



Ricerca di Sistema elettrico

Sistemi di Early Warning e di Real Time Control per la gestione intelligente dei sistemi di drenaggio urbano

M. Maglionico, M. Altobelli, S.S. Cipolla

SISTEMI DI EARLY WARNING E DI REAL TIME CONTROL PER LA GESTIONE INTELLIGENTE DEI SISTEMI DI DRENAGGIO URBANO

M. Maglionico, M. Altobelli, S.S.Cipolla (Università Di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori energetici"

Progetto: "D.6 - Sviluppo di un modello integrato di Smart District Urbano"

Obiettivo: "Gestione sostenibile e circolare dell'ambiente urbano"

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sistemi di Early Warning e di Real Time Control per la gestione intelligente dei sistemi di drenaggio urbano"

Responsabile scientifico ENEA: Davide Mattioli

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna: Marco Maglionico

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 CARATTERIZZAZIONE DEI SISTEMI DI EARLY WARNING.....	7
2.2 TIPOLOGIE DI SISTEMI DI EARLY WARNING.....	13
2.3 ESEMPIO DI SISTEMA DI EARLY WARNING.....	17
3 SISTEMI DI REAL TIME CONTROL RTC.....	18
3.1 STRUMENTI RTC.....	18
3.2 MODALITÀ DI CONTROLLO.....	24
3.2.1 ESEMPIO DI SISTEMA RTC.....	26
3.2.2 ESEMPIO DI RETE FOGNARIA CON SISTEMA RTC.....	28
4 OTTIMIZZAZIONE DELLA RETE DI DRENAGGIO URBANO ATTRAVERSO SISTEMI DI REAL TIME CONTROL.....	32
4.1 TIPOLOGIE E ALGORITMI DEI SISTEMI RTC.....	32
4.2 REGOLE DI CONTROLLO OTTIMALE IN FUNZIONE DELLO SCHEMA DELLA RETE.....	35
4.3 METODOLOGIE DI REALIZZAZIONE DI SISTEMI RTC.....	36
5 NATURE BASED SOLUTIONS: UNA STRATEGIA INTEGRATA AI SISTEMI DI EW E RTC.....	45
5.1 NBS A SCALA DI EDIFICIO.....	47
5.1.1 I TETTI VERDI.....	47
5.1.2 RECUPERO E RIUSO DELL'ACQUA.....	47
5.2 NBS A SCALA DI QUARTIERE.....	49
5.2.1 AREE AD ALLAGAMENTO CONTROLLATO.....	49
5.2.2 FASCE FILTRO.....	51
5.2.3 BIORETENTION.....	53
5.2.4 PAVIMENTAZIONI E AREE PERMEABILI.....	54
6 MODELLAZIONE DI UNA RETE DI DRENAGGIO: SWMM 5.1 COME STRUMENTO DI CALCOLO OPEN SOURCE.....	56
6.1 SWMM 5.1.....	56
6.2 SCHEMATIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI DI UNA RETE DI DRENAGGIO.....	60
6.3 PROCESSO DI CONTROLLO PID IN SWMM.....	60
6.4 MODELLAZIONE DI UNA RETE REALE A BOLOGNA: AREA FOSSOLO.....	62
6.4.1 CALIBRAZIONE E TARATURA DEL MODELLO.....	64
6.4.2 SCELTA DEGLI OBIETTIVI.....	77
6.4.3 CRITERI ADOTTATI PER IL POSIZIONAMENTO DEGLI ORGANI DI REGOLAZIONE.....	77
6.4.4 CALCOLO DEL PARAMETRO CH.....	78
6.4.5 POSIZIONAMENTO DELLE PARATOIE NELLA RETE (ORIFICE) E REGOLE DI CONTROLLO.....	79
6.4.6 CONDIZIONI AL CONTORNO PER LA MODELLAZIONE DELLA RETE DELL'AREA FOSSOLO.....	82
6.4.7 SCENARI MODELLATI.....	84
7 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE DELLA RETE CON SWMM 5.1.....	86
8 LINEE GUIDA PER L'IMPLEMENTAZIONE DEI SISTEMI REAL TIME CONTROL SU UNA RETE DI DRENAGGIO IN COMBINAZIONE CON SISTEMI DI EARLY WARNING.....	91
9 GESTIONE DELLE ACQUE METEORICHE E DI SCARICO NELLA SMARTWATER PLATFORM.....	95
10 CONCLUSIONI.....	97

11	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	98
12	ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	101

Sommario

I temi sviluppati nel presente documento, come da accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna, riguardano le modalità di gestione della rete di drenaggio urbano al fine di contenere le problematiche di natura idraulica legate a fenomeni di allagamento delle aree urbane e all'inquinamento dei corpi idrici ricettori.

Per gestire queste problematiche di natura idraulica e ambientale sono stati analizzati i sistemi di Early Warning (EW) e di Real Time Control (RTC) puntando all'ottimizzazione gestionale del sistema di drenaggio. Infatti, l'ottimizzazione del sistema di drenaggio passa anche attraverso un miglioramento dei sistemi di previsione degli eventi meteorici che sollecitano la rete (EW) e una migliore gestione dell'evento durante il suo verificarsi (modellazione numerica e RTC). Allo stesso tempo sono state valutate azioni di trasformazione del territorio urbanizzato attraverso tecniche denominate "Nature Based Solutions" (NBS) che migliorano il sistema urbano rendendolo paesaggistico e fruitivo e allo stesso tempo resiliente e tecnologico.

L'analisi svolta, affiancata dalla modellazione di una rete urbana esistente presente nel comune di Bologna, ha permesso la predisposizione di linee guida per una corretta modalità di realizzazione dei sistemi di EW e RTC, definendone le caratteristiche e gli strumenti da utilizzare.

Implementando un modello idraulico relativo ad una rete reale del comune di Bologna, è stato valutato l'impatto della tecnologia RTC sul sistema fognario e sull'ambiente, confrontando differenti scenari. È stato messo a confronto l'uso di tecnologie classiche, come l'inserimento di una vasca di laminazione, rispetto alla soluzione dinamica che prevede il controllo in tempo reale.

A conclusione del lavoro svolto al fine di ottimizzare la gestione della rete fognaria, è stata valutata la richiesta di dati necessari per l'implementazione del dominio "fognature" all'interno della piattaforma SmartWater.

1 Introduzione

Il presente documento di inserisce all'interno del progetto *D.6* "Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano" relativo al tema di ricerca "smart cities and smart communities".

I temi sviluppati, come dall'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna, riguardano i sistemi di Early Warning, di Real Time Control, la gestione e la modellazione delle reti di drenaggio urbano con l'inserimento di queste tecnologie affiancate da azioni di trasformazioni del territorio urbanizzato con tecniche denominate "Nature Based Solutions".

Lo scopo principale dell'attività è definire delle linee guida per il corretto inserimento nel sistema di drenaggio di queste tecnologie al fine di ottimizzare la gestione dell'intero sistema rendendolo resiliente e tecnologico.

Come previsto dall'attività di ricerca in una prima fase si analizzano i sistemi di Early Warning (EW) e di controllo in tempo reale (Real Time Control - RTC) per poi procedere alla modellazione di una rete esistente in ambito territoriale regionale per valutarne criticità e gettare le basi per valutazioni riguardanti differenti modalità di gestione e delle linee guida per l'inserimento di un sistema di EW e RTC ad esso connesso.

A conclusione del processo di analisi dei sistemi di drenaggio urbano di tipo "dinamico", con l'introduzione del monitoraggio EW e di controllo in tempo reale della rete RTC, si ipotizza il flusso dei dati e la loro elaborazione all'interno della piattaforma SmartWater.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 CARATTERIZZAZIONE DEI SISTEMI DI EARLY WARNING

Eventi meteorologici estremi, come piogge intense o persistenti nel tempo, possono causare gravi danni al territorio, quali allagamenti ed esondazioni di corsi d'acqua, e conseguente rischio per le vite umane. La possibilità di prevedere questa tipologia di eventi permette di pianificare e gestire al meglio il sistema di drenaggio urbano al fine di limitare i danni ad essi connessi.

L'Italia, infatti, risulta essere soggetta ad un elevato rischio di allagamento, come mostra la Figura 2.1.

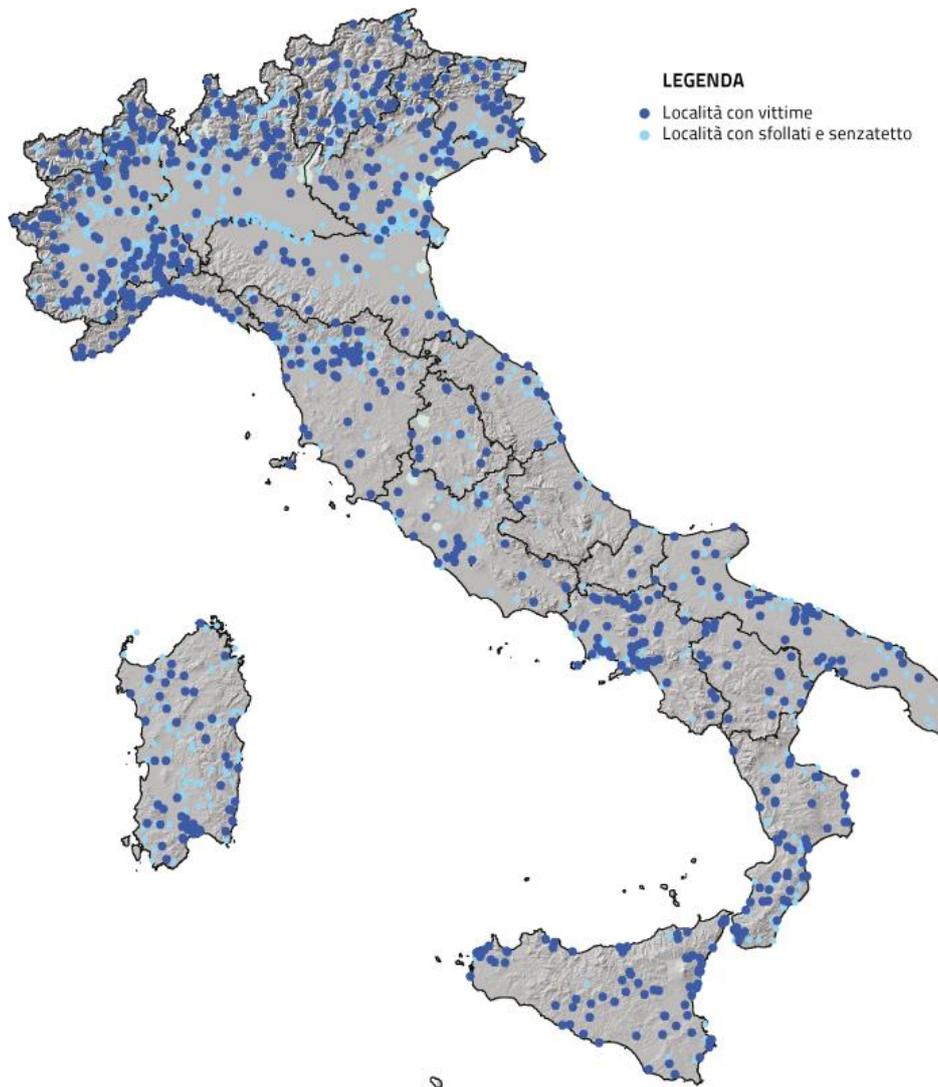


Figura 2.1: Distribuzione geografica delle località con eventi di inondazione con danni alla popolazione nel periodo 590-2008 (CNR-IRPI)

A tale proposito i sistemi di previsione degli eventi meteorici (EW) permettono l'individuazione tempestiva di fenomeni meteorologici ad alto impatto con una specificità spaziale in grado di, attraverso azioni opportune, di mitigare i possibili danni.

Questo sistema di nowcasting risulta essere uno strumento di fondamentale importanza nella gestione e nella prevenzione dei rischi connessi ad eventi meteorici estremi.

I sistemi di EW si basano su due passaggi fondamentali: identificazione e tracciamento dell'evento. Basato sulle osservazioni radar, il sistema individua le celle temporalesche, le classifica e, grazie ai dati elaborati relativi alla velocità radiale, stima la direzione di spostamento.

Le celle temporalesche sono inseguite e caratterizzate da diversi parametri derivati da dati radar e satellitari quali: massimo echo, area, temperatura della nube e "vertical integrated liquid" (VIL) ossia la stima della quantità d'acqua contenuta in una colonna d'aria.

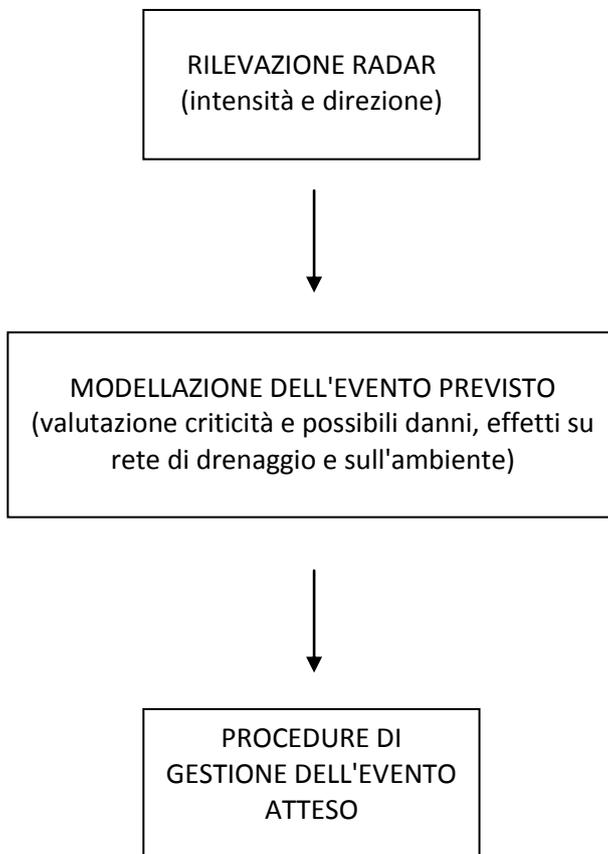


Figura 2.2: Schema semplificato dei principali passaggi legati al sistema di EW

I sistemi di Early Warning sono composti da:

- stazione meteo composta da rete di pluviometri: questi dati possono servire per la calibrazione del campo di riflettività del radar ed ottenere così delle stime affidabili ad alta densità spaziale, inoltre servono ad ampliare il database della pluviometria del sito;
- radar: permette di determinare l'intensità e lo spostamento dell'evento; determina il vettore spostamento degli echi radar e, conoscendo la scansione temporale, il vettore velocità;
- satellite: offre la possibilità di vedere le zone non raggiungibili dal radar;
- piattaforma per la modellazione dell'evento: i dati vengono elaborati arrivando a definire il livello di rischio e le procedure da adottare;
- database: archivio digitale delle precipitazioni e degli eventi significativi relativi al sito di interesse.

Il problema principale da risolvere nella previsione degli eventi meteorici è quello di riuscire a definire la distribuzione spaziale e temporale dell'evento stesso. La disomogeneità delle precipitazioni sul territorio, infatti, complicano la definizione del livello di rischio di allagamento urbano e delle possibili misure preventive attuabili.

L'uso del radar permette la previsione dell'entità dell'evento meteorico ma con il limite dovuto al campo di risoluzione dello strumento. I pluviometri, essendo strumenti più semplici ed economici e quindi dislocabili in più parti del territorio, permettono di definire una distribuzione spaziale delle piogge al fine di creare un database.

La definizione della risoluzione spazio-temporale del sistema radar meteorologico è fondamentale per riuscire a modellare in modo efficiente i sistemi di drenaggio urbano. In letteratura si trovano numerosi riferimenti: Schilling nel 1991 suggerisce l'uso di una risoluzione temporale di pioggia compresa tra 1 e 5 minuti e a livello spaziale indica un intervallo spaziale di 1 km; Fabry et al., 1994, suggerisce una risoluzione più dettagliata, nello specifico fa riferimento ad una scansione temporale di 1-5 minuti per 100-500 m di risoluzione spaziale.

Indicazioni più specifiche per la zone con clima mediterraneo [Berne et al., 2004], prevedono il calcolo della risoluzione temporale di pioggia Δt come:

$$\Delta t = \frac{t_c}{4}$$

dove t_c rappresenta il tempo di corrivazione del bacino.

Definito la *lag time* come il tempo intercorso da quando si ha la metà del volume di pioggia a quando si arriva alla metà del volume defluito, t_1 risulta pari a:

$$t_1 = 3 \cdot S^{0.3}$$

dove:

t_1 : lag time [min]

S: superficie bacino [ha]

Essendo t_1 compreso tra un minimo di pochi minuti ed un massimo di un'ora, la risoluzione temporale di pioggia si traduce in un intervallo compreso tra 1 e 15 minuti. Mettendo in relazione t_1 e Δt si ottiene la scansione temporale in funzione dello spazio:

$$\Delta t = 0.75 \cdot S^{0.3}$$

La relazione tra la risoluzione spaziale e quella temporale si sintetizza con la formula:

$$\Delta r = 1.5 \cdot \sqrt{\Delta t}$$

Questa relazione risulta valida per i casi di studio con clima mediterraneo, pendenze comprese tra 1 e 10% e impermeabilità del suolo variabili dal 10 al 60%.

Nel caso di:

- S < 10 ha $\rightarrow \Delta t = 1 \text{ min}$ $\Delta r = 1.5 \text{ km}$
- S = 1.000 ha $\rightarrow \Delta t = 6 \text{ min}$ $\Delta r = 3.7 \text{ km}$
- S = 10.000 ha $\rightarrow \Delta t = 12 \text{ min}$ $\Delta r = 5.2 \text{ km}$

La risoluzione spazio-temporale della pioggia influenza sensibilmente la previsione di portata, soprattutto nel caso di piccoli bacini [Bruni et al., 2015]; da un'analisi effettuata sul nord-est Europa [Ochoa-Rodriguez et al., 2015] per i bacini analizzati la risoluzione spaziale e temporale risulta pari a:

- S = 2.6 ha $\rightarrow \Delta t = 1 \text{ min}$ $\Delta r = 1.5 \text{ km}$
- S = 100 ha $\rightarrow \Delta t = 3 \text{ min}$ $\Delta r = 2.6 \text{ km}$
- S = 560 ha $\rightarrow \Delta t = 5 \text{ min}$ $\Delta r = 3.3 \text{ km}$
- S = 5600 ha $\rightarrow \Delta t = 10 \text{ min}$ $\Delta r = 4.7 \text{ km}$

Il modello sviluppato per la città di Cranbrook, vicino a Londra (Cristiano et al., 2018) è stato utilizzato per valutare gli effetti dell'aggregazione spaziale e temporale sull'intensità di pioggia. Nello specifico, il bacino in oggetto ha un'estensione di 810 ha ed è monitorato da un radar X-band con risoluzione spaziale da 100 m² e risoluzione temporale di 1 minuto.

L'aggregazione spaziale prevede di raggiungere valori pari a 500, 1000 e 3000 m², quella temporale invece fissa la scansione a 3, 5 e 10 minuti.

In questo studio viene introdotto un nuovo approccio basato sulla percentuale di copertura dell'area investigata al di sopra di una certa soglia, nello specifico viene definita la soglia Z_{75} (75esimo percentile dell'intero dataset). Il cluster principale viene definito, per ogni intervallo di tempo, come l'insieme dei

pixels di pioggia rilevati dal radar che superano la soglia scelta. Sono considerati come appartenenti al cluster principale tutti i pixels che hanno almeno un lato in comune con il cluster principale, mentre quelli con dimensioni minori di 8 ha (~1% della superficie totale del bacino) vengono considerati trascurabili. Il massimo periodo al di sopra della soglia scelta viene denominato $Twz75$, è definito per ogni pixel e successivamente mediato sull'intera area considerata.

Per valutare gli effetti dell'aggregazione spazio-temporale sull'intensità di pioggia viene definito il *Peak attenuation ratio* R_{er} ; esso rappresenta il rapporto tra la differenza tra il picco misurato con risoluzione pari a 100 m e 1 minuto (P_{ref}) e il picco ottenuto con l'aggregazione (P_{st}) rispetto al picco misurato:

$$R_{er} = \frac{P_{ref} - P_{st}}{P_{ref}}$$

Vengono inoltre introdotti tre fattori di scala per analizzare l'impatto delle scale spazio-temporali di bacino e di pioggia sulla sensitività del deflusso simulato:

- $\alpha1$: si focalizza sulla variabile spaziale valutando il rapporto tra scala spaziale di pioggia e di bacino rispetto a quella utilizzata per misurare l'evento (Δs):

$$\alpha1 = \frac{\sqrt{A}}{\Delta s} \cdot \frac{\sqrt{s}}{\Delta s}$$

Con:

s: area cluster principale;

A: area drenata;

Δs : risoluzione spaziale utilizzata per misurare l'evento.

- $\alpha2$: analizza l'influenza tra la variabilità spaziale di pioggia rispetto quella di bacino e la variabilità temporale di bacino rispetto quella di pioggia:

$$\alpha2 = \frac{\sqrt{A}}{\Delta s} \cdot \frac{t_{lag}}{\Delta t}$$

Con:

t_{lag} : lag time

Δt : risoluzione temporale di pioggia

- $\alpha3$: influenza tra grandezze spaziali e temporali di pioggia e di bacino:

$$\alpha3 = \frac{\sqrt{A}}{\Delta s} \cdot \frac{\sqrt{s}}{\Delta s} \cdot \frac{t_{lag}}{\Delta t} \cdot \frac{Twz75}{\Delta t}$$

Con:

$Twz75$: massimo periodo al di sopra della soglia scelta.

Dall'analisi dei dati emerge che variando la risoluzione spaziale da 100 e 3000 m si perde fino all'80% del picco massimo di portata; variando la risoluzione temporale da 1 a 10 minuti la riduzione del picco di portata è pari all'88%. Dai risultati ottenuti è evidente come l'aggregazione sia spaziale che temporale incida pesantemente sulla determinazione del picco di portata.

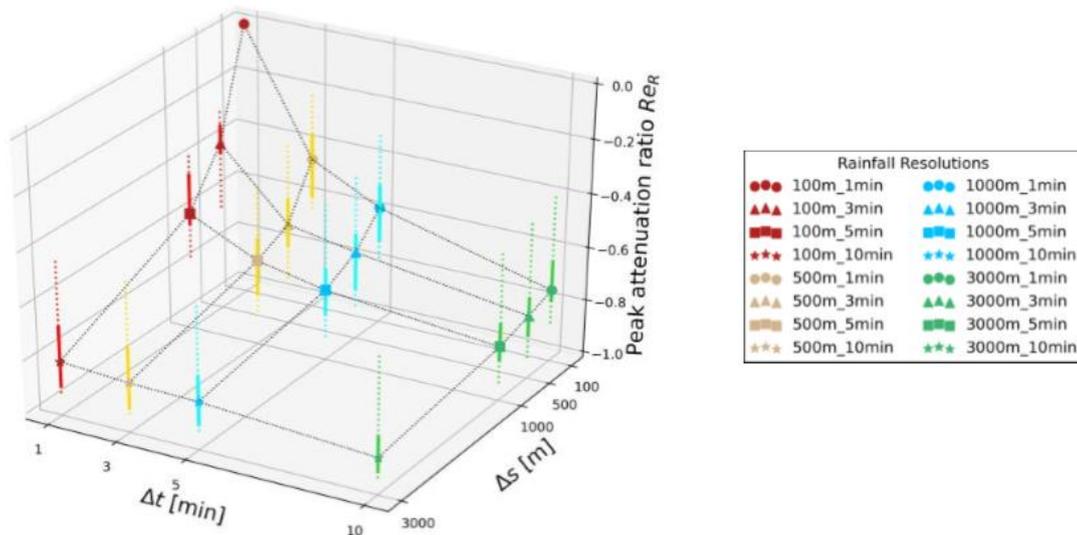


Figura 2.3: Attenuazione del picco di portata espressa in funzione della risoluzione spaziale e temporale per ogni configurazione analizzata [Cristiano et al., 2018]

In generale un radar ha una lunghezza d'onda compresa tra 1 e 10 cm, le lunghezze d'onda più corte sono utili per identificare anche le particelle più piccole, ma sono soggette a maggior attenuazione del segnale.

Esistono tipologie differenti di radar a seconda del tipo di Banda:

- S: lunghezza d'onda pari a 10 cm, sono i più utilizzati ma anche i più costosi date le dimensioni dell'antenna;
- C: lunghezza d'onda di 5 cm, buon compromesso tra prestazioni e problematiche ingegneristiche;
- X: lunghezza d'onda di 3 cm, sono usati per brevi distanze;
- K: lunghezza d'onda pari ad 1 cm, permette di identificare le particelle più piccole come quelle della nebbia.

Per ogni tipo di banda radar si ha una differente risoluzione spazio-temporale, si riportano in Tabella 2.1 i valori tipici per ogni tipo di radar.

	X-band	C-band	S-band
<i>Risoluzione spaziale</i>	100-1000 m	250-2000 m	1000-4000 m
<i>Risoluzione temporale</i>	1-5 min	5-10 min	10-15 min
<i>Range massimo</i>	30-60 km	100-130 km	100-200 km

Tabella 2.1: Risoluzione spazio-temporale per ogni tipo di banda radar (Thorndah et al., 2017)

I dati forniti dal radar si riferiscono al livello di riflettività:

- 0-10 dBZ: pioggia debole;
- 10-30 dBZ: pioggia moderata;
- 30-55 dBZ: pioggia forte;
- >55 dBZ: grandine.

La riflettività Z è funzione dell'intensità, della distanza e della velocità di pioggia.

Il radar invia un impulso elettromagnetico e analizza il segnale retrodiffuso in termini di intensità e di ritardo; queste due informazioni permettono la definizione della quantità d'acqua presente e la distanza dalla nube. Identifica le celle con riflettività maggiore di 35 dBZ e gli assegna un codice identificativo; definite le celle ne calcola intensità, temperatura, area e altezza.

Alla scansione successiva segue la cella con determinato identificativo generando così una successione temporale di punti, definendo il percorso, ossia la direzione, dell'evento e la sua velocità.

La risoluzione temporale del radar dipende dalla strategia di scansione utilizzata; lo strumento deve scansionare l'atmosfera a diverse quote per creare un volume completo e questo può richiedere diversi

minuti in funzione della velocità di rotazione del radar e del numero di livelli da analizzare. Generalmente i radar impiegano 5-15 minuti tra una scansione e quella successiva.

2.2 TIPOLOGIE DI SISTEMI DI EARLY WARNING

L'architettura di base dei sistemi di Early Warning si può suddividere in tre elementi chiave:

- conoscenza e classificazione del rischio: per questo si analizza il background della zona, gli aspetti geografici, fisici e ambientali, i database della pluviometria del sito e degli eventi significativi al fine di valutare le varie componenti per evidenziare le zone maggiormente a rischio e i possibili danni legati ad una determinata intensità di pioggia. Obiettivo: Mappa del Rischio;
- previsione in tempo reale: questo elemento chiave si basa sul monitoraggio e sulla modellazione dei dati così ottenuti. I dati vengono simulati all'interno di un modello idraulico che definisce la risposta della rete di drenaggio all'evento meteorico previsto, definendone il livello di rischio;
- diffusione e comunicazione dello stato di allerta/allarme: diffusione dello stato di allerta e possibilità di anticipare l'evento dannoso attraverso manovre sulla rete di drenaggio al fine di contenere e limitare danni e rischi.

Per la realizzazione di un sistema efficace di Early Warning relativo al rischio di allagamento urbano, il dato fondamentale risulta essere quello legato alla previsione della precipitazione. L'affidabilità di questo dato influenza significativamente tutto il sistema di monitoraggio e di Early Warning [Koriche et al., 2016; Hempel et al., 2010].

Le possibili configurazioni del sistema di Early Warning sono quattro e si distinguono principalmente in funzione delle modalità di elaborazione dei dati previsionali forniti dal radar:

- a) utilizzo di un database di eventi storici;
- b) utilizzo di un database di eventi sintetici elaborati attraverso la modellazione idraulica della rete;
- c) simulazione dell'evento previsto con un modello idraulico semplificato;
- d) simulazione dell'evento previsto per gestire, non solo l'allarme ma anche i data set dell'impianto RTC.

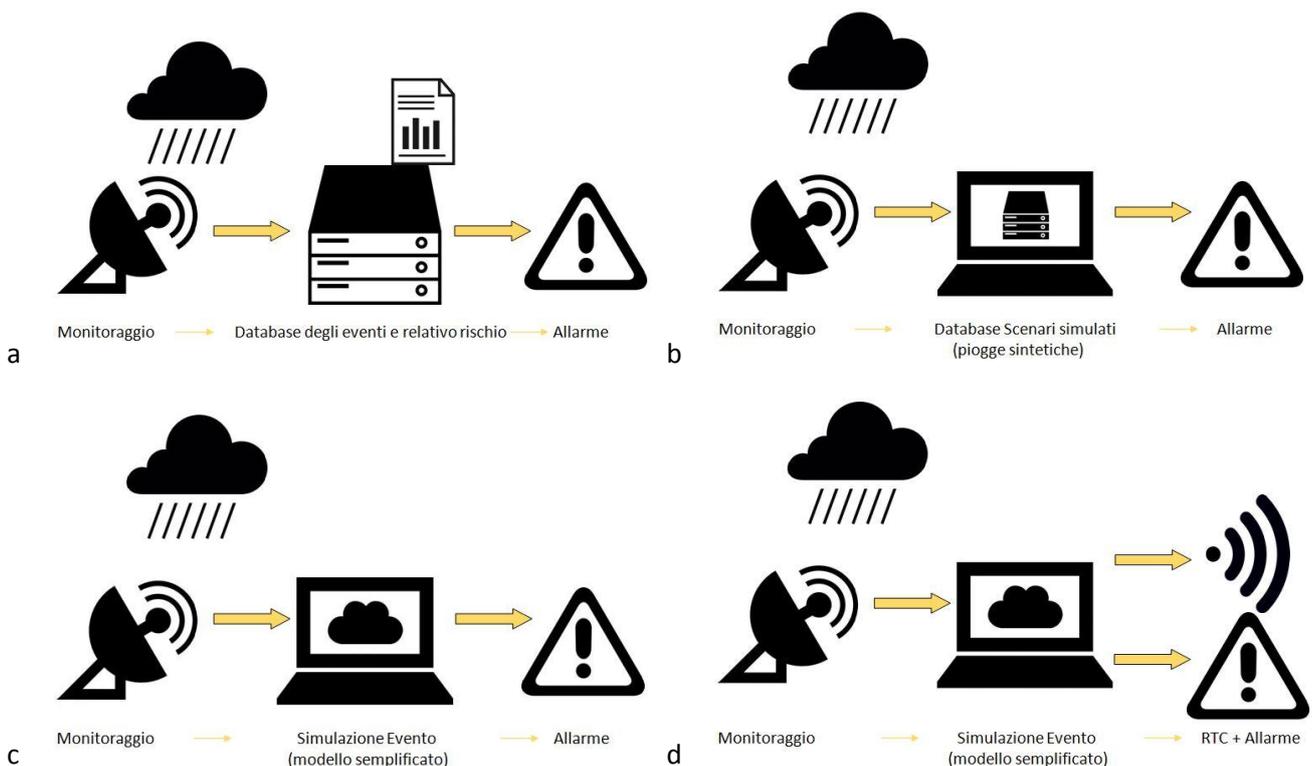


Figura 2.4: Configurazioni di sistemi di Early Warning

La configurazione di tipo "a", basata sull'analisi di un database di eventi storici, è sicuramente molto semplice, ma il problema della valutazione dello scenario è oggettivo e rende il modello approssimativo.

L'utilizzo di un database di eventi sintetici pre-simulati attraverso modellazioni idrauliche (tipo "b") è una valida soluzione anche se dipende molto dall'accuratezza del modello e della calibrazione dei dati di input. Un esempio di città che utilizza questa configurazione è Hvidovre vicino a Copenhagen, il radar acquisisce i dati ogni 5 minuti, il sistema calcola l'ammontare della precipitazione previsionale e la ricerca nel database per valutarne il livello di rischio correlato e nel caso provvede a dare l'allarme [Vezzano et al., 2014]. La vera limitazione di questo approccio può essere l'aggiornamento degli scenari in caso di variazioni della rete di drenaggio.

Le configurazioni "c" e "d" si basano sullo stesso sistema di valutazione del rischio ma operano in modo diverso nella fase successiva in quanto nel caso "d" il sistema non solo provvede a dare l'allarme ma comunica direttamente con il sistema di controllo in tempo reale RTC impostando i data set necessari per contrastare l'evento previsto attraverso gli attuatori. Città come Barcellona (tipologia c) [Cembrano et al., 2014] e Québec City (tipo d) utilizzano le simulazioni degli eventi attraverso la definizione di un modello idraulico semplificato.

Québec City risulta essere un modello di città estremamente virtuoso dal punto di vista della gestione della rete di drenaggio. L'impianto di monitoraggio e di controllo in tempo reale vede 14 serbatoi di accumulo da utilizzare per contenere l'eccesso di acqua in attesa di trattamento, limitando così lo sversamento nel ricettore, 14 punti RTC, 32 stazioni di monitoraggio e 4 stazioni di controllo. Il sistema RTC collegato al sistema di EW e ai sensori agisce autonomamente sugli attuatori decidendo dove convogliare le portate per limitare gli sversamenti [Pleau et al., 2005; Pleau et al., 2010; Schultze et al., 2004; Fradet et al., 2010].

L'utilizzo combinato del sistema di EW e RTC, se entrambi opportunamente calibrati, permette una gestione della rete di drenaggio in grado di limitare i rischi correlati al fenomeno del flooding urbano [Sun et al., 2017; Lowe et al., 2016].

Lo studio delle casistiche di flooding dell'area oggetto di monitoraggio, valutando la relazione "causa-effetto", è importante per ottenere un quadro completo delle zone critiche e dei livelli di rischio in relazione all'intensità di pioggia. Il primo obiettivo sarà quindi quello di realizzare una mappa delle criticità attraverso l'uso di un modello idraulico della rete che analizza i possibili scenari di crisi. Vanno quindi analizzate le singole parti della rete, le variabili di precipitazione quali: intensità e durata e quelle specifiche dell'allagamento ossia: frequenza, durata, entità, livello dell'acqua.

L'Early Warning è un sistema di previsione e allarme che mira alla tutela e alla messa in sicurezza delle persone e cerca di minimizzare i danni causati da fenomeni di flooding e si attua in diverse fasi:

- Fase 1: monitoraggio → sulla base dei dati osservati da pluviometri, radar, satellite e modellazione bisogna ricostruire il campo di precipitazione per ottenere una previsione attendibile;

- Fase 2: elaborazione dei dati e valutazione del rischio → in questa fase possiamo distinguere differenti approcci:

- a) se non si dispone del modello idraulico della rete di drenaggio sarà necessario creare un database di eventi pregressi ricercando le informazioni negli annali pluviometrici, nei rapporti dei Vigili del Fuoco e in quelli della Protezione Civile al fine di ottenere quanti più scenari possibili;
- b) disponendo del modello idraulico della rete si possono creare differenti scenari simulando delle piogge sintetiche per creare un database di eventi ed un grafico di valutazione del rischio. Prendendo come esempio quanto sviluppato per il caso del fiume Toga in Giappone (Seong-Sim Yoon and Eiichi Nakakita, 2015) si può analizzare l'approccio e cercare di ridurlo a dimensione di rete di drenaggio. Questo studio focalizza l'attenzione sui sistemi radar di previsione e l'implementazione di un grafico relativo al rischio di flooding. Questo nomogramma si basa su informazione relative alla precipitazione (intensità media e durata), alla portata e al tirante idrico del fiume, cercando una relazione tra evento di flooding, livello dell'acqua da modelli idrologici e ietogrammi previsionali di precipitazione, per definire i gradi di rischio. Attraverso la modellazione si possono valutare differenti configurazioni per analizzare le portate e il comportamento della rete

di drenaggio. Dalle differenti modellazioni si possono definire i range di rischio e i relativi gradi di allerta.

I dati necessari per realizzare il grafico relativo al rischio di flooding sono:

- intensità di pioggia;
- durata di pioggia;
- range di portata e relativo rischio.

c) questo approccio prevede l'uso di un modello idraulico semplificato che acquisisce i dati previsionali in tempo reale e li utilizza per simulare il comportamento della rete. Per poter valutare i dati in ingresso e i livelli di rischio corrispondenti, si crea un database di eventi storici e sintetici come per il caso b.

