazioni delle stazioni riportate nella Tabella 3-4.

I dati pluvio-idrometrici sono stati forniti dal Servizio Idrografico Regionale. Le precipitazioni sono state ragguagliate al bacino con il metodo dei topoi.

| Num. | Inizio | Fine |
|------|---------------------|---------------------|
| 1 | 06/03/2017 12:00:00 | 08/03/2017 12:00:00 |
| 2 | 08/12/2017 00:15:00 | 18/12/2017 00:00:00 |

Tabella 3-3 – Eventi del Calice alla Variante Pratese.

| Codice stazione | Descrizione |
|-----------------|---------------------|
| TOS11000094 | Acquerino |
| TOS01001263 | Baggio |
| TOS01001151 | Cantagallo |
| TOS01001273 | Fattoria di lavello |
| TOS01001269 | La Ferruccia |
| TOS10001210 | Prato Galceti |
| TOS11000093 | Santomato |

Tabella 3-4 – Stazioni pluviometriche.

Le portate in transito nella stazione idrometrica sono state calcolate con la scala di deflusso ricostruita come descritto nei paragrafi precedenti. Nella

Figura 3-5 si riporta la sezione ove è posto idrometro.

I risultati della verifica sono riportati nella Figura 3-6 e

Figura 3-7 .



Figura 3-5 – Sezione in corrispondenza dell'idrometro del Calice alla Variante Pratese.

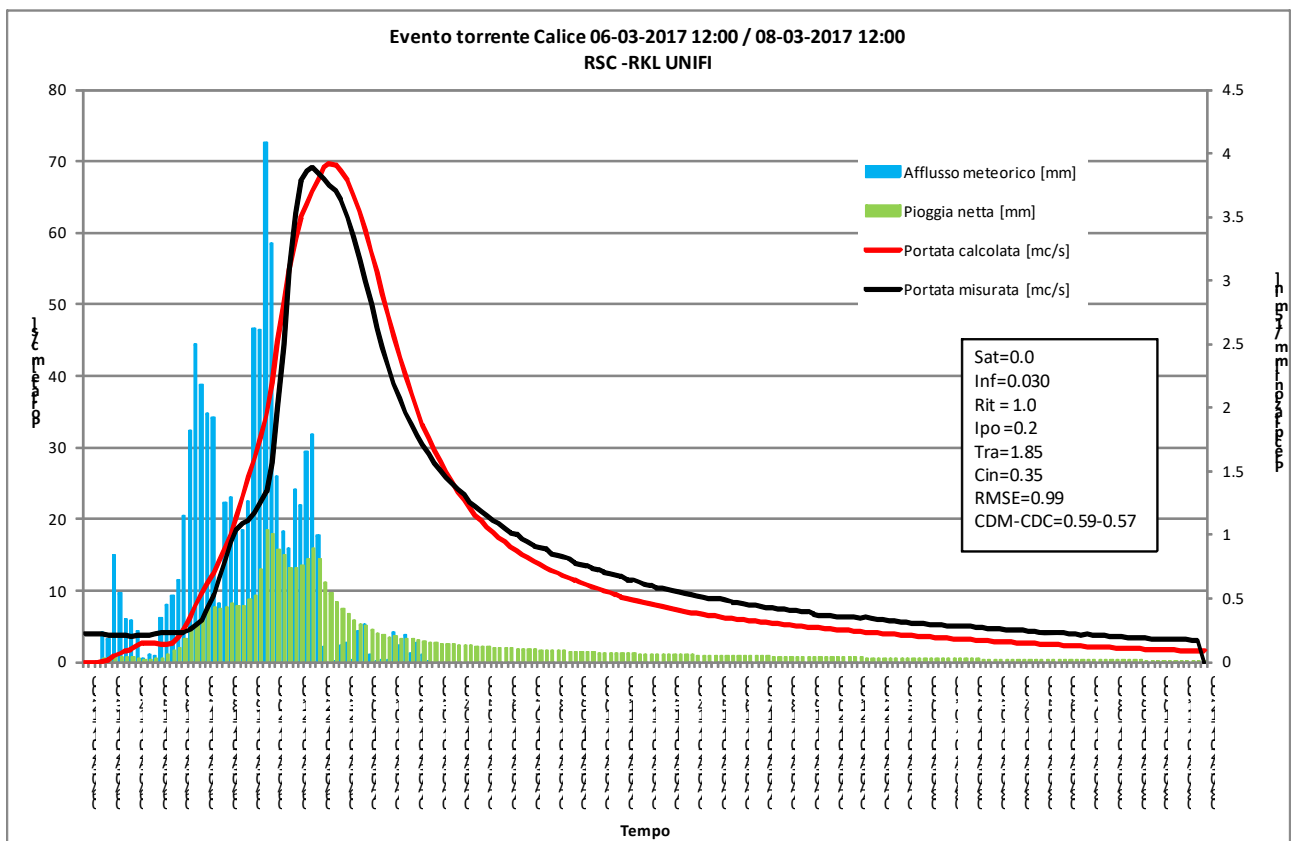


Figura 3-6 – Evento 06-03-2017.

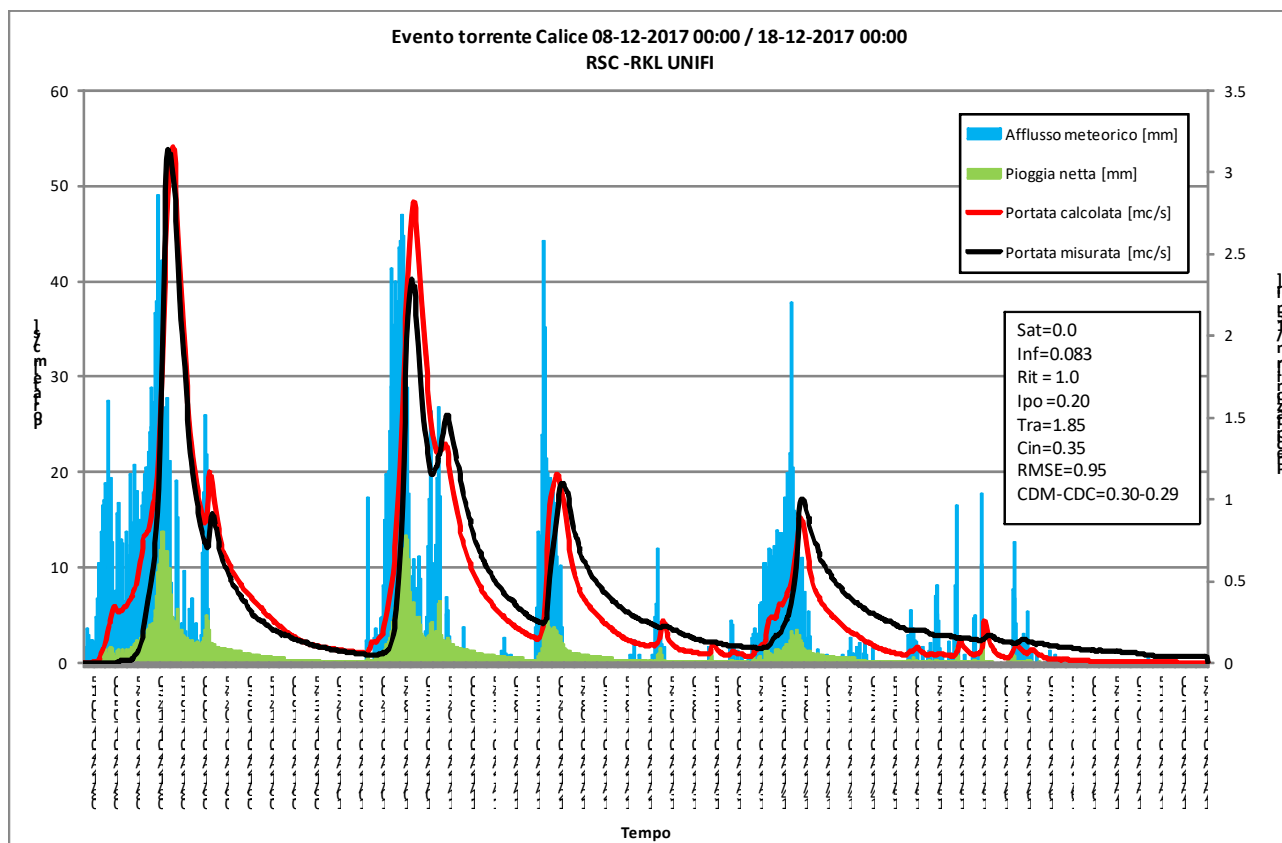


Figura 3-7 – Evento 08-12-2017.

I parametri di taratura di PIENE per il Calice alla Variante Pratese sono riportati nella [Tabella 3-5](#)

Si osserva una buona corrispondenza del valore del picco di piena per l'evento del 2012 e del 2016. Per l'evento del 2013 si ha una sottostima mentre in quello del 2016 una sovrastima imputabili probabilmente allo scarso numero di stazioni pluviometriche presenti nel bacino.

| Inizio | Fine | Saturazione | Filtrazione | Ritenuta | Ipodermico | Trasferimento | Cinematico / invaso |
|------------------|------------------|-------------|-------------|----------|------------|---------------|------------------------|
| 06/03/2017 12:00 | 08/03/2017 12:00 | 0.00 | 0.030 | 1.000 | 0.200 | 1.850 | 0.350 |
| 08/12/2017 00:10 | 18/12/2017 00:00 | 0.00 | 0.083 | 1.000 | 0.200 | 1.850 | 0.350 |
| Media | | 0.00 | 0.057 | 1.000 | 0.200 | 1.850 | 0.350 |

Tabella 3-5 – Parametri taratura del Calice alla Variante Pratese.

3.4.1 Gli idrogrammi di piena per i diversi tempi di ritorno

La valutazione degli idrogrammi di piena è stata condotta sulla base di quanto esposto nei paragrafi precedenti utilizzando il modello afflussi-deflussi

Il calcolo delle sollecitazioni al sistema idraulico ipotizza eventi caratterizzati da un campo di precipitazione a intensità costante, di fissata durata e fissato tempo di ritorno interessante tutto il bacino. Le durate degli eventi sono definite in modo tale da comprendere le varie condizioni critiche.

Gli idrogrammi di piena sono stati calcolati per le durate di 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.5, 5.5 e 7.5 ore e per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni su un totale di 62 immissioni.

Nella [Tabella 3-6](#) sono riepilogati i valori della portata idrologica al colmo di portata valutati per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni con la modellistica idrologica implementata per i bacini totali sottesi alle immissioni.