- Fase 3: segnalazione stato di allerta → in funzione del livello di rischio vanno previste le procedure necessarie per:

- avvisare la popolazione (SMS, telefonate, e-mail, sirene, ecc.);
- attivare gli organi competenti per contenere i danni, ad esempio chiudendo zone a rischio.

- Fase 4: interventi sulla rete di drenaggio → interventi diretti sulla rete, mediante manovre o attraverso il controllo in tempo reale (RTC), per modificare accumuli e sversamenti. Il sistema RTC comunica direttamente con quello di EW da cui riceve i data set in funzione del grado di rischio per azionare gli attuatori che influenzano il processo del flusso idraulico.

La combinazione del sistema di monitoraggio EW e di quello RTC è un valido strumento per rispondere alle mutevoli esigenze della rete di drenaggio urbana in relazione al crescere delle aree impermeabili e ai cambiamenti delle piogge. Per determinare i data set dell'impianto RTC è necessario realizzare un modello idraulico per prevedere il comportamento della rete in funzione delle variazioni di portata e delle azioni di chiusura/apertura degli attuatori, avendo preventivamente realizzato una mappa delle criticità. I principali obiettivi delle simulazioni sono quelli di minimizzare gli sversamenti, massimizzare la capacità di trattamento dell'impianto di depurazione, minimizzare il volume di accumulo e definire le variazioni dei set-point.

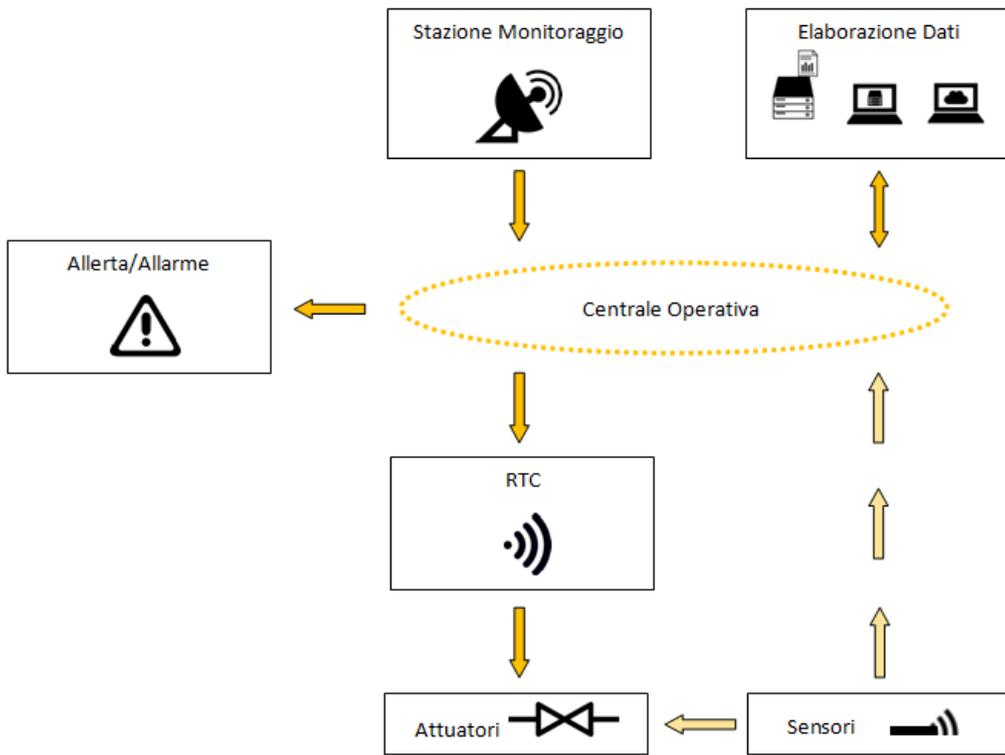


Figura 2.5: Schema interazione tra sistema di EW e RTC

2.3 ESEMPIO DI SISTEMA DI EARLY WARNING

Ci sono esempi di sistemi di Early Warning che permettono di definire anche i casi in cui l'applicazione di tale soluzione tecnologica si rivela inefficace.

Il caso di Nancy evidenzia come il monitoraggio radar e la definizione dell'entità dell'evento meteorico siano limitati dal rapporto che intercorre tra range di azione degli strumenti e le dimensioni dell'area interessata. Nello specifico, il sistema di EW di Nancy sfrutta la sola previsione radar, senza supporti di database di confronto, con scansione spaziale di 1 km² ogni 5 minuti. Nel 1970, per limitare il rischio allagamento della città e gli sversamenti nel fiume Meurthe, venne realizzata una vasca di accumulo in linea con la rete fognaria di 12'000 m³ associata ad un sistema di controllo in tempo reale che chiude una paratoia quando vengono superati i 3 m³/s. Il vero problema risiedeva nel fatto che in questa zona il vento supera i 60 km/h, che coincidono a 5 celle in 5 minuti ovvero 5 volte la dimensione dell'area drenata nella vasca di accumulo. Quando il sistema finisce di elaborare i dati, andando così a definire l'entità dell'evento meteorico, non c'è abbastanza tempo per inviare il segnale agli attuatori (Faure et al., 1999).

Il fatto di non avere una database degli eventi storici rende più complicata la definizione della distribuzione spaziale della pioggia, essendo la precipitazione tendenzialmente disomogenea sul territorio; l'entità dell'evento sarà quindi limitata dal campo di azione del radar.

L'utilizzo di una rete di pluviometri disposti su tutto il territorio, permette di definire una distribuzione spaziale delle piogge fino a realizzare un database di eventi da utilizzare per la modellazione dell'evento previsionale.

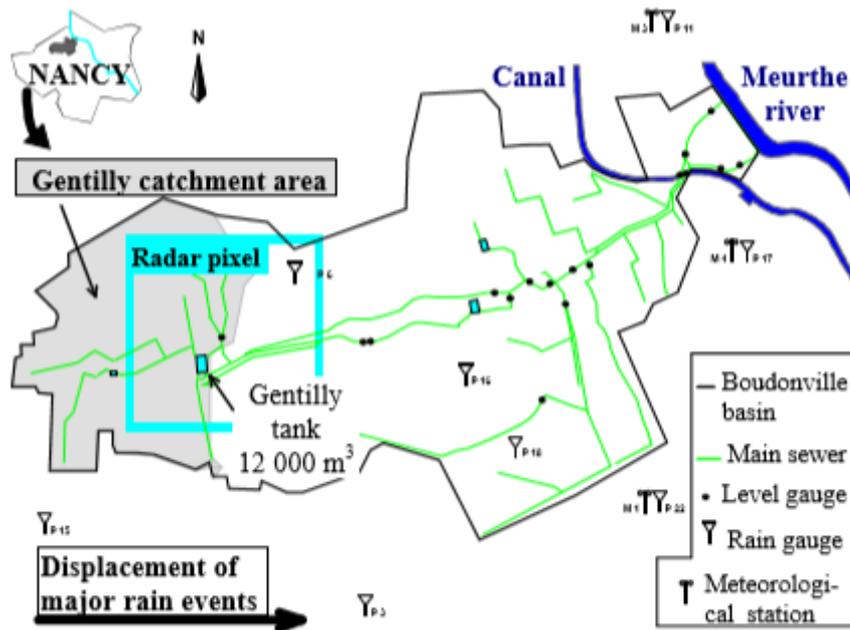


Figura 2.6: Pixel del radar rispetto all'area di Boudonville e Gentilly (Faure et al., 1999).

3 SISTEMI DI REAL TIME CONTROL (RTC)

Quando una rete di drenaggio urbano è sovraccaricata dall'ingresso eccessivo e rapido di acqua meteorica, può avvenire il fenomeno dell'allagamento. La crescente urbanizzazione e i cambiamenti climatici hanno favorito l'aumento di questi fenomeni di allagamento nei centri urbani, portando inoltre ad un maggior livello di inquinamento dei corsi d'acqua ricettori.

Per gestire gli allagamenti in area urbana ed evitare il sovraccarico della rete, si ricorre usualmente alla realizzazione di vasche volano o di laminazione. Un altro approccio, può essere quello di utilizzare la rete in maniera più sofisticata, cioè utilizzare la capacità di immagazzinamento presente nella rete fognaria, accumulando quei volumi d'acqua che altrimenti causerebbero l'esondazione. Per poter applicare questa strategia, le attuali reti devono essere state costruite con criteri di conservazione nel tempo e che quindi risultino avere delle condotte più grandi di quanto sarebbe necessario. Per attuare una strategia del genere è poi necessario monitorare in Real Time la rete e poter operare dinamicamente su di essa per mantenere determinate condizioni ottimali anche durante gli eventi meteorici. Si tratta quindi di prevedere il controllo in tempo reale (RTC) delle reti. Queste tecniche permettono di ottimizzare in maniera dinamica la capacità d'invaso della rete di drenaggio urbano esistente attraverso l'uso di "attuatori".

Ad esempio un sistema RTC può essere composto da un sistema di paratoie intelligenti, che durante eventi intensi si autoregolano per ottimizzare la capacità di invaso effettiva delle condotte fognarie. L'apertura graduale delle paratoie si basa sul bilanciare le capacità di riempimento delle condotte in ogni punto della rete. Gli obiettivi principali per i quali storicamente tali sistemi RTC sono stati realizzati comprendono:

- la riduzione dei fenomeni di allagamento nelle aree urbane;
- la minimizzazione dei volumi di sfioro nei corpi idrici ricettori;
- la minimizzazione del consumo di energia negli impianti di sollevamenti.

Alcune delle strategie maggiormente utilizzate (Lima, Brema, Eindovhen) sono di tipo euristico e consistono nel cercare di distribuire in modo uniforme i volumi di piena nelle capacità di invaso all'interno del sistema ottenendo il riempimento sincrono del sistema di drenaggio.

Altre strategie adoperate (San Francisco, Detroit, Chicago, Stoccolma) consistono nell'avviare all'impianto di depurazione la massima portata compatibile con esso e nell'invasare volumi idrici finché siano disponibili capacità inutilizzate producendo sfioro di acque nei corpi idrici solo quando tutta la capacità di invaso disponibile è esaurita.

Il sistema di EA può operare in modo centralizzato o diffuso (controlli locali). Nel primo caso si deve operare su grandi quantità di dati e usualmente si devono eseguire complesse modellazioni matematiche. Pur ammettendo di avere a disposizione il modello, un controllo del genere comporterebbe tempi di elaborazione e risposta spesso troppo lunghi rispetto alla velocità di evoluzione del fenomeno fisico.

In questi casi si potrebbe utilizzare un sistema completamente distribuito. Diversi punti di controllo sono diffusi nella rete fognaria e opportunamente collegati ai sensori e alle paratoie. Ogni punto di calcolo (nodo) può comunicare solo con i nodi fisicamente vicini, tramite collegamento wired o wireless. Il comportamento è simulato attraverso algoritmi di *swarm intelligence*. Tali algoritmi prevedono che si definisca il comportamento di semplici entità che, interagendo tra loro, producono una cosiddetta proprietà emergente (Campisano A., Sanfilippo U., 2011). Il software SWMM, se modificato con un software esterno che realizza l'algoritmo di *swarm intelligence*, permette una interazione in Real-Time di questo tipo. Una soluzione più semplice è quella di intervenire localmente sugli organi regolatori, come nel presente caso di studio e i risultati dimostrano che l'uso di paratoie intelligenti fornisce effetti positivi sul funzionamento idraulico complessivo della rete riducendo sensibilmente il fenomeno dell'allagamento e di inquinamento dei corsi d'acqua ricettori.

3.1 STRUMENTI RTC

In un qualunque sistema controllato in tempo reale, a prescindere dal tipo di strategia di controllo adottata, è sempre presente uno o più gruppi delle seguenti apparecchiature hardware:

- un sensore (ad esempio un misuratore di livello o di portata, ecc.) che rilevi la grandezza variabile dalla cui misura dipende la regolazione;
- un regolatore o attuatore (ad esempio una pompa, una paratoia mobile, ecc.) che sia in grado di modificare il processo idraulico che si vuole regolare;
- un'unità di controllo (controller) che manovri il regolatore in modo da ridurre la variabile di processo al valore desiderato (set-point); tale valore viene fissato a priori, nel caso di set-point costante, oppure varia durante l'evento a seconda delle informazioni che riceve dalle misure locali dei sensori;
- due trasduttori, uno che fornisce i dati misurati dal sensore all'unità di controllo, e uno che fornisce i comandi dall'unità di controllo stessa al regolatore.

Il gruppo operativo formato dall'insieme delle apparecchiature sopra elencate è indicato con il termine "gruppo di controllo elementare" e funziona secondo un "ciclo di controllo elementare". Nel caso in cui è prevista un'unica centrale decisionale operativa per tutto il sistema, per ciascun gruppo di controllo elementare occorre un ulteriore trasduttore che consenta lo scambio di informazioni con la centrale operativa.

Nel seguito si riportano alcune indicazioni più approfondite sui vari elementi sopra descritti.

SENSORI

Sebbene esista una grande varietà di sensori sul mercato, solo alcuni di essi soddisfano i requisiti necessari per una loro installazione in reti di fognatura. In aggiunta, le applicazioni di RTC nei sistemi fognari, hanno mostrato che tali sensori debbano possedere ulteriori caratteristiche in relazione allo specifico obiettivo per cui vengono utilizzati. Risultano caratteristiche particolarmente importanti la resistenza del dispositivo all'aggressione chimico-fisica nel lungo periodo, l'economicità e la facilità di installazione e la manutenzione. Da tutto ciò deriva che, nella fase di progettazione del sistema RTC occorre prevedere adeguati manufatti per il posizionamento e la protezione dei dispositivi di misura; tali manufatti devono risultare di facile accesso al personale specializzato al fine di eseguire le normali operazioni di controllo dello stato di funzionamento e di manutenzione dei sensori.

Gli elementi controllabili si riferiscono a:

- misure di precipitazione: sono necessarie in quanto consentono di aumentare il livello di affidabilità dell'intero sistema di acquisizione. I moderni sistemi di RTC combinano l'informazione dei misuratori di precipitazione tradizionali a terra con i dati provenienti da stazioni radar, permettendo l'implementazione di sistemi di prevenzione complessi denominati Early Warning System;
- misure di livello: il monitoraggio di tale grandezza nei sistemi fognari consente una immediata comprensione dell'evoluzione dei processi idraulici in corso e rapide valutazioni di tipo quantitativo. Al giorno d'oggi vengono adoperate diverse tipologie di sonde di livello in funzione del processo monitorato quali:
 - sensori a galleggiante (float switches), spesso in uso per il controllo dei livelli nelle stazioni di sollevamento. Un solo sensore può comandare l'avvio e l'arresto di ogni pompa. Tuttavia l'esperienza ha mostrato che i sensori a galleggiante possono determinare rischi di malfunzionamento degli impianti, specialmente in presenza di solidi grossolani;
 - sensori a livello a variazione di assetto, naturale evoluzione tecnica dei sensori a galleggiante per stazioni di pompaggio di acque fognarie, scarichi industriali e acque di drenaggio. Il principio di funzionamento è basato su un deviatore incorporato in un involucro in polipropilene che pende libero, appeso a un cavo elettrico; quando il liquido sale o scende fino al sensore, questo cambia assetto

chiudendo o aprendo il contatto del derivatore il quale aziona un segnale che accende o spegne una pompa;

- misure di portata: la misura della portata può essere indirettamente ottenuta per mezzo di misure contemporanee di livello e di velocità della corrente. In funzione dell'obiettivo specifico dell'applicazione di RTC e conseguentemente dall'accuratezza richiesta nella misura, per la valutazione della portata si possono utilizzare differenti tecniche di misura. Nel caso in cui sia necessaria una certa accuratezza (ad esempio nel caso in cui la portata risulti essere la variabile di controllo della strategia di RTC adottata), occorre effettuare la misura diretta sulla velocità della corrente. Occorre pertanto utilizzare strumenti di misura come ad esempio i misuratori elettromagnetici o a ultrasuoni che consentono la valutazione della portata integrando le misure di livello idrico e della velocità della corrente. I misuratori elettromagnetici vengono usualmente adottati per correnti in pressione, mentre i dispositivi a ultrasuoni (misuratori Doppler e a tempo di transito) sono maggiormente raccomandati per correnti a superficie libera, basandosi sulla valutazione dell'intero profilo verticale di velocità all'interno del collettore;
- monitoraggio dei solidi: la deposizione di materiali solidi durante periodi di tempo asciutto e la loro risospensione durante eventi di pioggia è da considerarsi come una delle principali cause dell'inquinamento dei corpi idrici ricettori. Oltre ai problemi ambientali, l'accumulo di sedimenti sul fondo dei canali e la presenza di materiali galleggianti nella corrente possono determinare ostruzioni in rete, limitando le sezioni idrauliche dei collettori ed incrementando quindi i rischi di funzionamento in pressione durante gli eventi di precipitazione. Il controllo dei solidi sospesi rappresenta una delle priorità delle applicazioni di sistemi di RTC nelle fognature, tanto da essere stato inserito tra i nove controlli minimi individuati dall'US-EPA per il buon funzionamento delle reti fognarie. Il controllo dei solidi può essere condotto mediante un adeguato monitoraggio dei depositi e dei processi di trasporto ed erosione all'interno di canali e manufatti. Le tecniche per ottenere tali informazioni sono attualmente basate sull'utilizzo di sistemi ottici per l'acquisizione diretta e la successiva elaborazione di immagini all'interno della rete;
- sensori per la qualità delle acque: tali strumenti forniscono la misura di diverse variabili quali parametri organici (COD e TOC) e biomassa (livello di torbidità dell'attività respirometrica). Allo stesso modo, sono oramai largamente utilizzate varie tecniche basate sull'uso di bio-sensori [16] o su misure potenziometriche per il monitoraggio in linea di azoto, nitrati o altri nutrienti. Le grandezze descritte vengono usualmente prese in considerazione nella simulazione di strategie di RTC per obiettivi legati al mantenimento della qualità delle acque. Recentemente sono state sviluppate nuove tecnologie basate su tecniche di spettrometria nel campo del visibile/ultravioletto per la misura in continuo di diverse variabili di qualità delle acque (COD, BOD5, TOC, solidi sospesi, azoto, nitrati, fosforo, metalli pesanti). Malgrado tali sensori siano molto accurati nella misura (errori inferiori all'1%), non vengono ancora largamente utilizzati per applicazioni di RTC, in quanto estremamente costosi in confronto alla loro vita media negli ambienti fognari (circa un anno).

REGOLATORI

I regolatori sono gli elementi mobili dei sistemi di RTC e hanno la funzione di modificare i processi in atto. I regolatori, così come i sensori, possono essere classificati in base allo specifico obiettivo di controllo per cui essi sono impiegati. In particolare, la maggior parte dei regolatori adottati nei sistemi RTC vengono utilizzati per modificare processi idraulici (determinare variazioni di variabili quantitative quali il livello idrico o la portata) per il raggiungimento di obiettivi classici (limitare gli allagamenti, ridurre gli sversamenti nei ricettori, migliorare le condizioni di drenaggio nella rete, migliorare le condizioni di depurazione all'impianto di trattamento). I più comuni regolatori di portata (o di livello) utilizzati nelle reti fognarie sono:

- impianti di sollevamento: vengono utilizzate le pompe per il sollevamento delle acque reflue dalle zone più depresse della rete. Sono anche adoperate dove si richiedono maggiori velocità della corrente oppure in corrispondenza di invasi per facilitare le operazioni di svuotamento dei volumi accumulati;
- paratoie mobili (scorrevoli, a settore, a valvola, ecc.): possono essere utilizzate per aumentare o ridurre in tempo reale la soglia di sfioro di scaricatori laterali con l'obiettivo di controllare i volumi sfioranti, oppure possono essere posizionati all'interno di derivatori adoperati per separare le portate in arrivo in più parti. Le smart gates (paratoie intelligenti) sono costituite da un piatto mobile che ruota intorno ad un perno orizzontale. La paratoia risulta completamente chiusa quando il piatto mobile viene ruotato in una posizione perpendicolare alla direzione del flusso dell'acqua. Viceversa la paratoia è completamente aperta quando il piatto mobile è esattamente parallelo al flusso. Il grado di apertura del piatto è quindi proporzionale al flusso d'acqua. Per cui considerando che il piatto viene mosso in modo elettromeccanico, siamo in grado di modificare dinamicamente il flusso d'acqua nei punti della rete dove sono state inserite le paratoie;
- soglie (stramazzi laterali, trasversali, ecc.): vengono di norma progettate ad hoc per il sito per il quale esse devono essere posizionate e in funzione dello specifico obiettivo per cui sono utilizzate;
- sbarramenti gonfiabili (in gomma o in tessuto): hanno un comportamento idraulico simile alle soglie mobili e vengono di norma utilizzate nei sistemi di fognatura unitaria per massimizzare le capacità di invaso in linea;
- valvole (a spina, a farfalla, a vortice, ecc.): utilizzate principalmente per strozzare le correnti defluenti; sono normalmente montate su tubazioni circolari di modeste dimensioni ed utilizzate per ottenere controlli accurati delle portate immesse attraverso le condotte secondarie nei grandi collettori; vengono anche utilizzate negli impianti di depurazione per il controllo dei dispositivi dosatori per l'immissione di enzimi e sostanze chimiche nelle acque reflue;
- derivatori: vengono utilizzati di norma quando specifiche condizioni di deflusso richiedono la suddivisione della portata in più parti. Tali dispositivi funzionano normalmente in accoppiamento ad altri regolatori mobili quali paratoie e soglie.

UNITÀ DI CONTROLLO

Un'unità di controllo (controller) consiste in un servomeccanismo, meccanico, elettrico, o più spesso elettromeccanico, in grado di comandare il regolatore in modo da ricondurre la variabile da controllare (portata, livello, ecc.) al valore di set-point. Le unità di controllo possono essere di tipo "continuo" (nel caso ad esempio di paratoie o soglie mobili) oppure "discreto" (tipicamente nel caso di pompe). In generale le unità di controllo di tipo esclusivamente meccanico o pneumatico non consentono un'agevole modifica dei set-point; perciò, grazie anche all'eccezionale sviluppo avutosi in questi anni nel settore della microelettronica, ad esse si vanno via via sostituendo unità basate su microprocessori (PLC) le quali sono facilmente programmabili anche per via remota. I PLC in particolare possono essere programmati implementando logiche di controllo differenti in funzione del tipo di regolatore e del tipo di processo da regolare. L'ultima versione prevede l'inserimento di un data logger per la memorizzazione dei dati,

permettendo l'elaborazione in sito. Si tratta di elaboratori elettronici in grado di alleggerire l'onere di calcolo della centrale operativa principale.

I sistemi in continuo si distinguono in funzione del tipo di risposta che sono in grado di fornire rispetto ad uno scostamento (errore di regolazione) della grandezza da controllare rispetto al valore di soglia fissato. La logica più utilizzata nella programmazione è denominata PID, la quale prevede che la risposta del regolatore possa essere di tipo proporzionale (P), integrale (I), derivata (D) o la combinazione di due o più di questi comportamenti.

SISTEMI PER LA TRASMISSIONE DELLE INFORMAZIONI

Nei sistemi di controllo centralizzato, lo scambio di notevoli quantità di informazioni fra la centrale operativa e le unità di controllo locale richiede l'implementazione di reti di trasmissione. Nello specifico i sistemi esistenti si basano su:

- sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition): consentono l'acquisizione dei dati di processo dalle unità di controllo locali e degli strumenti di campo per trasmettere tali informazioni alla centrale operativa dove personale specializzato e addestrato ne effettua la supervisione e procede ad assumere le decisioni operative riguardanti le definizioni dei comandi di controllo. I moderni sistemi SCADA includono pertanto unità RTU distribuite a servizio dei regolatori, programmate con algoritmi di controllo spesso sofisticati che consentono già il controllo automatico del singolo regolatore. Il personale di supervisione alla centrale operativa effettua costantemente il monitoraggio dell'andamento delle variabili di processo e del funzionamento automatico di ciascun RTU potendo, in qualsiasi momento, assumere il controllo manuale remoto della singola unità. Poiché quindi nei moderni sistemi di RTC l'obiettivo principale dei sistemi SCADA è quello di comunicare dati e comandi di controllo da una stazione centrale operativa a unità remote geograficamente distribuite, risulta necessaria l'implementazione di una o più reti di comunicazione;
- protocolli di comunicazione: uno dei fattori che può influenzare in maniera significativa la scelta del tipo di sistema di trasmissione è la metodologia impiegata dai sistemi SCADA per lo scambio delle informazioni tra la stazione centrale (master station) e le RTU. La metodologia più comune è nota come protocollo master-slave secondo cui la stazione centrale interroga ciascuna RTU in base a un predeterminato schema di interrogazione; nella sua implementazione più semplice, ciascuna RTU risponde fornendo il valore corrente di ciascuna variabile di processo monitorata localmente e la stazione centrale ritrasmette alle RTU il valore di stato (set-point) per il comando dei regolatori. Uno schema leggermente più complesso prevede un protocollo di tipo report-by-exception, secondo il quale ciascuna RTU risponde all'interrogazione da parte della stazione centrale fornendo soltanto le informazioni relative alle variabili di processo che, nell'intervallo di tempo trascorso, hanno avuto un cambiamento di stato. Analogamente la stazione centrale risponderà alle RTU solo con riferimento alle stesse variabili che hanno subito cambiamenti di stato nell'ultimo intervallo di tempo. Tale protocollo, sebbene di più difficile implementazione, riduce sensibilmente il numero di informazioni da trasferire e il numero di trasmissioni da effettuare tra la stazione centrale e le varie RTU locali. Per ridurre ancora il numero di dati da trasferire può inoltre utilizzarsi il protocollo RTU cry-out; secondo tale schema è l'RTU stessa a dare inizio alla comunicazione con la stazione centrale, nel momento in cui la variabile monitorata subisce un cambiamento di stato superiore ad un certo valore. Tale metodo tuttavia richiede l'utilizzo di uno specifico software in grado di decidere la successione temporale delle comunicazioni tra le RTU e la stazione centrale quando più RTU debbono comunicare allo stesso tempo. Si va sempre più diffondendo il protocollo peer to peer in base al quale alcune RTU possono comunicare direttamente con altre RTU.

PRINCIPALI DISPOSITIVI UTILIZZATI

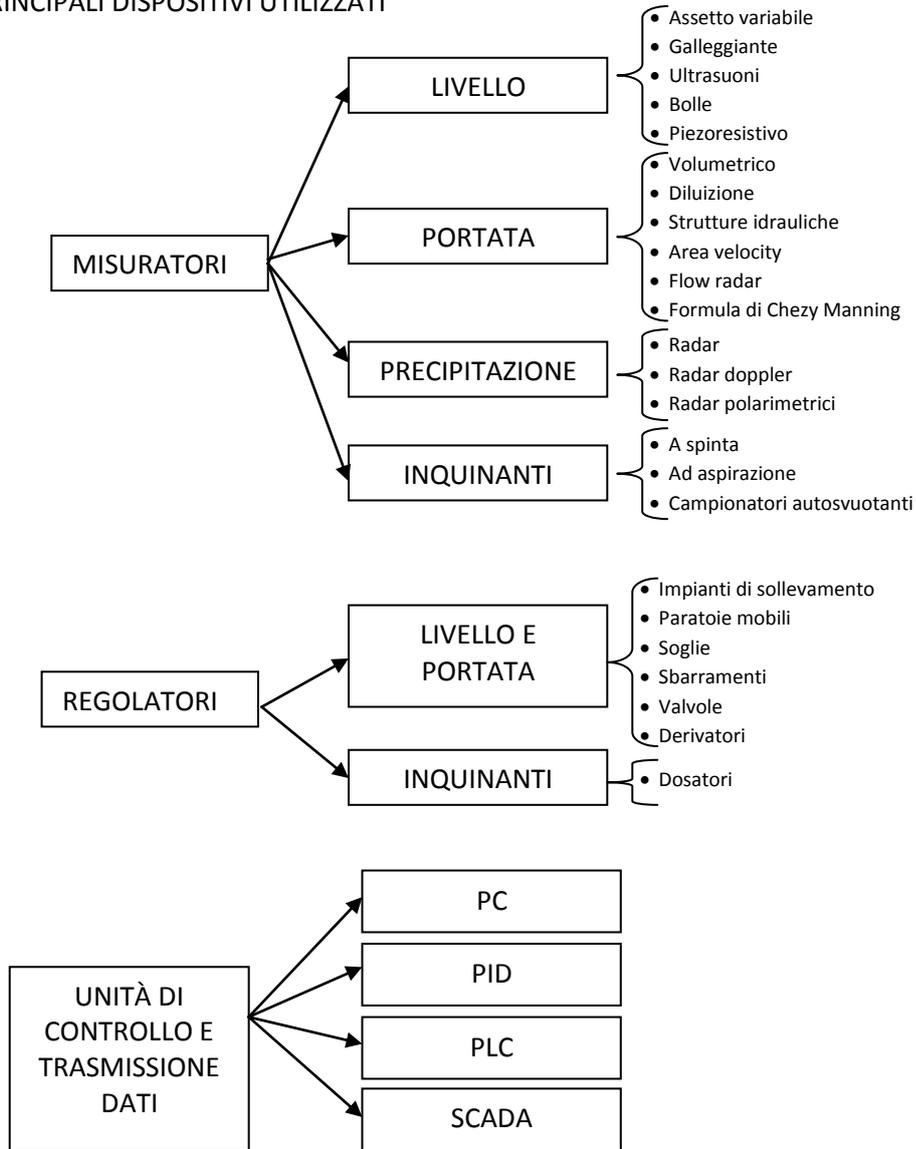


Figura 3.1: Schema riassuntivo dei principali dispositivi utilizzati nelle reti di drenaggio con sistemi RTC

3.2 MODALITÀ DI CONTROLLO

Per gestire il sistema RTC bisogna definire le strategie di controllo, ossia le procedure decisionali che concorrono a determinare i movimenti dei vari regolatori per il raggiungimento degli obiettivi prefissati. A livello operativo corrispondono quindi alla sequenza temporale dei valori di set-point imposti ai regolatori nel sistema RTC.

La strategia di controllo deve tenere conto di differenti fattori quali:

- la distribuzione temporale e spaziale degli afflussi;
- la capacità di convogliamento e d'invaso effettiva della rete;
- la fenomenologia idrologica e idraulica che presiede alla trasformazione afflussi-deflussi e al moto dell'acqua;
- la possibile presenza di sedimenti nei collettori.

L'elaborazione delle strategie di controllo ottimali, dunque, non è un problema di semplice e immediata soluzione, a causa sia della non linearità delle leggi che governano i fenomeni suddetti, sia delle difficoltà di misura tanto degli afflussi quanto dei deflussi, sia delle incertezze e aleatorietà riguardanti il comportamento idrologico del bacino, sia della necessità di tenere conto di eventuali malfunzionamenti della componente idraulica del sistema di drenaggio (occlusione dei collettori o di bocche d'uscita da invasi, guasti di pompe o di apparecchi di misura, ecc.).

Esistono differenti metodologie per la definizione delle strategie di controllo, nello specifico:

- ottimizzazione della funzione obiettivo: il problema viene rappresentato matematicamente. Si tratta di ricondurre il problema alla minimizzazione di tale funzione per date condizioni iniziali e al contorno. La tecnica più usata è la programmazione lineare nella quale vengono linearizzate tutte le variabili, sia di stato che di controllo. Per poter utilizzare questa tecnica occorre semplificare le equazioni di De Saint-Venant considerando le velocità e la portata uscente costante, eliminando l'effetto di rigurgito.
- Ricerca operativa: si introducono, a partire da una strategia di controllo di primo tentativo, delle variazioni casuali verificandole a posteriori per evidenziare un possibile miglioramento. Questa tecnica permette una maggiore flessibilità nell'impostazione delle variabili poiché non sono più necessarie le semplificazioni connesse alla necessità di linearizzare le variabili medesime. Questo metodo richiede un notevole onere computazionale che di fatto ne condiziona la completa applicabilità online per la gestione del controllo in tempo reale.
- Matrici di decisione e regole: richiedono un cospicuo lavoro offline, ma consentono un più semplice e veloce uso in fase operativa. Per ogni possibile combinazione degli afflussi e delle variabili di stato, le combinazioni vengono elaborate offline e poi sintetizzate in una matrice, in fase operativa, essendo noti i valori degli afflussi e delle variabili i risultati sono facilmente ricavabili. Si applicano regole del tipo "if...then...else..." direttamente a intervalli di valori degli afflussi e delle variabili.
- Metodi euristici: ci si affida all'esperienza e alla sensibilità di uno o più operatori qualificati. D'altra parte, però, in questo modo sul singolo operatore viene a gravare il peso di una notevole responsabilità personale. Inoltre, quando l'operatore lascia il suo lavoro, buona parte dell'esperienza e della sensibilità da lui acquisite tendono a perdersi e occorrono molto tempo e non pochi errori prima che il nuovo personale acquisisca la medesima padronanza del sistema di controllo;
- Sistemi esperti: si basa sull'intelligenza artificiale di cosiddetti "sistemi esperti", in grado di emulare le capacità di apprendimento di un operatore "umano", ma in funzione senza soluzione di continuità. Un sistema esperto si articola essenzialmente in tre livelli:
 - rilevazione e memorizzazione dello stato del sistema;
 - sintesi conoscitiva delle informazioni rilevate;

- interpretazione delle informazioni rilevate e applicazione, a partire da esse, delle regole di controllo che sono giudicate più opportune in base alle esperienze accumulate nel passato in situazioni analoghe e/o a simulazioni precedentemente eseguite offline.

Di contro, pur possedendo una buona flessibilità nell'affrontare le varie situazioni che si possono presentare nel sistema di drenaggio che si trova sotto controllo, ciascun sistema esperto viene per sua natura plasmato sulle caratteristiche del "suo" bacino, e molto più difficilmente che nel caso di un operatore umano può essere quindi implementato su un bacino differente; analogamente, pure sostanziali modifiche del bacino o del sistema di drenaggio che esso controlla, possono invalidare le "esperienze" operative precedentemente accumulate.

3.2.1 ESEMPIO DI SISTEMA RTC

Si ipotizzi di inserire una paratoia mobile con controllo in tempo reale a monte di uno scaricatore. Tale paratoia avrà la funzione di attivare la capacità di invaso della condotta.

La variabile da controllare sarà quindi il livello a monte di ogni singola paratoia:

→ set-point= $Y_{setpoint}=80\%$ dell'altezza massima del canale.

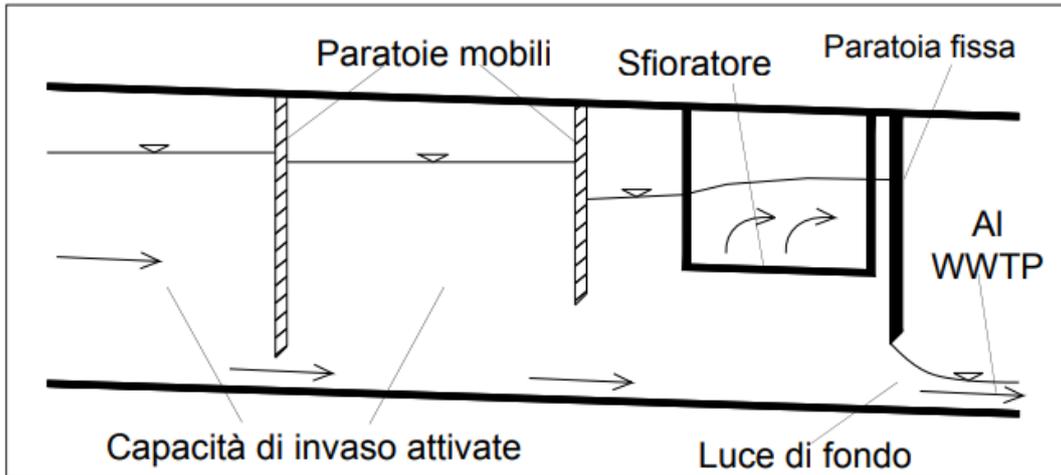


Figura 3.2: Schematizzazione di una paratoia a monte di uno scaricatore di piena

Sulla base delle misure registrate a monte della paratoia, l'unità di controllo calcola l'errore di regolazione, cioè la deviazione dal set-point:

$$\Delta a(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Con:

$$e(t) = \text{errore} = Y_m - Y_{setpoint}$$

K_p = proporzionale

K_i = integrale

K_d = derivativo

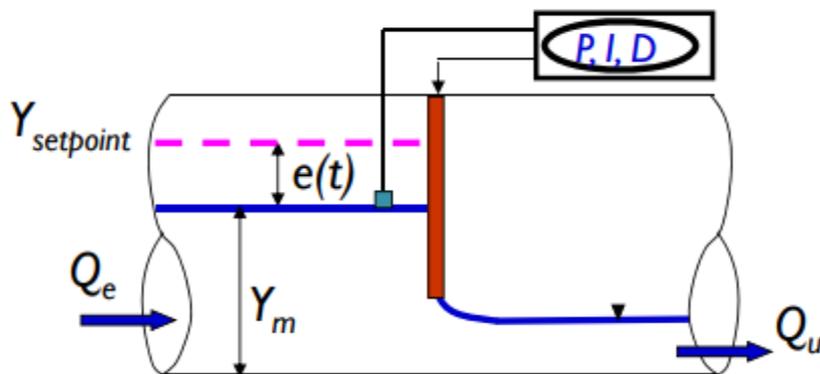


Figura 3.3: Schematizzazione della paratoia e delle principali variabili in gioco

I tre termini (K_p , K_i , K_d) che contengono l'errore di regolazione $e(t)$ rappresentano rispettivamente i contributi proporzionale, integrale e derivativo alla correzione. È evidente che un controllo efficace del processo richiede la calibrazione dei parametri K_p , K_i , K_d dell'unità. La valutazione di tali parametri è normalmente condotta mediante metodi semi-empirici basati sui risultati di simulazioni numeriche del processo da regolare. Dall'applicazione di tali metodologie al controllo dei livelli idrici nei collettori di fognatura, e più in generale negli invasi in linea, alcuni autori suggeriscono valori di K_p compresi tra 0,1 e 0,6, valori di K_i compresi tra 0,0008 e 0,05 e valori di K_d compresi tra 6 e 50. Una procedura più generale

delle unità a logica PID è stata proposta da Ziegler e Nicholas e derivata dal controllo di processi industriali; la procedura è basata sulla valutazione di K_o , che è pari al valore assunto da K_p nel caso di un'unità di controllo P (puramente proporzionale) che conduca il sistema controllato alla condizione in cui insorgono oscillazioni di tipo permanente. Una volta determinato il valore K_o e il relativo periodo di oscillazione T_o , i parametri della controller possono derivarsi dalle seguenti relazioni:

P controller	$K_p = 0.5 \cdot K_o$		
PI controller	$K_p = 0.45 \cdot K_o$	$K_i = 0.53 \cdot \frac{K_o}{T_o}$	
PD controller	$K_p = 0.5 \cdot K_o$		$K_d = 0.1 \cdot \frac{K_o}{T_o}$
PID controller	$K_p = 0.6 \cdot K_o$	$K_i = 1.2 \cdot \frac{K_o}{T_o}$	$K_d = 0.07 \cdot \frac{K_o}{T_o}$

Tabella 3.1: Differenti tipologie di controller [Campisano e Sanfilippo, 2011]

3.2.2 ESEMPIO DI RETE FOGNARIA CON SISTEMA RTC

Esempi di sistemi di Real Time Control in funzione nel mondo si trovano in numerosi città:

- USA: Boston, Chicago, Cleveland, Detroit, Milwaukee, Minneapolis, Philadelphia, San Francisco, Seattle, Washington, Wilmington;
- Canada: Quebec City, Montreal, Toronto, Vancouver;
- Giappone: Tokyo, Osaka;
- UK: Liverpool, Birmingham, Newcastle;
- Francia: Bordeaux, Marsiglia, Parigi, Nancy;
- Germania: Amburgo, Brema, Monaco, Berlino;
- Svizzera: Berna, Zurigo;
- Austria: Vienna.

Il caso canadese di Quebec City prevede un'ottimizzazione del sistema di drenaggio sotto diversi punti, e nello specifico mira a:

- minimizzare i costi;
- minimizzare gli sversamenti;
- minimizzare gli allagamenti;
- massimizzare la capacità di trattamento dell'impianto di depurazione;
- minimizzare le variazioni dei set-point.

La rete di drenaggio è stata modificata in diverse fasi negli anni compresi tra il 1998 e il 2008. In un primo momento sono stati realizzati due tunnels con una capacità di accumulo di 17'800 m³, 17 punti di monitoraggio e 5 punti con strumenti RTC. Dal 2002 sono state realizzate 14 vasche di accumulo, per un totale di 121'300 m³ di invaso, 19 punti di controllo e 9 siti di installazione di strumenti RTC.

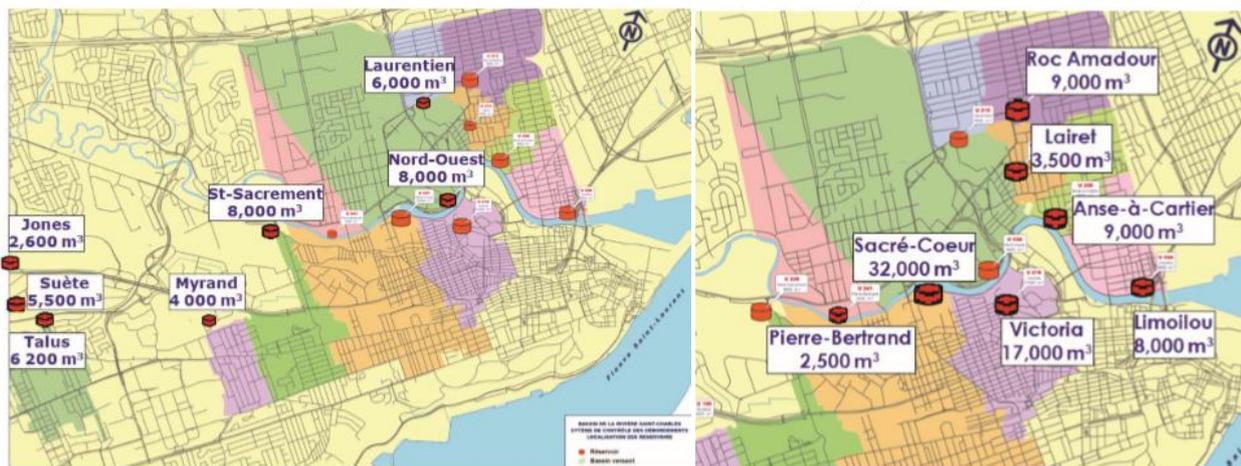


Figura 3.4: Realizzazione delle vasche di accumulo sul territorio tra il 2002 e il 2005 (sinistra) e tra il 2004 e il 2008 (destra) [Pleau et al., 2010]

Questo complesso sistema di Real Time Control punta a sfruttare la capacità di invaso della rete e del tunnel, con i set points che vincolano la portata al di sotto del valore massimo calcolato, limitando il flusso inviato al depuratore.

I livelli vengono misurati dalla rete di sensori installata nel sistema fognario, creando una ridondanza di dati al fine di limitare gli errori. A tale scopo sono stati installati sensori di tipologie differenti. I PLC e i PC convalidano i dati e li salvano con passo temporale di 5 minuti. Associato al sistema di RTC, è stata realizzata una fitta rete di pluviometri che permettono di definire la distribuzione delle precipitazioni che, associata all'utilizzo dei sistemi radar, permette la previsione dell'entità dell'evento meteorico (sistema di Early Warning).

I sistemi di EW e RTC, collaborano quindi al raggiungimento del primo obiettivo fondamentale prefissato, ossia evitare i fenomeni di allagamento urbano.

Il sistema combinato di EW e RTC viene attentamente mantenuto, al fine di garantire accuratezza dei dati analizzati e azioni tempestive e efficaci. Nello specifico il piano di manutenzione prevede:

- pulizia dei sensori settimanale;
- calibrazione del sistema di EW attraverso la validazione dei dati forniti dai radar ogni 3 mesi;
- archiviazione dei dati presenti nel database ogni mese;
- calibrazione annuale del modello idraulico sulla base delle statistiche e dei rapporti relativi ad ogni singolo evento meteorico (salvo modifiche della rete, in tal caso il modello viene aggiornato e validato per ogni eventuale modifica).

Uno studio di Pleau et al. (2010) evidenzia i risultati ottenuti durante gli eventi del 2000 e del 2001 confrontando il sistema RTC con la rete statica. Nello specifico su 53 eventi nell'anno 2000, il sistema RTC ha determinato una riduzione dei volumi sversati del 75%.

	2000 (53 eventi di pioggia)	2001 (45 eventi di pioggia)
Volume sversato con sistema RTC	47'300 m ³	22'000 m ³
Volume sversato sistema statico	185'400 m ³	129'000 m ³
Riduzione %	75%	83%
Frequenza con sistema RTC	23	25
Frequenza sistema statico	40	44
Riduzione %	43%	43%

Tabella 3.2: Riduzione degli sversamenti in 5 dei maggiori punti con scolmatore di Quebec City

Altro esempio di rete mista con controllo in tempo reale è quella di Boulogne Billancour [Entem et al., 1998], comune francese nella Ile-de-France. Questa rete è composta da condotti di sezione ovoidale di grandi dimensioni (circa tre metri di altezza).

Il tronco di rete relativo alle acque di Boulogne Billancour si raccorda con un altro ramo di fognatura che trasporta le acque dell'area a sinistra della Senna, per poi essere tutte convogliate verso l'impianto di depurazione.

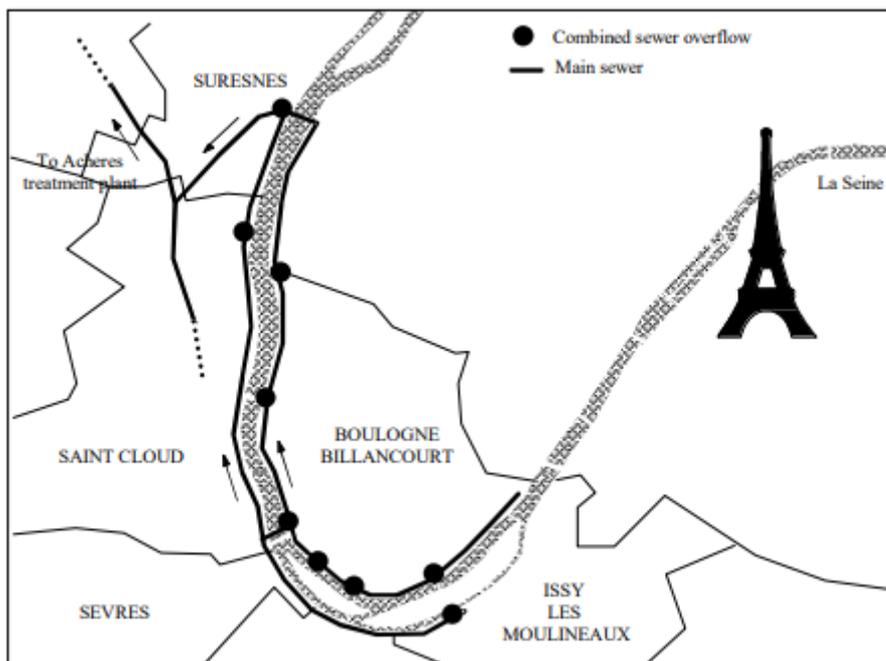


Figura 3.5: Schema della rete fognaria del comune di Boulogne Billancour [Entem et al., 1998]

Il sistema di RTC nasce per limitare gli sversamenti nella Senna e quindi abbattere gli inquinanti riversati nel corpo idrico ricettore.

Per valutare il potenziale di controllo in tempo reale del sistema fognario, è stato utilizzato il software MOUSE procedendo quindi alla modellazione di tre anni di piogge reali.

Dalle simulazioni è emerso che con le strategie di controllo si possono ridurre gli sversamenti di circa l'80% in volume e del 90% in termini di sostanze inquinanti. Questa fase sperimentale di modellazione e analisi ha portato alla realizzazione di un sistema di Real Time Control composto da:

- 6 attuatori per lo scarico automatizzato nella Senna, regolati attraverso logiche PID per mantenere i livelli in condotta entro valori prefissati. Sono state quindi definite 6 logiche di controllo per far variare i set points in funzione dell'entità dell'evento meteorico;
- un modello idraulico realizzato con il software MOUSE ON LINE che simula gli eventi nella rete con previsioni di 30 minuti. In questo modo si verificano e fissano i set points da inviare agli attuatori;
- sistema di EW implementato nel software insieme ad una fitta rete di pluviometri che definiscono, insieme, intensità e distribuzione spaziale dell'evento meteorico;
- trasmissione dati, attraverso il sistema SCADA, riguardanti le misure fornite dai vari sensori presenti in rete.

Il procedimento completo per step risulta così composto:

- 1- il sistema riceve i dati dai sensori (ogni minuto vengono inviate 20 misure);
- 2- modellazione della rete sulla base dei dati acquisiti dai sensori;
- 3- simulazioni iterative per determinare la migliore strategia di controllo da applicare caso per caso;
- 4- le strategie di controllo vengono acquisite dal sistema SCADA che invia il comando agli attuatori.

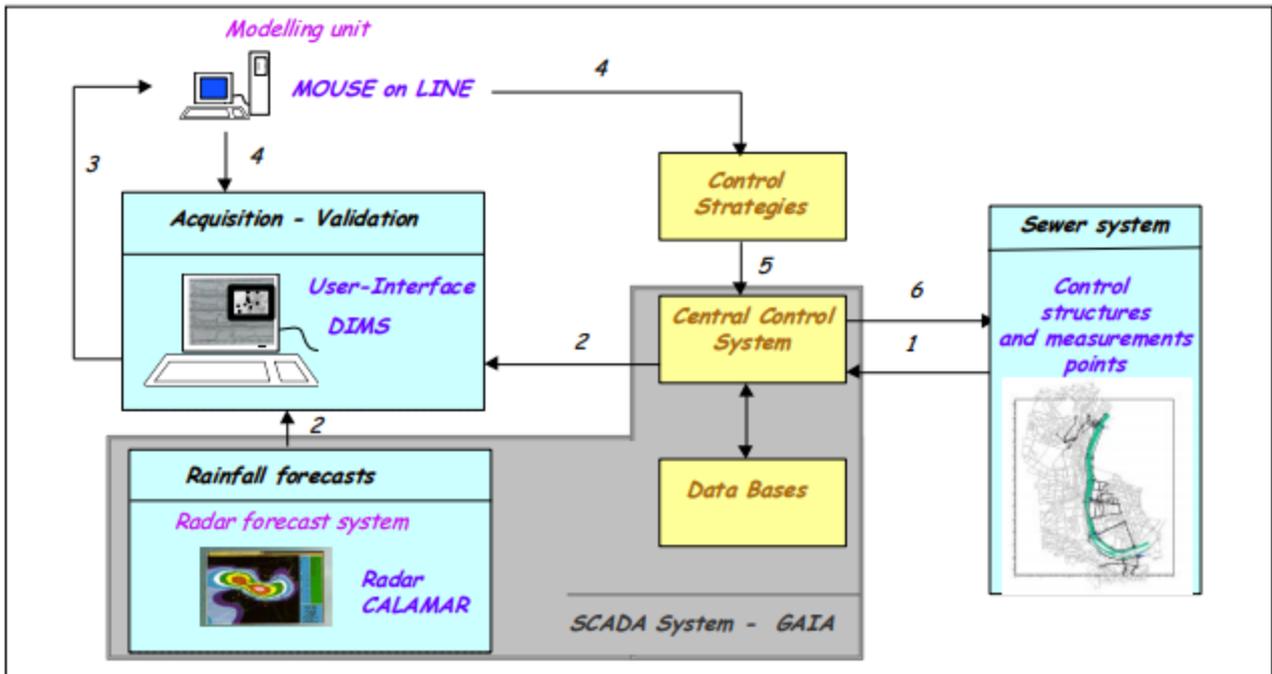


Figura 3.6: Diagramma di funzionamento [Entem et al., 1998]

4 OTTIMIZZAZIONE DELLA RETE DI DRENAGGIO URBANO ATTRAVERSO SISTEMI DI REAL TIME CONTROL

4.1 TIPOLOGIE E ALGORITMI DEI SISTEMI RTC

L'ottimizzazione della rete di drenaggio urbano è un concetto che mira ad utilizzare la rete in maniera dinamica, sfruttando la capacità di immagazzinamento della preesistente struttura fognaria, accumulando quei volumi che causerebbero esondazioni o sversamenti nei corpi idrici ricettori.

La rete deve quindi essere resa "dinamica" attraverso l'installazione di un sistema di monitoraggio in real time e, allo stesso tempo, di dispositivi capaci di regolarsi in funzione del dato misurato, al fine di sfruttare al massimo la capacità di invaso dei condotti senza dover prevedere l'installazioni di grandi e costose opere di invaso che risultano, inoltre, di non facile installazione in zone già densamente urbanizzate.

Le informazioni di base necessarie per implementare un sistema di RTC sono quelle relative a:

- misure e campionamenti: si rende quindi necessaria l'installazione di una rete di sensori nelle condotte; nel caso fossero già presenti va valutata l'ipotesi di ampliare la rete di monitoraggio con nuovi strumenti;
- geometria della rete: è necessario conoscere la rete in ogni sua parte, sia la struttura principale sia i dettagli geometrici di ogni singolo elemento che la costituisce;
- schema dei deflussi e delle portate circolanti;
- capacità di invaso di ogni elemento che costituisce la rete;
- disponibilità di modelli idraulici.

Per realizzare un sistema di RTC è necessario implementare un algoritmo finalizzato sulle funzioni obiettivo da perseguire, queste possono essere:

- massimizzare la capacità di invaso della rete esistente per minimizzare le portate massime in rete;
- minimizzare gli sversamenti per diminuire il carico inquinante immesso nell'ambiente attraverso l'attivazione degli scolmatori di piena;
- massimizzare la capacità di depurazione degli impianti di trattamento ottimizzando le portate ad esso convogliate;
- minimizzare i costi di gestione.

Gli algoritmi implementabili sono di molteplici tipologie, si possono distinguere tra modelli di controllo predittivi MPC o regolatori quadratico lineari LQR, oppure tra algoritmi di ottimizzazione rispetto a quelli che sfruttano strategie automatizzate. Queste ultime considerano i possibili scenari che si possono verificare durante il funzionamento del sistema e dispongono di strategie prestabilite per determinare le azioni di controllo appropriate.

Un'altra distinzione riguarda il tipo di controllo, se locale, regionale o globale. Un controllo locale prevede che ogni singolo attuatore agisca in modo indipendente e scollegato dagli altri; in quello globale i sensori comunicano con un sistema centrale che li coordina tra di loro. Il sistema locale è più indicato quando sono presenti pochi attuatori sulla rete, quando la rete si presenta complessa è necessario che gli attuatori lavorino in modo congiunto sfruttando quindi un sistema di controllo globale.

Il controllo locale è fra le tecniche RTC più semplici da applicare, il sensore solitamente è posto vicino all'organo di regolazione e comunicano tra di loro senza inviare informazioni alla centrale operativa. È generalmente effettuato a "soglia costante" ossia che il regolatore tende a mantenere costante un valore di set-point predefinito; in casi più avanzati si sfrutta il controllo a "soglia variabile" che permette di variare il set-point durante l'evento meteorico sulla base di opportune misure locali.

Il controllo di tipo regionale si pone ad un livello intermedio tra locale e globale nel senso che il livello del set-point della variabile di controllo del singolo regolatore viene modificato nel tempo sulla base di dati di processo misurati in altri siti oltre a quello dell'attuatore stesso.

Le operazioni, a differenza di quanto avviene nel caso di controllo globale, sono relative a zone idraulicamente indipendenti, risulta quindi essere un'implementazione dei cicli di controllo dei sistemi locali interconnessi tra di loro.

Il controllo globale, o centralizzato, ha una visione di insieme dell'intero sistema, istante per istante, grazie alla trasmissione dei dati ad una centrale operativa nella quale vengono processate le informazioni per poi impartire le azioni ai regolatori. Le decisioni vengono quindi inviate ai regolatori locali che provvedono ad eseguirle.

Lo schema operativo può essere strutturato in forma "gerarchica" ossia con più sottolivelli decisionali per l'esecuzione delle direttive elaborate dalla centrale operativa. In presenza di sistemi di previsione meteorologica (EW), il controllo globale prevede la risposta della rete in funzione dell'entità della piena causata dall'evento e ne definisce le strategie da adottare per ogni regolatore. Si deve tenere conto, nel caso combinato RTC globale con EW, che il tipo di informazione che viene inviata dal radar deve essere correlata alle funzioni obiettivo del sistema di controllo in tempo reale. Inoltre è importante ricordare che le previsioni meteorologiche hanno un orizzonte temporale che non supera le 12-24 ore in relazione al tipo di eventi di interesse e al livello di incertezza ammessa e quindi l'uso di modelli di simulazione online deve essere rapportato a tale lasso temporale.

Esistono anche sistemi che sfruttano la combinazione di controllo globale e locale, controllo ad intelligenza distribuita; in questi sistemi i regolatori locali mantengono un certo grado di autonomia nel senso che ricevono le direttive dalla centrale operativa ma possono rifiutarle se incoerenti con la situazione locale all'istante corrente.

Un'altra possibile distinzione si ha tra sistemi reattivi e predittivi. I primi reagiscono agli eventi esterni attuali o passati, quelli predittivi invece hanno meccanismi e metodologie di previsione per stimare gli eventi futuri e tenerli in considerazione per scegliere la strategia di controllo opportuna.

Nel caso dei sistemi di drenaggio urbano, la previsione di variabili come la precipitazione fornisce utili informazioni sul comportamento del sistema anche se questo approccio è estremamente dipendente dall'orizzonte temporale della previsione, dall'affidabilità del dato e dalla giusta semplificazione del modello idraulico realizzato.

Altro criterio per definire l'algoritmo del sistema di controllo in tempo reale è quello collegato al tipo di variabili controllate, nello specifico si possono sintetizzare in:

- RTC basato sui volumi;
- RTC basato sulla quantità;
- RTC basato sugli inquinanti.

Il primo è il più utilizzato in quanto la strumentazione necessaria per il monitoraggio è di più facile installazione e di conseguenza la conoscenza della rete è quella di base; negli altri casi bisogna approfondire le informazioni relative all'impianto di trattamento e al corpo idrico ricettore in cui vengono sversati gli eccessi provenienti dalla rete fognaria.

Sono quindi richiesti differenti componenti in funzione del tipo di schema di controllo, la Tabella 4.1 schematizza i componenti necessari per l'implementazione delle differenti configurazioni di RTC (Garcia et al., 2015).

Tipologia di controllo	Strumentazione	Algoritmo di controllo	Comunicazione SCADA	Server centrale SCADA	Operatore	Server RTC centrale	Previsione meteo	Modello on-line
Controllo locale manuale	✓				✓			
Controllo locale automatico	✓	✓						
Controllo regionale automatico	✓	✓	✓	✓				
Controllo di supervisione remoto	✓	✓	✓		✓			
Controllo globale basato sulle strategie	✓	✓	✓	✓		✓		
Controllo globale basato sull'automatizzazione	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Tabella 4.1: Schematizzazione dei componenti richiesti in funzione della configurazione di RTC [Garcia et al., 2015]

Le due tipologie di algoritmi maggiormente utilizzati sono:

- algoritmi euristici: sono basati principalmente sull'esperienza, servono per semplificare sistemi che sono complessi da modellare. Fanno parte di questi algoritmi:
 - RBC: controllo basato sulle regole, è uno dei più semplici da implementare, sfrutta un notevole numero di regole per il controllo e le strategie sono definite offline. Questo comporta che siano regole veloci del tipo "if...then"
 - FLC: semplifica gli output sfruttando regole semplici
- algoritmi basati sull'ottimizzazione: sono basati sull'ottimizzazione delle funzioni obiettivo e delle misure delle variabili del sistema, ricercano quindi l'azione di controllo ottimale. Questo algoritmo affronta il problema di generare le strategie di controllo al fine di massimizzare o minimizzare determinate funzioni, basandosi sulle letture attuali o passate. Le funzioni obiettivo più usate in questo algoritmo sono:
 - minimizzare gli allagamenti urbani;
 - minimizzare gli sversamenti nei corpi idrici;
 - massimizzare la capacità di trattamento delle acque reflue;
 - minimizzare i costi operativi;
 - minimizzare gli inquinanti immessi nell'ambiente.

Fanno parte di questi algoritmi:

- LQR: controllo lineare delle azioni;
- MPC: controllo basato sul modello;
- ES: strategie evolutive;
- PD: controllo basato sul processo biologico di evoluzione.

4.2 REGOLE DI CONTROLLO OTTIMALE IN FUNZIONE DELLO SCHEMA DELLA RETE

RETE A MAGLIE CHIUSE

Sono reti prive di sconnessioni idrauliche e possono essere semplificate, entro certi limiti, ad un unico invaso.

Eventuali piogge disomogenee in termini spaziali, dopo un certo lasso di tempo, tendono a compensarsi spontaneamente. Queste reti si prestano alla realizzazione di sistemi RTC globali con sistema di early warning integrato [Campisano A. e Sanfilippo U. 2011]. Il sistema di EW permette di gestire il sistema in modo da tenere i volumi idrici nelle zone dove l'afflusso meteorico si va esaurendo ed allontanarli da quelle in cui quest'ultimo è in fase crescente o comunque più intenso.

Se i ricettori sono più di uno, il sistema di RTC unito a quello di EW così gestito offre la possibilità di decidere verso quale indirizzare i deflussi in un determinato istante in funzione dei livelli idrici o del valore delle sostanze inquinanti.

RETE AD ALBERO

Sono reti complesse per le quali è preferibile adottare un sistema di RTC globale e gerarchico associato al sistema di previsioni meteorologiche di EW [Campisano A. e Sanfilippo U. 2011].

Sono reti che risentono molto della disomogeneità di distribuzione delle piogge, con il sistema di EW si può favorire il riempimento delle condotte meno sollecitate mentre con il controllo gerarchico si possono gestire gli invasi delle condotte in maniera semplificata. In pratica questo sistema semplifica i rami a monte di un determinato nodo come se fossero un unico invaso, con un idrogramma in accesso che corrisponde alla somma di quelli entranti nei vari rami; ad un livello gerarchico inferiore vengono elaborate le strategie di controllo che permettono di eseguire le direttive ricevute dal livello gerarchico superiore finché scendendo per livelli gerarchici di accorpamento inferiori, si arrivano a definire le operazioni di regolazione per ciascun gruppo.

4.3 METODOLOGIE DI REALIZZAZIONE DI SISTEMI RTC

Un approccio proposto da Seborg et al. (2011), e ripreso da Mollerup et al. (20016), prevede 6 fasi di progettazione per ottimizzare la rete di drenaggio urbana attraverso l'implementazione di sistemi di real time control secondo una gerarchia di controllo dipendente dal tempo.

Nello specifico si parte dall'identificare le variabili del processo (step 1) e si definiscono le funzioni obiettivo ossia il risultato che si vuole perseguire attraverso l'inserimento di un sistema di real time control (step 2). Il passo successivo prevede lo sviluppo del modello in relazione ai vincoli della rete, sarà quindi indispensabile capire il funzionamento del sistema per arrivare alla realizzazione della funzione obiettivo in modo semplice e funzionale (step 3 e 4). Occorre quindi un'accurata analisi dei modelli implementati al fine di trovare la soluzione che ottimizza la funzione obiettivo (step 5) per poi valutarne il grado di errore e affidabilità (step 6).

I principali obiettivi del sistema RTC si riassumono in:

- riduzione degli inquinanti;
- evitare allagamenti, garantendo maggiori condizioni igieniche;
- ottimizzare la gestione del sistema fognario riducendo i costi.

Fissato l'obiettivo o gli obiettivi da perseguire, si procede ad analizzare la rete, per valutare la possibilità di inserire un sistema di RTC, sfruttando la metodologia PASST (Planning Aid for Sewer System Real Time Control) messa a punto del Working Group on Real Time Control of the German Association for Water, Wastewater and Waste (ATV-DVWK). Questo è uno strumento che consente la valutazione dei benefici potenziali dell'implementazione di un sistema di RTC all'interno di un bacino urbano. Tale strumento è stato concepito come sistema esperto in grado di fornire ai professionisti una linea guida nella pianificazione e nella progettazione dei sistemi di RTC. Viene attribuito un punteggio alla rete analizzata in base alle informazioni riguardanti il sistema in esame:

- 0-24 punti: sistema probabilmente non adatto per applicazione RTC;
- 25-35 punti: sistema probabilmente adatto per applicazione RTC;
- >36 punti: sistema molto adatto per applicazioni RTC.

Se il sistema risulta favorevole all'applicazione del sistema di RTC, si procede ad analizzare la rete e le principali caratteristiche del sistema RTC da implementare.

Viene inoltre fornito un work plan per assistere il progettista nell'implementazione del sistema e in particolare vengono fornite indicazioni su:

- requisiti del software per la simulazione del sistema RTC;
- criteri di scelta delle strategie di controllo e sui criteri per la definizione degli algoritmi di controllo del sistema di RTC;
- criteri di scelta della strumentazione di misura e degli organi regolatori;
- indicazioni su aspetti economici, legali e gestionali.

Criterio		Valutazione		
A.	<i>Bacino</i>	<i>Punteggio (valori in parentesi)</i>		
A.1	Topografia (pendenza media superficiale)	Piana <0.3% (2)	Media <1% (1)	Acclive >1% (0)
A.2	Dimensioni (lunghezza dell'asta principale)	Elevata >5 km (2)	Media >1km (1)	Modesta <1 km (0)
A.3	Differenza tra sviluppo attuale e futuro dell'area	Elevate (5)	Modeste (1)	Nessuna (0)
B.	<i>Sorgenti di inquinamento</i>	<i>Punteggio</i>		
B.1	Aree con crescente inquinamento da acque di dilavamento	Molte (2)	1-2 (1)	Nessuna (0)
B.2	Variabilità spazio-temporale della produzione di acque reflue (fonti di	Elevata (2)	Media (1)	Nessuna (0)

	Critero	Valutazione		
	maggiore inquinamento, immissioni da sistemi separati)			
C.	Sistema Fognario	Punteggio		
C.1	Numero di dispositivi di regolazione (pompe, paratoie, soglie)	Molti (4)	1-2 (2)	Nessuno (0)
C.2	Pendenza dei collettori	Modesta <0.2% (4)	Media (2)	Elevata >0.5% (0)
C.3	Connessioni a maglie in rete	Molte (4)	1-2 (2)	Nessuna (0)
C.4	Numero di invasi esistenti (vasche e tubazioni >50 m ³)	>4 (4)	1-3 (2)	0 (0)
C.5	Numero di dispositivi di sfioro	>6 (4)	2-6 (2)	<2 (0)
C.6	Volume totale di invaso (vasche e tubazioni)	>5000 m ³ (4)	2000-5000 m ³ (2)	<2000 m ³ (0)
C.7	Volume di invaso specifico (rispetto all'area impermeabile)	>40 m ³ /ha (4)	20-40 m ³ /ha (2)	<20 m ³ /ha (0)
C.8	Numero di collettori all'impianto di trattamento	>2 (3)	2 (1)	1 (0)
D.	Funzionamento del sistema	Punteggio		
D.1	Aree di allagamento localizzato	Molte (2)	1-2 (1)	Nessuna (0)
D.2	Numero di invasi utilizzati in maniera non uniforme	>1 (4)	1 (2)	Nessuno (0)
D.3	Comportamento non uniforme degli scarichi	Significativo (4)	Medio (2)	Non significativo (0)
E.	Corpi ricettori	Punteggio		
E.1	Differenze locali nelle capacità idrauliche	Forti (4)	Medie (2)	Nessuna (0)
E.2	Differenze locali nelle capacità di carico (balneazione, aree protette)	Significative (4)	Medie (2)	Non significative (0)
E.3	Sensibilità del ricettore	Molto sensibile (2)		Poco sensibile (0)
F.	Impianto di trattamento	Punteggio		
F.1	Portata avviata all'impianto di trattamento	>1.5 Q _{d,max} (3)	> Q _{d,max} (1)	< Q _{d,max} (0)
F.2	Sensibilità ai picchi di portata e di inquinante	Molto sensibile (2)		Poco sensibile (0)

Tabella 4.2: Tabella dei punteggi per la valutazione delle potenzialità dell'adozione dell'RTC per un sistema fognario [Campisano e Sanfilippo, 2011]

Si riportano alcune spiegazioni relative alla Tabella 4.2 [Campisano e Sanfilippo, 2011]:

- A1. Topografia (pendenza media superficiale):
l'attivazione della capacità di invaso in bacini con forti pendenze è possibile solo in aree di modeste dimensioni o con numero di attuatori molto elevato.
- A2 Dimensioni (lunghezza dell'asta principale):

usualmente nelle aree di grandi dimensioni le piogge sono distribuite in maniera non uniforme. Le capacità di alcune parti del bacino possono essere utilizzate per ridurre i carichi inquinanti in altre parti del sistema.

- A3 Differenze tra sviluppo attuale e futuro dell'area
Identifica aree progettate ma non totalmente realizzate.
- B1 Aree con crescente inquinamento da acque di dilavamento
L'ausilio di un sistema RTC può consentire l'avvio di queste acque in modo prioritario verso l'impianto di trattamento;
- B2 Variabilità spazio-temporale della produzione di acque reflue
Il sistema RTC può gestire in maniera dinamica le portate di efflusso da vasche di accumulo in modo da limitare o eliminare gli sversamenti;
- C1 Numero dei dispositivi di regolazione
Se sono già presenti sistemi manuali di regolazione, il sistema RTC dovrà solo essere ampliato con l'installazione di sistemi di misura e di dispositivi di controllo;
- C2 Pendenze dei collettori
Importanti capacità di invaso si hanno con collettori di grandi dimensioni e ridotta pendenza attraverso l'inserimento di paratoie a cascata;
- C3 Connessione e maglie in rete
In questi casi le portate si possono gestire più facilmente distribuendole nei diversi rami, garantendo maggiore flessibilità al sistema;
- C4 Numero di invasi esistenti (vasche e tubazioni >50m³)
Un alto numero di invasi incrementa la possibilità di utilizzo di esse mediante tecniche RTC;
- C5 Numero di dispositivi di sfioro
Se sono presenti molti dispositivi di scarico è possibile effettuare una gestione più flessibile degli sfiori privilegiando gli sversamenti in punti meno sensibili;
- C6 Volume totale di invaso
La capacità di attivare grandi volumi di invaso è caratterizzata da elevati rapporti costi-benefici in quanto i costi dei sistemi RTC sono prevalentemente costi fissi;
- C7 Volume di invaso specifico
Se tale parametro è modesto significa che le vasche esistenti risultano piene anche dopo eventi di piena modesti, il sistema RTC non può apportare benefici significativi per la riduzione dei volumi di sfioro;
- C8 Numero dei collettori all'impianto di trattamento
Se ci sono più collettori diretti all'impianto di depurazione, in caso di pioggia probabilmente non funzioneranno in maniera uniforme. L'introduzione del sistema RTC può in questi casi migliorare le prestazioni dei collettori sottoutilizzati;
- D1 Aree di allagamento localizzato
Aree che in caso di piogge intense sono spesso soggette ad allagamento mentre altre aree del bacino sono ancora disponibili, in questo caso il sistema RTC riesce a sfruttare al meglio le capacità di invaso della rete riducendo i fenomeni di allagamento.

- D2 Numero di invasi utilizzati in maniera non uniforme
È un indice di gestione non ottimale della rete, un sistema RTC centralizzato può gestirli e sfruttarli a meglio in maniera dinamica;
- D3 Comportamento non uniforme degli scarichi
Indica l'uso non ottimale della capacità di invaso dei collettori. Maggiori sono le differenze di funzionamento degli scarichi, maggiore sarà il beneficio che può pervenire dall'implementazione di un sistema RTC;
- E1 Differenze locali nella capacità idraulica
Se esistono differenze significative nella capacità idraulica dei corpi idrici ricettori, l'uso di tecniche RTC può consentire ad esempio di scaricare portate di picco nei ricettori di capacità idraulica maggiore;
- E2 Differenze locali nella capacità di carico
RTC per scaricare in modo prioritario nei corpi idrici ricettori dotati di maggiore capacità di autodepurazione;
- E3 Sensibilità del ricettore
Il sistema RTC può evitare o ridurre significativamente gli scarichi in un ricettore sensibile.