Nella Tavola T01 si riportano i bacini idrografici e le sezioni di calcolo della portata. Nella Tavola T02 si riporta la planimetria delle immissioni al sistema idraulico.

| Immissione | Area bacino [kmq] | Portata [mc/s] | | |
|------------|-------------------|----------------|--------|--------|
| | | Tr 030 | Tr 200 | Tr 500 |
| IMI001 | 29.47 | 103.01 | 227.59 | 299.02 |
| IMI002 | 30.25 | 101.78 | 212.66 | 278.38 |
| IMI003 | 48.03 | 142.21 | 283.83 | 373.48 |
| IMI004 | 53.78 | 149.65 | 287.82 | 377.70 |
| IMI005 | 0.46 | 3.32 | 5.97 | 7.97 |
| IMI006 | 1.10 | 3.26 | 11.43 | 15.51 |
| IMI007 | 1.43 | 3.43 | 13.79 | 18.64 |
| IMI008 | 1.46 | 3.45 | 13.23 | 17.83 |
| IMI009 | 0.28 | 3.22 | 4.82 | 5.85 |
| IMI010 | 0.29 | 3.14 | 4.70 | 5.71 |
| IMI011 | 1.80 | 6.70 | 16.07 | 21.60 |
| IMI012 | 55.59 | 152.31 | 290.97 | 381.80 |
| IMI013 | 0.48 | 7.28 | 10.89 | 13.23 |
| IMI014 | 0.73 | 8.07 | 13.14 | 16.92 |
| IMI015 | 56.34 | 151.65 | 287.89 | 377.59 |
| IMI016 | 11.88 | 61.01 | 129.46 | 170.22 |
| IMI017 | 25.56 | 108.41 | 231.16 | 303.61 |
| IMI018 | 26.03 | 90.24 | 172.91 | 223.76 |
| IMI019 | 82.37 | 222.39 | 412.15 | 542.49 |
| IMI020 | 0.54 | 6.74 | 12.77 | 17.05 |
| IMI021 | 1.44 | 13.86 | 26.36 | 34.91 |
| IMI022 | 1.51 | 9.41 | 17.81 | 23.11 |
| IMI023 | 0.80 | 3.42 | 7.46 | 10.29 |
| IMI024 | 2.45 | 11.25 | 22.92 | 30.39 |
| IMI025 | 0.15 | 3.07 | 4.59 | 5.58 |
| IMI026 | 0.55 | 7.73 | 11.57 | 14.05 |
| IMI027 | 3.00 | 13.80 | 27.95 | 36.95 |
| IMI028 | 0.96 | 10.94 | 18.79 | 23.87 |
| IMI029 | 1.37 | 9.13 | 16.18 | 20.59 |
| IMI030 | 0.41 | 3.05 | 6.56 | 9.25 |

| Immissione | Area bacino [kmq] | Portata [mc/s] | | |
|------------|-------------------|----------------|--------|--------|
| | | Tr 030 | Tr 200 | Tr 500 |
| IMI031 | 0.74 | 2.83 | 9.20 | 12.79 |
| IMI032 | 0.15 | 0.29 | 1.94 | 2.75 |
| IMI033 | 0.91 | 2.91 | 10.68 | 14.81 |
| IMI034 | 2.30 | 11.21 | 25.09 | 32.95 |
| IMI035 | 2.34 | 11.33 | 22.42 | 29.29 |
| IMI036 | 5.37 | 23.22 | 45.99 | 60.35 |
| IMI037 | 1.29 | 13.69 | 24.49 | 31.61 |
| IMI038 | 2.13 | 19.45 | 34.35 | 44.09 |
| IMI039 | 2.38 | 20.37 | 35.85 | 46.01 |
| IMI040 | 2.63 | 21.03 | 37.40 | 47.99 |
| IMI041 | 3.04 | 19.75 | 36.23 | 46.50 |
| IMI042 | 3.07 | 17.97 | 32.91 | 42.13 |
| IMI043 | 3.13 | 15.89 | 28.09 | 35.76 |
| IMI044 | 8.50 | 37.69 | 70.95 | 91.81 |
| IMI045 | 0.70 | 8.07 | 12.06 | 14.69 |
| IMI046 | 9.25 | 39.37 | 73.67 | 95.12 |
| IMI047 | 91.66 | 233.69 | 432.86 | 571.10 |
| IMI048 | 0.34 | 2.65 | 3.99 | 6.56 |
| IMI049 | 1.51 | 8.66 | 16.74 | 22.18 |
| IMI050 | 1.98 | 9.50 | 19.08 | 25.33 |
| IMI051 | 2.66 | 8.49 | 21.52 | 28.89 |
| IMI052 | 6.56 | 43.14 | 78.73 | 101.56 |
| IMI053 | 9.87 | 69.30 | 121.01 | 155.40 |
| IMI054 | 10.20 | 68.19 | 118.52 | 151.75 |
| IMI055 | 10.61 | 63.88 | 110.17 | 140.53 |
| IMI056 | 10.81 | 44.97 | 75.80 | 95.82 |
| IMI057 | 0.25 | 5.70 | 9.79 | 12.40 |
| IMI058 | 0.38 | 5.41 | 9.39 | 11.97 |
| IMI060 | 1.35 | 10.15 | 20.26 | 27.22 |
| IMI061 | 2.44 | 18.10 | 33.00 | 43.03 |
| IMI059 | 0.63 | 9.05 | 15.77 | 20.16 |
| IMI062 | 3.63 | 18.60 | 36.35 | 47.47 |

Tabella 3-6 – Valori di portata al colmo valutati per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni per i bacini totali sottesi alle immissioni.

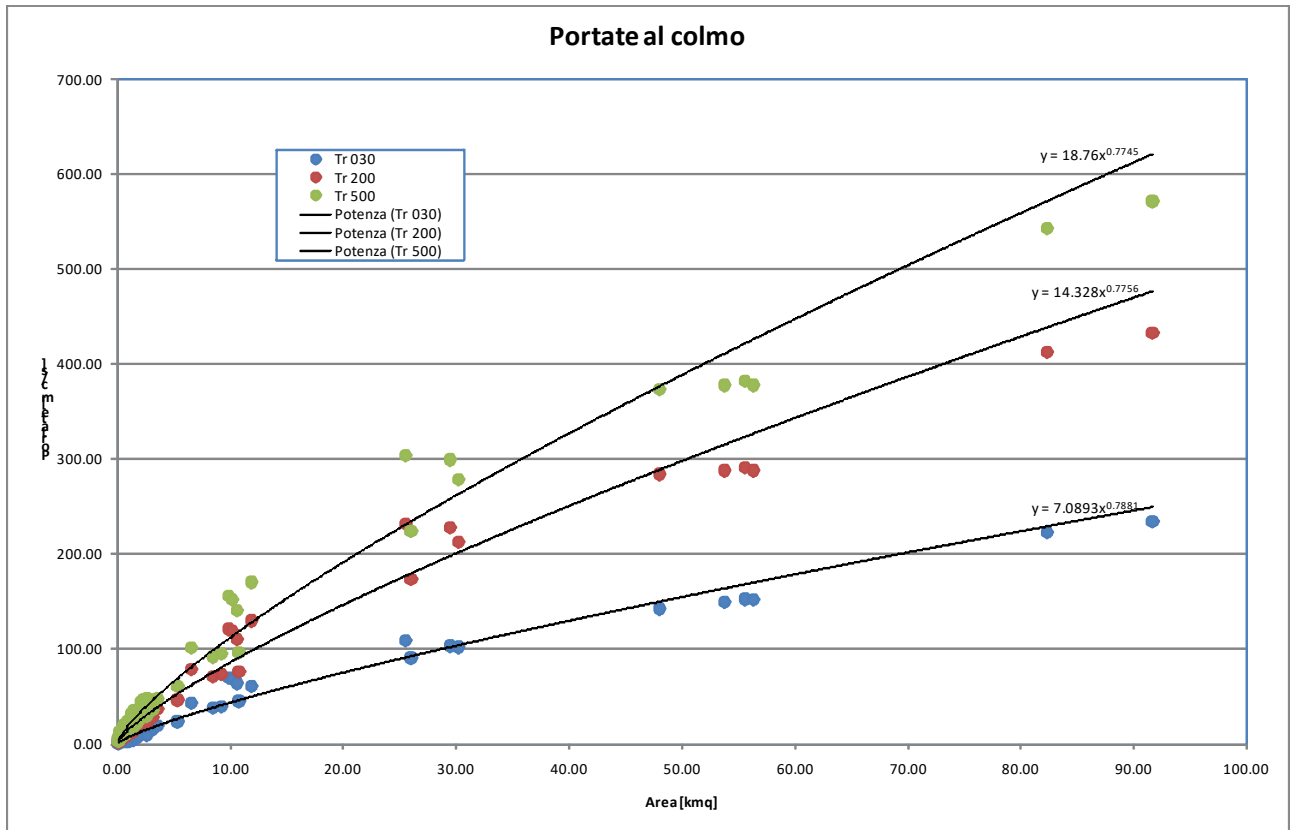


Figura 3-8 – Portate al colmo per i diversi tempi di ritorno

4 ANALISI IDRAULICA

Le verifiche idrauliche sono state condotte con un modello idraulico di moto vario con modellazione bidimensionale delle aree di esondazione.

Il modello di moto vario monodimensionale consente la simulazione del fenomeno di propagazione dell'onda di piena lungo i corsi d'acqua, mentre il modello bidimensionale permette la simulazione dei fenomeni propagazione delle esondazione nelle aree circostanti.

Ai fini della perimetrazione delle aree inondabili è stato fatto riferimento ai battenti idrici massimi (inviluppo) che si instaurano in ciascuna cella del modello digitale del terreno durante la simulazione numerica.

4.1 Il modello idraulico unidimensionale

La verifica idraulica è stata condotta secondo uno schema di moto vario basato sulle classiche equazioni del moto e di continuità per una corrente unidimensionale, associate ad una opportuna equazione per la stima delle dissipazioni energetiche sia a carattere concentrato sia di tipo distribuito.

Le equazioni del moto e di continuità, nella loro formulazione generale di *De Saint Venant*, esprimono le caratteristiche idrauliche (portata, carico piezometrico, altezza d'acqua, velocità) in funzione del tempo e dello spazio:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - J \quad [4.1]$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + q(x) = 0 \quad [4.2]$$

in cui:

A = area della sezione liquida [m^2]; Q = portata [m^3/s]; $q(x)$ = portata laterale (positiva se entrante) [m^2/s]; H = carico totale della corrente [m]; g = accelerazione di gravità [m/s^2]; U = velocità media della corrente [m/s]; J = perdite di carico effettivo per unità di lunghezza; x = ascissa corrente lungo l'alveo [m]; t = tempo [s].

La risoluzione dello schema di moto viene ottenuta per via numerica, discretizzando le equazioni nel dominio spazio-temporale mediante opportuni schemi numerici. La soluzione viene pertanto ottenuta solo nei punti di discretizzazione (e non con continuità su tutto il dominio). Tali punti sono rappresentati dalla sezioni geometriche rilevate (*discretizzazione spaziale*) e dalla scansione temporale utilizzata nella rappresentazione dei fenomeni (*discretizzazione temporale*).