Il primo fondamentale step risulta quindi quello di definire gli obiettivi da raggiungere, al fine di valutare se la rete è in grado di beneficiare del sistema di RTC attraverso procedure di valutazione come quella esposta nella Tabella 4.2. Superata la fase di valutazione, si procede ad uno studio preliminare a scala di pianificazione ossia si analizzano i vari aspetti di carattere tecnico, gestionale, organizzativo, legale ed economico connessi al sistema. Si confronteranno quindi differenti soluzioni alternative per valutare quella che ottimizza il sistema.

Le principali informazioni di base per la pianificazione riguardano principalmente le informazioni strutturali e di automazione, quelle relative alla disponibilità di misure e strumenti di simulazione e sugli aspetti organizzativi. Si possono riassumere le informazioni richieste, secondo ATV-DVWK, come riportato in Tabella 4.3, per quanto riguarda la struttura, e Tabella 4.4 relativa agli strumenti.

Elemento strutturale	Informazioni richieste
<p><i>Capacità di invaso e di trattamento Bacini di scarico e di ritenzione</i></p>	<p><u>Dati costruttivi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • forma • dimensione • volume • pozzetti di misura • tipo e posizione degli organi di regolazione (soglie, paratoie, valvole, etc.) <p><u>Dati idraulici:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • portata di progetto in ingresso • portata di progetto in uscita • profili delle soglie • livello massimo di invaso • livello di sfioro <p><u>Altri dati:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • tipologia di funzionamento • area del bacino • caratteristiche dei canali in entrata e in uscita
<p><u>Scaricatori di piena</u></p>	<p><u>Dati costruttivi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • forma • dimensione • tipo e posizione degli organi di regolazione (soglie, paratoie, valvole, etc.) <p><u>Dati idraulici:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • portata di progetto in ingresso • portata di progetto scaricata • lunghezza • disegni di progetto <p><u>Altri dati:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • area del bacino • caratteristiche dei canali in arrivo e in uscita

Elemento strutturale	Informazioni richieste
<u>Immissione in rete</u>	<ul style="list-style-type: none"> • diametro • pendenza • lunghezza • tempo di percorrenza del canale immissario
<u>Collettori di grandi dimensioni</u> <u>Invasi in linea</u>	<ul style="list-style-type: none"> • geometria • tipologia di attivazione degli invasi • livello massimo di invaso • capacità massima di invaso
<u>Manufatti di intersezione</u>	<ul style="list-style-type: none"> • tipo di intersezione • geometria del manufatto • distribuzione delle portate
<u>Vincoli</u>	In funzione del tipo di vincolo

Tabella 4.3: Informazioni da rilevare sugli elementi strutturali del sistema [DWA, 2005]

Strumenti	Informazioni richieste
<p style="text-align: center;"><i>Sensori di portata</i> <i>Sensori di livello</i> <i>Campionatori per la qualità</i> <i>Pluviometri</i></p>	<p><u><i>Dati costruttivi:</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> • dimensione • anno di costruzione • principio di funzionamento • campo di misura • accuratezza • affidabilità <p><u><i>Altri dati:</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> • ubicazione • possibilità di utilizzo per applicazioni RTC • sistema di trasmissione dati
<p style="text-align: center;"><u><i>Regolatori</i></u></p>	<p><u><i>Dati costruttivi:</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> • tipologia • dimensioni • anno di costruzione • tipo di regolazione <p><u><i>Dati idraulici:</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> • capacità minima e massima • legge di efflusso <p><u><i>Altri dati:</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> • possibilità di utilizzo per applicazioni RTC • affidabilità operativa
<p style="text-align: center;"><u><i>Unità di controllo</i></u></p>	<p><u><i>Dati costruttivi:</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> • tipologia di controllo (locale, regionale, etc.) • dimensioni <p><u><i>Altri dati:</i></u></p> <ul style="list-style-type: none"> • possibilità di utilizzo per applicazioni RTC • grado di protezione in ambienti aggressivi

Strumenti	Informazioni richieste
<u>Sistemi di trasmissione</u>	<p><u>Dati costruttivi:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • tipologia di connessione (linea telefonica, wireless, etc.) • segnali trasmessi • tipologia e protocolli di trasmissione • intervalli di trasmissione <p><u>Altri dati:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • affidabilità operativa • ridondanza della connessione

Tabella 4.4: informazioni da rilevare sugli strumenti da installare sulla rete per la realizzazione di un sistema RTC [DWA, 2005]

Se non dovessero esserci misurazioni pregresse, sarà quindi necessario effettuare campagne sperimentali di misura al fine di creare un database ai fini della calibrazione, e validazione, del modello di simulazione. La scelta della tipologia del modello di simulazione dipende chiaramente dal dettaglio che si intende ottenere nei risultati finali. In generale devono consentire di quantificare le prestazioni e il comportamento del sistema in diverse condizioni idrauliche, allo scopo di effettuare il confronto tra strategie di controllo differenti.

Le principali fasi preliminari si possono riassumere in:

1. definizione degli obiettivi che si intendono raggiungere mediante il sistema RTC. Si definiscono i criteri attraverso i quali si quantificano gli effetti dell'utilizzo di tali strategie rispetto ad un sistema statico, quali livelli massimi idrici, frequenza, durata e volumi di sfioro, i carichi inquinanti sfiorati, la portata depurata e eventuali parametri di qualità relativi ai ricettori.
2. Definizione degli scenari di carico ossia gli eventi meteorici significativi da simulare, considerando che per gli eventi estremi il sistema di real time control consente solo minime riduzioni di volumi di scarico.
3. Stima del potenziale di invaso ossia della capacità in linea. Richiede la valutazione dei volumi massimi realmente attivabili all'interno del sistema.
4. Definizione delle strategie di controllo, dei criteri con cui posizionare i sensori di misura e i regolatori all'interno del sistema. Va inoltre definita la tipologia di controllo da adottare e gli algoritmi di controllo dei regolatori.

Confrontare differenti soluzioni permette di definire quale effettivamente soddisfa gli obiettivi prefissati, comparando e valutando pregi e difetti di tutti i possibili approcci.

Questa comparazione può essere svolta valutando differenti aspetti: dall'efficacia delle singole soluzioni in termini di raggiungimento degli obiettivi oppure all'efficienza economica delle soluzioni.

Per la valutazione in termini economici, si possono utilizzare metodologie basate sul confronto dei soli costi, analisi costi-benefici o analisi costi-efficacia. Per questo occorre determinare i costi riguardanti:

- i manufatti;
- la strumentazione per il monitoraggio;
- i regolatori e i dispositivi di controllo;
- i sistemi di telecomunicazione;
- il personale e la sua formazione;
- il materiale di consumo.

Nell'analisi economica delle alternative progettuali, va sottolineato che, nel valutare le soluzioni con RTC, occorre individuare opportuni criteri analitici per tenere in considerazione gli ulteriori benefici legati ad

esempio alla razionalizzazione del servizio e della manutenzione, all'aumento delle condizioni di sicurezza del sistema fognario e al miglioramento dei processi di trattamento all'impianto di depurazione.

5 NATURE BASED SOLUTIONS: UNA STRATEGIA INTEGRATA AI SISTEMI DI EW E RTC

Le infrastrutture verdi denominate Nature Based Solutions (NBS) sono soluzioni decentralizzate sul territorio al fine di gestire le portate superficiali dovute agli eventi meteorici, soprattutto quelli intensi. L'uso combinato di NBS e vasche di accumulo o sistemi RTC può portare ad una riduzione significativa non solo dei picchi di portata, ma anche in termini di sostanze inquinanti sversate nel ricettore, riducendo sia il rischio di allagamento sia di inquinamento del corpo idrico ricettore.

Le NBS sono soluzioni ispirate e basate sulla natura, nate per rispondere alle sfide più urgenti in termini ambientali. Sono economicamente vantaggiose, in grado di fornire benefici per l'ambiente, la società e l'economia, e di contribuire ad aumentare la resilienza.

I punti di forza delle NBS si possono sintetizzare in:

- uso sostenibile dei materiali;
- resilienza al cambiamento climatico;
- gestione dell'acqua in relazione al rischio di siccità e inondazione;
- qualità dell'acqua e dell'aria;
- relazioni tra spazio fisico e urbano e benessere dei cittadini;
- equità e coesione sociale;
- rigenerazione urbana.

Le NBS si possono suddividere in due grandi tipologie:

- a scala di edificio → coperture e pareti verdi, recupero e riuso dell'acqua nelle abitazioni;
- a scala di quartiere → aree ad allagamento controllato, fasce filtro, pavimentazioni e aree permeabili.

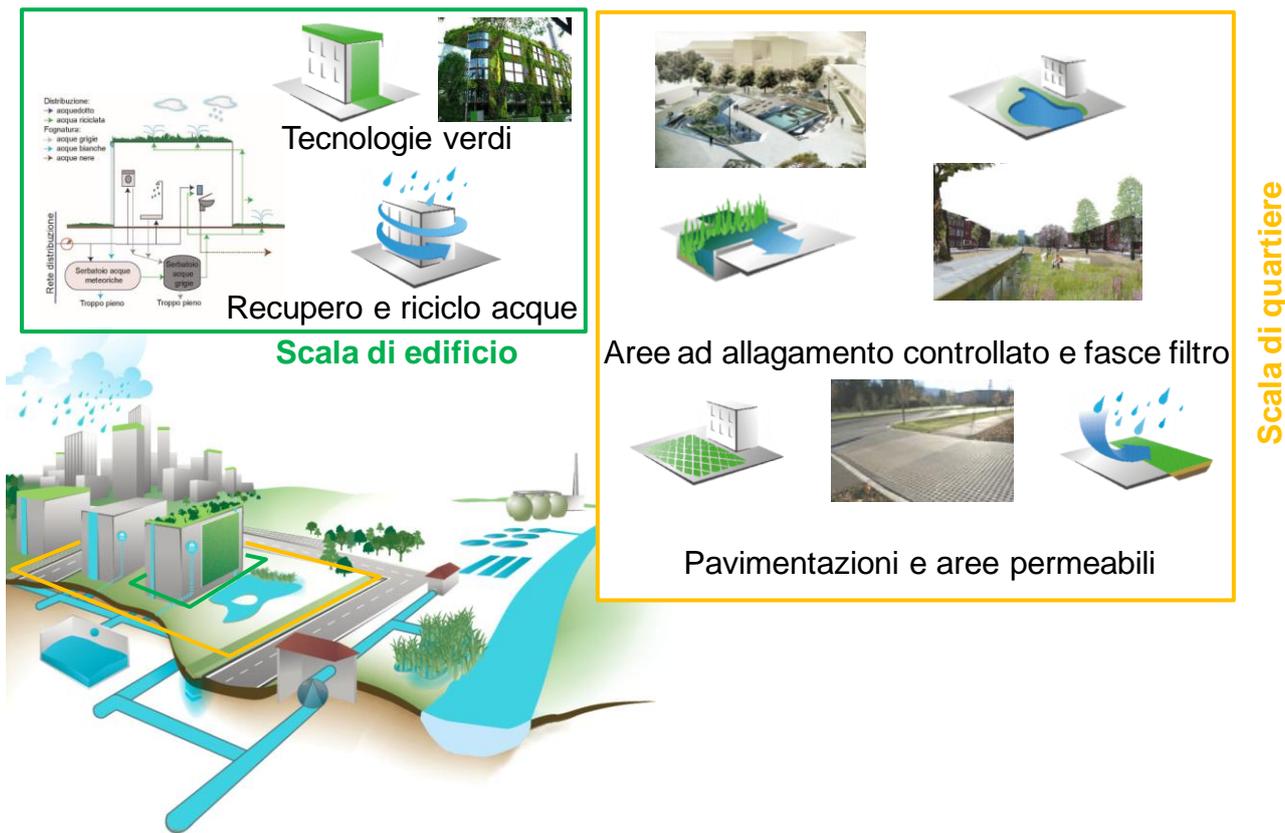


Figura 5.1: Schema delle principali tipologie di NBS

L'adozione di tali tecnologie permette di ottenere benefici sotto più punti di vista come schematizzato in Figura 5.2.

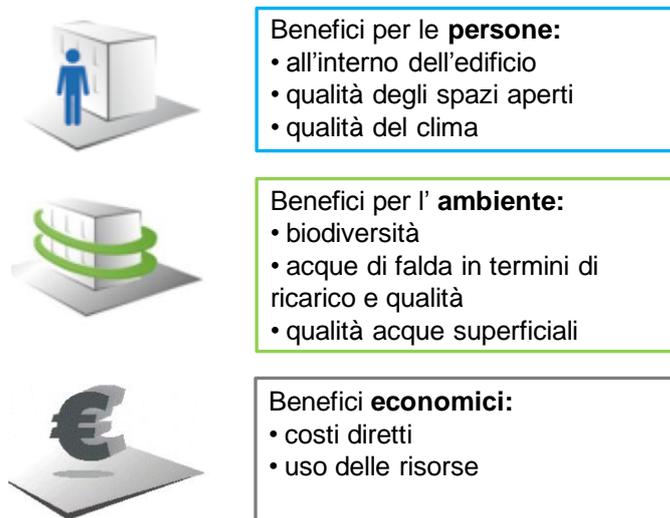


Figura 5.2: Schema dei principali benefici delle NBS.

5.1 NBS A SCALA DI EDIFICIO

5.1.1 I TETTI VERDI

I tetti verdi sono utilizzati per impedire che parte dell'acqua meteorica venga immessa in rete grazie alla ritenzione mirata e per aumentare la percentuale di evaporazione nel bilancio idrico complessivo. Altri effetti positivi dei tetti verdi comprendono il miglioramento del microclima, la riduzione degli inquinanti nel deflusso delle acque piovane, l'isolamento termico in estate e in inverno e l'ulteriore protezione della struttura del tetto. I tetti verdi si suddividono in due categorie: intensivi ed estensivi, in funzione dello spessore del substrato. Quelli estensivi sono caratterizzati da un substrato sottile, quelli intensivi avendo un substrato di notevole spessore possono trasformarsi in veri e propri giardini.

L'uso di tetti verdi porta ad una riduzione del deflusso delle precipitazioni per ritenzione ed evaporazione. Con tetti verdi intensivi, è possibile ottenere una conservazione quasi completa dell'acqua piovana, soprattutto nel caso di ampi tetti verdi. La proporzione di evaporazione e il grado di ritenzione sono determinati dalla struttura del substrato. La struttura è composta da strati di vegetazione, strato filtrante e strato di drenaggio.

Riassumendo, le coperture verdi permettono:

- una riduzione del carico idraulico sul sistema fognario con conseguente diminuzione del rischio di allagamento urbano;
- un miglioramento in termini di sversamenti nei corpi idrici ricettori;
- un miglioramento del clima nei dintorni della struttura.



Figura 5.3: Tetto verde sperimentale presso la Scuola di Ingegneria dell'Università di Bologna

5.1.2 RECUPERO E RIUSO DELL'ACQUA

Gli impianti per il recupero e il riuso prevedono l'accumulo di acque meteoriche e/o grigie, queste ultime provenienti da lavabo, doccia e lavatrice, previo trattamento.

I vantaggi che sono offerti dall'installazione di impianti di raccolta dell'acqua piovana per uso individuale non sono goduti solo a livello privato, ma si riflettono positivamente anche nella sfera dell'intervento pubblico, ovvero questa soluzione tecnologica permette di ridurre la quantità d'acqua che viene inviata alla rete fognaria in proporzione alla capacità di accumulo del serbatoio installato evitando il ripetersi di sovraccarichi della rete fognaria in caso di precipitazioni di forte intensità, e inoltre si hanno effetti positivi riguardanti:

- l'aumento dell'efficienza dei depuratori (laddove le reti fognarie bianca e nera non siano separate), sottraendo al deflusso importanti quote di acqua meteorica che, nel diluire i quantitativi di liquami da trattare, ridurrebbero l'efficacia della fase biologica di depurazione;
- la capacità di trattenere e/o disperdere in loco l'eccesso d'acqua piovana (ad esempio durante forti temporali) che non viene assorbita dal terreno a livello urbano, a causa della progressiva impermeabilizzazione dei suoli, rendendo inutili i potenziamenti delle reti fognarie pubbliche di raccolta.

Un altro punto di forza nel riutilizzo delle acque meteoriche è dovuto al fatto che esse, nonostante risultino contaminate da sostanze inquinanti contenute nell'aria, da eventuali residui di materiale delle superfici di raccolta e accumulo e da sostanze organiche che si accumulano sulla superficie di captazione (foglie, fanghi, ecc.) o possano trasportare batteri e virus provenienti da sterco animale, le concentrazioni di inquinanti

presenti risultano, comunque, basse; essendo destinata ad un riuso di tipo non potabile, quest'acqua necessita usualmente del solo filtraggio delle parti solide prima di essere accumulata all'interno del serbatoio e di un trattamento finale di affinamento prima dell'utilizzo. Eventuali trattamenti di disinfezione si possono adottare quando l'acqua permane per molti giorni all'interno del serbatoio.

Il recupero e il riciclaggio delle acque meteoriche sono tra i sistemi in grado di offrire un immediato contributo alla soluzione dei problemi dello spreco, della carenza e dei costi dell'approvvigionamento idrico sempre in crescita.

L'impianto per il recupero e il riuso delle acque meteoriche si compone di:

1- Sistema di captazione: la rete per la raccolta delle acque meteoriche è composta principalmente dalla superficie di copertura dell'edificio, l'acqua che si deposita sulla copertura viene indirizzata ai canali di gronda e di conseguenza ai pluviali, alle tubazioni di raccordo fino ai pozzetti. Questa superficie è quella che capta le acque e le convoglia al sistema di accumulo passando prima per i manufatti dedicati al filtraggio.

2- Filtro d'ingresso: in un impianto per recupero acqua piovana il filtraggio dell'acqua è necessario in quanto i detriti come foglie, rametti, sassolini, terra o altro in arrivo dai tetti o dalle aree di recupero dell'acqua, se non filtrati arrivando nelle cisterne e si depositano sul fondo o galleggiano.

3- Vasca di calma e serbatoio d'accumulo: è il contenitore che accumula l'acqua piovana filtrata.

4- Trattamento finale: è un processo da effettuare nel caso in cui le acque meteoriche recuperate servano per scopi diversi da quello irriguo, come servire le cassette dei WC o per altri usi non potabili. Questi trattamenti sono di due tipi: una disinfezione, effettuabile con lampade a raggi ultravioletti o con l'inserimento di ipoclorito di sodio; oppure si può operare una seconda filtrazione, eseguita con sabbie, carboni attivi, membrane o filtri multistrato.

5- Sistema di prelievo, pompaggio e controllo: il gruppo di pompaggio serve per prelevare l'acqua stoccata nel serbatoio ed immetterla nella rete idrica dedicata alla pressione desiderata.

6- Troppo pieno: la fase di smaltimento delle acque in eccesso si riconduce ad un semplice sifone che permette lo smaltimento della quota parte in esubero rinviandola allo scarico.

7- Rete duale di distribuzione: è il sistema di tubazioni che porta le acque piovane accumulate al loro terminale per il riutilizzo, distinte da quelle relative alla rete di adduzione dell'acqua potabile.

8- Reintegro da acquedotto: in caso di livello minimo all'interno del serbatoio di accumulo, l'acqua all'interno del serbatoio sarà reintegrata con quella potabile dell'acquedotto.

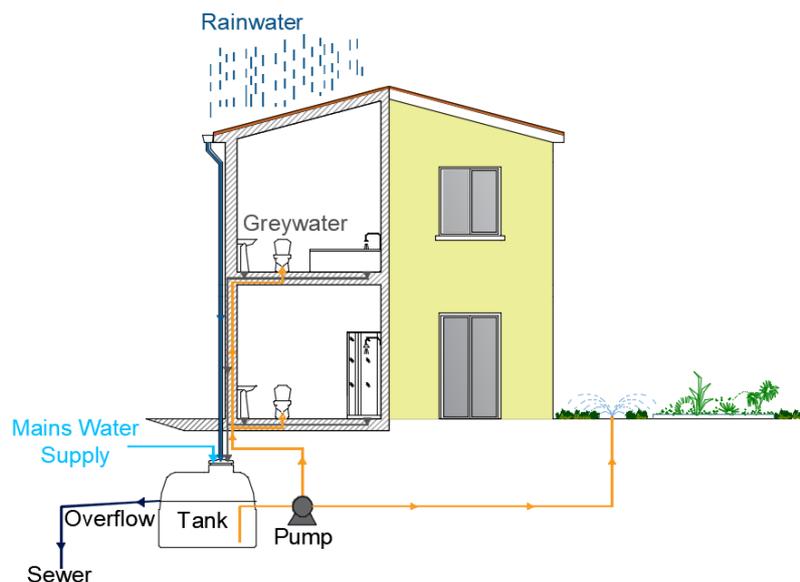


Figura 5.4: Schema di impianto per il recupero e il riuso delle acque meteoriche.

5.2 NBS A SCALA DI QUARTIERE

5.2.1 AREE AD ALLAGAMENTO CONTROLLATO

Sono aree progettate in modo da creare piccoli invasi profondi al massimo 30-60 cm, con la funzione di accumulare temporaneamente, e smaltire tramite infiltrazione o rilascio graduale, i deflussi prodotti da una superficie impermeabile. I terreni più idonei sono quelli con elevata permeabilità, sabbiosi con presenza di ghiaia grossolana, in quanto permettono la filtrazione ed evitano il ristagno di acqua.

Per mantenere un'elevata permeabilità del bacino, è fondamentale la presenza di essenze vegetali erbacee rustiche. La loro forma dipende dallo spazio disponibile in sito.

Tali sistemi sono utilizzati per il drenaggio di superfici ridotte (< 2 ha) e possono essere facilmente inseriti all'interno del tessuto urbano.

Tipicamente questi sistemi sono costituiti da una fascia con copertura erbosa disposta tra la superficie drenata e la zona di ristagno, un'area avvallata vegetata, nella quale si ha il ristagno temporaneo delle acque meteoriche, un sistema di drenaggio, disposto sul fondo (a seconda delle condizioni idrogeologiche è possibile prevedere anche la sola dispersione nel sottosuolo, prevedendo solo un troppo pieno per gli eventi di pioggia più intensi). La fascia con copertura erbosa effettua un'azione di filtrazione del materiale più grossolano e di rallentamento della velocità di deflusso, favorendo di fatto la sedimentazione del materiale. Nell'area di ristagno si ha quindi un accumulo temporaneo e un'ulteriore deposizione di materiale trasportato. Lo strato di materiale organico effettua una prima filtrazione delle acque meteoriche e favorisce la crescita di microrganismi che provvedono ad una degradazione della materia organica trasportata. Lo spessore di suolo vegetativo svolge la funzione di sistema di filtrazione; le particelle argillose del suolo forniscono siti per l'adsorbimento di inquinanti. La vegetazione garantisce la stabilità del suolo e partecipa all'azione di trattenimento degli inquinanti.

Un'altro modo innovativo per gestire e raccogliere l'acqua piovana nelle città consiste nella realizzazione di piazze ad allagamento controllato o water squares, all'apparenza sembrano semplici spazi pubblici, ma in caso di pioggia intensa si trasformano in bacini di stoccaggio.

Le water squares vengono posizionate in punti strategici dell'area urbana e in caso di forti piogge si trasformano in bacini di raccolta e stoccaggio delle acque meteoriche, così da alleggerire il sistema fognario ed eventualmente riutilizzare quanto raccolto per i momenti di scarsità idrica. Questa soluzione porta alla realizzazione di realtà urbane dinamiche.

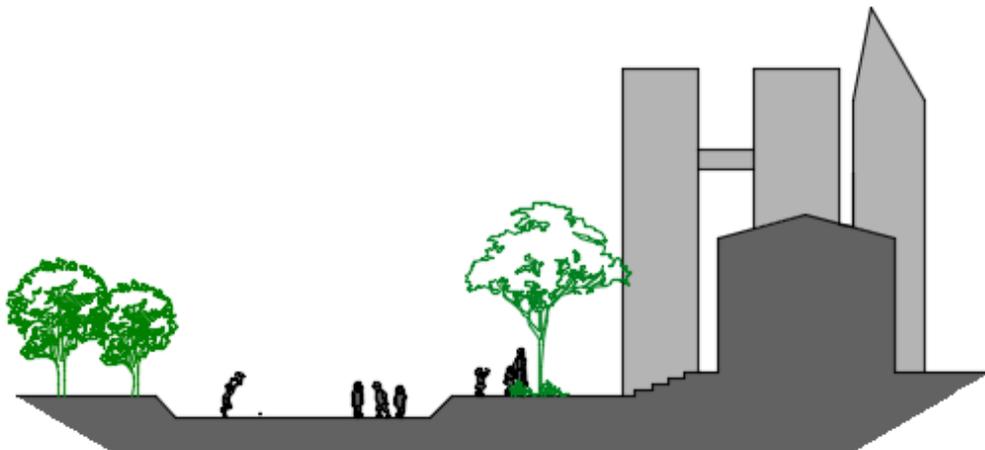


Figura 5.5: Schema esemplificativo di water square caso "asciutto" pari a circa il 90% del tempo dell'anno

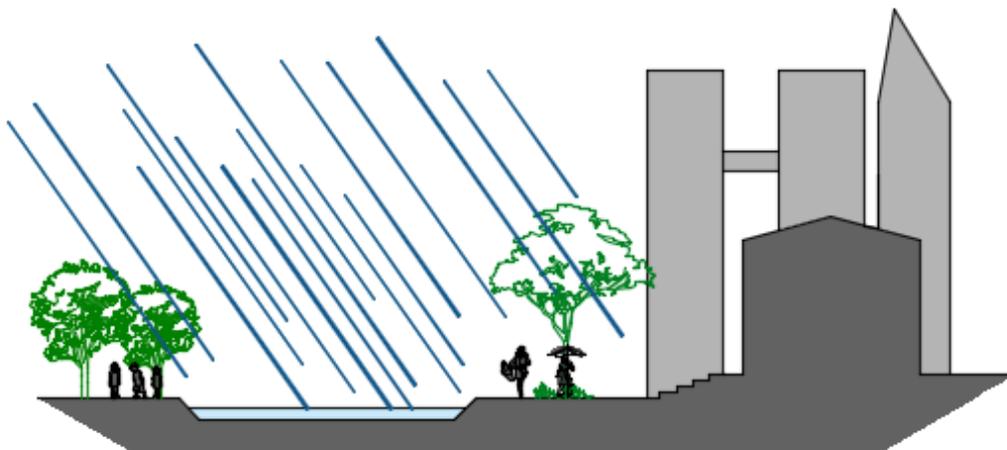


Figura 5.6: Schema esemplificativo di water square caso "allagato" pari a circa il 10% del tempo dell'anno

Nel 90% del tempo le water squares si presentano come aree urbane dedicate al gioco ed il relax poiché risultano "asciutte" ed utilizzabili come spazio pubblico, nel restante 10%, e in funzione all'intensità delle piogge, potranno risultare più o meno "allagate".

Durante le precipitazioni di media o lieve intensità, l'acqua sarà semplicemente filtrata ed immagazzinata in bacini di stoccaggio così da poterla riutilizzare, al contrario, in caso di forti precipitazioni, la piazza, allagandosi, si trasformerà in un vero e proprio bacino di raccolta e decantazione delle acque in modo da gestirne l'immissione in rete senza sovraccaricare il sistema fognario. Usualmente sono progettate con tempo di ritorno pari a due anni, e il tempo di permanenza di acqua in vasca sarà bene non superi le 24-30 ore per motivi igienici.

5.2.2 FASCE FILTRO

I canali inerbiti sono canali rivestiti da erba o piante resistenti all'erosione, costruiti per far defluire le acque di pioggia provenienti dalle superfici impermeabili in maniera regolare, sfruttando la capacità della vegetazione di ridurre le velocità di flusso.

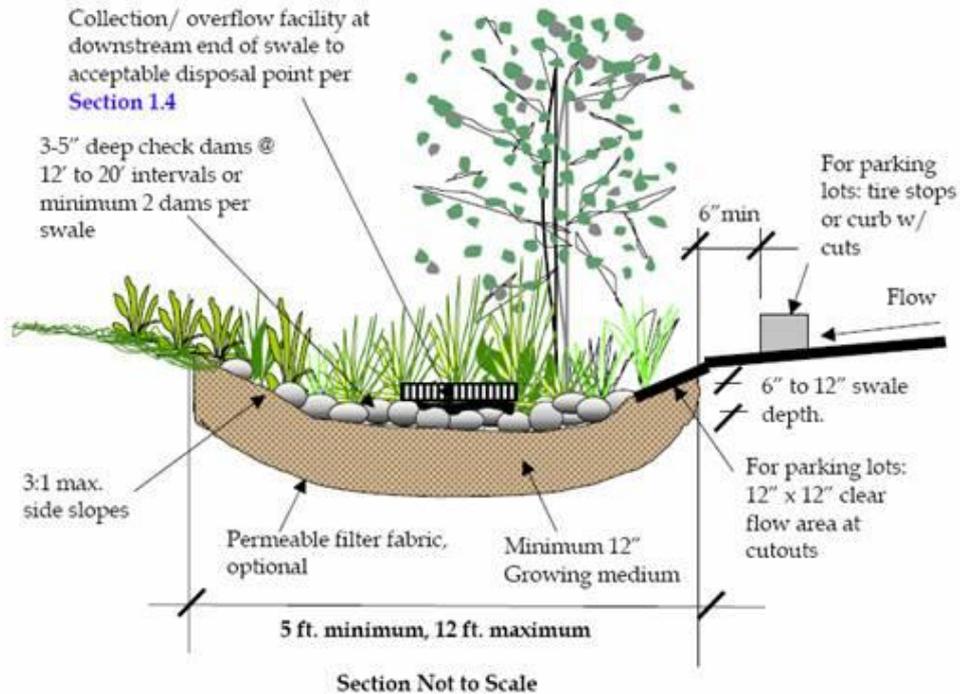


Figura 5.7: Esempio di un canale inerbito [<http://www.ci.sandy.or.us>]

Non vengono di norma progettati per controllare i picchi di portata. Nel caso di pendenze eccessive i canali inerbiti possono presentare sul fondo del letto delle depressioni o delle piccole paratoie in grado di rallentare ulteriormente i flussi e aumentare la capacità di ritenzione idraulica.

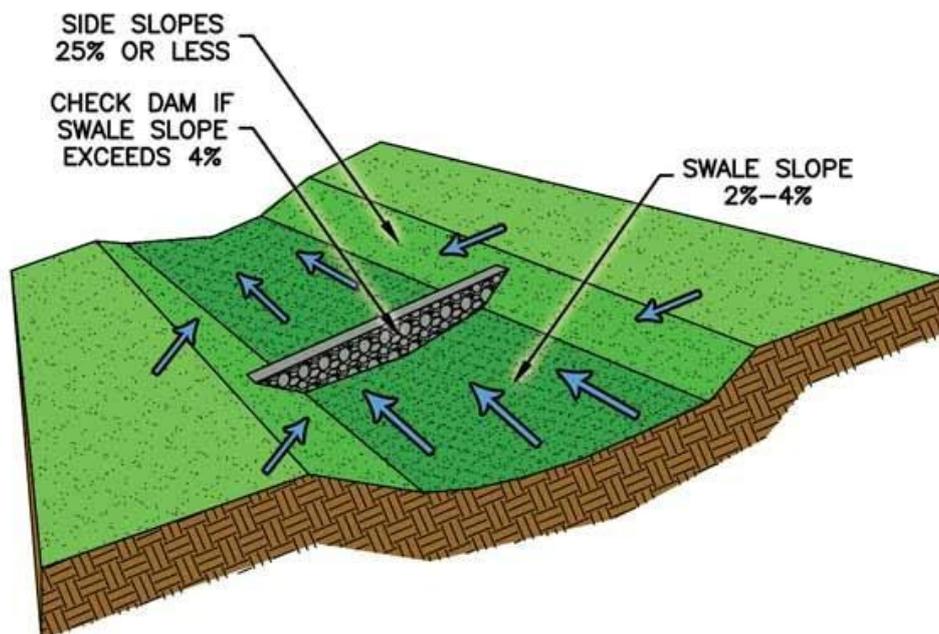


Figura 5.8: Esempio di canali inerbiti con diaframmi [<http://www.fxbrowne.com>]

Gli inquinanti possono essere rimossi dalle acque attraverso processi di filtrazione legati alla vegetazione, per deposizione, oppure in alcuni casi per infiltrazione nel terreno dei nutrienti in forma solubile. Il grado di depurazione raggiungibile dipende soprattutto dal tempo di residenza delle acque nel canale e dal grado di contatto di queste con la vegetazione e con la superficie del terreno. La presenza di strutture come paratoie o depressioni, all'interno del letto, possono migliorare la capacità di rimozione aumentando i tempi di residenza. Il grado di depurazione raggiungibile dipende soprattutto dal tempo di residenza delle acque nel canale e dallo sviluppo della superficie di contatto di queste con la vegetazione e con la superficie del terreno. Nei sistemi vegetati gli inquinanti sono rimossi dalle acque di prima pioggia attraverso processi fisici (sedimentazione e volatilizzazione), chimici (adsorbimento e filtrazione) e biologici (decomposizione biologica, biophytoremediation, fitodegradazione). L'integrazione dei diversi processi è la condizione ottimale.

I parametri idraulici da controllare durante la progettazione di un biofiltro sono: la lunghezza, la pendenza longitudinale e l'altezza del tirante idrico. È opportuno assicurare, per la portata di progetto, un tempo di permanenza dell'acqua di almeno 5 minuti, una velocità di scorrimento non superiore ai 0,3 m/s e fare in modo che il battente idrico sia comparabile all'altezza del manto erboso.

Le sezioni maggiormente utilizzate sono larghe e di diversa forma: triangolare, rettangolare e trapezia. La manutenzione della vegetazione richiede periodiche ispezioni, rasature dell'erba, applicazione di fertilizzanti e ripristino delle aree dilavate e delle macchie scoperte. In particolare i sedimenti depositati possono distruggere il manto erboso e alterare l'altezza degli argini rischiando di compromettere l'uniformità del flusso lungo il canale. Pertanto possono essere necessari periodici livellamenti e semine.



Figura 5.9: Canale inerbito realizzato in un parcheggio [<http://www.minnehahacreek.org>]

5.2.3 BIORETENTION

Questi sistemi sono studiati per simulare l'ecosistema di un bosco con una combinazione di filtrazione del suolo e assorbimento da parte della vegetazione. La superficie vegetata nel sottosuolo comprende un sistema di drenaggio per la raccolta delle acque che hanno attraversato il terreno e lo strato radicale ed è progettata per apparire il più naturale possibile. Questo conferisce all'area un aspetto estremamente attraente. L'acqua di pioggia penetra nel sistema e viene momentaneamente stoccata in uno stagno poco profondo posto all'interno dell'area. Da questo stagno l'acqua in parte filtra lentamente attraverso il terreno ed in parte viene assorbita dalle piante.



Figura 5.10: Esempio di Bioretention in un giardino privato [<http://www.water-research.net>]

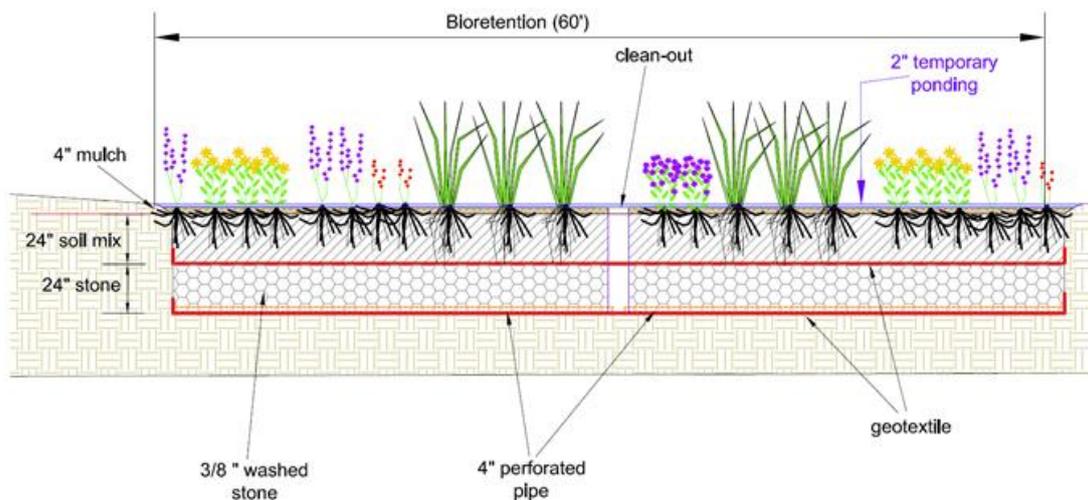


Figura 5.11: Sezione di un Bioretention [<http://www.wetland.org>]

5.2.4 PAVIMENTAZIONI E AREE PERMEABILI

Sono costituite da elementi modulari, caratterizzati dalla presenza di vuoti che vengono riempiti con materiale permeabile in modo da permettere l'infiltrazione delle acqua di dilavamento. Questa tecnologia permette di ridurre l'area impermeabile del sito con conseguente riduzione del deflusso superficiale e del carico idraulico in rete. L'applicabilità di questa soluzione verde è vasta ma è necessario che il contenuto di argilla presente nel sottofondo sia inferiore al 30%.