La perdita di carico effettivo viene stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

$$J = \frac{U|U|}{gC^2R} \quad [4.3]$$

in cui U è la velocità media nella sezione, R è il raggio idraulico e C il coefficiente di resistenza esprimibile nella forma:

$$C = \frac{K_s R^{1/6}}{\sqrt{g}} \quad [4.4]$$

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

Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti in corrispondenza dei ponti, vengono introdotte delle perdite di carico effettivo addizionali, ΔH , mediante la formula:

$$\Delta H = \xi \Delta \left(\alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \right) \quad [4.5]$$

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

La risoluzione delle equazioni sopra descritte viene svolta per via numerica, discretizzandole opportunamente alle differenze finite, e associandovi appropriate condizioni al contorno. Le precedenti equazioni sono risolte in forma implicita approssimando alle differenze finite le derivate e operando una media pesata per gli altri termini, e associandovi appropriate condizioni al contorno. In particolare sono state utilizzate le seguenti formulazioni:

$$A = p_s p_t A_i^k + p_s (1 - p_t) A_i^{k+1} + (1 - p_s) p_t A_{i+1}^k + (1 - p_s) (1 - p_t) A_{i+1}^{k+1}$$

$$\frac{\partial A}{\partial s} = p_t \frac{A_{i+1}^k - A_i^k}{\Delta s} + (1 - p_t) \frac{A_{i+1}^{k+1} - A_i^{k+1}}{\Delta s} \quad [4.6]$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = p_s \frac{A_i^{k+1} - A_i^k}{\Delta t} + (1 - p_s) \frac{A_{i+1}^{k+1} - A_{i+1}^k}{\Delta s}$$

dove p_s è il peso della media spaziale e p_t il peso della media temporale (l'indice k è riferito al tempo e l'indice i allo spazio). I valori utilizzati per p_s e p_t sono rispettivamente di 0.5 e 0.45, che dalle prove effettuate risultano essere i più affidabili per la risoluzione del sistema.

Il modello fornisce la risoluzione delle equazioni in corrispondenza dei nodi di una griglia spazio-temporale ove, in corrispondenza delle sezioni fluviali predefinite, al variare del tempo si ricavano i valori delle grandezze idrauliche (portata, velocità, carico piezometrico, etc.). A ciascun passo il programma bilancia le equazioni di moto e di continuità in modo iterativo fino al raggiungimento di una correzione su portate e livelli inferiore a una soglia prefissata.

Le condizioni al contorno da imporre al sistema prima definito possono consistere nella attribuzione di una scala di deflusso, di un idrogramma dei livelli o dell'altezza critica.

La simulazione di fenomeni di laminazione viene condotta associando al modello idraulico non stazionario appena descritto un modello quasi-bidimensionale, definito mediante una rappresentazione "a celle di accumulo" delle aree inondabili adiacenti il corso d'acqua.

4.2 Il modello di inondazione bidimensionale

Le aree di potenziale esondazione possono essere modellate anche come oggetto bidimensionale a patto di fornire un modello digitale del terreno rappresentativo della loro altimetria.

La risoluzione dello schema di inondazione bidimensionale è ottenuta mediante la risoluzione di un sistema alle derivate parziali, di tipo iperbolico, non lineare, costituito dalle equazioni complete di De Saint Venant scritte in forma bidimensionale.

Le equazioni di continuità e del moto nelle due direzioni possono essere scritte come segue:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad [4.7]$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \tau_x = 0 \quad [4.8]$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \tau_y = 0 \quad [4.9]$$

in cui x è coordinata longitudinale; y coordinata trasversale; t coordinata temporale; h altezza d'acqua; u componente di velocità nella direzione x ; v componente di velocità nella direzione y ; $M = uh =$ flusso della corrente in direzione x ; $N = vh =$ flusso della corrente in direzione y ; h altezza

d'acqua; H = quota della superficie libera; ρ densità dell'acqua; τ_x sforzo tangenziale al fondo nella direzione x ; τ_y sforzo tangenziale al fondo nella direzione y .

In particolare, gli sforzi tangenziali lungo x e y sono stati valutati nel modo seguente:

$$\tau_x = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad [4.10a]$$

$$\tau_y = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad [4.10b]$$

avendo indicato con n il coefficiente di scabrezza di *Manning* assunto nel caso specifico pari a 0.05.

La risoluzione delle equazioni sopra scritte viene svolta numericamente mediante uno schema alle differenze finite di tipo implicito accoppiato ad appropriate condizioni al contorno.

In particolare, facendo riferimento allo schema di Figura 4-1, sono state utilizzate le seguenti formulazioni nell'equazione di continuità:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t} \\ \frac{\partial M}{\partial x} = p_t \left(\frac{M_{i,j+1/2}^k - M_{i,j-1/2}^k}{\Delta x} \right) + (1-p_t) \left(\frac{M_{i,j+1/2}^{k+1} - M_{i,j-1/2}^{k+1}}{\Delta x} \right) \\ \frac{\partial N}{\partial y} = p_t \left(\frac{N_{i+1/2,j}^k - N_{i-1/2,j}^k}{\Delta y} \right) + (1-p_t) \left(\frac{N_{i+1/2,j}^{k+1} - N_{i-1/2,j}^{k+1}}{\Delta y} \right) \end{array} \right. \quad [4.11]$$

in cui:

$$\begin{array}{ll} M_{i,j-1/2}^k = u_{i,j-1/2}^k [p_s h_{i,j}^k + (1-p_s) h_{i,j-1}^k]; & N_{i-1/2,j}^k = v_{i-1/2,j}^k [p_s h_{i,j}^k + (1-p_s) h_{i-1,j}^k]; \\ M_{i,j+1/2}^k = u_{i,j+1/2}^k [p_s h_{i,j+1}^k + (1-p_s) h_{i,j}^k]; & N_{i+1/2,j}^k = v_{i+1/2,j}^k [p_s h_{i+1,j}^k + (1-p_s) h_{i,j}^k]; \\ M_{i,j-1/2}^{k+1} = u_{i,j-1/2}^{k+1} [p_s h_{i,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j-1}^{k+1}]; & N_{i-1/2,j}^{k+1} = v_{i-1/2,j}^{k+1} [p_s h_{i,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i-1,j}^{k+1}]; \\ M_{i,j+1/2}^{k+1} = u_{i,j+1/2}^{k+1} [p_s h_{i,j+1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1}]; & N_{i+1/2,j}^{k+1} = v_{i+1/2,j}^{k+1} [p_s h_{i+1,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1}]. \end{array} \quad [4.12a,b]$$

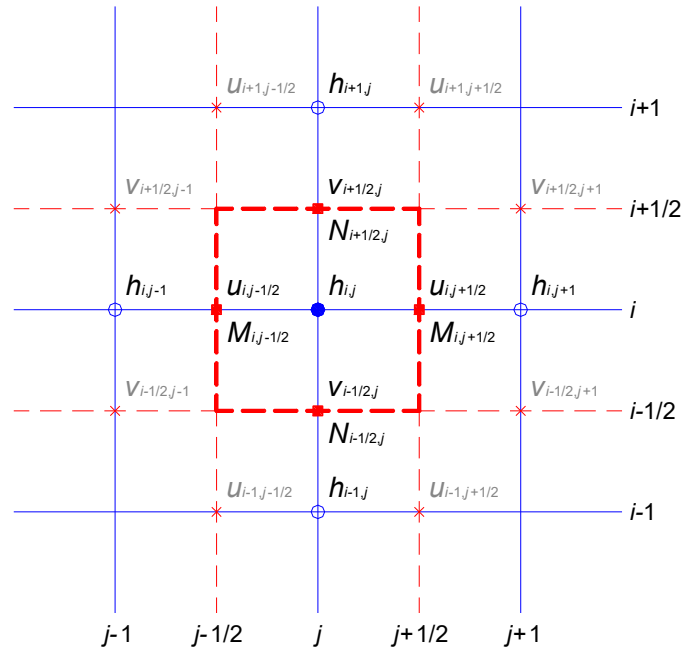


Figura 4-1 – Griglia di calcolo equazione di continuità

Mentre, facendo riferimento allo schema di Figura 4-2, sono state utilizzate le seguenti formulazioni nell'equazione del moto nella direzione x:

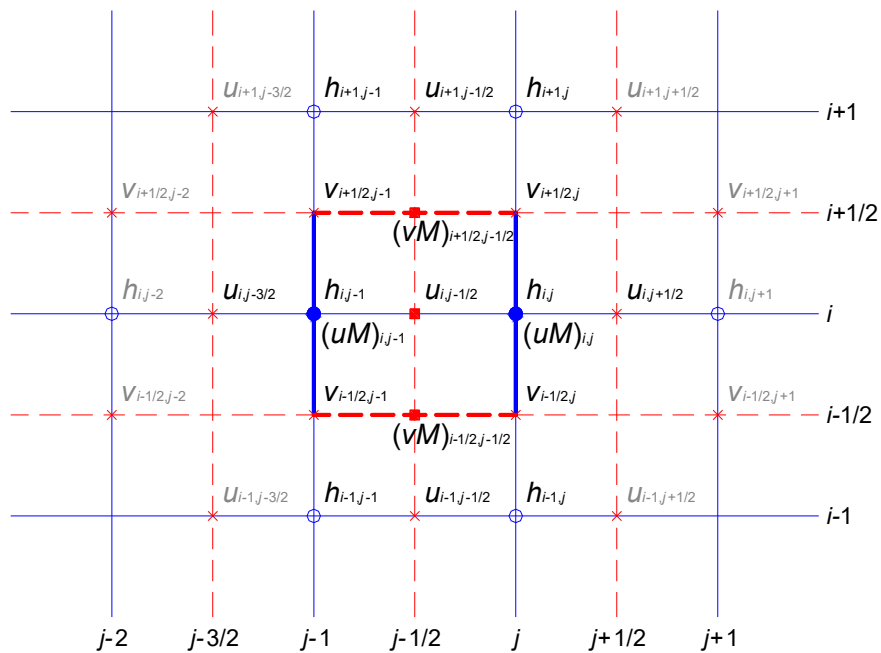


Figura 4-2 – Griglia di calcolo equazione di moto lungo X

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial M}{\partial t} &= \frac{M_{i,j}^{k+1} - M_{i,j}^k}{\Delta t} = \frac{(uh)_{i,j}^{k+1} - (uh)_{i,j}^k}{\Delta t} \\
 \frac{\partial(uM)}{\partial x} &= p_t \left(\frac{(uM)_{i,j}^k - (uM)_{i,j-1}^k}{\Delta x} \right) + (1-p_t) \left(\frac{(uM)_{i,j}^{k+1} - (uM)_{i,j-1}^{k+1}}{\Delta x} \right) \\
 \frac{\partial(vM)}{\partial y} &= p_t \left(\frac{(vM)_{i+1/2,j-1/2}^k - (vM)_{i-1/2,j-1/2}^k}{\Delta y} \right) + (1-p_t) \left(\frac{(vM)_{i+1/2,j-1/2}^{k+1} - (vM)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1}}{\Delta y} \right) \\
 gh \frac{\partial H}{\partial x} &= g \left[p_t (p_s h_{i,j-1}^k + (1-p_s) h_{i,j}^k) + (1-p_t) (p_s h_{i,j-1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1}) \right] \\
 &\quad \cdot \left[p_t \left(\frac{H_{i,j}^k - H_{i,j-1}^k}{\Delta x} \right) + (1-p_t) \left(\frac{H_{i,j}^{k+1} - H_{i,j-1}^{k+1}}{\Delta x} \right) \right] \\
 \frac{1}{\rho} \tau_x &= gn^2 (p_t u_{i,j-1/2}^{k+1} + (1-p_t) u_{i,j-1/2}^k) \cdot \left[p_t (p_s h_{i,j-1}^k + (1-p_s) h_{i,j}^k) + (1-p_t) (p_s h_{i,j-1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1}) \right]^{-1/3} \\
 &\quad \cdot \left\langle \left(p_t u_{i,j-1/2}^k + (1-p_t) u_{i,j-1/2}^{k+1} \right)^2 + \left\{ p_t \left[p_s (p_s v_{i-1/2,j-1}^k + (1-p_s) v_{i-1/2,j}^k) + \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. + (1-p_s) (p_s v_{i+1/2,j-1}^k + (1-p_s) v_{i+1/2,j}^k) \right] + (1-p_t) \left[p_s (p_s v_{i-1/2,j-1}^{k+1} + (1-p_s) v_{i-1/2,j}^{k+1}) + \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. + (1-p_s) (p_s v_{i+1/2,j-1}^{k+1} + (1-p_s) v_{i+1/2,j}^{k+1}) \right] \right\}^2 \right\rangle^{1/2}
 \end{aligned} \right. \tag{4.13}$$

in cui:

$$(uM)_{i,j-1}^k = [p_s u_{i,j-3/2}^k \cdot u_{i,j-3/2}^k + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^k \cdot u_{i,j-1/2}^k] h_{i,j-1}^k;$$

$$(uM)_{i,j}^k = [p_s u_{i,j-1/2}^k \cdot u_{i,j-1/2}^k + (1-p_s) u_{i,j+1/2}^k \cdot u_{i,j+1/2}^k] h_{i,j}^k;$$

[4.14a]

$$(uM)_{i,j-1}^{k+1} = [p_s u_{i,j-3/2}^{k+1} \cdot u_{i,j-3/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^{k+1} \cdot u_{i,j-1/2}^{k+1}] h_{i,j-1}^{k+1};$$

$$(uM)_{i,j}^{k+1} = [p_s u_{i,j-1/2}^{k+1} \cdot u_{i,j-1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j+1/2}^{k+1} \cdot u_{i,j+1/2}^{k+1}] h_{i,j}^{k+1};$$

$$(vM)_{i-1/2,j-1/2}^k = [(p_s v_{i-1/2,j-1}^k + (1-p_s) v_{i-1/2,j}^k) \cdot (p_s u_{i-1,j-1/2}^k + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^k)] \cdot [p_s (p_s h_{i-1,j-1}^k + (1-p_s) h_{i-1,j}^k) + (1-p_s) (p_s h_{i,j-1}^k + (1-p_s) h_{i,j}^k)];$$

$$(vM)_{i+1/2,j-1/2}^k = [(p_s v_{i+1/2,j-1}^k + (1-p_s) v_{i+1/2,j}^k) \cdot (p_s u_{i,j-1/2}^k + (1-p_s) u_{i+1,j-1/2}^k)] \cdot [p_s (p_s h_{i,j-1}^k + (1-p_s) h_{i,j}^k) + (1-p_s) (p_s h_{i+1,j-1}^k + (1-p_s) h_{i+1,j}^k)];$$

[4.14b]

$$(vM)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1} = [(p_s v_{i-1/2,j-1}^{k+1} + (1-p_s) v_{i-1/2,j}^{k+1}) \cdot (p_s u_{i-1,j-1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^{k+1})] \cdot [p_s (p_s h_{i-1,j-1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i-1,j}^{k+1}) + (1-p_s) (p_s h_{i,j-1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1})];$$

$$(vM)_{i+1/2,j-1/2}^{k+1} = [(p_s v_{i+1/2,j-1}^{k+1} + (1-p_s) v_{i+1/2,j}^{k+1}) \cdot (p_s u_{i,j-1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i+1,j-1/2}^{k+1})] \cdot [p_s (p_s h_{i,j-1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1}) + (1-p_s) (p_s h_{i+1,j-1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i+1,j}^{k+1})].$$

Infine, facendo riferimento allo schema di Figura 4-3, sono state utilizzate le seguenti formulazioni nell'equazione del moto nella direzione y:

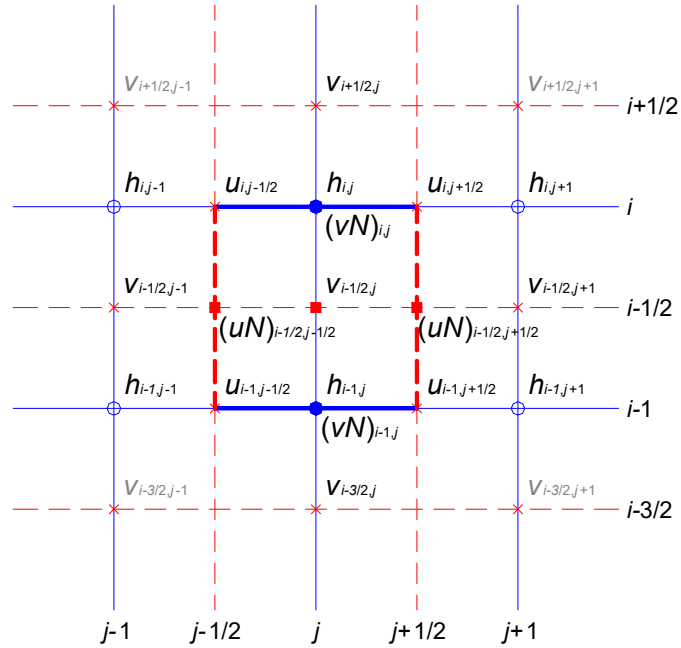


Figura 4-3 – Griglia di calcolo equazione di moto lungo Y

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial N}{\partial t} &= \frac{N_{i,j}^{k+1} - N_{i,j}^k}{\Delta t} = \frac{(vh)_{i,j}^{k+1} - (vh)_{i,j}^k}{\Delta t} \\
 \frac{\partial (uN)}{\partial x} &= p_t \left(\frac{(uN)_{i-1/2,j+1/2}^k - (uN)_{i-1/2,j-1/2}^k}{\Delta x} \right) + (1-p_t) \left(\frac{(uN)_{i-1/2,j+1/2}^{k+1} - (uN)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1}}{\Delta x} \right) \\
 \frac{\partial (vN)}{\partial y} &= p_t \left(\frac{(vN)_{i,j}^k - (vN)_{i-1,j}^k}{\Delta y} \right) + (1-p_t) \left(\frac{(vN)_{i,j}^{k+1} - (vN)_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta y} \right) \\
 gh \frac{\partial H}{\partial y} &= g \left[p_t (\rho_s h_{i-1,j}^k + (1-p_s) h_{i,j}^k) + (1-p_t) (\rho_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1}) \right] \cdot \\
 &\quad \cdot \left[p_t \left(\frac{H_{i,j}^k - H_{i-1,j}^k}{\Delta y} \right) + (1-p_t) \left(\frac{H_{i,j}^{k+1} - H_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta y} \right) \right] \\
 \frac{1}{\rho} \tau_y &= gn^2 (p_t v_{i-1/2,j}^{k+1} + (1-p_t) v_{i-1/2,j}^k) \cdot \left[p_t (\rho_s h_{i-1,j}^k + (1-p_s) h_{i,j}^k) + (1-p_t) (\rho_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1}) \right]^{-1/3} \cdot \\
 &\quad \cdot \left\{ p_t \left[\rho_s (p_s u_{i-1,j-1/2}^k + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^k) + (1-p_s) (\rho_s u_{i-1,j+1/2}^k + (1-p_s) u_{i,j+1/2}^k) \right] + \right. \\
 &\quad \left. + (1-p_t) \left[\rho_s (p_s u_{i-1,j-1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^{k+1}) + (1-p_s) (\rho_s u_{i-1,j+1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j+1/2}^{k+1}) \right] \right\}^2 + \\
 &\quad \left. + (p_t v_{i-1/2,j}^k + (1-p_t) v_{i-1/2,j}^{k+1})^2 \right\}^{1/2}
 \end{aligned} \right\} \quad [4.15]$$

in cui:

$$\begin{aligned}
 (uN)_{i-1/2,j-1/2}^k &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j-1}^k + (1-\rho_s) v_{i-1/2,j}^k) \cdot (\rho_s u_{i-1,j-1/2}^k + (1-\rho_s) u_{i,j-1/2}^k) \right] \cdot \\
 &\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j-1}^k + (1-\rho_s) h_{i,j-1}^k) + (1-\rho_s) (\rho_s h_{i-1,j}^k + (1-\rho_s) h_{i,j}^k) \right]; \\
 (uN)_{i-1/2,j+1/2}^k &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j}^k + (1-\rho_s) v_{i-1/2,j+1}^k) \cdot (\rho_s u_{i-1,j+1/2}^k + (1-\rho_s) u_{i,j+1/2}^k) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j}^k + (1-\rho_s) h_{i,j}^k) + (1-\rho_s) (\rho_s h_{i-1,j+1}^k + (1-\rho_s) h_{i,j+1}^k) \right]; \\
 (uN)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1} &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j-1}^{k+1} + (1-\rho_s) v_{i-1/2,j}^{k+1}) \cdot (\rho_s u_{i-1,j-1/2}^{k+1} + (1-\rho_s) u_{i,j-1/2}^{k+1}) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j-1}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j-1}^{k+1}) + (1-\rho_s) (\rho_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j}^{k+1}) \right]; \\
 (uN)_{i-1/2,j+1/2}^{k+1} &= \left[(\rho_s v_{i-1/2,j}^{k+1} + (1-\rho_s) v_{i-1/2,j+1}^{k+1}) \cdot (\rho_s u_{i-1,j+1/2}^{k+1} + (1-\rho_s) u_{i,j+1/2}^{k+1}) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\rho_s (\rho_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j}^{k+1}) + (1-\rho_s) (\rho_s h_{i-1,j+1}^{k+1} + (1-\rho_s) h_{i,j+1}^{k+1}) \right]. \\
 (vN)_{i,j-1}^k &= \left[\rho_s v_{i-3/2,j}^k \cdot v_{i-3/2,j}^k + (1-\rho_s) v_{i-1/2,j}^k \cdot v_{i-1/2,j}^k \right] h_{i,j-1}^k; \\
 (vN)_{i,j}^k &= \left[\rho_s v_{i-1/2,j}^k \cdot v_{i-1/2,j}^k + (1-\rho_s) v_{i+1/2,j}^k \cdot v_{i+1/2,j}^k \right] h_{i,j}^k; \\
 (vN)_{i,j-1}^{k+1} &= \left[\rho_s v_{i-3/2,j}^{k+1} \cdot v_{i-3/2,j}^{k+1} + (1-\rho_s) v_{i-1/2,j}^{k+1} \cdot v_{i-1/2,j}^{k+1} \right] h_{i,j-1}^{k+1}; \\
 (vN)_{i,j}^{k+1} &= \left[\rho_s v_{i-1/2,j}^{k+1} \cdot v_{i-1/2,j}^{k+1} + (1-\rho_s) v_{i+1/2,j}^{k+1} \cdot v_{i+1/2,j}^{k+1} \right] h_{i,j}^{k+1};
 \end{aligned}
 \tag{4.16a}$$

dove ρ_s è il peso della media spaziale e ρ_t il peso della media temporale (l'indice k è riferito al tempo, mentre gli indici i e j sono riferiti rispettivamente alle coordinate lungo x e y). I valori utilizzati per ρ_s e ρ_t sono rispettivamente di 0.5 e 0.45 che dalle prove effettuate risultano essere i più affidabili per la risoluzione del sistema.

Il modello fornisce la risoluzione delle equazioni in corrispondenza dei nodi di una griglia spazio-temporale ove, al variare del tempo, si ricavano i valori delle grandezze idrauliche (portata, velocità, carico piezometrico, etc). A ciascun passo il programma bilancia le equazioni di moto e di continuità in modo iterativo fino al raggiungimento di una correzione su portate e livelli inferiore a una soglia prefissata. La propagazione delle esondazioni avviene in condizioni di corrente lenta.