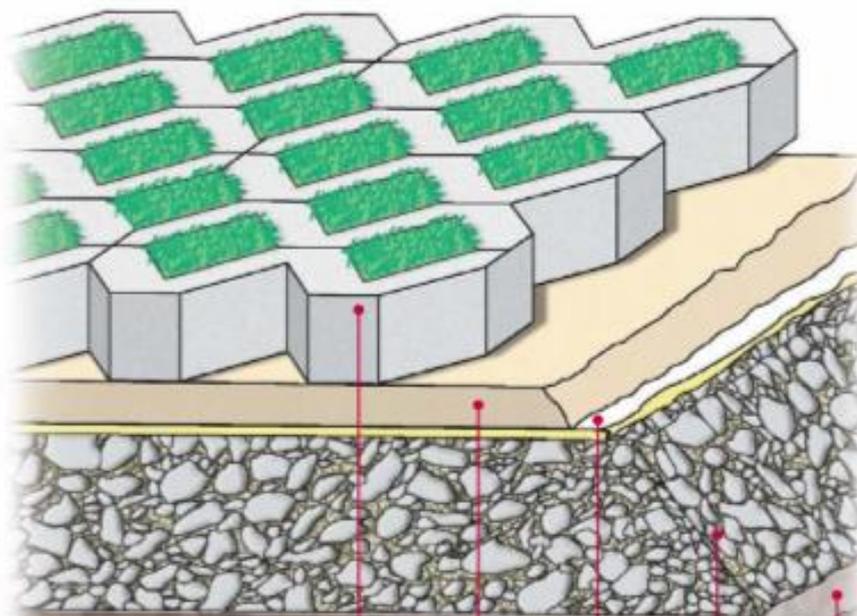
Si suddividono in:

- *Superfici permeabili con sola infiltrazione nel sottosuolo:* l'acqua passa attraverso la superficie permeabile per poi essere rilasciata e filtrata gradualmente negli strati sottostanti. Il dispositivo è composto da una pavimentazione permeabile, con la funzione di assorbire e fare penetrare nello strato sottostante le acque meteoriche che defluiscono sulla superficie, e da uno strato di ghiaia lavata con il compito di facilitare l'infiltrazione nel suolo sottostante; è inoltre dotato di un sistema di troppo pieno per mantenere efficiente il sistema evitando che il dispositivo si saturi.
- *Superfici permeabili con solo scarico delle acque in rete:* l'acqua che si infila nel dispositivo non filtra negli strati sottostanti. È presente una membrana impermeabile alla base del dispositivo che convoglia le acque in un sistema di tubazioni direttamente al corpo ricevente. Questa soluzione viene adottata quando il terreno ha bassa permeabilità, quando l'acqua deve essere conservata e riutilizzata o quando ci sono seri rischi per la falda acquifera. Questa tecnologia sfrutta la sola capacità di ritenzione degli strati superficiali della pavimentazione.
- *Superfici permeabili miste:* queste tecnologie prevedono l'inserimento di una serie di tubi forati che aiutano ad infiltrare e trasferire ad altri sistemi di drenaggio l'acqua. Vengono così sfruttate sia la capacità di infiltrazione che quelle di trasporto ad opera delle tubazioni collocate sotto la pavimentazione.

Superfici permeabili	Materiale	Descrizione	Drenaggio acqua	Utilizzo
<p>Sterrati inerbiti</p> 	Suolo misto ghiaia	Strato di terreno con ghiaia, per migliorare il drenaggio, e seminato con essenze per migliorare il calpestio	Attraverso la natura porosa del terreno	Parcheggi, piste ciclabili e pedonali, cortili, percorsi.
<p>Grigliati inerbiti</p> 	Materiali plastici (PEAD)	Grigliati di materiale plastico riempiti con terreno organico e seminati per il calpestio	Attraverso il terreno inerbito presente nell'alveolo	Parcheggi e strade d'accesso poco trafficate.
	Cls vibrocompresso	Grigliati in cls		Parcheggi e strade d'accesso
<p>Blocchi di cls drenante</p> 	Cls vibrocompresso con finitura superficiale ad alta resistenza	Blocchi in cls posati e vibrati su letto di sabbie. Le fughe possono essere inerbite	Attraverso le fughe tra i blocchi di cls	Strade e piazzali poco trafficati, piazzali
<p>Blocchi di cls filtrante</p> 	Cls poroso con finitura superficiale ad alta resistenza e porosità	Blocchi di cls poroso posati e vibrati su letto di sabbia. Le fughe possono essere inerbite	Attraverso le fughe tra i blocchi di cls	Strade e piazzali poco trafficati, piazzali

Superfici permeabili	Materiale	Descrizione	Drenaggio acqua	Utilizzo
Conglomerati cementizi filtranti 	Cls poroso	Pavimentazione in conglomerati cementizi porosi che drenano l'acqua alla di sotto della loro superficie senza creare deflusso	Attraverso la pavimentazione	Strade e piazzali poco trafficati, piazzali

Tabella 5.1: caratteristiche di alcune tipologie di pavimentazioni permeabili



Pavimentazione in elementi di grigliato erboso

Strato di allettamento con sabbia di spessore 3-5 cm

Manto geotessile a filo continuo del peso di 150 g/m²

Sottofondo in misto granulare miscelato con humus, spessore 20-25 cm

Terreno di base

Figura 5.12: stratigrafia pavimentazione permeabile (www.molinaro.it)

6 MODELLAZIONE DI UNA RETE DI DRENAGGIO: SWMM 5.1 COME STRUMENTO DI CALCOLO OPEN SOURCE

6.1 SWMM 5.1

Il sempre maggiore impatto delle attività umane sull'ambiente urbano e in particolare sulla idrologia urbana ha spinto, fin dagli anni '70, alla realizzazione di numerosi modelli per lo studio dei deflussi urbani. Questi modelli hanno in genere solide basi scientifiche fondate su una più completa e approfondita conoscenza, acquisita in questi ultimi due decenni dei diversi processi fisici del ciclo idrologico nei bacini urbani, e hanno avuto una certa diffusione favorita dalla disponibilità e dall'aumentata potenza di strumenti di calcolo elettronico. I modelli più noti presentano un diverso grado di dettaglio a seconda dei processi idrologici esaminati e del tipo di approccio utilizzato, ma sono in genere del tipo "distribuito" e "fisicamente basato". Le basi fisiche dovrebbero consentire, in teoria, l'assenza nei modelli di parametri di taratura atti a consentire di adattare i modelli a possibili diverse situazioni. Tuttavia, poiché è impossibile simulare in dettaglio tutti i processi idraulici e idrologici che si sviluppano in un bacino urbano durante gli eventi di pioggia, alcune strutture dei modelli possono essere talvolta di tipo concettuale, atte a consentire un'utile rappresentazione complessiva dei processi, ma richiedenti di fatto qualche parametro di taratura.

Il modello SWMM (Storm Water Management Model) è un modello completo di simulazione idrologica e di qualità delle acque di bacini urbani. Il modello viene distribuito gratuitamente dall'U.S. EPA e consente di sviluppare applicazioni riguardanti le acque di prima pioggia e di dilavamento urbano e la gestione idraulica dei sistemi di drenaggio al fine della laminazione delle piene. Il codice di calcolo è in grado di simulare sia gli aspetti idraulici, sia di qualità delle acque delle reti di drenaggio. Si può utilizzare il modello afflussi-deflussi SWMM sia in fase di progettazione sia nel caso di verifica. SWMM si applica per simulare un evento singolo, ma anche per fare delle simulazioni continue con ietogrammi storici e/o sintetici. Nel modello viene considerata una variazione spaziale della pioggia, la ritenzione superficiale viene sottratta tutta alla parte iniziale del pluviogramma, le superfici contribuenti sono permeabili e impermeabili, lo scorrimento superficiale è calcolato tramite l'equazione di continuità e l'equazione di Manning, mentre l'infiltrazione è valutata secondo il metodo di Green e Ampt o con la legge di Horton.

SWMM offre la possibilità di compiere calcoli e simulazioni di tipo idraulico (grazie alla risoluzione e integrazione numerica in forma completa delle equazioni di De Saint Venant) su una rete di canali o condotte, sollecitata da fenomeni meteorici o da ingressi di natura diversa. Il moto in pressione è ammesso grazie allo stratagemma della fessura di Preissman e nei nodi è considerato il volume dei pozzetti in congruenza con i livelli idrici. Il programma opera in ambiente Windows e il suo funzionamento risulta semplice e intuitivo. Per ogni simulazione i risultati possono essere visualizzati con tabelle, grafici, profili longitudinali e direttamente sulla planimetria della rete mediante l'utilizzo di una diversa colorazione dei vari collettori, aspetto quest'ultimo che si è mostrato alquanto pratico soprattutto per la possibilità di visualizzare a colpo d'occhio certi parametri come, ad esempio, il grado di riempimento dei condotti.

SWMM schematizza il bacino idrografico di drenaggio, e i suoi differenti componenti fisici, come vari compartimenti:

- Atmosfera: nel quale vengono definiti i valori di pioggia che la simulazione utilizza per le precipitazioni sul bacino. È possibile lanciare simulazioni di eventi critici di pioggia che vanno a sollecitare il bacino di studio di diverso tipo:

- a "evento singolo", ovvero simulazioni della durata di poche ore; – "in continuo", ovvero simulazioni della durata di diversi giorni o mesi.

- Territorio: può essere suddiviso in diversi sottobacini, ciascuno caratterizzato in maniera differente; riceve afflussi dal comparto Atmosfera, come pioggia, o sottoforma di deflusso superficiale proveniente da altre porzioni di Territorio.

- Groundwater: il quale riceve infiltrazione dal Territorio e trasferisce gli efflussi al Trasporto.

- Trasporto: contiene la rete dei canali, condotte, manufatti. SWMM utilizza una descrizione topologica della rete basandosi su una geometria formata da rami e nodi. I rami e i nodi hanno ciascuno proprietà specifiche che, combinate tra loro, consentono la rappresentazione idraulica dell'intera rete di deflusso. In questo comparto si procede al calcolo della propagazione dell'onda di piena in rete, scegliendo tra diversi

moduli: moto uniforme, onda cinematica e moto vario, basato sulla risoluzione completa delle equazioni di De Saint Venant. In quest'ultima opzione il programma consente di effettuare i calcoli in maniera più accurata, poiché vengono modellati anche i fenomeni di rigurgito, moti a pelo libero e in pressione, inversione del flusso nei rami. Il programma di calcolo risulta essere fondamentale strutturato in maniera modulare, costituito da singoli blocchi, ognuno dei quali ha una specifica funzione e routine di calcolo. Ogni blocco può essere utilizzato singolarmente oppure in cascata, in modo tale che il risultato di uno possa essere inteso come base di partenza per l'utilizzo di un blocco successivo, con la sola eccezione del blocco Runoff, il quale ammette come ingressi esclusivamente i dati meteorologici provenienti dai moduli Rain e Temperature.

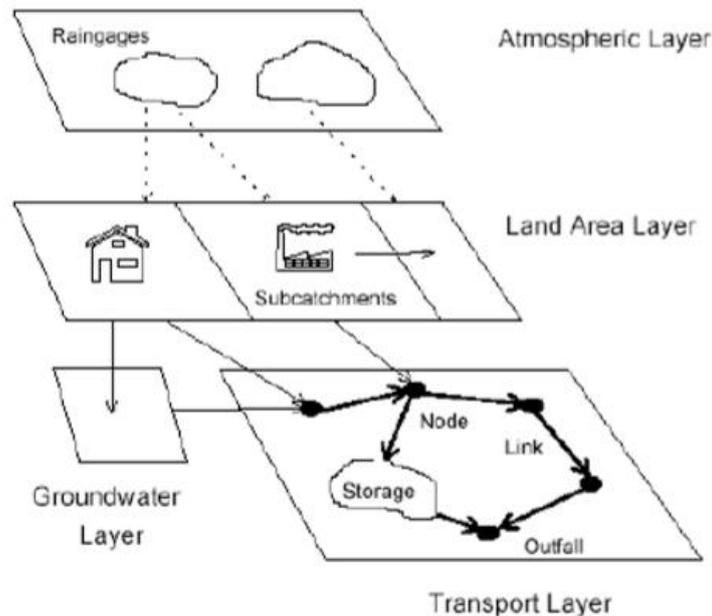


Figura 6.1: Componenti fisici di un bacino idrografico

Il programma è quindi suddiviso in due moduli: uno di Servizio ed un altro Computazionale. Nel primo modulo sono contenute una serie di blocchi che consentono di elaborare i risultati ottenuti, gestire i dati meteo-climatici da inserire nel programma o che vengono utilizzati nel corso di simulazioni di tipo continuo (blocchi Temperature e Rain), di gestire i risultati ottenuti per mezzo di grafici e stampe (blocco Graph), sistemare i valori di output al fine di aggregare i dati, utilizzabili così dai blocchi in cascata (blocco Combine). Il modulo Computazionale contiene i blocchi con i relativi simulatori di processo idrologico ed idraulico.

Il blocco Runoff è il primo passo di una simulazione in SWMM. Questo riceve come input gli eventuali dati meteorologici registrati nei blocchi Rain e/o Temperature, oppure si possono introdurre degli ietogrammi (con intensità di pioggia/tempo o precipitazione totale in mm/tempo) definiti dall'utente. Runoff analizza il processo afflussi-deflussi utilizzando un approccio basato sulla tecnica dei serbatoi non lineari con una opzione per il calcolo dell'apporto idrico derivante dallo scioglimento della neve. Inoltre viene anche analizzato il processo di infiltrazione e di evaporazione, in modo da poter arrivare ad ottenere come risultato il tracciamento dell'idrogramma in ogni ramo della rete studiata. Il blocco può essere impostato per compiere simulazioni per periodi temporali che vanno dai minuti agli anni.

Per di più, Runoff offre anche la possibilità di simulare la qualità delle acque, in termini di analisi dei processi di spostamento dei contaminati dalle superfici scolanti alla rete di fognatura o di scolo. Come uscita di questo blocco si hanno degli idrogrammi che fungono da ingresso alla rete di drenaggio.

Il secondo blocco Transport, va a modellare il comportamento qualitativo e quantitativo del sistema, appoggiando il calcolo idraulico sulla schematizzazione dell'onda cinematica. I risultati consistono in livelli, portate e concentrazioni delle sostanze contaminanti per ogni componente della rete, schematizzata in un sistema di rami e nodi.

Il blocco Storage/Treatment è sostanzialmente una specializzazione di Transport; infatti può simulare fino a tre inquinanti in un serbatoio contenete fino a cinque unità o processi. Il blocco simula inoltre i processi di decadimento del primo ordine associati ad una miscelazione completa, funzioni di rimozione e di dinamica di sedimentazione. Inoltre è possibile calcolare una previsione dei costi di avvio, di gestione e di manutenzione per ogni unità di trattamento.

SWMM consente di modellare la propagazione dei deflussi all'interno della rete mediante la risoluzione completa delle equazioni di De Saint Venant. Risulta essere efficace per la simulazione di reti ad albero o a maglia; vengono modellati, infatti, anche i fenomeni di rigurgito, le inversioni del flusso nei rami, i moti a pelo libero e in pressione. Utilizza una descrizione topologica della rete basata su una geometria rami-nodi; i rami e i nodi hanno caratteristiche specifiche, opportunamente configurabili, che, combinate tra loro, permettono la descrizione idraulica dell'intera rete di deflusso. Nella schematizzazione usata dal blocco, i rami sono sostanzialmente i condotti della rete fognaria (i canali nel caso di sezioni aperte) e consentono di propagare le portate da un nodo all'altro. I nodi rappresentano i pozzetti presenti nel sistema fognario (o i punti di intersezione dei rami, come nel caso dei canali); nei nodi vengono localizzate le portate in ingresso (provenienti dal Runoff ed espressi come idrogrammi di piena generati a partire dal modello afflussi-deflussi) e le portate uscenti dalla rete. SWMM è in grado di rappresentare i vari processi idrologici che producono il deflusso dalle aree urbane e non, i quali includono:

- precipitazioni ;
- evaporazione d'acqua;
- accumulo e scioglimento della neve;
- infiltrazione di pioggia negli strati insaturi del terreno;
- percolazione di acqua infiltrata negli strati dell'acqua freatica;
- interflow fra acqua freatica e la rete di fognatura.

La variabilità spaziale di questi processi è realizzata dividendo la zona di studio in sottobacini, ognuno dei quali sarà diviso sulla base dell'area permeabile ed impermeabile. Il deflusso superficiale può essere diretto fra i sottobacini, o nei punti di entrata di una rete di fognatura.

Le precipitazioni in SWMM sono definite attraverso l'attribuzione dei Rain Gages, che forniscono i dati di pioggia sui bacini. Si possono inserire manualmente attraverso appositi editor, oppure si possono caricare da un file di testo esterno. Le principali informazioni sono relative all'intensità o al volume di pioggia, e all'intervallo di registrazione dei dati (ogni ora, 30 minuti, 15 minuti, ...).

Il deflusso superficiale è caratterizzato da quella parte di precipitazione che scorre sulla superficie del terreno e si raccoglie successivamente nella rete di scolo. Sottraendo le perdite all'afflusso meteorico totale, rappresentato dalla pioggia lorda, si ricava la pioggia netta, ossia quella quota di precipitazione che contribuisce al deflusso superficiale.

Ogni superficie dei sottobacini è trattata come un serbatoio non-lineare. Gli ingressi sono rappresentati dalla precipitazioni, dalle piogge e/o scioglimento delle nevi, mentre le uscite sono rappresentate dall'evaporazione, dall'infiltrazione e dal deflusso superficiale. Il volume del serbatoio schematizzato, è rappresentato dalla massima capacità di immagazzinamento delle depressioni superficiali. Il deflusso superficiale per unità di area Q si innesca ogni volta che l'altezza d'acqua nel serbatoio supera il valore della depressione superficiale d_s e il flusso che fuoriesce è dato dall'equazione:

$$Q = W \cdot \frac{1.49}{n} \cdot (d - d_p)^{5/3} \cdot i^{1/2}$$

Dove:

- Q = deflusso superficiale;
- W = larghezza del bacino (Width);
- n = coef. di scabrezza di Manning;
- d = altezza d'acqua;
- d_p = altezza delle depressioni superficiali;
- i = pendenza del sottobacino.

La rete di drenaggio è idealizzata come una serie di rami, ciascuno associabile ad una forma geometrica, connessi tra loro in corrispondenza dei nodi.

Le proprietà costanti dei rami riguardano il tipo di sezione, la lunghezza, la pendenza e la scabrezza; vengono invece determinate ad ogni passo di calcolo la portata, la velocità, l'area bagnata del flusso, il raggio idraulico e la larghezza del pelo libero. Queste ultime tre variabili sono funzione del livello idrico istantaneo.

La portata Q è invece la variabile indipendente fondamentale dei rami, si assume costante ad ogni time step di calcolo in ogni ramo mentre la velocità ed l'area bagnata del flusso, o livello, sono invece grandezze variabili nello stesso ramo.

Le proprietà costanti associate ai nodi sono la quota di scorrimento e la quota di immissione (o emissione) del ramo rispetto al fondo; quelle determinate ad ogni passo di calcolo e funzione del livello idrico nel nodo sono il volume, l'area superficiale libera e il carico idraulico H . La variabile indipendente fondamentale nei nodi è il carico idraulico, variabile nel tempo, ma costante nel singolo nodo durante un passo di calcolo. Gli afflussi e deflussi avvengono in corrispondenza dei nodi del sistema. La variazione di volume nel nodo durante un dato passo di calcolo costituisce la base per i calcoli seguenti di portata e carico idraulico.

Il programma utilizza per il calcolo le equazioni di De Saint Venant:

$$\frac{1}{b(h)} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial t} + gA \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = gA \cdot (I_0 - I_f)$$

Dove:

- A = area bagnata;
- Q = portata;
- b = larghezza del pelo libero;
- x = distanza lungo l'asse del condotto;
- g = accelerazione gravitazionale;
- H = carico idraulico totale;
- z = livello dello scorrimento;
- h = livello idrico;
- I_0 = pendenza della condotta;
- I_f = pendenza locale linea dei carichi.

6.2 SCHEMATIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI DI UNA RETE DI DRENAGGIO

Una rete di canali, per poter essere implementata in SWMM, necessita di essere schematizzata come un insieme di R rami e N nodi, ciascuno con le proprie caratteristiche.

I nodi rappresentano i punti dove il sistema di trasporto interseca i vari rami. Fisicamente rappresentano la confluenza dei canali superficiali o, nel caso si utilizzi il programma per sistemi di fognature, i pozzetti. Alcuni nodi ricoprono un ruolo importante nella riproduzione schematica della rete che si compie in SWMM, rappresentano infatti il luogo di immissione dei deflussi superficiali; tutto il deflusso del sottobacino di calcolo viene schematizzato dal software in modo tale da convergere in un unico punto, rappresentato dal nodo di inizio del canale di scolo. I principali parametri di input per un nodo sono la quota di fondo, la quota del terreno e gli eventuali afflussi in ingresso.

I rami sono le condotte che permettono il transito dell'acqua da un nodo all'altro del sistema.

Nel processo di schematizzazione della rete idraulica, ogni singolo canale deve essere suddiviso in più rami e nei corrispettivi nodi. Ogni ramo è schematizzato come un condotto con caratteristiche costanti di forma, pendenza, scabrezza, e pertanto ogni variazione di pendenza del canale, confluenza di più collettori, salti di fondo, variazioni di profondità o di sezione devono essere rappresentati con rami differenti. La forma del canale può essere scelta utilizzando un apposito menù del programma, grazie al quale è possibile selezionare una serie di sezioni di formati standard, tutte opportunamente configurabili nelle dimensioni a seconda delle esigenze di rappresentazione. In uno stesso nodo possono convergere ovviamente più rami, ognuno con altezza differente rispetto al fondo.

SWMM permette la schematizzazione di organi regolatori, come ad esempio gli scaricatori (*Weir*). Esistono diverse possibilità di scelta nel tipo del manufatto, come ad esempio laterale, frontale, trapezoidale, solo per citarne alcuni. Lo scaricatore laterale viene schematizzato in SWMM come un collegamento, ad esempio, tra un nodo ed un *outfall*. I parametri di input per questo dispositivo sono l'altezza della soglia (h), la lunghezza del manufatto (L) ed un coefficiente d'efflusso (C_w). La portata che fuoriesce viene calcolata mediante la seguente formula:

$$Q = C_w \cdot L \cdot h^{\frac{5}{2}}$$

Altro elemento fondamentale per la rappresentazione della rete risulta essere l'*orifice*. Attraverso gli *orifices* è possibile schematizzare in SWMM manufatti quali paratoie o diaframmi. Sono rappresentati come un collegamento tra due nodi. Possono essere di sezioni circolare o rettangolare e situati alla base del nodo d'ingresso (*Bottom*) o ad una determinata quota rispetto alla base (*Side*). È possibile dotarli di una valvola di ritegno. Le portate che transitano attraverso quest'organo sono definite dalla seguente espressione:

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gh}$$

dove μ rappresenta un coefficiente d'efflusso, A la sezione del manufatto, h la differenza di quota del pelo libero tra nodo d'ingresso e d'uscita, g l'accelerazione di gravità.

6.3 PROCESSO DI CONTROLLO PID IN SWMM

Un processo PID (Proporzionale, Integrativo, Derivativo) è costituito da un loop di controllo dove si minimizza un certo valore d'errore costituito dalla differenza tra output del processo controllato e un valore definito di set point. Il setting che il controller esercita sul processo dipende da tre fattori: proporzionale, integrativo e derivato. Nello specifico parametro proporzionale dipende dal valore corrente di errore, il derivato misura l'errore che prevedibilmente si avrà allo step successivo, l'integrativo è legato alla storia pregressa del segnale di errore.

L'equazione che definisce un generico controller PID a tempo continuo risulta essere:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^T e(t) \cdot dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Dove:

- $e(t)$ = setpoint(t) - output(t-1);
- $u(t)$ = output del controller al tempo t ;
- K_p, K_I, K_D = costanti rispettivamente proporzionale, integrativa e derivativa.

Se la rete di drenaggio è controllata da un PID, $e(t)$ è il valore desiderato come ad esempio il grado di riempimento della tubazione, $u(t)$ sarà il grado di apertura della paratia che mi definisce il livello d'acqua corrente nella tubazione.

SWMM utilizza l'equazione appena esposta in modo un po' differente:

$$u(t) = K_p \cdot [e(t) + \frac{1}{K_I} \cdot \int_0^T e(t) \cdot dt + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt}]$$

Si nota quindi un peso maggiore nella formula da parte del parametro proporzionale. Quando si ha come riferimento un elemento a monte dell'organo regolatore, che sia la portata di un ramo o il livello di un nodo, il modello SWMM 5.1. richiede un valore del coefficiente K_p negativo, mentre se il controllo viene effettuato su un elemento a valle, tale coefficiente sarà positivo.

La sezione aperta della paratoia può cambiare grazie a delle regole di controllo, in SWMM si possono assumere dei parametri per regolare l'apertura delle paratoie o il livello di un nodo oppure la portata che transita in un ramo. Il modo più semplice per regolare l'apertura di una paratoia nella realtà tuttavia risulta essere tramite la misura di livello dell'acqua presente nel nodo a monte. Il grado di apertura è determinato dalla variazione del livello del nodo di monte rispetto ad un valore prefissato di set point, è attuato attraverso l'uso della logica PID assegnando i tre valori delle costanti caratteristiche K_p , K_i e K_d .

6.4 MODELLAZIONE DI UNA RETE REALE A BOLOGNA: AREA FOSSOLO

Per implementare una rete esistente con il sistema di RTC, applicando la logica PID, è stata scelta la zona Fossolo di Bologna. Quest'area è stata infatti soggetta a numerosi progetti di ricerca e relative campagne di misura, sia in termini quantitativi per la misura delle portate che qualitativi, per la misura della qualità delle acque in tempo di pioggia.

L'area drenata è di circa 48 ettari principalmente urbanizzata, quindi impermeabile, caratterizzata da un coefficiente di efflusso medio del 60% circa. Gli edifici presenti all'interno del bacino sono quasi esclusivamente ad uso residenziale e ad attività commerciali di modesta importanza. Il numero di residenti risulta pari a circa 10.000 unità. La rete di drenaggio presente, è di tipo misto ad albero, risalente agli anni '60. Lo sviluppo complessivo è di circa 6 km e termina con un condotto di sezione policentrica (sezione di tipo Vigentino) con altezza interna massima pari a 1,44 m e larghezza interna pari a 1,80 m. Tale condotto è stato realizzato in opera in muratura, mentre i rimanenti condotti sono prevalentemente prefabbricati in calcestruzzo, con sezioni circolari e ovoidali. La rete oggetto di studio è caratterizzata da 203 nodi con un ricoprimento medio di circa 4 metri, e 202 rami, caratterizzati da una pendenza media dello 0,6% che procede da sud, verso nord.

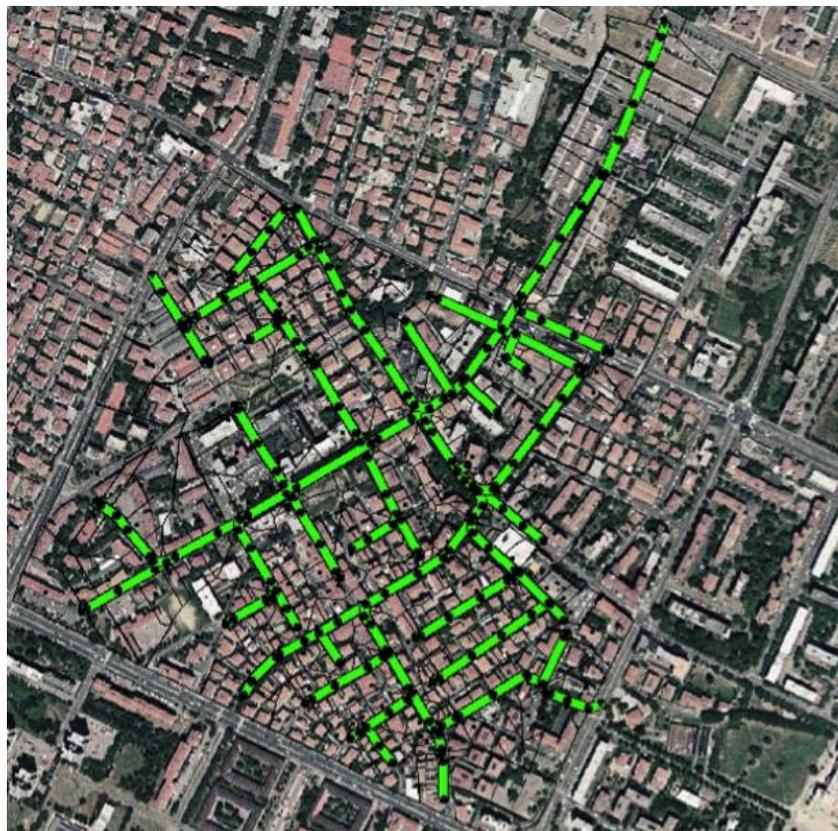


Figura 6.2: Schema della rete fognaria dell'area "Fossolo" sovrapposta all'immagine satellitare del quartiere in oggetto.

Per i campionamenti, nelle precedenti attività di ricerca, erano stati installati due pluviometri, due misuratori di livello ed un sistema di campionamento automatico delle acque.

Il misuratore è posto a ridosso della parete più vicina all'asse del condotto, ad una distanza dal fondo di circa due metri. Il sensore è ad ultrasuoni, di classe IP68, quindi resistenti ai fluidi corrosivi e completamente sommergibile. La precisione dello strumento è di circa 3 mm per distanze misurate rispetto al fondo, inferiori a 3 m.

I valori di portata sono quindi dedotti dalle misure di livello attraverso una scala di deflusso tarata direttamente sulla sezione fino a 70 cm dal fondo ed estesa a tutto il condotto adottando lo stesso coefficiente di scabrezza. I dati rilevati dal misuratore di livello sono poi inviati ad un data-logger per l'elaborazione del segnale. Tale apparecchio consente inoltre di visualizzare in tempo reale la misura del livello.

Tutte le misure acquisite, sia di pioggia che di livello, sono inviate ad una unità centrale di memorizzazione che consente poi lo scarico delle stesse tramite un PC, collegato ad internet. Sul condotto terminale della rete fognaria, in prossimità del misuratore di livello è stato installato il campionatore automatico. Per rendere operativo il sistema di campionamento automatico è stata installata all'interno del condotto di fognatura una piccola pompa esterna sommersa che preleva circa 1 l/s con 5 m di prevalenza. La pompa viene controllata dall'Unità Centrale del Sistema di Acquisizione Dati che si attiva solamente quando piove ed il livello idrico nel condotto supera il livello di soglia di 0,20 m, sufficiente a garantirne il corretto funzionamento.

La pompa esterna rimane poi in funzione fino a quando il livello non scende al di sotto della soglia citata. La tubazione di mandata raggiunge il campionatore all'ingresso del quale è installata una piccola pompa peristaltica che ne controlla i circuiti interni come pure il riempimento delle bottiglie di campionamento. Il circuito di lavaggio dei condotti entra in funzione ad intervalli temporali regolari al di fuori dei periodi di funzionamento della pompa esterna per impedire che si formino intasamenti ed ostruzioni nei circuiti interni del campionatore.

6.4.1 CALIBRAZIONE E TARATURA DEL MODELLO

Realizzato il modello in SWMM, inserendo le caratteristiche principali relative alla geometria e alla struttura della rete, è stato calibrato il modello sulla base dei dati forniti dalle campagne di misurazione. Attraverso la calibrazione si ricercano i valori dei parametri che permettono un buon accordo tra le portate e i volumi registrati e le analoghe grandezze ottenute simulando il modello, con riferimento ad un ben individuato campione di eventi afflussi - deflussi disponibili. Il passo successivo è la verifica del modello, per valutarne le prestazioni con i parametri di calibrazione, ma su un campione di eventi differente rispetto a quello utilizzato in fase di calibrazione.

La calibrazione è fatta di più fasi:

- scelta dei parametri, che dipende dalla struttura del modello adoperato e da considerazioni che nascono dall'opportunità di limitare il numero dei parametri da tarare, escludendo quelli rispetto ai quali il modello è poco sensibile.
- L'analisi di sensibilità che consiste nell'accertare l'incidenza della variazione di ciascun parametro del modello sul risultato finale; essa è molto utile in quei casi in cui non si disponga di casi sperimentali di confronto e si voglia trasferire l'uso del modello a casi diversi da quelli per i quali esso è stato tarato.
- Scelta di un criterio di valutazione che può essere di tipo euristico, ovvero conseguire alla definizione di una determinata funzione obiettivo. Con i criteri euristici, la valutazione della bontà delle prestazioni del modello si basa su un giudizio pseudo-oggettivo dell'utente che confronta, a seconda dello scopo per cui viene adoperato, il modello, portate al colmo registrate e simulate, volumi dell'evento di piena. Giudizi più oggettivi si ottengono facendo statistiche dei rapporti tra volumi e portate osservati e i corrispondenti valori simulati. Ovviamente si utilizzeranno quei parametri che hanno fornito valori di questi rapporti prossimi all'unità.

In maniera ancora più oggettiva la calibrazione si effettua ricorrendo al calcolo basato sulle funzioni obiettivo, uno strumento al quale si ricorre quando l'informazione sperimentale disponibile è affidabile e quantitativamente consistente. In questo caso, la calibrazione si forma di un ulteriore passo, che è rappresentato dalla scelta del metodo di ottimizzazione ed, eventualmente, dal criterio di convergenza. Una volta che il modello è stato calibrato, si possono usare le stesse funzioni di ottimizzazione per la validazione: in questa fase esse vengono definite funzioni d'errore. L'errore soglia che si vuole conseguire lo si può fissare a zero, o ad un valore prossimo allo zero: quanto più la funzione soglia è prossima a questo valore, tanto più la verifica risulta soddisfacente.

TARATURA E VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO

La calibrazione del modello precede ogni applicazione pratica e permette di determinare i valori di quei parametri che permettono di massimizzare l'attendibilità della simulazione. Nel caso di studio, la calibrazione è stata eseguita confrontando i valori di portata calcolati dal modello, con i valori di portata ottenuti attraverso una scala di deflusso, tramite il sensore di livello inserito nel collettore 33-86 su una serie di 9 eventi (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8, E10) raccolti tra il 1994 e il 1995.

Per ogni evento disponibile si è modificato manualmente il valore di diversi parametri, per successivi tentativi, affinché gli idrogrammi calcolati mostrassero una sufficiente corrispondenza con quelli osservati.

In particolare i parametri in oggetto sono:

- *N-imperv*: coefficiente di Manning delle aree impermeabili;
- *N-perv*: coefficiente di Manning delle aree permeabili;
- *Dstore-perv*: perdite dovute a depressioni superficiali, aree permeabili;
- *Dstore-imperv*: perdite dovute a depressioni superficiali, aree impermeabili;
- *Slope*: pendenza del sottobacino.

Successivamente sono stati mediati questi parametri sui 9 eventi, ottenendo dei valori unici di calibrazione.

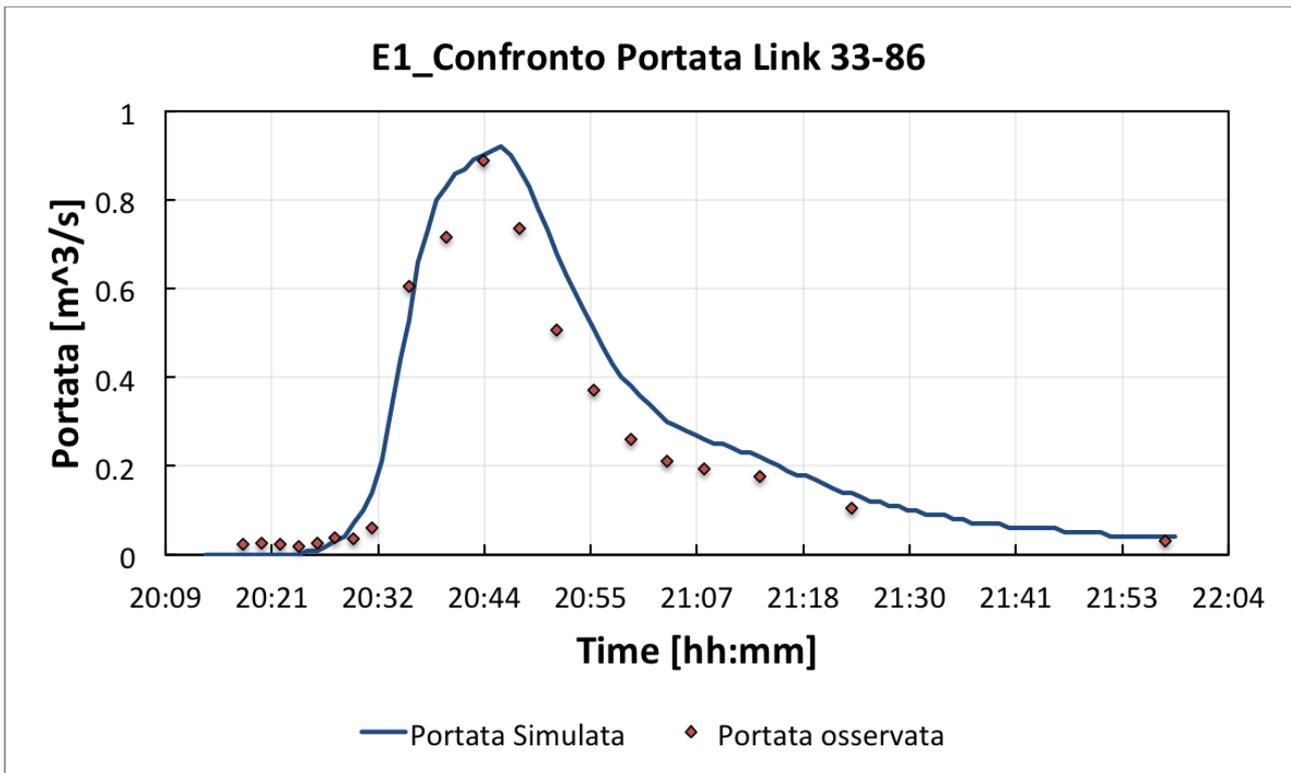


Figura 6.3: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 25/04/1994

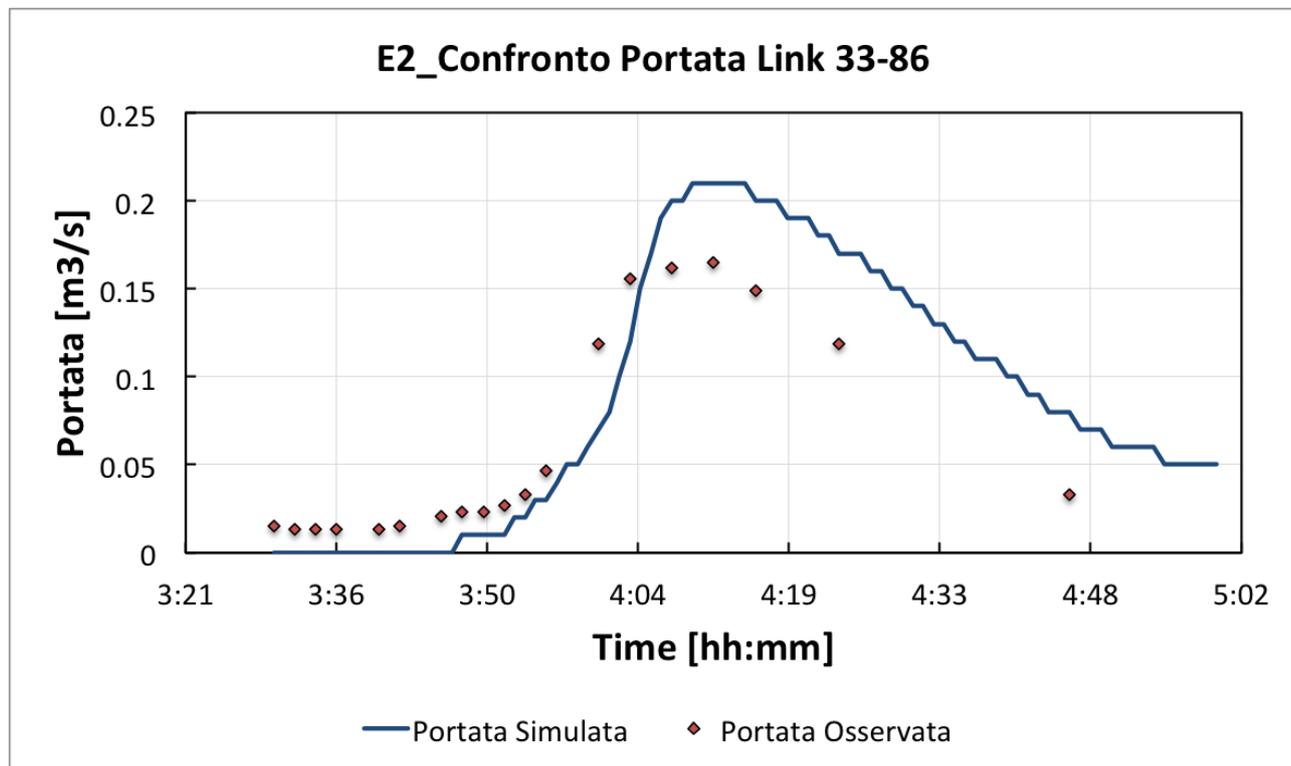


Figura 6.4: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 02/05/1994

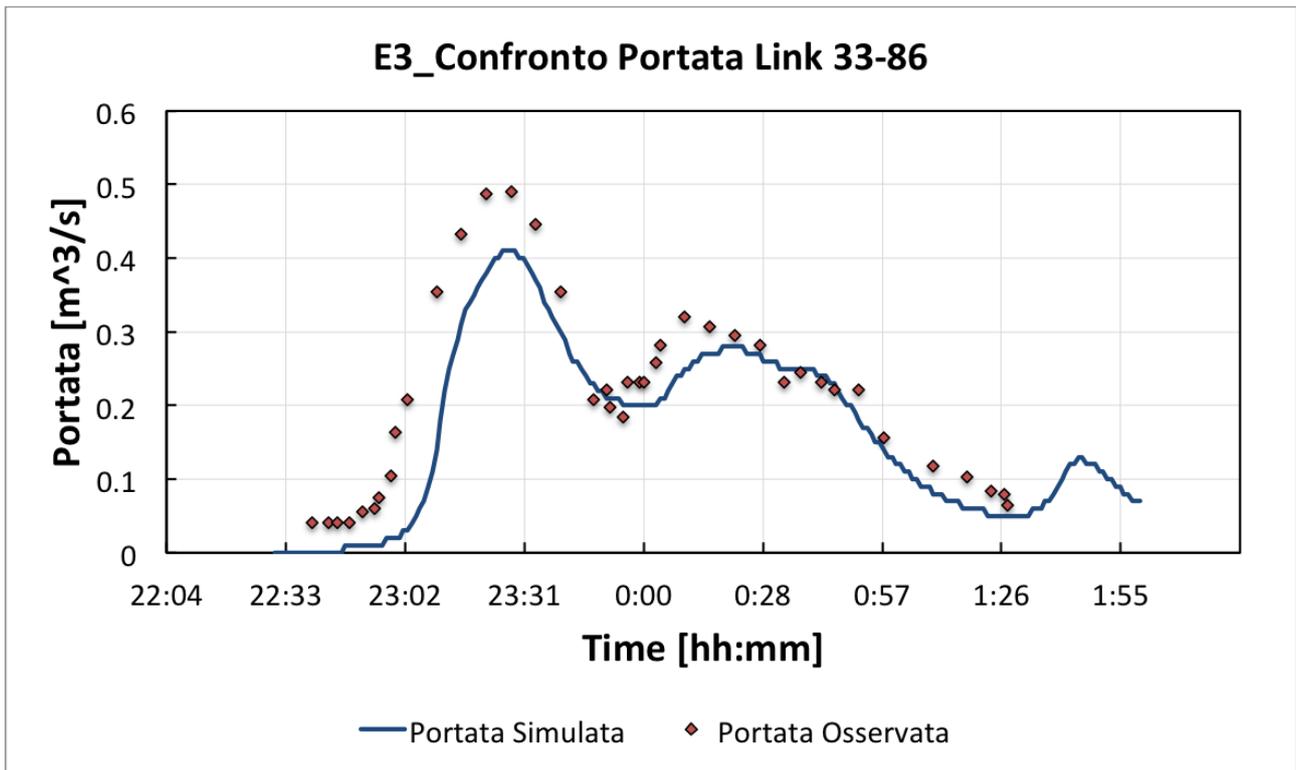


Figura 6.5: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 21/09/1994

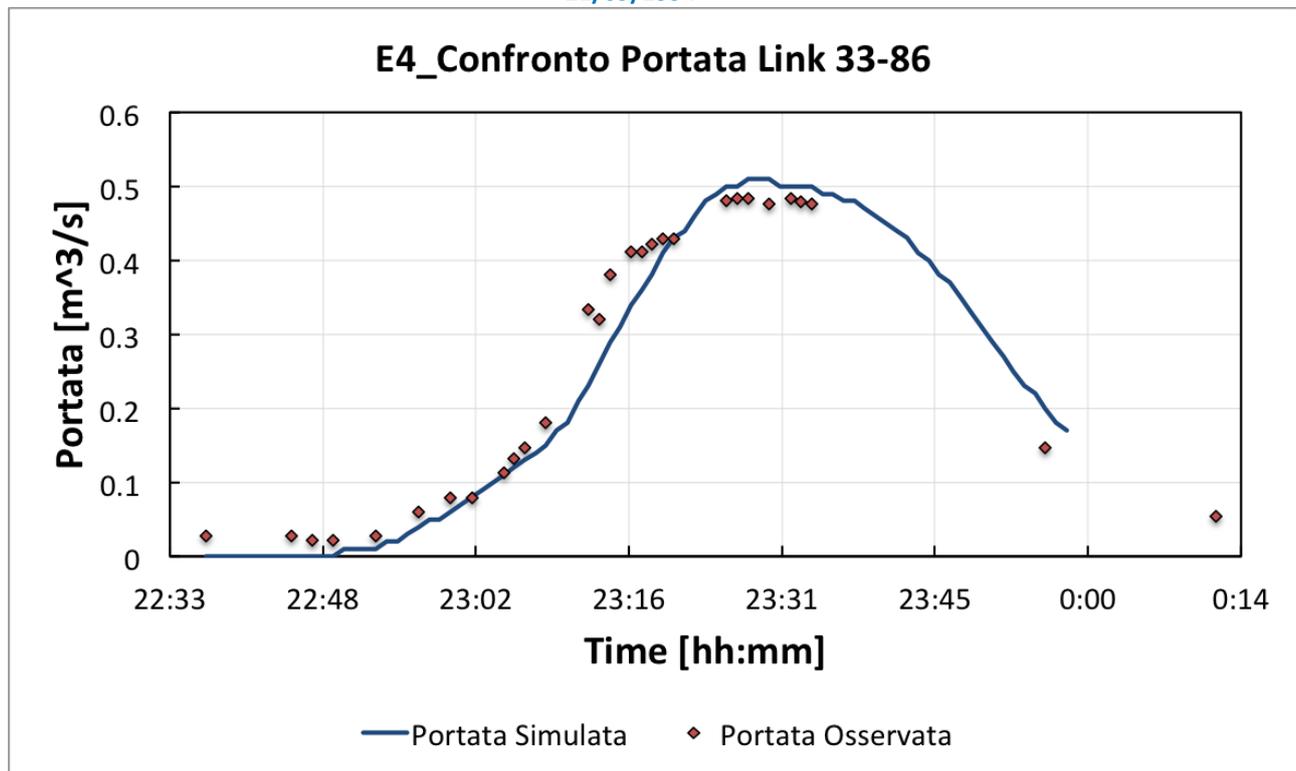


Figura 6.6: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 23/10/1994

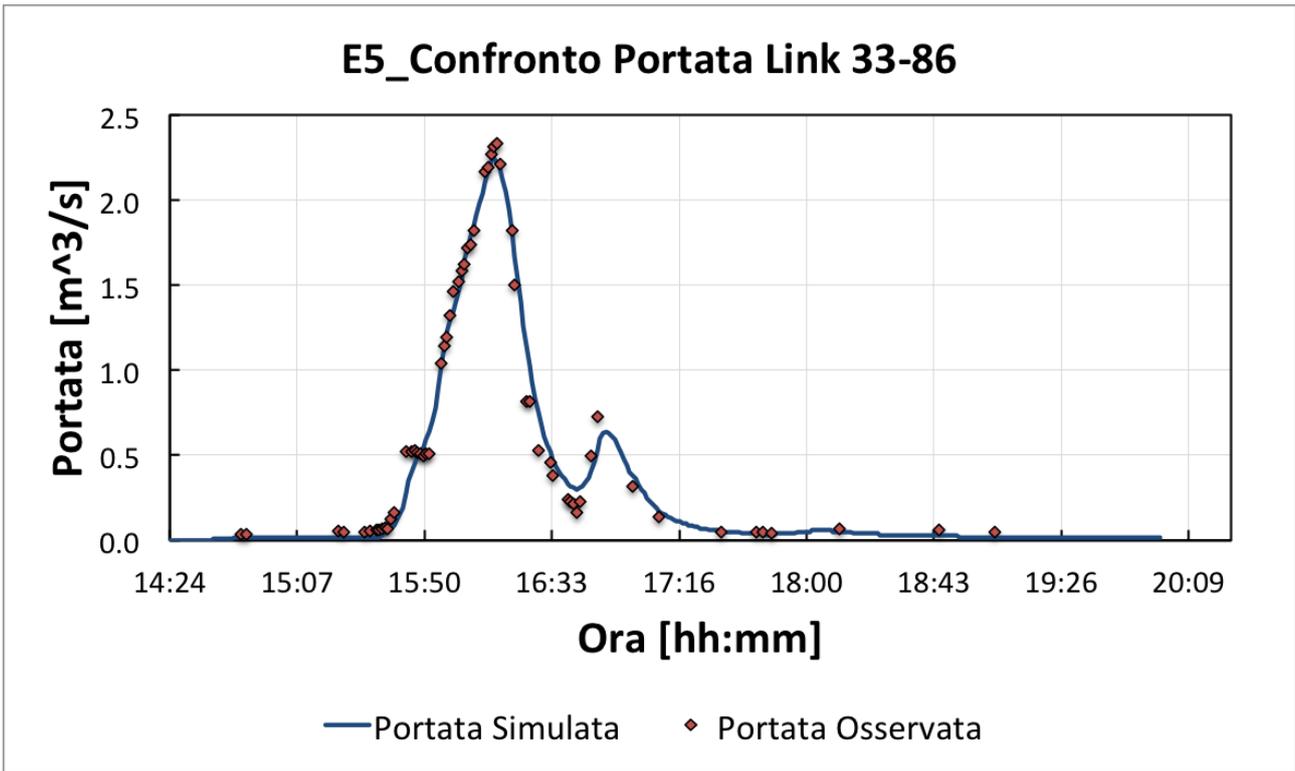


Figura 6.7: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 28/10/1994

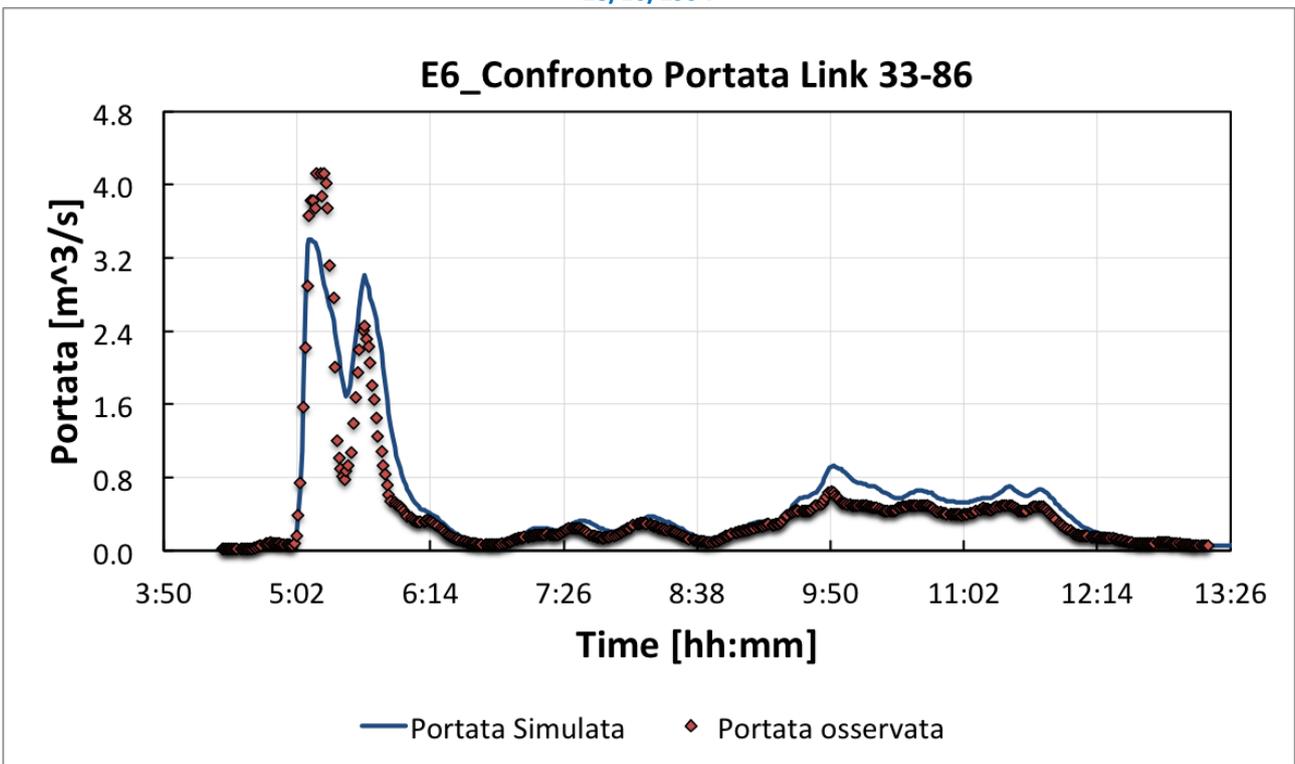


Figura 6.8: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 23/06/1995

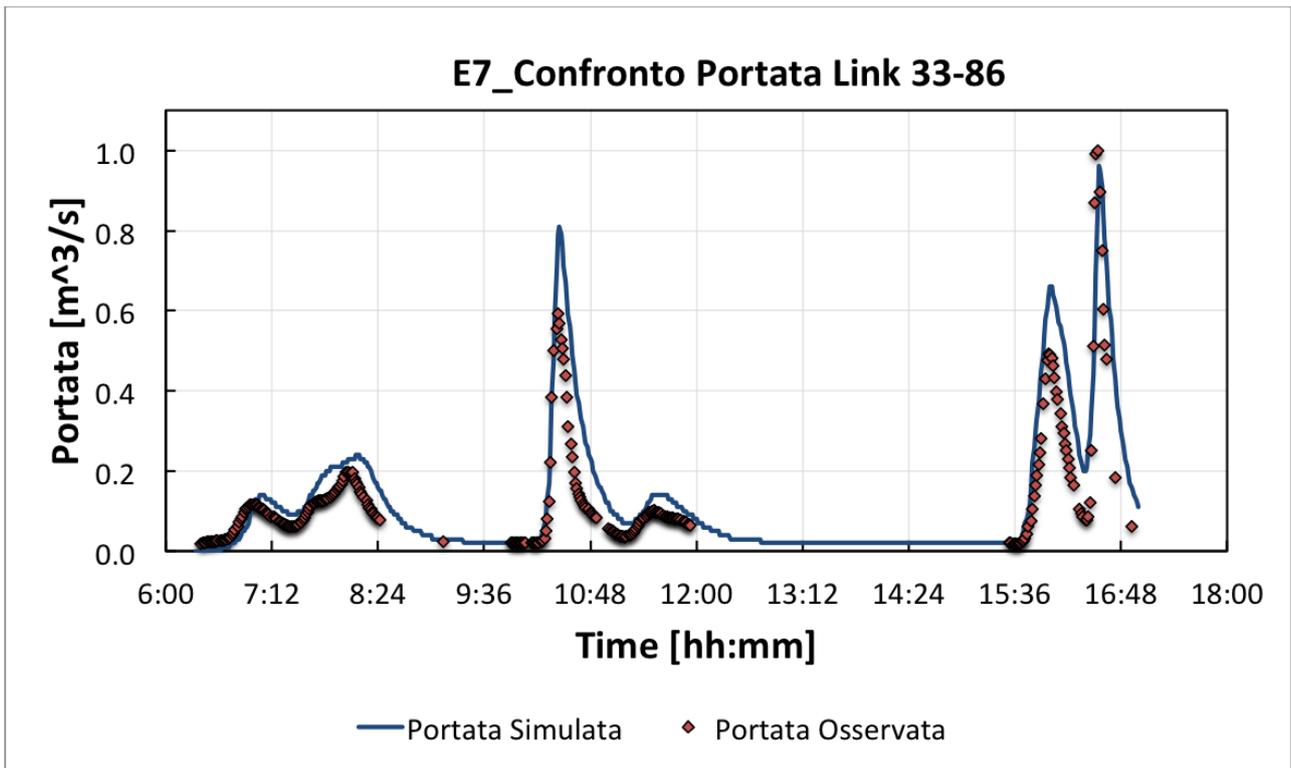


Figura 6.9: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 13/09/1995

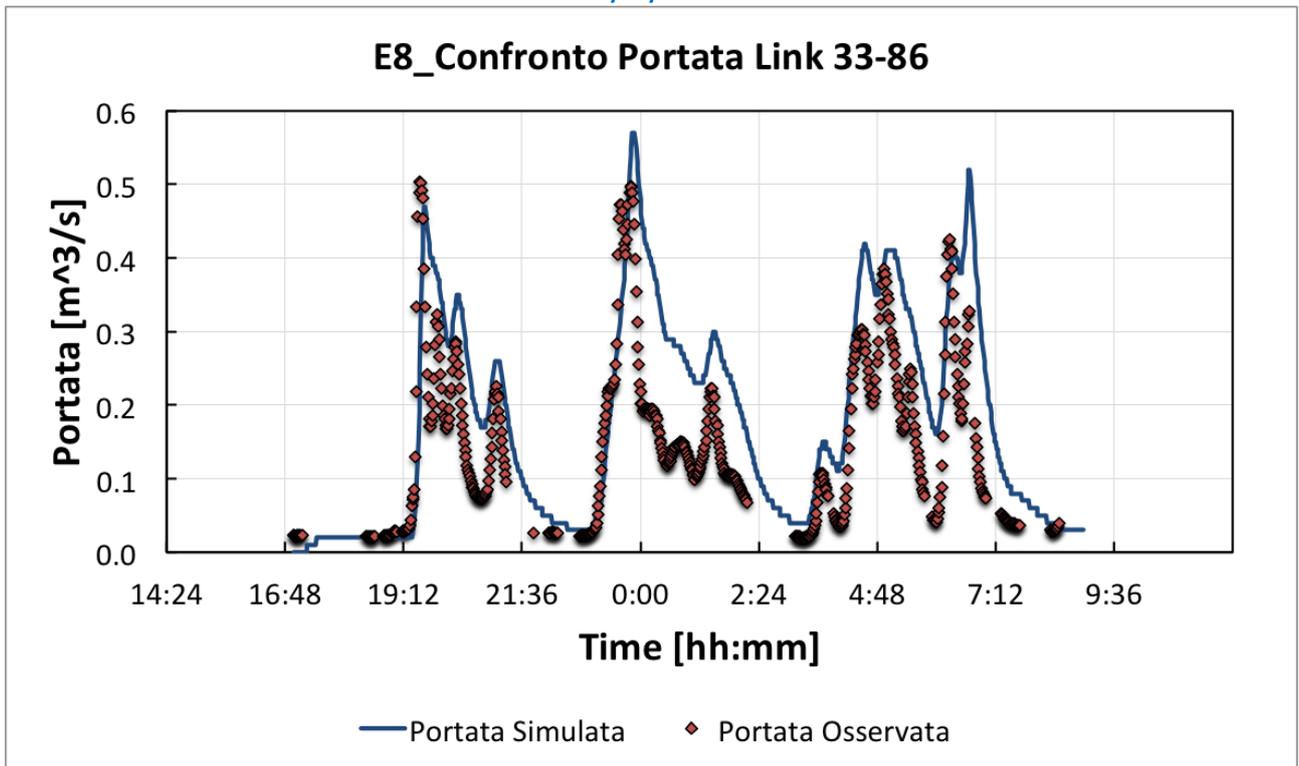


Figura 6.10: confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 13/11/199

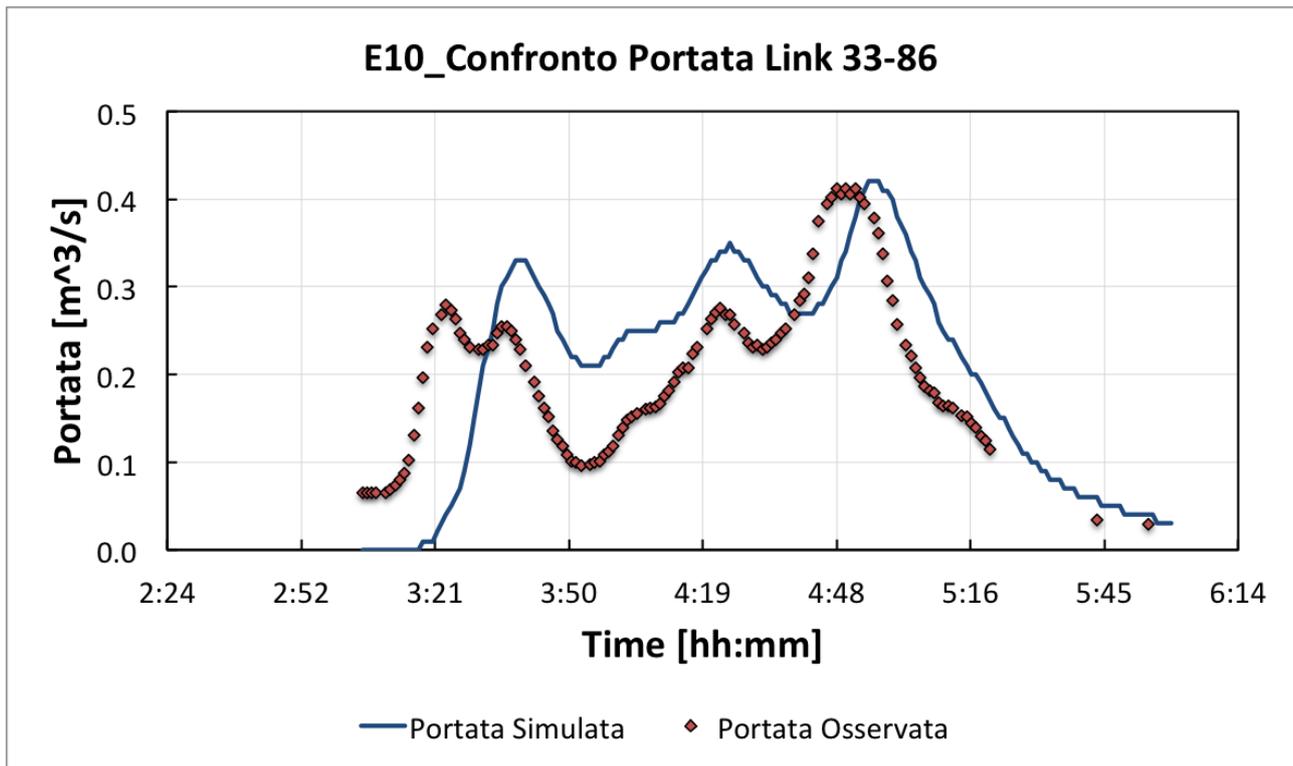


Figura 6.11: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 02/04/1996

Nella Tabella 6.1 sono riportati i parametri utilizzati nella calibrazione e nella Tabella 6.2 i valori medi per la modellazione dell'area di studio.

Tabella 6.1: Parametri utilizzati nei diversi eventi per la calibrazione

EVENTO E1				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.009	0.09	0.8	2.5	1.4
EVENTO E2				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.1	0.3	0.8	4	1
EVENTO E3				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.015	0.1	0.3	4	3
EVENTO E4				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.01	0.1	0.2	2.5	1.5
EVENTO E5				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.015	0.3	1	4	3
EVENTO E6				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.01	0.09	0.4	2	3
EVENTO E7				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.008	0.3	1	2.5	0.8
EVENTO E8				

N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.003	0.3	1	2.5	0.8
EVENTO E10				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.006	0.06	1	2.8	0.5

Tabella 6.2: calcolo dei parametri medi per la modellazione della rete

MEDIA				
N imp	N perm	D-store Imp	D-store Perm	Slope
0.02	0.16	0.67	2.98	1.67

Si è inoltre quantificato l'errore mediante una funzione obiettivo, o meglio una funzione errore, in grado di quantificare l'efficienza della simulazione. Più la funzione errore è prossima allo zero, tanto più la verifica fornisce risultati soddisfacenti. Considerando un idrogramma costituito da n punti analizzando lo stesso in termini di portate, la funzione obiettivo misura lo scarto tra portata osservata e portata simulata. In particolare, si sono utilizzate:

- Deviazione quadratica totale: misura lo scarto per ogni passo temporale i di un singolo idrogramma fra le portate osservate (Q_o) e quelle simulate (Q_s):

$$OF_1 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi})}$$

- Deviazione totale quadratica obliqua: viene attribuito un peso maggiore ai più alti valori di portata dell'idrogramma:

$$OF_2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n |Q_{oi}^2 - Q_{si}^2|}}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi})}$$

Queste formule sono state applicate per ogni evento utilizzato per la calibrazione, in particolare per tutti gli eventi si è ottenuto un errore in percentuale inferiore al 2,5% in riferimento alla funzione obiettivo OF_1 e inferiori allo 6,5% in riferimento alla OF_2 . Successivamente si è proceduto alla validazione del modello, quindi applicando i parametri medi determinati attraverso la calibrazione, su un evento non utilizzato nella fase precedente, confrontando sempre le portate osservate e misurate nel collettore 33-86 (Figura 6.12).

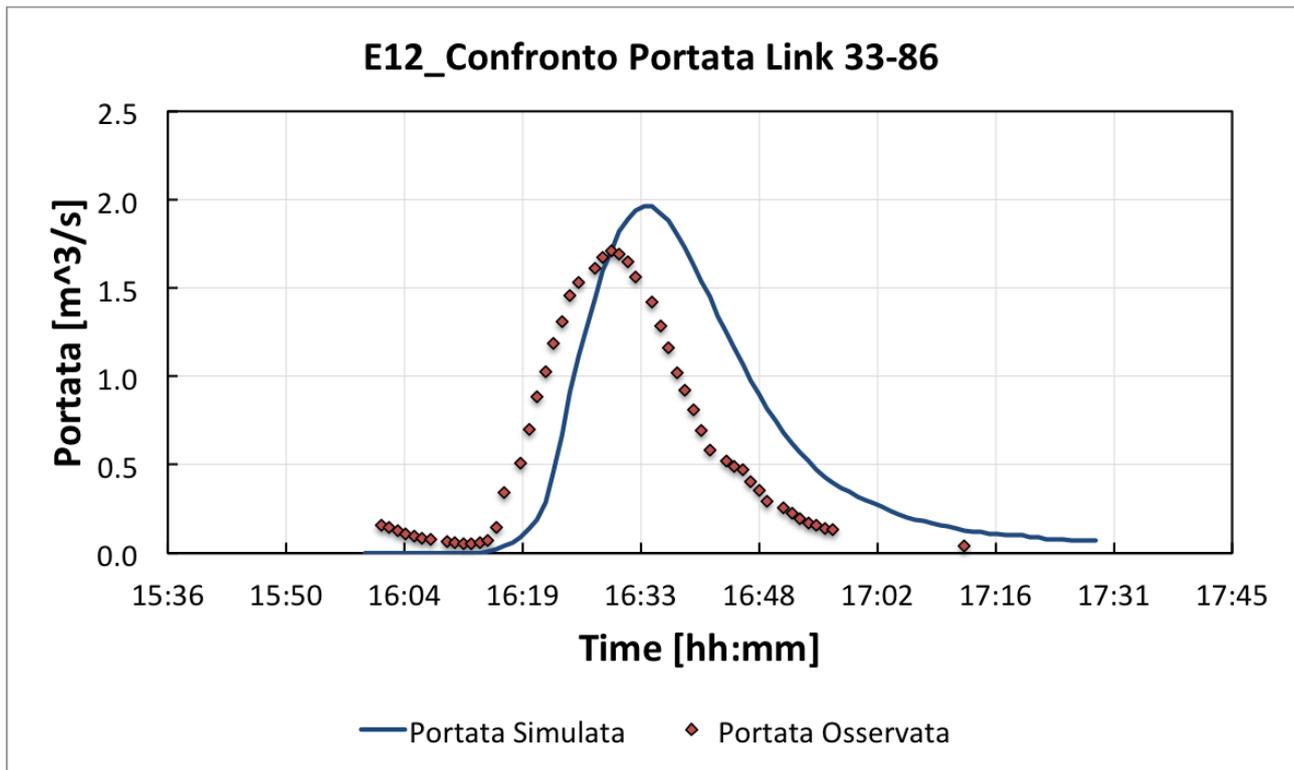


Figura 6.12: Confronto tra l'idrogramma registrato e ricostruito da simulazione, con parametri calibrati, durante l'evento del 06/08/1997 per la validazione del modello

TARATURA E VALIDAZIONE DEL MODELLO DI QUALITÀ

Durante gli eventi piovosi, l'aumento della portata fa sì che l'acqua ecceda la capacità del sistema, quindi, nel tratto finale arriverà una portata maggiore di quella destinata all'impianto di trattamento delle acque, che perciò verrà convogliata al corpo idrico ricettore. In molti casi si hanno le concentrazioni degli inquinanti che sono molto alte, soprattutto per quanto riguarda le acque di prima pioggia. Per poter studiare dei modelli matematici per la simulazione degli aspetti di qualità delle acque nelle reti fognarie, occorre comprendere le modalità con cui i carichi inquinanti si formano e si propagano.

Le fasi principali della formazione e propagazione degli inquinanti nelle reti di drenaggio urbano sono le seguenti:

- L'accumulo di sostanze inquinanti sulla superficie del bacino e di fognatura durante il tempo secco (Build-up);
- Il dilavamento della superficie durante gli eventi di pioggia e l'ingresso in fognatura delle sostanze inquinanti (Run-off);
- Il trasporto nella rete fognaria, associato con gli aspetti di deposizione ed erosione dei sedimenti, e la trasformazione degli stessi per reazione chimica.

L'accumulo delle sostanze inquinanti sul bacino ed in fognatura dipende essenzialmente dal periodo di tempo secco che precede l'evento meteorico. Il suo valore è funzione di diversi aspetti, ad esempio, sulla superficie del bacino dipende:

- dalla deposizione dei sedimenti erosi dagli agenti atmosferici;
- dalla deposizione di emissioni legate al traffico veicolare (gas di scarico, oli, degradamento dei pneumatici);
- dalle deposizioni di emissioni da impianti industriali e termici;
- dall'applicazione di fertilizzanti e pesticidi in prati ed altre aree verdi;
- dallo spargimento di sostanza antigelo;
- dalla deposizione di materiale grossolano sulle superfici, includendo spazzatura e residui organici di origine urbana ed animale.