4.3 Il modello di inondazione quasi-bidimensionale

La simulazione delle esondazioni nelle porzioni di territorio esterne al comune di Montemurlo e per la modellazione dei meccanismi di riempimento delle casse di espansione presenti allo stato attuale si è fatto ricorso alla modellazione *quasi-dimensionale tipo Cunge*, integrando cioè il modello mono-dimensionale con quello a macro-aree interconnesse. In questo secondo caso le quote di inondazione coincidono con le quote raggiunte nelle singole celle.

Nel modello tipo *Cunge* l'area potenzialmente inondabile viene immaginata composta da aree elementari connesse idraulicamente tra loro e con l'asta fluviale da soglie sfioranti. La definizione delle aree elementari che compongono le aree di potenziale inondazione deve avvenire con criteri di massima verosimiglianza del modello alla realtà: pertanto ad ogni struttura di contenimento identificabile sul territorio (quali i rilevati stradali e ferroviari, muri e argini, corsi d'acqua) deve corrispondere il bordo di una o più aree.

La delimitazione e la modellazione di tali aree, dette *aree di potenziale esondazione*, per le quali risulta prevalente il fenomeno di invaso rispetto a quello di trasporto, avviene secondo le seguenti fasi:

– *individuazione e acquisizione delle strutture di contenimento*

le aree elementari di potenziale esondazione sono delimitate da elementi di contorno rappresentati da argini, rilevati stradali e ferroviari, contenimenti naturali. L'individuazione di tali elementi è stata condotta sulla base cartografica della C.T.R. 1:2.000 e del modello digitale del terreno con passo 1 m x 1 m;

– *caratterizzazione morfologica delle aree di potenziale inondazione*

in tale fase si è proceduto alla definizione delle caratteristiche plano-altimetriche delle aree elementari sulla base della cartografia con l'obiettivo di ricavare la legge di riempimento quota-volume di inondazione in funzione dei livelli di piena nella forma:

$$V = A(y - y_0)^B \quad [4.17]$$

in cui y_0 è la quota minima del terreno all'interno dell'area.

– *definizione delle connessioni idrauliche*

sulla base dell'analisi dettagliata delle caratteristiche morfologiche, infrastrutturali ed idrauliche del territorio sono state definite le caratteristiche delle connessioni idrauliche tra l'alveo principale e le aree di potenziale esondazione, e tra le aree stesse.

La simulazione del fenomeno esondativo si basa inoltre sulle seguenti ipotesi:

- i volumi idrici di inondazione si generano esclusivamente *per tracimazione* delle sommità arginali del corso d'acqua. Non sono considerati altri fenomeni quali, ad esempio, il collasso delle strutture arginali o fenomeni di rigurgito diversi da quelli già considerati nel presente studio. Anche gli elementi infrastrutturali, delimitanti le aree di potenziale inondazione (i.e. rilevati stradali, ferroviari, etc.), si considerano, al pari degli argini fluviali, tracimabili senza collasso;
- il fenomeno dell'allagamento di ciascuna area potenzialmente inondabile avviene seguendo la legge di riempimento quota-volume;
- il trasferimento dei volumi di esondazione, sia alveo/area sia area/area avviene tramite le connessioni idrauliche.

Il fenomeno dell'allagamento di ciascuna area avviene in modo sincrono, cioè non viene messo in conto il tempo effettivo connesso alla reale propagazione sul terreno dei volumi esondati. Quest'ultimo è peraltro di difficile stima, soprattutto in casi di aree fortemente antropizzate, ove la presenza di strutture e infrastrutture condiziona la velocità e le direzioni lungo le quali l'allagamento si propaga.

La propagazione dei livelli idrici nelle celle avviene pertanto attraverso la sola legge di continuità dei volumi. A tale scopo è necessario considerare il volume accumulato nella singola cella e le sue variazioni dovute agli scambi di portata con le celle circostanti.

L'approssimazione adottata è tanto più accettabile quanto maggiore è il numero di aree potenzialmente soggette a esondazione. Infatti, in tal modo, il riempimento di ciascuna area è regolato dalle caratteristiche degli sfioratori di collegamento tra le aree che, in funzione della quota e della lunghezza, influenzano la velocità di riempimento della cella successiva. Si trascurano comunque gli effetti della non stazionarietà e bidimensionalità connessi al fenomeno di propagazione del fronte di inondazione.

Ad ogni passo temporale l'equazione di continuità impone il bilancio tra i volumi netti transitati attraverso la cella e la variazione di volume locale, sotto le ipotesi che il volume accumulato in

ciascuna cella sia univocamente correlato all'altezza idrica nella cella stessa, e che le portate scambiate siano funzione dei livelli a monte e a valle delle connessioni idrauliche.

In particolare, l'equazione di continuità per la generica area k -esima risulta la seguente:

$$A_{ck} \frac{\partial h_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}(h_k, h_i) \quad [4.18]$$

ove A_{ck} rappresenta la superficie allagata nell'area k -esima, h_k è l'altezza d'acqua relativa, Q_{ki} è la portata scambiata con l'area i -esima adiacente in funzione delle relative altezze idriche e la sommatoria è estesa a tutte le aree in comunicazione diretta con l'area k -esima.

4.4 La modellazione idraulica delle connessioni idrauliche

Le soglie sfioranti sono assimilate a stramazzi in parete grossa, con possibilità di funzionamento bidirezionale, in condizioni di deflusso libero oppure rigurgitato in funzione dei livelli a monte e a valle dello stramazzo.

La legge di deflusso adottata nelle condizioni deflusso libero:

$$Q_{sf} = l\mu_1 h_1 \sqrt{2gh_1} \quad [4.19]$$

e nel caso di deflusso rigurgitato:

$$Q_{sf} = l(\mu_1(h_1 - h_2) + \mu_2 h_2) \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad [4.20]$$

dove l è la lunghezza della soglia, μ_1 e μ_2 sono pari rispettivamente a 0.4 e 0.65, h_1 e h_2 sono rispettivamente i livelli del pelo libero a monte e a valle, riferiti alla quota della soglia (con $h_2 < h_1 - h_2$). Mentre la quota di sfioro delle connessioni alveo/area o area/area è in generale ben definibile come la quota inferiore dell'elemento di contenimento che separa le aree stesse, invece la lunghezza del fronte di sfioro ha un valore dipendente in linea di massima dalla densità spaziale delle sezioni fluviali o dalla lunghezza dei lati delle aree.

Le portelle sono assimilate a luci a battente, che possono funzionare in modo bidirezionale in condizioni di deflusso libero o rigurgitato.

Nelle condizioni di deflusso libero si distinguono i seguenti tre casi:

- 1) livello di monte a quota inferiore all'intradosso della paratoia

$$Q_{sf} = l\mu_1 h_1 \sqrt{2gh_1} \quad [4.21]$$

- 2) livello di monte a quota superiore all'intradosso della paratoia per una quantità minore dell'altezza della luce

$$Q_{sf} = l(\mu_2(h_1 - b) + \mu_1(2b - h_1)) \sqrt{2g\left(h_1 - \frac{h_1 - b}{2}\right)} \quad [4.22]$$

- 3) livello di monte a quota superiore all'intradosso della paratoia per una quantità maggiore dell'altezza della luce

$$Q_{sf} = l\mu_2 b \sqrt{2g\left(h_1 - \frac{b}{2}\right)} \quad [4.23]$$

Nelle condizioni di deflusso rigurgitato si distinguono i seguenti quattro casi:

- 1) livello di monte a quota inferiore all'intradosso della paratoia

$$Q_{sf} = l(\mu_1(h_1 - h_2) + \mu_2 h_2) \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad [4.24]$$

- 2) livello di monte a quota superiore all'intradosso della paratoia per una quantità minore dell'altezza della luce e livello di valle minore dell'altezza della luce

$$Q_{sf} = l\mu_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} + l(\mu_2(h_1 - b) + \mu_1(2b - h_1)) \left(\frac{b - h_2}{b}\right) \sqrt{2g\left(h_1 - h_2 - \frac{h_1 - b}{2}\right)} \quad [4.25]$$

- 3) livello di monte a quota superiore all'intradosso della paratoia per una quantità maggiore dell'altezza della luce e livello di valle minore dell'altezza della luce

$$Q_{sf} = l\mu_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} + l\mu_2 (b - h_2) \sqrt{2g\left(h_1 - h_2 - \frac{b - h_2}{2}\right)} \quad [4.26]$$

- 4) livello di monte a quota superiore all'intradosso della paratoia per una quantità maggiore dell'altezza della luce e livello di valle maggiore dell'altezza della luce

$$Q_{sf} = l\mu_2 b \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad [4.27]$$

dove l e b sono rispettivamente la larghezza e l'altezza della luce della portella, μ_1 e μ_2 sono pari rispettivamente a 0.4 e 0.65, h_1 e h_2 sono rispettivamente i livelli del pelo libero a monte e a valle, riferiti alla quota della soglia della portella.

Le idrovore sono caratterizzate da una curva e da un livello di attacco e un livello di stacco. Se il livello di monte è maggiore del livello di valle:

$$Q = c \quad [4.28]$$

se il livello di monte è minore del livello di valle

$$Q_{sf} = a(h_2 - h_1)^2 + b(h_2 - h_1) + c \quad [4.29]$$

dove a , b e c sono i parametri della curva caratteristica, h_1 e h_2 sono rispettivamente i livelli del pelo libero a monte e a valle.

4.5 Definizione dei corsi d'acqua oggetto di studio

L'elenco dei corsi d'acqua considerati nell'ambito del presente studio è riportato nella [Tabella 4-1](#), in cui sono indicati:

- la sigla che contraddistingue il corso d'acqua;
- il nome del tratto di corso d'acqua;
- la lunghezza del tratto;
- il numero di sezioni che compone il tratto.

4.6 Schematizzazione dell'area di studio

Il sistema idraulico considerato, schematizzato nel suo complesso per il territorio di Montemurlo è stato descritto da:

- n. 25 tronchi fluviali individuati tramite le confluenze ([Tabella 4-1](#));
- n. 1260 sezioni fluviali;
- n. 46 aree di potenziale esondazione idraulicamente connesse, a cui corrispondono:
 - n. 8 casse di espansione per le acque alte (C_AGNACCINO, C_FUNANDOLA, C_STREGALE, F_STREGALE, C_SELVAVECCHIA, C_MENDACIONE, C_FICARELLO_M, C_FICARELLO_V, C_BASSA);
 - n. 1 cassa di espansione per le acque basse (A_BASSE_ME);

- n. 10 tratti di corsi d'acqua (POLA, PARUGIANO, F_AGNACCINO, F_POLTRONOVA, F_GRAMIGNETO, AGNACCINO_SC01, AGNACCINO_SC02, AGNACCINO_SC03, AGNACCINO_SC04, MAZZACCHERI_SC);
- n. 27 aree corrispondenti alla porzione di territorio esterna al comune;
- n. 1 modello digitale del terreno, rappresentativo del territorio comunale di Montemurlo;
- n. 4515 connessioni idrauliche tra le aree di potenziale esondazione e i corsi d'acqua e tra le aree stesse;
- n. 77 portelle di collegamento, rappresentative di scarichi, sottovia o tombamenti;
- n. 9 idrovore:
 - n. 2 idrovore per l'impianto di sollevamento delle acque basse nel fosso Mendancione in corrispondenza di via Pola;
 - n. 4 idrovore per l'impianto di sollevamento delle acque del fosso Agnaccino nella cassa;
 - n. 3 idrovore per l'impianto di sollevamento delle acque dello scolmatore dell'Agnaccino nel fosso Mendancione
- n. 62 immissioni di portata liquida in altrettante sezioni di corsi d'acqua.

La planimetria delle sezioni fluviali utilizzate, delle casse di espansione, delle connessioni idrauliche, delle portelle di collegamento, delle idrovore e del modello digitale del terreno è riportata nell'elaborato T02, mentre le principali caratteristiche di tali elementi sono riportate nella Appendice 0 della presente relazione.

| Sigla [codice] | Corso d'acqua [tratto] | L [m] | Sezioni [#] | Sigla [codice] | Corso d'acqua [tratto] | L [m] | Sezioni [#] |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------------|
| AG | Aгна | 6415.9 | 112 | FU - DF | Funandola_01 | 874.1 | 36 |
| AN | Agnaccino_01 | 1378.8 | 49 | FU - DF | Funandola_02 | 1285.4 | 78 |
| AN | Agnaccino_02 | 317.3 | 28 | FU | Funandola_03 | 2146.0 | 63 |
| AN | Agnaccino_03 | 285.3 | 25 | FU - DF | Funandola_dv | 642.1 | 22 |
| BG | Bagnolo | 4716.1 | 107 | GR | Gramigneto | 546.2 | 51 |
| BU | Bure_01 | 6789.3 | 137 | ME | Mendacione_01 | 3093.3 | 135 |
| BU | Bure_02 | 511.5 | 14 | ME | Mendacione_02 | 666.4 | 30 |
| BU | Bure_03 | 373.0 | 10 | ME | Mendacione_03 | 732.3 | 30 |
| BU | Bure_04 | 58.4 | 2 | PL | Poltronova | 201.3 | 26 |
| CA | Calice | 1032.2 | 23 | SE | Selvavecchia | 714.8 | 37 |
| CN | Calicino | 1407.0 | 30 | ST | Stregale_01 | 2247.1 | 64 |
| FI | Ficarello | 2679.4 | 91 | ST | Stregale_02 | 1088.6 | 39 |
| FG | Fosso_Guardia | 466.3 | 21 | - | - | - | - |

Tabella 4-1– Elenco dei corsi d'acqua considerati.

4.7 Parametri del modello idraulico

La condizione al contorno di monte, in termini di idrogrammi di portate, è stata assegnata nella prima sezione di monte di ciascun corso d'acqua. Per ogni tempo di ritorno e per ogni durata dell'evento di pioggia, il relativo idrogramma di piena della condizione di monte è stato ricavato dai risultati dell'analisi idrologica.

Le immissioni idrologiche dei sottobacini imposte al sistema, sono state applicate senza tenere conto delle possibili esondazioni a monte delle immissioni stesse.

Le condizioni al contorno di valle per il torrente Calice, il torrente Calicino, il torrente Bagnolo e per il fosso Ficarello sono state espresse in termini di scala di deflusso, assegnate all'ultima sezione dei tratti verificati (sezioni CA0012__, CN0085__, BA0101__ e FI4076_A). Le altezze idrometriche con le

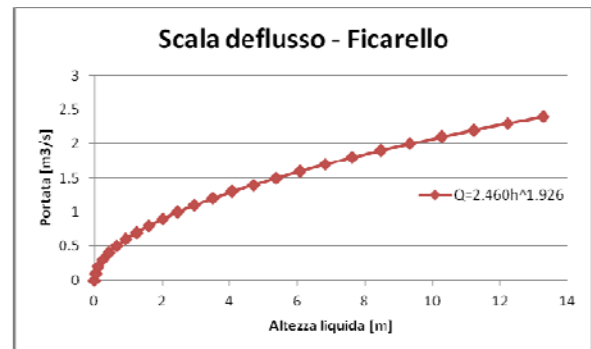
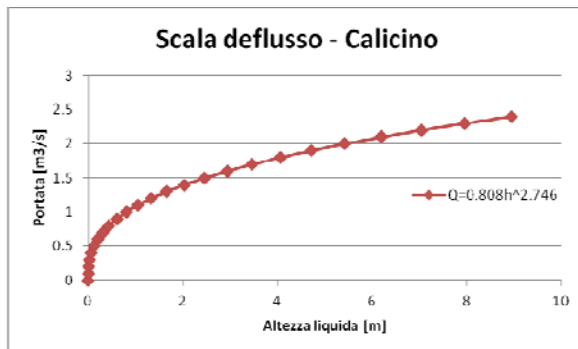
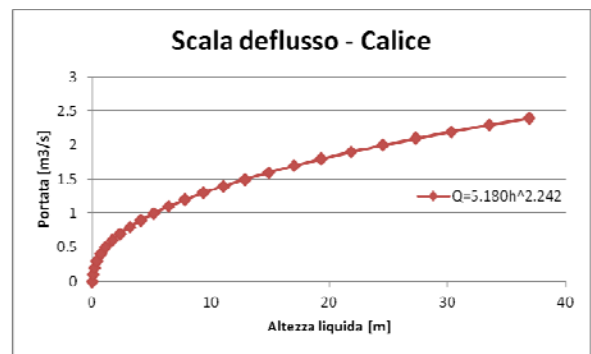
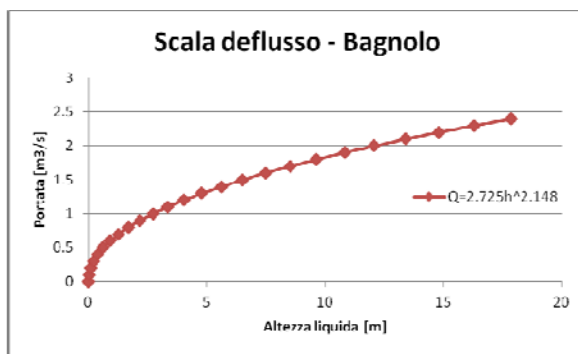
relative portate sono state fornite dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale. Sulla base di tali dati si sono ottenute le scale di deflusso nella seguente forma:

$$Q = a(h - b)^c + q_0 \quad [4.29]$$

Dove a, b, c e q_0 sono i parametri della scala di deflusso (Tabella 4-2):

| Corso d'acqua [tratto] | Sezione [codice] | a | b | c | q_0 |
|------------------------|------------------|-------|--------|-------|-------|
| Bagnolo | BA0101__ | 2.725 | 40.520 | 2.148 | 0.00 |
| Calice | CA0012__ | 5.180 | 40.210 | 2.242 | 0.00 |
| Calicino | CN0085__ | 0.808 | 38.840 | 2.746 | 0.00 |
| Ficarello | FI4076_A | 2.460 | 39.050 | 1.926 | 0.00 |

Tabella 4-2 – Parametri scale di deflusso.



In prossimità dei ponti la sezione rilevata è stata suddivisa in 4 sezioni teoriche, di cui una a monte, una filo ponte monte, una filo ponte valle e una a valle in modo da schematizzare il fenomeno di rigurgito connesso con la presenza di un eventuale restringimento della sezione.

I coefficienti delle perdite per espansione e contrazione sono stati assunti in generale pari a 0.1 (contrazione) e 0.2 (espansione), in corrispondenza dei ponti sono stati utilizzati i coefficienti 0.3 (contrazione) e 0.6 (espansione).

I valori dei parametri di scabrezza (espressa come coefficiente di *Gauckler-Strickler*) sono in linea con quelli utilizzati nello studio "Studio idrologico e idraulico di alcuni corsi d'acqua nel territorio comunale di Montemurlo, 2012", e sono riportati in Tabella 4-3.

Le quote degli sfioratori d'alveo sono state ricavate dalle sezioni, la larghezza del fronte di sfioro è stata posta pari alla distanza tra le sezioni.

Partendo dai progetti delle casse di espansione sul fosso Ficarello, sono state inserite le quote di sfioro arginali e le quote di sfioro delle opere di prese delle due casse.

La legge di riempimento quota-volume delle aree di potenziale esondazione è stata elaborata a partire dal modello digitale del Lidar.

Il coefficiente di scabrezza di *Gauckler-Strickler* è stato assunto per le aree non edificate $20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, mentre in prossimità degli edifici $2 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. (Figura 2-2)

Il passo temporale adottato nelle simulazioni degli eventi di piena è di 5 minuti. La durata complessiva degli eventi simulati è stata assunta pari a 15 ore.

| Corso d'acqua [tratto] | K_s [$\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$] | Corso d'acqua [tratto] | K_s [$\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$] |
|---------------------------|--|---------------------------|--|
| Agna | 30 | Funandola_01 | 60 |
| Agnaccino_01 | 45 | Funandola_02 | 45 |
| Agnaccino_02 | 45 | Funandola_03 | 45 |
| Agnaccino_03 | 45 | Funandola_dv | 60 |
| Bagnolo | 30 | Gramigneto | 45 |
| Bure_01 | 30 | Mendacione_01 | 36 |
| Bure_02 | 30 | Mendacione_02 | 36 |
| Bure_03 | 30 | Mendacione_03 | 36 |
| Bure_04 | 30 | Poltronova | 45 |
| Calice | 30 | Selvavecchia | 36 |
| Calicino | 45 | Stregale_01 | 45 |
| Ficarello | 30 | Stregale_02 | 45 |
| Fosso_guardia | 36 | - | - |

Tabella 4-3– Valori del coeff. di *Gauckler-Strickler* attribuiti ai corsi d'acqua analizzati.

5 VERIFICA DELLO STATO ATTUALE

Le verifiche idrauliche dello stato attuale sono state condotte utilizzando la modellistica descritta nei paragrafi precedenti ed applicata ai tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni e per le durate di 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 3.5, 5.5 e 7.5 ore.

Le verifiche idrauliche hanno fornito, per ogni tempo di ritorno e durata considerati, i valori temporali e quelli massimi (iniluppi) di:

- portate e livelli idrometrici per ogni sezione del reticolo idrografico (modello mono-dimensionale);
- volumi e livelli idrometrici nelle aree di potenziale esondazione (modello quasi-bidimensionale);
- battenti di esondazione e velocità di propagazione nel DTM (modello bidimensionale);
- portate transitate attraverso gli elementi di connessione tra l'alveo e le aree e tra le aree stesse.

Lo scopo della verifica è stato quello di valutare i battenti massimi (iniluppo) di piena raggiunti nel territorio comunale di Montemurlo, in occasione di eventi con tempo di ritorno pari a 30, 200 e 500 anni e la conseguente inondabilità delle suddette aree.

Nell'elaborato A01 sono riportati i tabulati delle verifiche idrauliche dei corsi d'acqua studiati per lo stato attuale per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni.

Nell'elaborato A02 sono riportate le sezioni fluviali dei corsi d'acqua studiati con i massimi livelli idrici valutati per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni nelle verifiche idrauliche dello stato attuale.

Nell'elaborato T03 si riportano i profili longitudinali dell'alveo, delle quote arginali e delle altezze idrometriche per i vari tempi di ritorno nello stato attuale.