Un altro aspetto essenziale che controlla la qualità di sostanze accumulate è costituito dall'efficienza e dalla frequenza della pulizia stradale operata dai mezzi meccanici degli Enti pubblici preposti. Per quanto riguarda invece l'accumulo in fognatura durante il tempo secco, esso è funzione essenzialmente del numero di abitanti e del tipo di insediamento residenziale, industriale, ...), dalle caratteristiche geometriche delle rete fognaria (pendenza, forma, sezione, lunghezza, scabrezza) e naturalmente dalle reazioni chimiche e biologiche che possono avvenirvi.

Giunte nelle reti fognarie, le sostanze inquinanti sono soggette a propagazione, deposito, ed erosione, la cui entità dipenderà dalla quantità di materiale presente nei condotti, dalle caratteristiche granulometriche dei sedimenti e dalle caratteristiche geometriche della rete fognaria. Nel modello SWMM 5.1. la modellazione degli aspetti qualitativi si basa essenzialmente sulla simulazione dei processi già ricordati precedentemente: accumulo degli inquinanti sul bacino durante il tempo secco, dilavamento da parte della pioggia, trasporto nei condotti della rete fognaria. Di queste fasi, le più importanti sono sicuramente le prime due ed in particolare il lavaggio della superficie stradale. L'accumulo dei solidi sul bacino viene effettuata nel modello SWMM 5.1. mediante una legge esponenziale, espressa dalla seguente formula:

$$Ma(dts) = A \cdot Peim \cdot \frac{Accu}{Disp} \cdot (1 - e^{-Disp \cdot dts})$$

Dove:

- $Ma(dts)$ = massa accumulata sulla superficie del bacino [kg];
- A = area totale del bacino [ha];
- $Peim$ = frazione di superficie impermeabile;
- $Accu$ = tasso di accumulo dei solidi [kg/ha/giorno], rappresenta la produzione di solidi dovuta all'erosione delle strade, ecc. Il suo valore in letteratura cambia in funzione della densità di popolazione e attività commerciali; ad esempio per zone residenziali altamente popolate si assume un valore compreso tra 10 - 25 kg/(giorno . ha);
- $Disp$ = coefficiente di dispersione [l/giorno], rappresenta la scomparsa delle particelle dovuta al vento, al traffico automobilistico, alla degradazione biologica e biochimica (in letteratura il suo valore viene posto convenzionalmente pari a 0,08 l/giorno);
- dts = durata del tempo secco antecedente la pioggia [giorni].

Nell'istante in cui inizia l'evento pluviometrico si ha il lavaggio del materiale accumulato sul bacino ed il conseguente trasporto dello stesso nella rete fognaria. La modellazione del lavaggio viene invece effettuata con l'integrazione della seguente relazione:

$$\frac{dMa}{dt} = -Arra \cdot P^{wash} \cdot Ma$$

Dove:

- Ma = massa presente sul bacino nell'istante in cui inizia l'evento [kg];
- $Arra$ = coefficiente di lavaggio [l/mm]; il suo valore usuale in letteratura è pari a 0,181;
- $wash$ = coefficiente numerico il cui scopo è di far incidere maggiormente l'effetto dell'intensità della pioggia sulla quantità di inquinanti che vengono dilavati (il suo valore è variabile tra 1,5 e 3);
- P = intensità di pioggia netta [mm/h].

Le massime concentrazioni si manifestano con un picco che precede il picco delle portate e si manifestano quando le portate in fognatura raggiungono un valore maggiore rispetto a ciò che è indirizzato all'impianto di depurazione. Il 70-80% delle sostanze inquinanti sono contenute nella parte iniziale di volume che va verso valle (acque di prima pioggia). La maggior parte è attaccata ai solidi sospesi per cui, con una sedimentazione delle acque (vasche di prima pioggia ad esempio) ci si libera di gran parte delle sostanze chimiche e biochimiche inquinanti.

Per quanto riguarda la taratura del modello di qualità della rete di drenaggio oggetto di studio, si è fatta la stessa procedura del modello idraulico, osservando i valori dei soli solidi sospesi (TSS) in quanto dai risultati sperimentali effettuati in letteratura, risulta essere uno dei parametri più rappresentativi dello stato d'inquinamento delle acque di drenaggio. In particolare si sono confrontati i valori di concentrazione dei

solidi sospesi calcolati dal modello con i valori ottenuti dal campionatore posto al nodo 33, su una serie di eventi (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8), utilizzando un metodo grafico.

Per ogni evento disponibile si è intervenuti manualmente su dei parametri caratteristici per tentativi, affinché il pollutogramma del nodo 33 mostrasse una sufficiente corrispondenza. In particolare si è intervenuti su:

- *DWF* = solidi in sospensione;
- *Accu* = accumulo superficiale;
- *Disp* = coefficiente di dispersione;
- *Arra* = coefficiente di lavaggio;
- *Wash* = coefficiente numerico.

Nello specifico si è assunto *DWF* e *Disp* costanti, secondo i propri valori di default, rispettivamente pari a 230 mg/l per il primo, e 0,08 l/giorno il secondo. Successivamente, per tentativi si sono modificati gli altri valori secondo il loro range di variazione.

Accu è molto legato all'uso del suolo, perciò essendo l'area oggetto di studio una zona residenziale densamente popolata, si è modificato rispettando un range definito tra 10 e 25 kg/(giorno . ha).

Arra ha un campo di variazione tra 0,15 e 0,25 l/mm che dipende da molti fattori legati alle caratteristiche dell'evento di pioggia.

Dal punto di vista qualitativo, il modello mostra un'elevata sensibilità al valore *wash*, più è elevato più cresce il picco del pollutogramma. Il suo scopo è far incidere maggiormente l'effetto dell'intensità di pioggia sulla quantità degli inquinanti che vengono dilavati; il suo range di variazione è compreso tra 1,2 e 2.

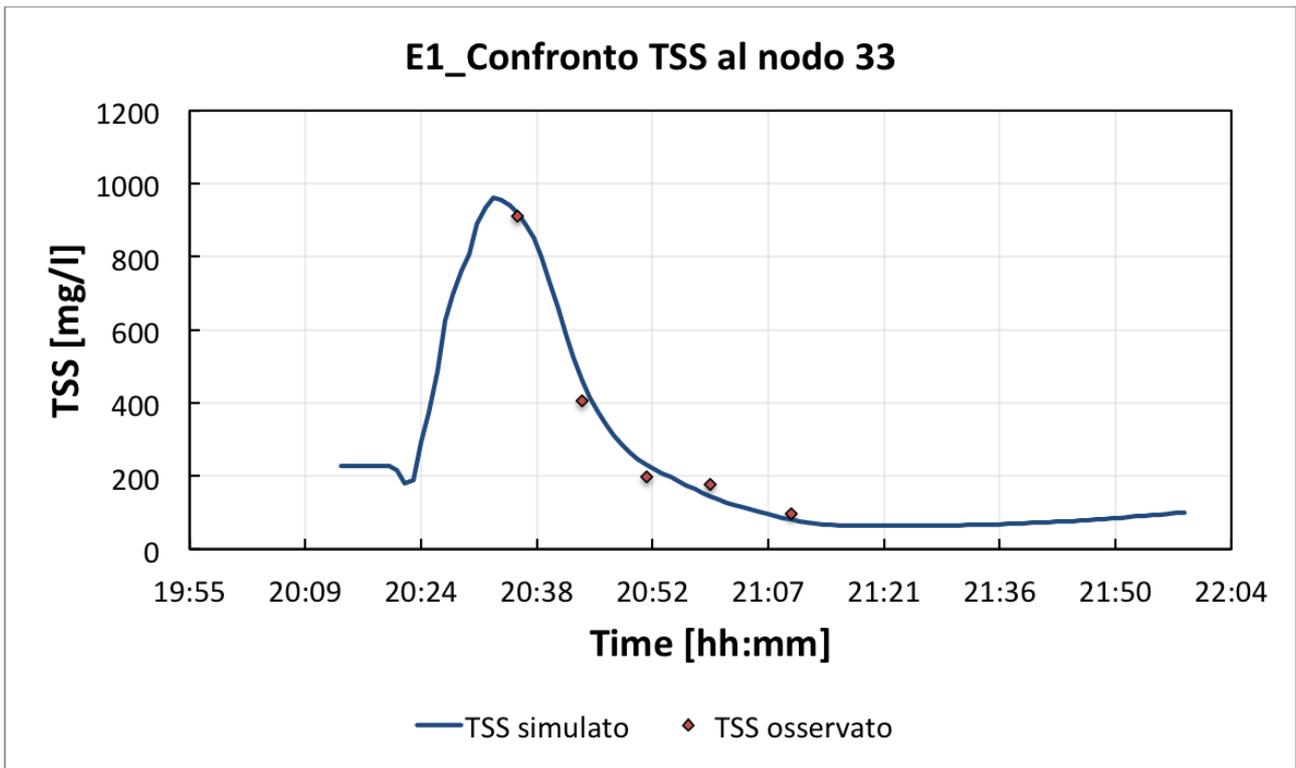


Figura 6.13: Confronto tra il pollutogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 25/04/1994

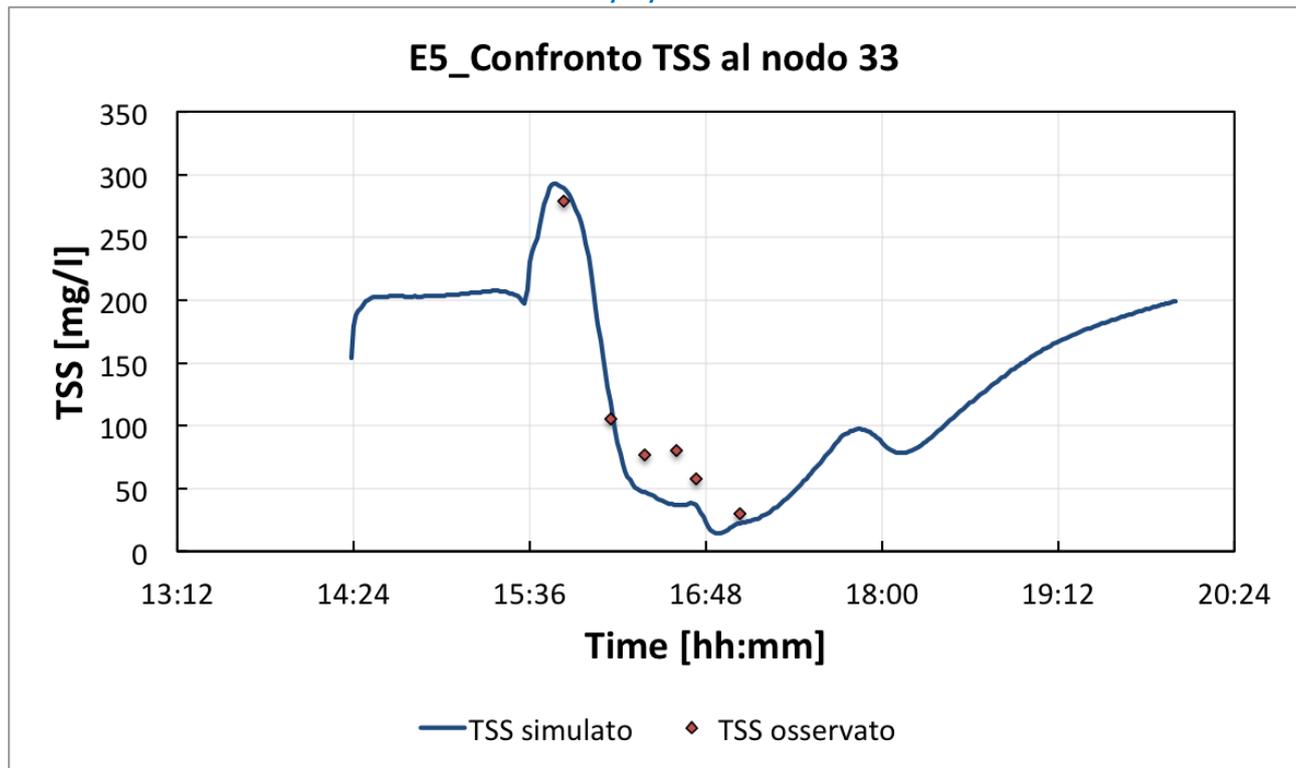


Figura 6.14: Confronto tra il pollutogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 28/10/1994

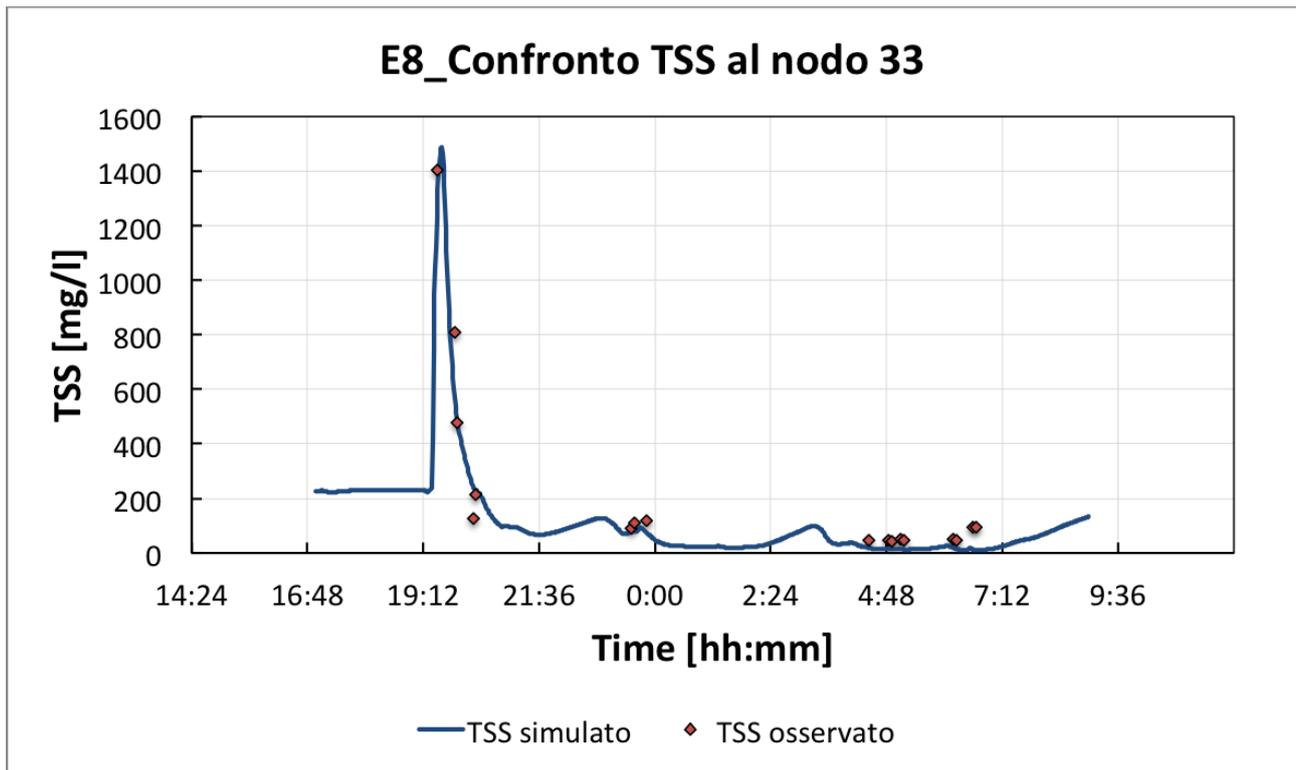


Figura 6.15: Confronto tra il pollutogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 13/11/1995

In Figura 6.16 viene riportato il grafico dell'evento E6 utilizzato per la validazione del modello, utilizzando i valori medi ottenuti dalla calibrazione.

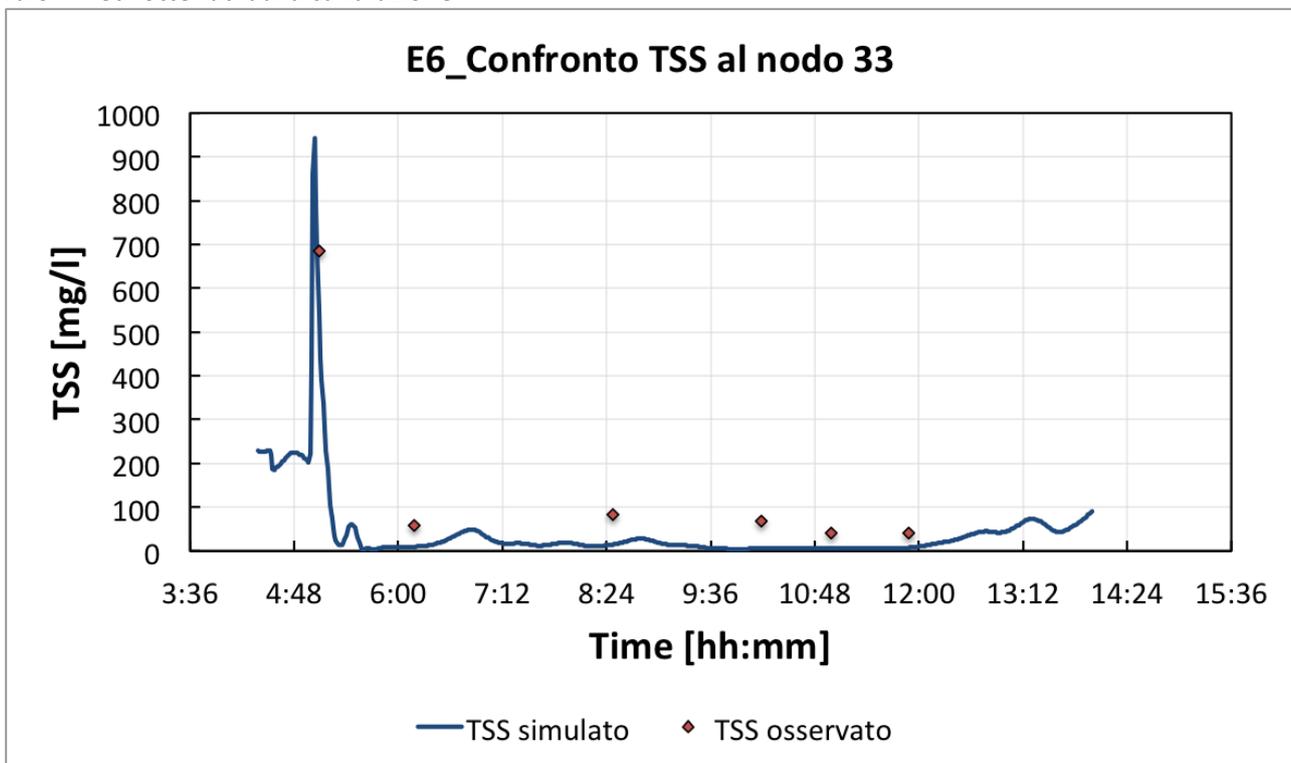


Figura 6.16: Confronto tra il pollutogramma registrato e ricostruito da simulazione durante l'evento del 23/06/1995 per la validazione del modello con i valori medi.

Nella Tabella 6.3: Parametri utilizzati nei diversi eventi per la calibrazione si riportano i valori utilizzati per la calibrazione del modello per i principali parametri richiesti dal software.

Tabella 6.3: Parametri utilizzati nei diversi eventi per la calibrazione

EVENTO E1				
TSS	BUILD-UP		WASH-OFF	
DWF [mg/l]	Accu [kg/ha/giorno]	Disp [l/giorno]	Arra [l/mm]	Wash
230	14	0.08	0.21	2
EVENTO E5				
TSS	BUILD-UP		WASH-OFF	
DWF [mg/l]	Accu [kg/ha/giorno]	Disp [l/giorno]	Arra [l/mm]	Wash
230	12	0.08	0.15	1.4
EVENTO E8				
TSS	BUILD-UP		WASH-OFF	
DWF [mg/l]	Accu [kg/ha/giorno]	Disp [l/giorno]	Arra [l/mm]	Wash
230	22	0.08	0.25	2

Nella Tabella 6.4 sono riportati i valori utilizzati per la validazione del modello ottenuti grazie alla media di quelli riportati in Tabella 6.3 per la calibrazione.

Tabella 6.4: Parametri utilizzati per la validazione del modello

EVENTO E6				
TSS	BUILD-UP		WASH-OFF	
DWF [mg/l]	Accu [kg/ha/giorno]	Disp [l/giorno]	Arra [l/mm]	Wash
230	16	0.08	0.203	1.8

6.4.2 SCELTA DEGLI OBIETTIVI

Gli obiettivi della modellazione sono quelli di ridurre i volumi sversati al corpo idrico ricettore e ridurre gli eventuali allagamenti, oltre ad effettuare una valutazione in termini di qualità; perciò sono state effettuate delle simulazioni tra stato attuale, quindi con funzionamento statico della rete e l'eventuale utilizzo di paratoie, in diversi scenari.

Per poter simulare il comportamento della rete come se fosse a se stante, è stata inserita una soglia con un ramo nel tratto finale che permettesse il deflusso di una certa portata verso un ipotetico depuratore, opportunamente dimensionato. Inoltre si è trasformato il nodo finale, che in realtà si immette nella rete reale in un collettore di sezione policentrica di dimensioni 192x240 cm, in un nodo di uscita, simulando l'immissione della rete in un corpo idrico ricettore.

6.4.3 CRITERI ADOTTATI PER IL POSIZIONAMENTO DEGLI ORGANI DI REGOLAZIONE

Si è scelto di regolare i deflussi durante gli eventi piovosi tramite l'utilizzo di paratoie, il cui controllo è regolato da sensori posti a monte in grado di determinare l'eventuale apertura o chiusura in funzione del livello misurato. Ognuno di questi nodi dovrà essere dotato di un pozzetto di ispezione dove viene posizionato un sensore ad ultrasuoni per la misura del livello, istante per istante, che verrà poi trasmesso al centro di controllo per la regolazione della paratoia. Tali organi sono schematizzati nel modello di calcolo utilizzato, SWMM 5.1 attraverso un link, denominato "Orifice".

Per la regolazione della paratoia, data la poca possibilità di azione riguardo il controllo in tempo reale all'interno del modello scelto, si è deciso di utilizzare come strategia di controllo, una strategia locale dove il movimento di ogni sbarramento è indipendente l'uno dall'altro per raggiungere un certo set-point fissato per il nodo di monte. Per evitare problemi di straripamento, il livello del set-point è stato fissato a circa l'80-85% dell'altezza del collettore stesso.

Una procedura di avvio ordina ad ogni sbarramento di aprirsi quando il livello di monte supererà una certa soglia e di chiudersi quando il livello dell'acqua raggiungerà il valore impostato.

Come linee guida per il posizionamento, invece, si è scelto di dislocare gli organi regolatori procedendo "step by step" da valle verso monte e dove si sviluppa una sottorete rispetto al condotto principale.

6.4.4 CALCOLO DEL PARAMETRO CH

Uno dei parametri fondamentali per la valutazione e la realizzazione del sistema RTC nelle reti fognarie è costituito dalla capacità di invaso disponibile in rete.

Il massimo riempimento conseguibile negli invasi in linea presenti nella rete, ovvero nei collettori, è strettamente connesso con la dimensione e la pendenza degli stessi. Inoltre risulta di notevole importanza anche il ricoprimento medio e il rapporto della portata massima transitabile nella sezione rispetto alla portata di moto uniforme effettuata sulla rete in condizioni statiche.

Il coefficiente CH mira a quantificare se in un tratto di rete risulta vantaggioso e opportuno inserire un organo regolatore.

$$CH = \frac{W_s \cdot R}{i \cdot Q_c}$$

Dove:

- W_s = volume specifico $W_{s_i} = \frac{\text{Volume del ramo } i\text{-esimo}}{\text{Area impermeabile } i\text{-esima} \cdot \text{coefficiente di deflusso}} = \frac{W_i}{A_{imp_i} \cdot \varphi_i}$ [m³/ha];
- R = ricoprimento medio [m];
- i = pendenza del ramo i -esimo [m/m];
- Q_c = rapporto tra la portata massima transitabile nella sezione i -esima e la portata che transita in condizioni di moto uniforme $Q_c = \frac{Q_{max}}{Q_{uni}}$ [m³/s].

Il coefficiente risulta essere direttamente proporzionale al volume specifico [W_s] che tiene in considerazione il volume del collettore rispetto alla superficie di territorio che deve essere drenata e al ricoprimento medio [R]: infatti all'aumentare di essi, il collettore in esame sarà più idoneo allo scopo richiesto. Risulta essere inversamente proporzionale, invece, alla pendenza [i] e al rapporto tra le portate [Q_{max}/Q_{uni}] in quanto all'aumentare di essi diminuiscono le caratteristiche positive del collettore.

Sono state individuate delle fasce di interesse per individuare se il collettore risulta più o meno idoneo, nello specifico sono stati assunti dei valori ottimali (Tabella 6.5) ed in modo iterativo, fissato uno, sono stati fatti variare fino ad ottenere:

- $0 \div 2.5 \cdot 10^5 \rightarrow$ Non Idoneo
- $2.5 \cdot 10^5 \div 6 \cdot 10^5 \rightarrow$ Idoneo
- $> 6 \cdot 10^5 \rightarrow$ Sicuramente Idoneo

Tabella 6.5: valori ottimali per il calcolo di CH

R	3 m
I	0.5 %
W_s	300 m ³ /ha
Q_c	0.5

6.4.5 POSIZIONAMENTO DELLE PARATOIE NELLA RETE (ORIFICE) E REGOLE DI CONTROLLO

Per rappresentare la paratoia in SWMM viene utilizzato il link *orifice*, questo permette di regolare il flusso come avverrebbe con l'inserimento di tale organo regolatore. Essi sono caratterizzati dalla grandezza dell'apertura, rettangolare o circolare, dalla dimensione e dal coefficiente di scarico.

La grandezza, o il grado di apertura può essere cambiata attraverso regole di controllo. Si possono distinguere due differenti tipologie di *orifice*:

- *Side*: apertura laterale;
- *Bottom*: apertura sul fondo.

Dato che nel caso di *orifice* si ha una formula per il calcolo della portata differente da quella che avviene nei rami della rete, per fare in modo che il valore calcolato dal modello dopo l'inserimento della paratoia non ancora in funzione, quindi come se fosse a sezione completamente aperta, non si discosti troppo dalla situazione originale senza organi regolatori, è necessario, al fine dei calcoli, sovradimensionare leggermente la grandezza di alcune aperture.

Per simulare l'effetti delle paratoie necessarie alla regolazione della portata, si inseriscono nel modello degli *orifice* laterali (*side*) e per permettere il passaggio della portata nera si è scelto l'*orifice bottom* per simulare uno scarico sul fondo. Questa soluzione permette il normale flusso dell'acqua all'interno dei collettori quando non si hanno precipitazioni, permettendo così il normale deflusso delle acque nei periodi di tempo secco.

Per gestire aperture e chiusure delle paratoie, come già accennato in precedenza, si utilizza il loop di controllo PID, in SWMM viene richiesto un valore del coefficiente K_p che sarà da inserire negativo nel caso il controllo venga fatto sul nodo di monte o positivo se si fa riferimento al nodo di valle.

La ricerca dei coefficienti ottimali è stata condotta in modo iterativo, impostando il set-point dell'80-85% di capacità del nodo a monte della paratoia, di volta in volta sono stati fatti variare tali valori al fine di mantenere costante il livello del nodo in funzione del grado di apertura impostato.

Le regole di controllo (*control rules*) all'interno di SWMM sono state implementate facendo riferimento alla misura di livello del nodo di monte rispetto alla paratoia.

Ogni organo regolatore, essendo una strategia di tipo locale, necessita di una specifica regola di controllo per determinare il grado di apertura rispetto alla variazione di livello e al valore di set-point prefissato; questo avviene attraverso l'implementazione della logica PID nel modello assegnando i valori alle tre costanti K_p , K_i , K_d (vedi Figura 6.17).

Per il posizionamento delle paratoie, dopo aver definito il coefficiente CH relativo alla capacità di un determinato ramo di essere utilizzato efficacemente per l'inserimento di una smart gate, si procede valutando in quali punti, partendo da valle verso monte, tale coefficiente mostra valori superiori a 250'000 (valore minimo per risultare idoneo).

La seconda regola definita per il posizionamento delle paratoie fa riferimento ai punti della rete dove una sottorete si immette nel collettore principale. Tendenzialmente vanno scartate le tubazioni con lunghezze modeste per evitare eventuali rigurgiti e tratti in pressione.

In modo iterativo, si inserisce una paratoia nel modello e si verifica, attraverso una simulazione, il rapporto tra l'altezza massima dell'acqua che transita nella tubazione rispetto alla massima altezza possibile a sezione piena.

Per la rete del Fossolo sono state inserite, step by step, 7 paratoie, come si può valutare dalla Figura 6.18.

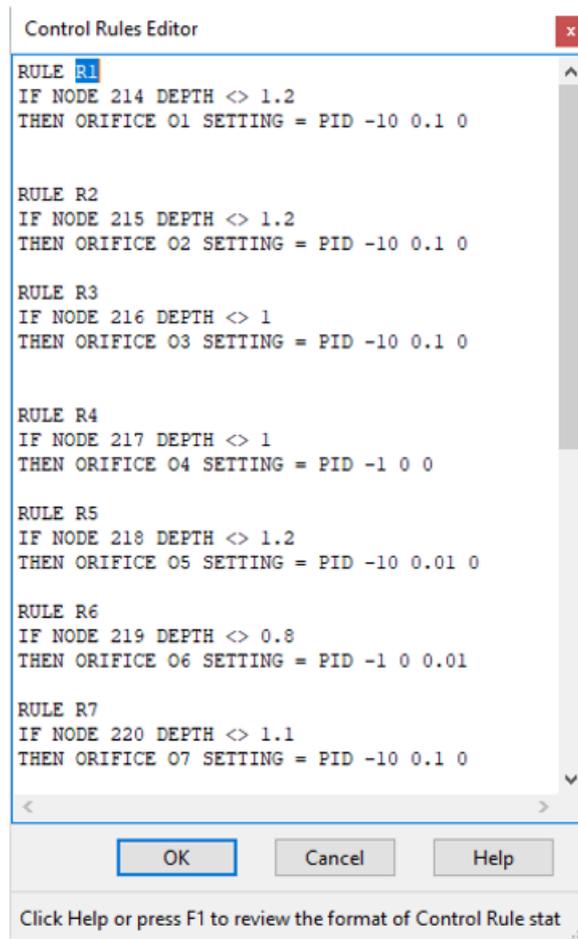


Figura 6.17: Interfaccia grafica relativa ai controls rules sul modello SWMM 5.1.

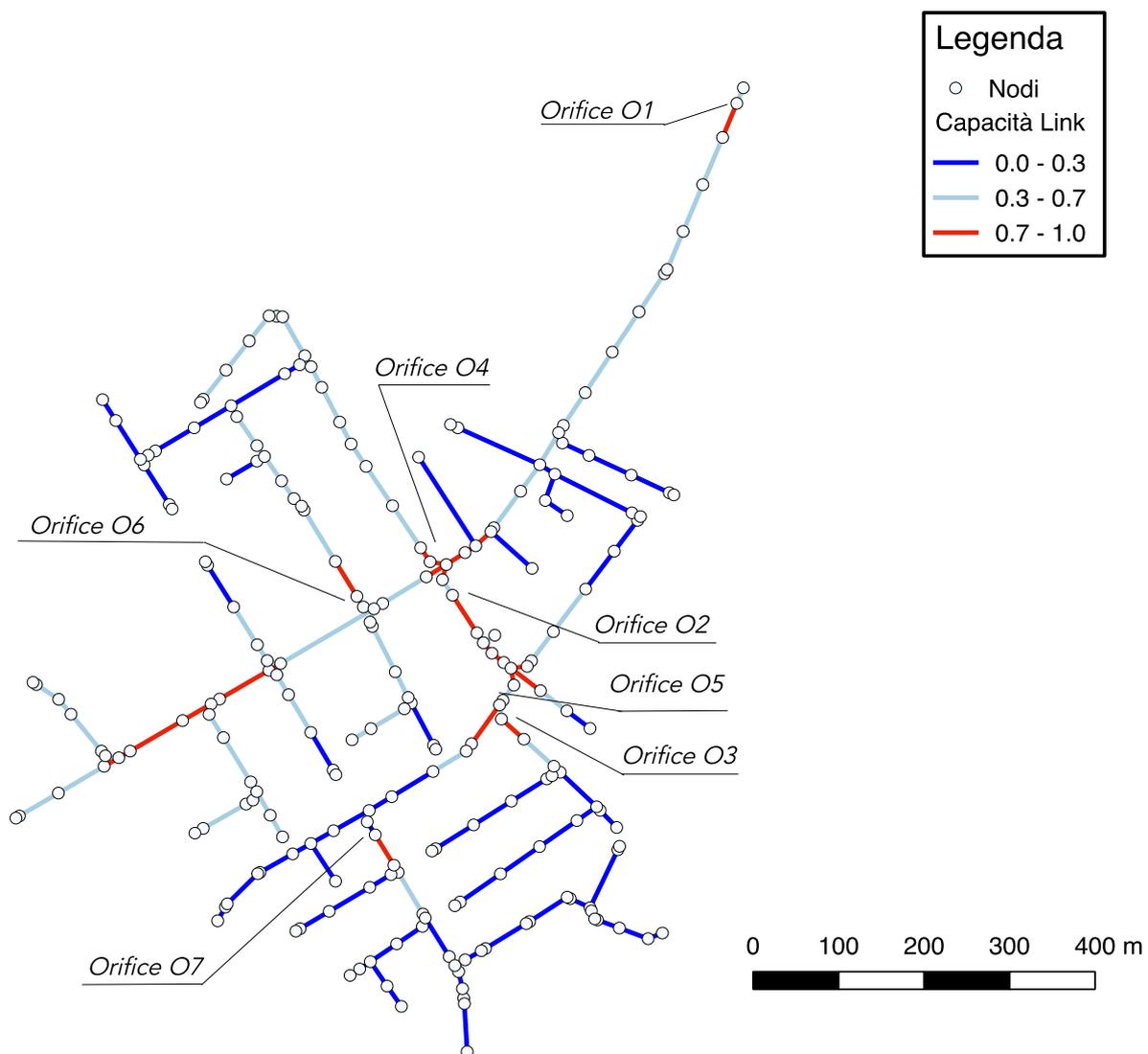


Figura 6.18: Schema della rete e posizione delle 7 paratoie mobili (orifice)

6.4.6 CONDIZIONI AL CONTORNO PER LA MODELLAZIONE DELLA RETE DELL'AREA FOSSOLO

Osservando le simulazioni con l'inserimento di tutte le smart gate, la rete si presenta con un tratto iniziale in pressione. In questo specifico tratto, essendo la parte iniziale dell'intero sistema, troncato per limitare il caso di studio ad un'area ben definita, non risulta efficace l'inserimento di un sistema RTC. Per evitare il presentarsi di questa situazione, è stata inserita una vasca di accumulo in grado di contenere parte delle acque meteoriche. Nello specifico i rami interessati mostrano problemi con portate superiori a circa 600 l/s, la vasca è stata dimensionata per ricevere la portata eccedente ai 400 l/s.

È stato inserito un collettore dal nodo 137 fino alla vasca, la quale è dotata di un orifizio di scarico collegato al nodo 12 posto più a valle. Inoltre è stata inserita un orifizio a valle del nodo 137 nella rete originale.

Per far transitare esclusivamente una portata di 400 l/s è stato necessario inserire un restringimento attraverso l'uso di un *orifice*. Considerando questa portata come nota e ipotizzando una sezione circolare, utilizzando la formula inversa di Torricelli, è stato calcolato il diametro del restringimento, pari a 500 mm. Attraverso la formula inversa del moto uniforme si è dimensionato il collettore che collega il nodo 137 alla vasca affinché possano transitare 200 l/s e, ipotizzando una sezione circolare e una pendenza del 0.5%, mantenendo la scabrezza uguale a quella utilizzata per le altre tubazioni, ne risulta un diametro di 500 mm. Il volume della vasca, calcolato con il metodo delle sole piogge, è di 150 m³, con un tubo di scarico di diametro pari a 500 mm considerando una portata a valle di 0.5 m³/s.

In questo modo si migliora notevolmente la capacità di accumulo dei collettori.