Negli elaborati T04, T05 e T06, sono riportati i battenti di esondazione e le velocità di propagazione rispettivamente per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni per lo stato attuale.

5.1 Individuazione delle aree inondabili nello stato attuale

Sulla base dei risultati ottenuti dalle verifiche idrauliche condotte per i tempi di ritorno di 30, 200 e 500 anni, sono state perimetrate le aree inondabili.

Nell'elaborato T07 sono riportate le nuove perimetrazioni delle aree inondabili determinate a partire dai battenti di esondazione.

Il tracciamento delle aree inondabili è stato condotto sulla base dei battenti di esondazione e sulla base delle quote altimetriche.

5.2 Aggiornamento della pericolosità idraulica nello stato attuale

Sulla base delle aree inondabili e sui battenti di esondazione sono aggiornate le fasce di pericolosità idraulica nel territorio comunale di Montemurlo ai sensi del D.P.G.R. 53/R del 25 ottobre 2011.

Nell'elaborato T08 è riportata la perimetrazione della pericolosità idraulica ai sensi del D.P.G.R. 53/R del 25 ottobre 2011.

Nell'elaborato T09 è riportata la perimetrazione della pericolosità idraulica ai sensi del P.G.R.A..

Si ricorda che la pericolosità idraulica ai sensi del D.P.G.R. 53/R è stata definita in riferimento alle aree inondabili con tempo di ritorno 30, 200 e 500 con le seguenti modalità:

- I.2 aree inondabili con $200 < TR \leq 500$ anni;
- I.3 aree inondabili con $30 < TR \leq 200$ anni;
- I.4 aree inondabili con $Tr \leq 30$ anni.

Mentre la pericolosità idraulica ai sensi del PGRA, in seguito al recepimento della Direttiva 2007/60/CE, è stata definita in riferimento alle aree inondabili con tempo di ritorno 30, 200 e 500 con le seguenti modalità:

- P.I.1 aree inondabili con $200 < TR \leq 500$ anni;
- P.I.2 aree inondabili con $30 < TR \leq 200$ anni;
- P.I.3 aree inondabili con $TR \leq 30$ anni.

5.3 Perimetrazione della magnitudo idraulica

Nell'elaborato T.10 è rappresentata la magnitudo idraulica definita ai sensi della L.R. 41/2018 come il risultato della combinazione tra i valori dei battenti idrometrici e delle velocità di propagazione delle alluvioni poco frequenti.

Le aree inondate sono suddivise in tre classi di magnitudo:

- *moderata*: in cui i battenti idrici sono inferiori o uguali a 0.5 m e le velocità sono inferiori o uguali a 1.0 m/s. Nel caso in cui la velocità non sia determinata, area inondata in cui i battenti sono uguali o inferiori a 0.3 m;
- *severa*: area con battenti inferiori o uguali a 0.5 m e velocità superiori a 1.0 m/s, oppure area con battenti compresi tra 0.5 m e 1.0 m e velocità inferiori o uguali a 1.0 m/s. Nel caso in cui la velocità non sia determinata, area inondata in cui i battenti sono compresi tra 0.3 m e 0.5 m;
- *molto severa*: dove i battenti sono compresi tra 0.5 m e 1.0 m e velocità superiori a 1.0 m/s, oppure area con battenti superiori a 1.0 m. Nel caso in cui la velocità non sia determinata, area inondata in cui i battenti superiori a 0.5 m;

APPENDICE A

CARATTERISTICHE MODELLO IDRAULICO

| Codice | A_BASSE_ME | Codice | C_BASSA | Codice | C_FICARELLO_M | Codice | C_AGNACCINO | Codice | C_FUNANDOLA | Codice | C_MENDACIONE |
|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Quota | Volume | Quota | Volume | Quota | Volume | Quota | Volume | Quota | Volume | Quota | Volume |
| [m s.l.m.] | [m³] | [m s.l.m.] | [m³] | [m s.l.m.] | [m³] | [m s.l.m.] | [m³] | [m s.l.m.] | [m³] | [m s.l.m.] | [m³] |
| 48.53 | 0 | 42.67 | 0 | 55.83 | 0 | 47.37 | 0 | 49.95 | 0 | 48.61 | 0 |
| 48.81 | 491 | 42.95 | 2 | 56.47 | 266 | 47.92 | 2757 | 50.23 | 69 | 48.92 | 201 |
| 49.10 | 1855 | 43.23 | 25 | 57.11 | 6468 | 48.47 | 13933 | 50.51 | 1436 | 49.23 | 2633 |
| 49.39 | 3275 | 43.51 | 127 | 57.76 | 24624 | 49.02 | 25729 | 50.78 | 6232 | 49.54 | 6936 |
| 49.68 | 4739 | 43.79 | 872 | 58.40 | 52846 | 49.57 | 38014 | 51.06 | 13926 | 49.85 | 11516 |
| 49.97 | 6246 | 44.07 | 4855 | 59.04 | 88978 | 50.12 | 51100 | 51.34 | 22290 | 50.16 | 16211 |
| 50.25 | 7846 | 44.35 | 14173 | 59.68 | 129555 | 50.67 | 64895 | 51.62 | 30833 | 50.47 | 21026 |
| 50.54 | 9484 | 44.63 | 25161 | 60.32 | 173102 | 51.22 | 79243 | 51.89 | 39533 | 50.78 | 25960 |
| 50.83 | 11137 | 44.91 | 36599 | 60.96 | 219656 | 51.77 | 94292 | 52.17 | 48401 | 51.09 | 31011 |
| 51.12 | 12804 | 45.19 | 48197 | 61.61 | 270341 | 52.32 | 110055 | 52.45 | 57499 | 51.40 | 36169 |
| 51.40 | 14484 | 45.46 | 59907 | 62.25 | 324854 | 52.87 | 126375 | 52.73 | 66791 | 51.71 | 41432 |
| 51.69 | 16178 | 45.74 | 71757 | 62.89 | 382567 | 53.42 | 143070 | 53.01 | 76293 | 52.02 | 46802 |
| 51.98 | 17884 | 46.02 | 83776 | 63.53 | 442915 | 53.97 | 160104 | 53.28 | 86083 | 52.33 | 52291 |
| 52.27 | 19602 | 46.30 | 95957 | 64.17 | 505206 | 54.52 | 177433 | 53.56 | 96204 | 52.64 | 57911 |
| 52.56 | 21333 | 46.58 | 108221 | 64.81 | 568756 | 55.06 | 195049 | 53.84 | 106460 | 52.95 | 63629 |
| 52.84 | 23076 | 46.86 | 120533 | 65.46 | 633319 | 55.61 | 212928 | 54.12 | 116861 | 53.26 | 69454 |
| 53.13 | 24832 | 47.14 | 132864 | 66.10 | 698693 | 56.16 | 230996 | 54.39 | 127467 | 53.57 | 75456 |
| 53.42 | 26603 | 47.42 | 145200 | 66.74 | 764531 | 56.71 | 249114 | 54.67 | 138253 | 53.88 | 81735 |
| 53.71 | 28405 | 47.70 | 157539 | 67.38 | 830480 | 57.26 | 267267 | 54.95 | 149052 | 54.19 | 88106 |
| 53.99 | 30238 | 47.98 | 169880 | 68.02 | 896465 | 57.81 | 285438 | 55.23 | 159852 | 54.50 | 94502 |

| Codice | C_SELVAVECCHIA | Codice | C_STREGALE | Codice | F_AGNACCINO | Codice | F_STREGALE | Codice | PARUGIANO_A | Codice | POLA |
|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| Quota [m s.l.m.] | Volume [m³] | Quota [m s.l.m.] | Volume [m³] | Quota [m s.l.m.] | Volume [m³] | Quota [m s.l.m.] | Volume [m³] | Quota [m s.l.m.] | Volume [m³] | Quota [m s.l.m.] | Volume [m³] |
| 49.76 | 0 | 49.88 | 0 | 44.63 | 0 | 49.62 | 0 | 45 | 0 | 48.53 | 0 |
| 50.03 | 63 | 50.31 | 123 | 45.12 | 10 | 49.89 | 15 | 45 | 128 | 48.81 | 6 |
| 50.31 | 485 | 50.75 | 4731 | 45.61 | 56 | 50.17 | 74 | 46 | 501 | 49.10 | 47 |
| 50.59 | 1588 | 51.18 | 12679 | 46.10 | 177 | 50.45 | 154 | 46 | 980 | 49.39 | 142 |
| 50.87 | 3360 | 51.62 | 26258 | 46.58 | 367 | 50.73 | 250 | 46 | 1524 | 49.68 | 304 |
| 51.14 | 5320 | 52.05 | 42002 | 47.07 | 645 | 51.00 | 359 | 47 | 2118 | 49.97 | 564 |
| 51.42 | 7341 | 52.48 | 58691 | 47.56 | 1061 | 51.28 | 481 | 47 | 2763 | 50.26 | 1041 |
| 51.70 | 9413 | 52.92 | 75908 | 48.05 | 1647 | 51.56 | 617 | 47 | 3486 | 50.54 | 1747 |
| 51.98 | 11537 | 53.35 | 93524 | 48.54 | 2369 | 51.84 | 765 | 47 | 4279 | 50.83 | 2566 |
| 52.26 | 13712 | 53.78 | 111524 | 49.03 | 3188 | 52.12 | 927 | 48 | 5254 | 51.12 | 3482 |
| 52.53 | 15939 | 54.22 | 129980 | 49.52 | 4085 | 52.39 | 1103 | 48 | 6329 | 51.41 | 4462 |
| 52.81 | 18220 | 54.65 | 148957 | 50.01 | 5051 | 52.67 | 1297 | 48 | 7463 | 51.70 | 5478 |
| 53.09 | 20556 | 55.09 | 168424 | 50.50 | 6128 | 52.95 | 1529 | 48 | 8646 | 51.99 | 6532 |
| 53.37 | 22950 | 55.52 | 188148 | 50.99 | 7402 | 53.23 | 1795 | 49 | 9843 | 52.28 | 7625 |
| 53.64 | 25415 | 55.95 | 208101 | 51.48 | 8826 | 53.50 | 2092 | 49 | 11047 | 52.56 | 8753 |
| 53.92 | 28015 | 56.39 | 228163 | 51.97 | 10356 | 53.78 | 2426 | 49 | 12253 | 52.85 | 9915 |
| 54.20 | 30742 | 56.82 | 248318 | 52.45 | 11969 | 54.06 | 2789 | 50 | 13459 | 53.14 | 11114 |
| 54.48 | 33569 | 57.25 | 268652 | 52.94 | 13657 | 54.34 | 3153 | 50 | 14665 | 53.14 | 12359 |
| 54.76 | 36463 | 57.69 | 289362 | 53.43 | 15384 | 54.62 | 3516 | 50 | 15872 | 53.72 | 13678 |
| 55.03 | 39359 | 58.12 | 310277 | 53.92 | 17134 | 54.89 | 3879 | 50 | 17078 | 54.01 | 15011 |

Tabella A-5-1 – Leggi di invaso delle aree di potenziale esondazione nello stato attuale.

| Codice | Q_r [m s.l.m.] | a [m ² /mb] | b [m ²] |
|----------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| C_FICARELLO_V | 51.00 | 6642.00 | 1 |
| PARUGIANO | 44.30 | 100.00 | 1 |
| F_PARUGIANO | 41.10 | 970.00 | 1 |
| F_POLTRONOVA | 43.03 | 200.00 | 1 |
| F_CALICINO | 40.00 | 1775.00 | 1 |
| F_GRAMIGNETO | 42.91 | 200.00 | 1 |
| AGNACCINO_SC01 | 43.03 | 200.00 | 1 |
| AGNACCINO_SC02 | 42.91 | 300.00 | 1 |
| AGNACCINO_SC03 | 42.19 | 520.00 | 1 |
| AGNACCINO_SC04 | 41.30 | 250.00 | 1 |
| CALICINO_SC | 40.30 | 5000.00 | 1 |
| MAZZACCHERI_SC | 41.55 | 300.00 | 1 |
| MAZZONE_SC | 41.00 | 1000.00 | 1 |

Tabella A-5-2 – Curve di invaso delle aree di potenziale esondazione nello stato attuale.

| CODICE | CONNESSIONE | L [m] | h [m] | Hsoglia [m s.l.m.] | Apertura [%] | Clapet |
|---------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------------|---------------|
| PO001 | APE_003-APE_005 | 2.50 | 2.00 | 49.37 | 100 | NO |
| PO002 | APE_003-APE_005 | 0.60 | 0.60 | 47.00 | 100 | NO |
| PO004 | C_BASSA-ME5127 | 2.00 | 1.00 | 42.70 | 100 | SI |
| PO005 | APE_012-APE_011 | 4.00 | 3.00 | 45.25 | 100 | NO |
| PO008 | APE_025-APE_023 | 1.00 | 1.00 | 47.11 | 100 | NO |
| PO009 | APE_025-APE_023 | 2.00 | 1.00 | 46.51 | 100 | NO |
| PO010 | APE_025-APE_023 | 0.50 | 0.50 | 47.24 | 100 | NO |
| PO011 | APE_025-APE_026 | 0.50 | 0.50 | 46.69 | 100 | NO |
| PO012 | APE_025-APE_026 | 2.50 | 1.00 | 46.90 | 100 | NO |
| PO013 | APE_025-APE_026 | 0.50 | 0.50 | 48.10 | 100 | NO |
| PO014 | APE_025-APE_026 | 0.50 | 0.50 | 47.75 | 100 | NO |
| PO015 | APE_025-APE_026 | 3.00 | 2.00 | 48.60 | 100 | NO |
| PO017 | APE_002-APE_003 | 3.00 | 3.00 | 2.00 | 100 | NO |
| PO018 | C_MENDACIONE-ME7043 | 0.50 | 0.50 | 50.00 | 100 | SI |
| PO019 | C_MENDACIONE-POLA | 0.50 | 0.50 | 48.50 | 100 | SI |
| PO020 | A_BASSE ME-POLA | 0.50 | 0.50 | 48.60 | 100 | SI |
| PO021 | POLA-A_BASSE ME | 0.50 | 0.50 | 48.62 | 100 | SI |
| PO022 | POLA-C_MENDACIONE | 0.50 | 0.50 | 48.50 | 100 | SI |
| PO023 | PARUGIANO A-ME5095 | 8.00 | 2.65 | 46.00 | 100 | NO |
| PO024 | C_STREGALE-F_STREGALE | 0.50 | 0.50 | 50.25 | 100 | SI |
| PO025 | C_SELVAVECCHIA-F_STREGALE | 0.50 | 0.50 | 50.10 | 100 | SI |
| PO026 | ST5022_-F_STREGALE | 0.80 | 0.80 | 50.00 | 100 | SI |
| PO027 | F_STREGALE-ME7048 | 1.00 | 0.60 | 50.00 | 100 | SI |
| PO028 | BIDI-C_SELVAVECCHIA | 1.00 | 1.00 | 52.87 | 100 | SI |
| PO029 | C_FUNANDOLA-FU3001D | 0.80 | 2.65 | 50.37 | 100 | NO |
| PO030 | C_FUNANDOLA-FU3001D | 0.30 | 0.50 | 50.37 | 100 | NO |
| PO031 | AGNACCINO_SC01-F_POLTRONOVA | 0.93 | 1.20 | 43.05 | 100 | NO |
| PO032 | F_POLTRONOVA-PL1001A | 2.80 | 1.12 | 45.44 | 100 | NO |
| PO033 | AGNACCINO_SC02-F_GRAMIGNETO | 0.93 | 1.20 | 42.95 | 100 | NO |
| PO034 | F_GRAMIGNETO-GR1001B | 1.50 | 1.50 | 43.26 | 100 | NO |
| PO035 | AGNACCINO_SC03- AGNACCINO_SC04 | 0.93 | 1.20 | 42.20 | 100 | NO |
| PO036 | MAZZACCHERI_SC- AGNACCINO_SC04 | 1.45 | 1.40 | 41.55 | 100 | NO |
| PO037 | C_FUNANDOLA-C_STREGALE | 1.20 | 0.80 | 51.85 | 100 | NO |

| CODICE | CONNESSIONE | L [m] | h [m] | Hsoglia [m s.l.m.] | Apertura [%] | Clapet |
|---------------|----------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------------|---------------|
| PO038 | C_FUNANDOLA-C_STREGALE | 1.20 | 0.80 | 51.85 | 100 | NO |
| PO039 | C_FUNANDOLA-C_STREGALE | 1.20 | 0.80 | 51.85 | 100 | NO |
| PO040 | BIDI-BIDI | 6.00 | 5.72 | 68.20 | 100 | NO |
| PO041 | BIDI-BIDI | 1.00 | 0.79 | 66.24 | 100 | NO |
| PO042 | BIDI-BIDI | 1.00 | 0.79 | 65.09 | 100 | NO |
| PO043 | BIDI-BIDI | 2.00 | 1.57 | 65.03 | 100 | NO |
| PO044 | BIDI-BIDI | 1.50 | 1.18 | 61.50 | 100 | NO |
| PO045 | BIDI-BIDI | 7.00 | 3.00 | 59.90 | 100 | NO |
| PO046 | BIDI-BIDI | 3.00 | 3.80 | 60.00 | 100 | NO |
| PO047 | BIDI-BIDI | 1.00 | 0.79 | 59.67 | 100 | NO |
| PO048 | BIDI-BIDI | 7.00 | 3.00 | 59.74 | 100 | NO |
| PO049 | BIDI-BIDI | 2.80 | 3.00 | 56.20 | 100 | NO |
| PO050 | BIDI-BIDI | 2.80 | 3.00 | 56.55 | 100 | NO |
| PO051 | BIDI-BIDI | 2.80 | 3.00 | 55.11 | 100 | NO |
| PO052 | BIDI-BIDI | 1.00 | 0.75 | 54.45 | 100 | NO |
| PO053 | BIDI-BIDI | 1.00 | 1.00 | 58.55 | 100 | NO |
| PO054 | BIDI-BIDI | 2.80 | 3.04 | 59.84 | 100 | NO |
| PO055 | BIDI-BIDI | 1.00 | 1.00 | 60.46 | 100 | NO |
| PO056 | BIDI-APE_008 | 2.80 | 3.00 | 44.59 | 100 | NO |
| PO057 | BIDI-APE_008 | 5.00 | 4.00 | 43.66 | 100 | NO |
| PO058 | BIDI-APE_008 | 2.80 | 3.00 | 43.56 | 100 | NO |
| PO059 | BIDI-APE_007 | 20.00 | 4.00 | 43.81 | 100 | NO |
| PO060 | APE_004-APE_006 | 0.60 | 0.60 | 43.71 | 100 | NO |
| PO061 | APE_004-APE_006 | 2.80 | 3.00 | 43.83 | 100 | NO |
| PO062 | APE_004-APE_006 | 3.00 | 3.80 | 45.72 | 100 | NO |
| PO063 | BIDI-BIDI | 2.80 | 4.00 | 44.83 | 100 | NO |
| PO064 | BIDI-BIDI | 1.00 | 1.00 | 67.74 | 100 | NO |
| PO065 | BIDI-FU5027 | 1.20 | 0.94 | 52.20 | 100 | SI |
| PO066 | AGNACCINO_SC04-MAZZONE_SC | 0.93 | 1.20 | 41.30 | 100 | NO |
| PO067 | MAZZONE_SC-CALICINO_SC | 1.30 | 1.00 | 41.00 | 100 | NO |
| PO073 | F_AGNACCINO-AGNACCINO_SC01 | 1.20 | 1.20 | 44.46 | 100 | NO |
| PO074 | C_AGNACCINO-F_AGNACCINO | 1.20 | 0.80 | 45.75 | 100 | SI |
| PO075 | C_AGNACCINO-F_AGNACCINO | 1.20 | 0.80 | 45.75 | 100 | SI |
| PO076 | ST5036L_-MAZZACCHERI_SC | 0.60 | 0.60 | 46.30 | 100 | NO |
| PO077 | PARUGIANO-PARUGIANO_A | 1.00 | 1.00 | 44.90 | 100 | NO |
| PO078 | PARUGIANO-F_PARUGIANO | 0.50 | 0.50 | 44.40 | 100 | NO |
| PO079 | F_PARUGIANO-MAZZONE_SC | 0.80 | 0.80 | 41.20 | 100 | NO |

| CODICE | CONNESSIONE | L [m] | h [m] | Hsoglia [m s.l.m.] | Apertura [%] | Clapet |
|---------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------------|---------------|
| PO080 | CALICINO_SC-CN0100 | 1.70 | 1.30 | 41.00 | 100 | SI |
| PO081 | CALICINO_SC-F_CALICINO | 1.00 | 1.00 | 40.40 | 100 | NO |
| PO084 | F_GRAMIGNETO-AGNACCINO_SC03 | 0.93 | 1.20 | 42.95 | 100 | NO |
| PO085 | F_POLTRONOVA-AGNACCINO_SC02 | 0.93 | 1.20 | 43.05 | 100 | NO |
| PO086 | APE_003-APE_005 | 3.00 | 2.00 | 47.30 | 100 | NO |
| PO087 | C_FICARELLO_M-FI2027 | 0.60 | 0.60 | 55.20 | 100 | SI |

Tabella A-5-3 – Caratteristiche delle portelle di collegamento stato attuale.

| CODICE | CONNESSIONE | POMPE [#] | A₁ [m³/m²] | A₂ [m³/m] | A₃ [m³] | h_{attacco} [m s.l.m.] | H_{stacco} [m s.l.m.] |
|---------------|-----------------------|----------------------|--|--|--|---|--|
| ID001 | POLA-ME7044A | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 48.00 | 47.60 |
| ID002 | POLA-ME7044A | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 48.40 | 48.00 |
| ID003 | POLA-ME7044A | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 48.40 | 48.20 |
| ID004 | AN3001A -C AGNACCINO | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 46.10 | 45.90 |
| ID005 | AN3001A -C AGNACCINO | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 46.40 | 46.20 |
| ID006 | AN3001A -C AGNACCINO | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 46.70 | 46.50 |
| ID007 | AN3001A -C AGNACCINO | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 47.00 | 46.80 |
| ID008 | AGNACCINO_SC04-ME5121 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 1.20 | 42.00 | 41.40 |
| ID009 | AGNACCINO_SC04-ME5121 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 1.20 | 42.40 | 41.80 |
| ID010 | AGNACCINO_SC04-ME5121 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 1.20 | 42.80 | 42.20 |

Tabella A-5-4 – Caratteristiche delle idrovore stato attuale.