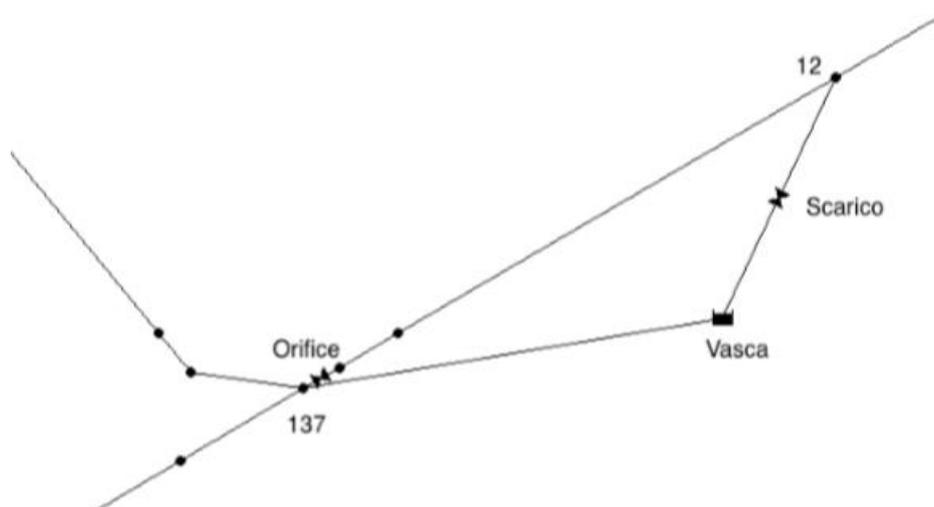


Figura 6.19: Rappresentazione in SWMM 5.1 dell'inserimento di una vasca di accumulo nel ramo 137-12

Per il tratto finale della rete, al fine di simularne il comportamento come se fosse fine a se stessa, è stato inserito un depuratore e una soglia dimensionata per scaricare al ricettore oltre 5 volte la portata nera di progetto. Su SWMM questo scaricatore viene schematizzato con una *Weir*.

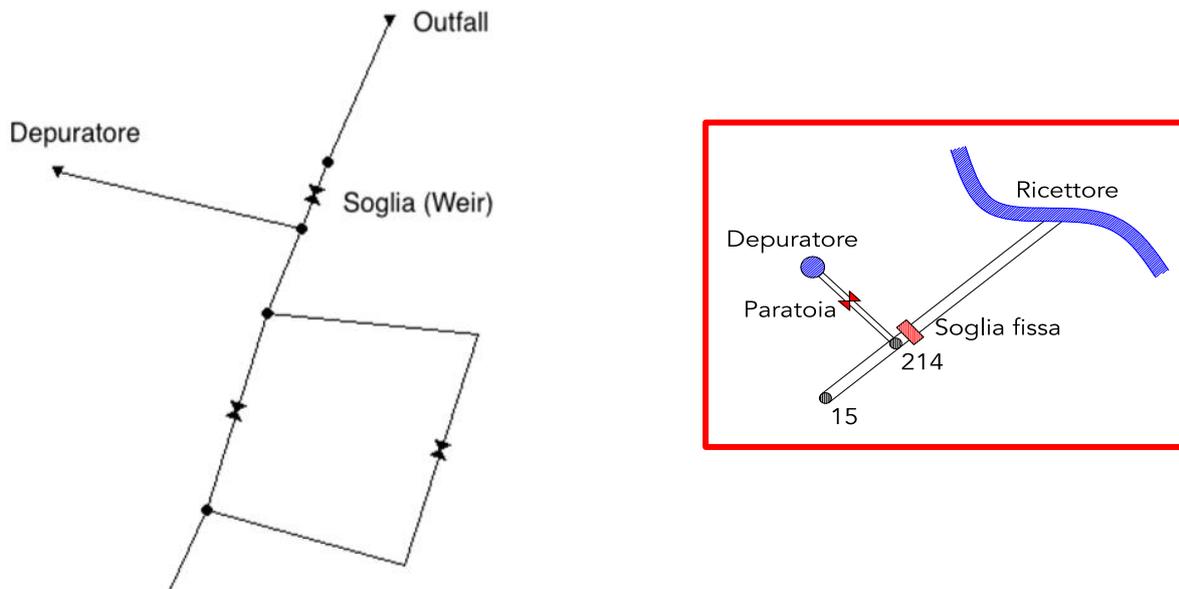


Figura 6.20: Rappresentazione in SWMM del tratto terminale della rete oggetto di studio

Considerata una dotazione pari a 250 l/abitante/giorno e una popolazione di 10'000 abitanti, si ottiene:

- $Q_n=30 \text{ l/s}$

- $5 \cdot Q_n=145 \text{ l/s}$

Per la tubazione che permette all'acqua di defluire verso al depuratore è stato scelto un collettore da 344 mm in PEAD.

Un ulteriore studio prevede l'inserimento di un *orifice* su questa condotta in uscita verso il depuratore, al fine di valutare l'effetto di un regolatore di portata in uscita in grado di mantenere costante il deflusso pari a Q_n .

È stata creata una curva relativa al grado di apertura della paratoia finale discretizzando il valore del tirante idrico per step successivi. Questa curva è stata quindi utilizzata come *control rules* della paratoia per il tratto verso il depuratore. In questo caso di studio la soglia è posta a 35 cm dal fondo.

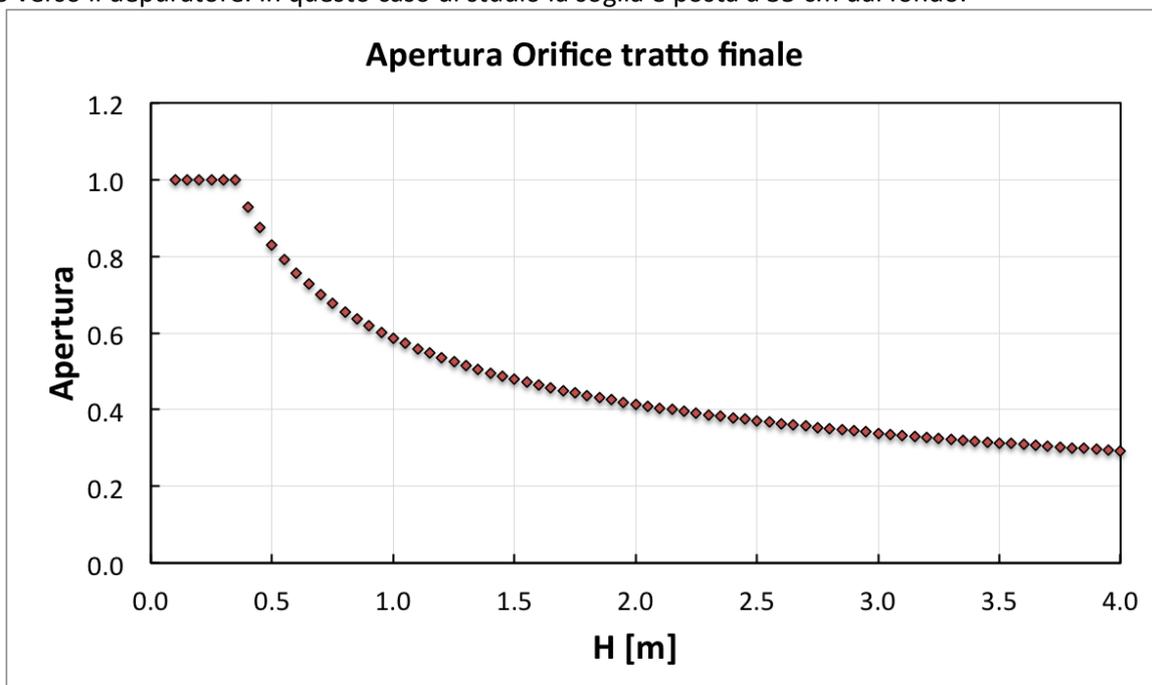


Figura 6.21: Curva che rappresenta la chiusura progressiva della paratoia nel tratto finale verso l'impianto di depurazione.

6.4.7 SCENARI MODELLATI

Per lo studio della rete del Fossolo, sono stati ipotizzati tre scenari di pioggia differenti (vedi Figura 6.22):

- Scenario 0 → caratterizzato da una distribuzione uniforme delle piogge su tutta l'area;
- Scenario 1 → la pioggia è distribuita in maniera non uniforme sull'area, viene suddivisa in 4 aree;
- Scenario 2 → la pioggia viene ridistribuita con diverse intensità sempre sulle 4 zone dello scen. 1.

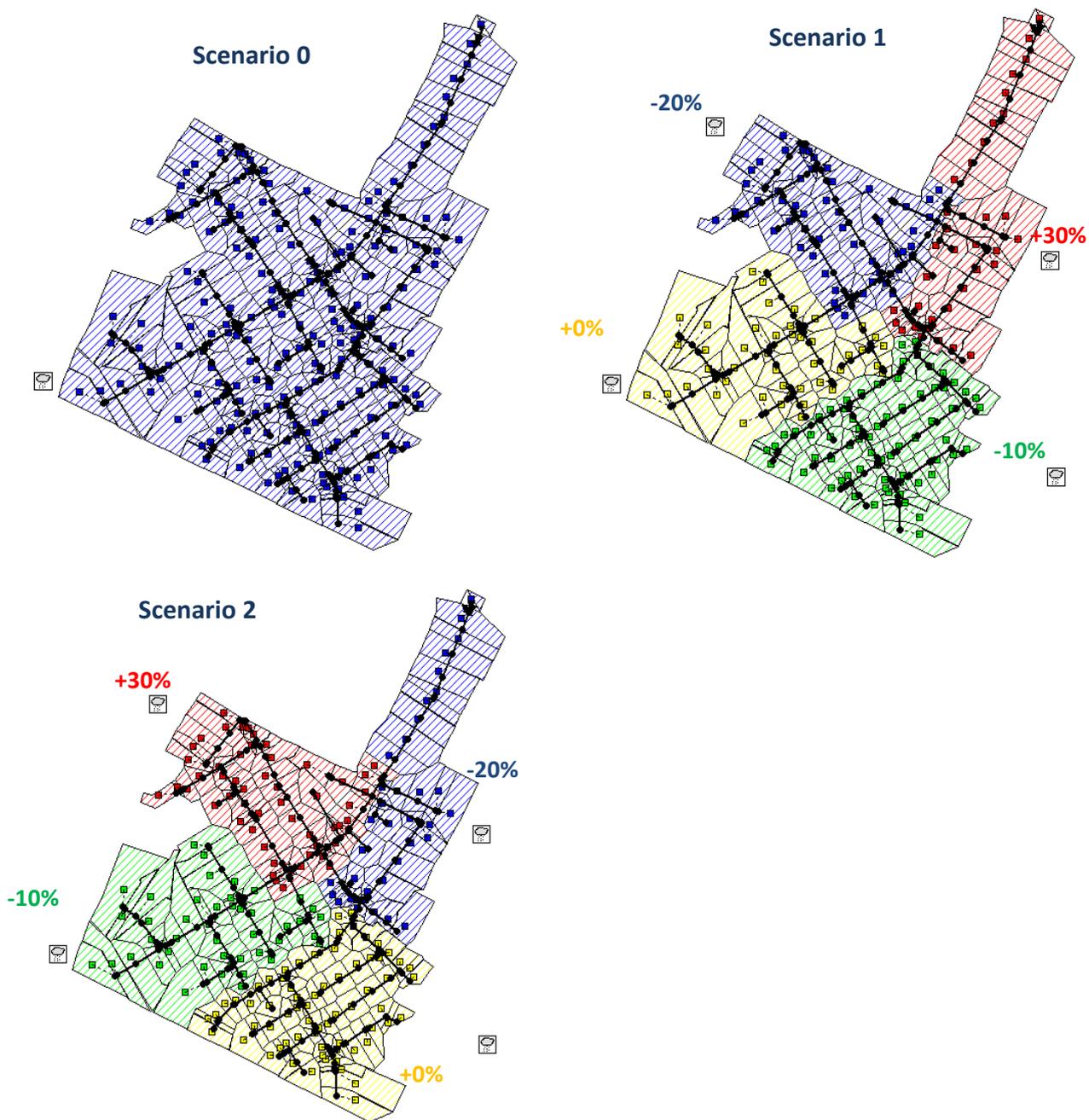


Figura 6.22: Scenari di pioggia analizzati

La rete è stata analizzata per ogni scenario di pioggia facendo variare:

- a) rete originale;
- b) rete con controllo RTC utilizzando i PID;
- c) rete con controllo RTC basato sui PID e *orifice* nel tratto verso il depuratore per controllare la portata in uscita;
- d) rete originale con vasca di accumulo finale, nello specifico sono state valutate vasche con dimensioni pari a 5 m³/ha, 10 m³/ha e 20 m³/ha;

Per ogni combinazione le grandezze analizzate, in termini di quantità e qualità, sono:

- numero totale di eventi;
- massa dei Solidi Sospesi Totali;
- volume totale.

Per le simulazioni è stato usato l'anno 2009 poiché quello con cumulata di precipitazione media rispetto a 27 anni di dati per il periodo 1990-2016.

7 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE DELLA RETE CON SWMM 5.1

Di seguito si riportano i risultati ottenuti nelle varie simulazioni relative al bacino sperimentale del Fossolo a Bologna.

Per poter confrontare i dati, sono state realizzate tre reti differenti:

- la rete originale con il depuratore ed uno scolmatore di piena che convoglia le acque diluite oltre una certa soglia al corpo ricettore;
 - la rete con paratoie mobile controllate da logica PID;
 - la rete implementata con la logica PID più un ulteriore paratoia che controlla i deflussi verso il depuratore.
- Per ogni rete sono stati realizzati tre differenti scenari di pioggia: uno uniforme (SC0) su tutto il bacino e due differenti distribuzioni non omogenee (SC1 e SC2).

Per poter valutare l'efficacia della tecnologia RTC è stata valutata anche l'ipotesi di inserire una vasca di laminazione al termine della rete originale, confrontando così strategie di controllo in tempo reale con quella maggiormente utilizzata anche se molto dispendiosa e di più difficile realizzazione a causa delle notevoli dimensioni dell'invaso.

RETE ORIGINALE	Scenario	Numero di eventi sversati nel ricettore	Volume al ricettore [m ³]	Volume al depuratore [m ³]	Massa SST al ricettore [kg]	Massa SST al depuratore [kg]
	0	52	40'272	695'691	3'937	133'653
	1	52	39'269	754'755	1'967	140'772
	2	51	40'900	734'706	2'572	139'542

RETE PID	Scenario	Numero di eventi sversati nel ricettore	Volume al ricettore [m ³]	Volume al depuratore [m ³]	Massa SST al ricettore [kg]	Massa SST al depuratore [kg]
	0	39	26'201	694'737	3'871	133'661
	1	40	25'617	753'559	1'931	140'824
	2	42	26'931	733'780	2'559	139'552

RETE PID+ORIFICE	Scenario	Numero di eventi sversati nel ricettore	Volume al ricettore [m ³]	Volume al depuratore [m ³]	Massa SST al ricettore [kg]	Massa SST al depuratore [kg]
	0	46	39'227	696'134	3'991	133'521
	1	44	38'856	755'377	2'063	140'650
	2	46	39'969	734'603	2'626	139'451

Risulta necessario premettere che nei casi con controllo in tempo reale, l'inserimento degli orifici per garantire il passaggio della portata nera causa un errore di calcolo dell'1% sul volume totale pari a circa 50'000 m³ di acqua in più nei casi con PID e PID+orifice rispetto alla soluzione originale.

Dal grafico in Figura 7.1 si può notare come in media vengano sversati: nel caso originale circa il 5.5% del volume totale, nel caso con controllo PID il 3.4%, mentre nella soluzione PID+Orifice il 5.1%.

Si evidenzia una riduzione di volume sversato nel ricettore pari al 34÷35% tra caso originale e con PID e pari al 2% tra originale e PID+Orifice.

La soluzione con controllo PID e strozzatura verso il depuratore mira alla tutela dell'impianto stesso, al fine di massimizzarne la capacità di trattamento.

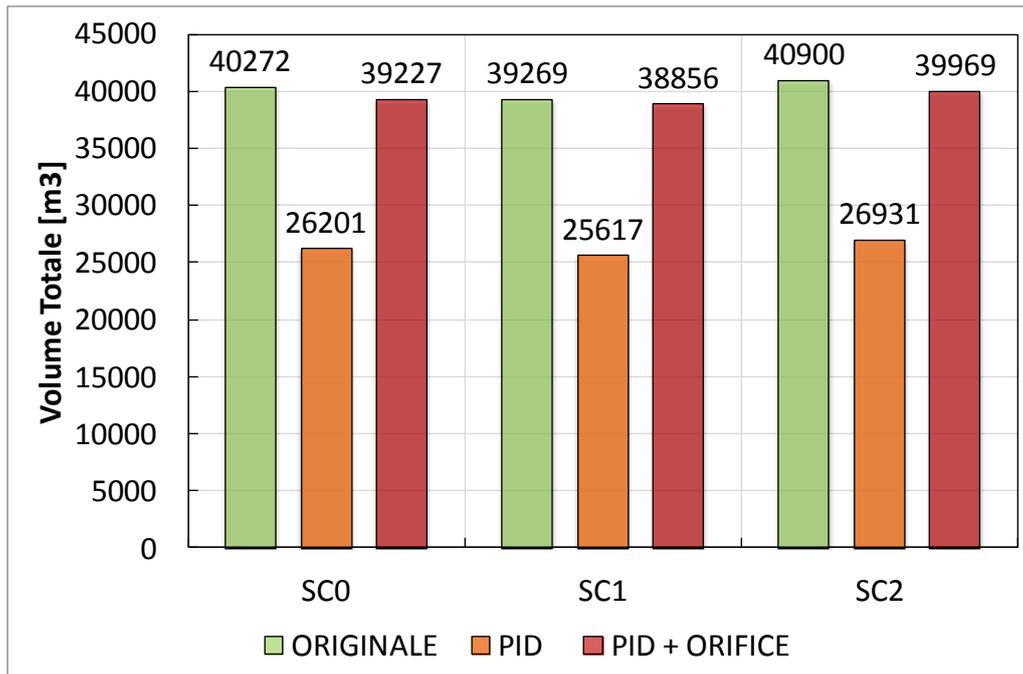


Figura 7.1: Grafico relativo al volume inviato verso il ricettore nelle varie configurazioni analizzate poste a confronto

Dal grafico relativo alla massa di Solidi Sospesi Totali (SST) sversata nel corpo idrico ricettore, Figura 7.2, si vede il beneficio apportato dall'introduzione del sistema RTC nella rete. Nello specifico si ha una riduzione del 50% tra il caso originale e quello con controllo PID, il 34% tra rete originale e il caso con PID+Orifice, mentre tra le due tipologie di RTC c'è una differenza del 23%.

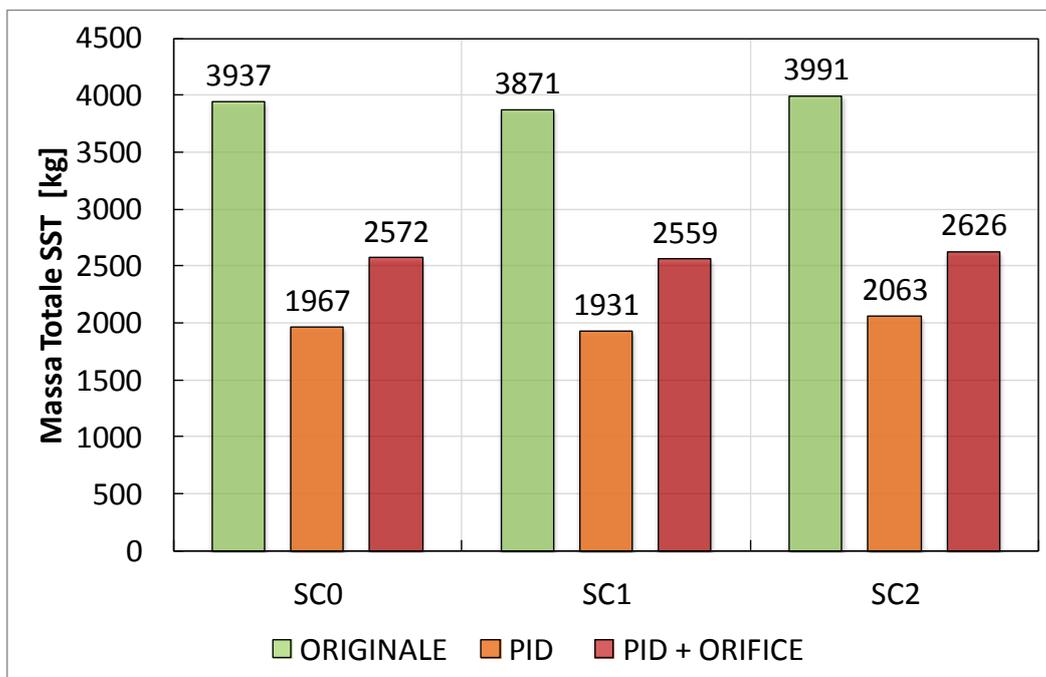


Figura 7.2: grafico relativo alla massa dei Solidi Sospesi Totali sversata nel corpo idrico ricettore nelle varie configurazioni analizzate poste a confronto

La soluzione con controllo in tempo reale gestito dal controllo PID permette quindi di ottimizzare i volumi e la massa SST inviata al ricettore, raggiungendo così l'obiettivo di minimizzare gli sversamenti e gli

inquinanti, limitando, allo stesso tempo, il rischio di allagamento urbano grazie all'ottimizzazione della capacità di accumulo delle condotte stesse.

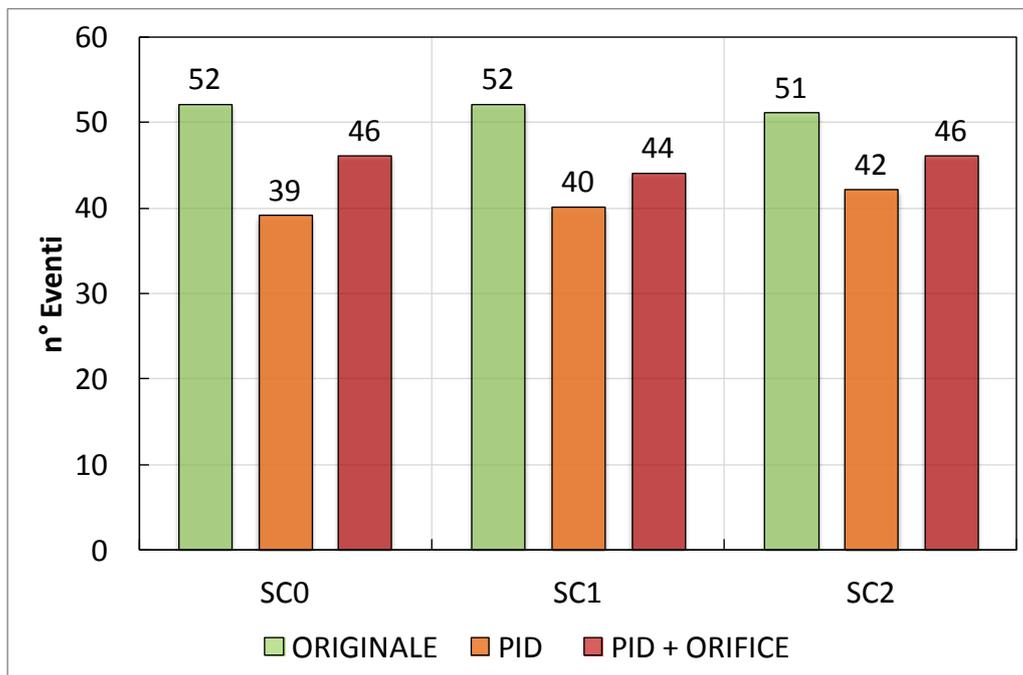


Figura 7.3: grafico relativo al numero degli eventi che nell'anno 2009 vengono sversati nel corpo idrico ricettore

Dalla Figura 7.3 emerge una riduzione del 22% in media tra gli eventi sversati nel caso di rete originale rispetto a quella con PID mentre tra configurazione originale e con PID+Orifice la riduzione % del numero di eventi scende al 12%.

La differenza tra i vari scenari analizzati, evidenzia come la distribuzione della precipitazione influenzi l'intero sistema fognario convalidando ulteriormente la necessità di un database di eventi pregressi, un'attenta analisi relativa alle precipitazioni e una rete di pluviometri ampia da associare ad un sistema previsionale come il radar meteorologico.

È stata analizzata la risposta della rete nel caso di inserimento di una vasca nel tratto terminale della rete. Nello specifico è stato utilizzato lo scenario di pioggia SC1, prevedendo vasche di dimensioni pari a 5, 10 e 20 m³/ha.

Confrontando i risultati ottenuti per lo scenario 1 nelle differenti configurazioni simulate (rete originale, con PID, PID con orificio e con le tre differenti vasche) si ottiene che:

	VOLUME	MASSA	N° EVENTI
Riduzione % tra Originale-Vasca 5 m ³ /ha	37	58	50
Riduzione % tra Originale-Vasca 10 m ³ /ha	48	74	60
Riduzione % tra Originale-Vasca 20 m ³ /ha	63	89	73
Riduzione % tra PID-Vasca 5 m ³ /ha	4	16	35
Riduzione % tra PID-Vasca 10 m ³ /ha	19	48	47
Riduzione % tra PID-Vasca 20 m ³ /ha	43	78	65
Riduzione % tra PID+OR-Vasca 5 m ³ /ha	37	36	44
Riduzione % tra PID+OR-Vasca 10 m ³ /ha	47	61	52
Riduzione % tra PID+OR-Vasca 20 m ³ /ha	63	84	68

Tabella 7.1: Riassunto delle riduzioni % tra i casi analizzati

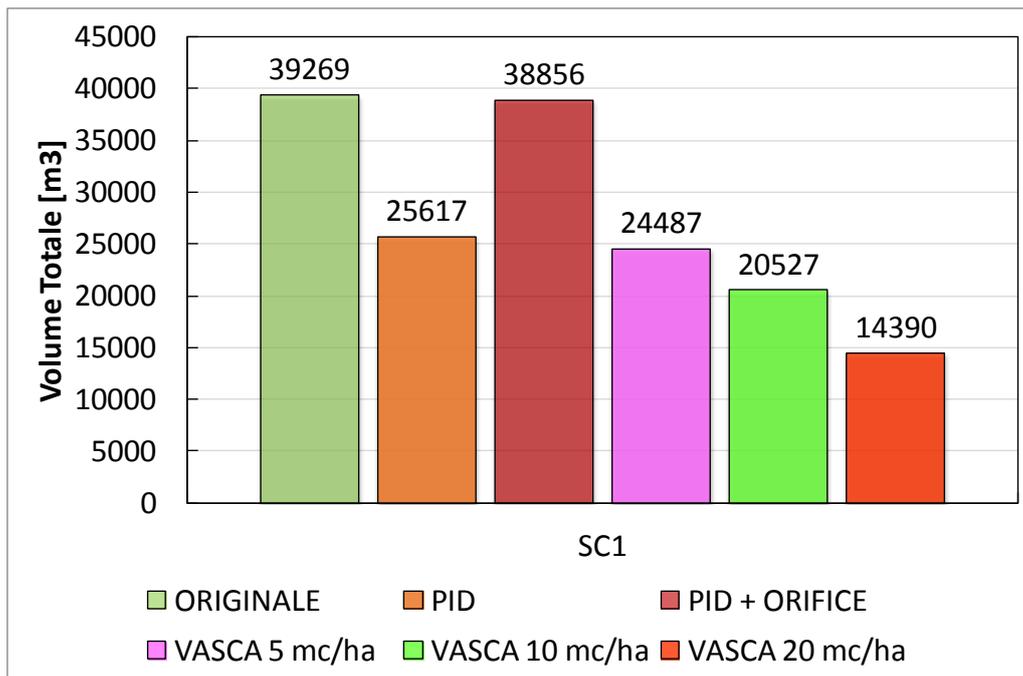


Figura 7.4: Grafico relativo ai volumi sversati nelle differenti configurazioni analizzate per lo scenario 1

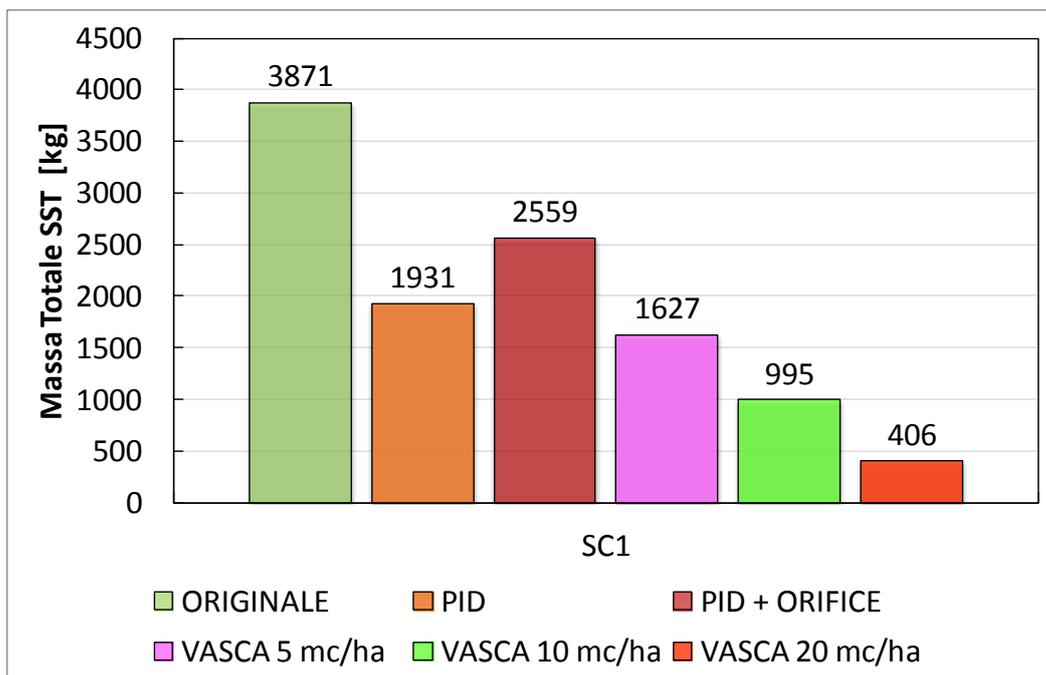


Figura 7.5: Grafico relativo alla massa dei Solidi Sospesi Totali sversata nelle differenti configurazioni analizzate per lo scenario 1

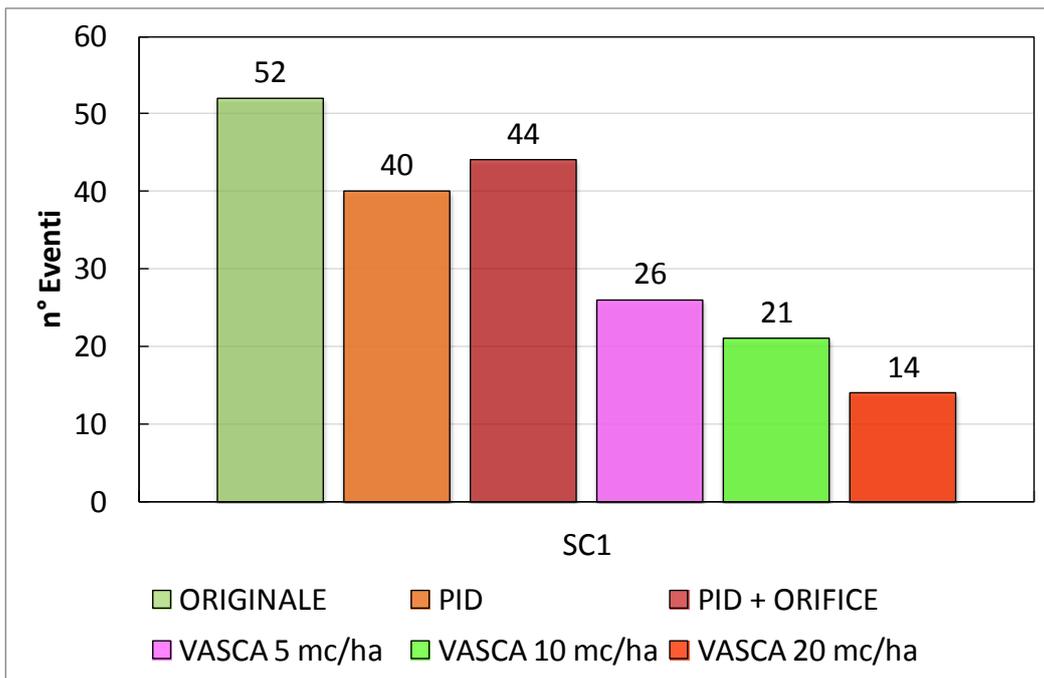


Figura 7.6: grafico relativo al numero di eventi che causano sversamento nel corpo idrico ricettore nelle differenti configurazioni analizzate per lo scenario 1

Osservando i dati riportati in Tabella 7.1, si può notare come il confronto tra l'utilizzo della logica PID rispetto alla vasca da 5 m³/ha non sia così sfavorevole in termini di volumi e massa SST sversata; l'utilizzo di vasche di grandi dimensioni come quelle ipotizzate da 10 e 20 m³/ha, pari a circa 470 e 935 m³ per l'area analizzata, risultano essere vantaggiose in termini di volumi e massa SST sversata; la sostanziale differenza tra l'utilizzo di un sistema di controllo in tempo reale e soluzioni standard, come l'inserimento di vasche di accumulo, risiede nella più facile realizzazione del sistema RTC in quanto vasche di così grandi dimensioni richiedono ampi spazi disponibili per la loro realizzazione, cosa non sempre fattibile visto il tessuto urbano particolarmente denso nelle aree urbane.

8 LINEE GUIDA PER L'IMPLEMENTAZIONE DEI SISTEMI REAL TIME CONTROL SU UNA RETE DI DRENAGGIO IN COMBINAZIONE CON SISTEMI DI EARLY WARNING

L'utilizzo di un sistema di EW permette di agire in modo preventivo sull'intero sistema di drenaggio attraverso procedure di preallerta, se lo si combina ad una rete fognaria con RTC si ottiene un sistema in grado gestire gli eventi meteorici più intensi ottimizzando la capacità della rete stessa.

Un sistema di EW è prevede principalmente:

- la realizzazione di una mappa del rischio: per questo si analizza il background della zona, gli aspetti geografici, fisici e ambientali, i database della pluviometria del sito e degli eventi significativi al fine di valutare le varie componenti per evidenziare le zone maggiormente a rischio e i possibili danni legati ad una determinata intensità di pioggia;
- la previsione in tempo reale: questo elemento chiave si basa sul monitoraggio e sulla modellazione dei dati così ottenuti. I dati vengono simulati all'interno di un modello idraulico che definisce la risposta della rete di drenaggio all'evento meteorico previsto, definendone il livello di rischio. In questa fase, sulla base delle previsioni, vengono decise le procedure di mitigazione dell'evento meteorico previsto.
- la diffusione e la comunicazione dello stato di allerta/allarme: diffusione dello stato di allerta e possibilità di anticipare l'evento dannoso attraverso manovre sulla rete di drenaggio al fine di contenere e limitare danni e rischi.

Per l'implementazione di un sistema di EW bisogna:

- realizzare una rete di monitoraggio basata sull'utilizzo di un radar, definendo la risoluzione spaziale e temporale ottimale:

$$\Delta t = \frac{t_c}{4} \quad (t_c \text{ rappresenta il tempo di corrivazione del bacino})$$

$$t_1 = 3 \cdot S^{0.3} \quad (t_1 \text{ rappresenta il lag time [min]; S: superficie bacino [ha])$$

Mettendo in relazione t_1 e Δt si ottiene la scansione temporale in funzione dello spazio:

$$\Delta t = 0.75 \cdot S^{0.3}$$

La relazione tra la risoluzione spaziale e quella temporale si sintetizza con la formula:

$$\Delta r = 1.5 \cdot \sqrt{\Delta t}$$

Questa relazione risulta valida per i casi di studio con clima mediterraneo, pendenze comprese tra 1 e 10% e impermeabilità del suolo variabili dal 10 al 60%.

Nel caso di:

- S<10 ha	→ $\Delta t = 1 \text{ min}$	$\Delta r = 1.5 \text{ km}$
- S=1.000 ha	→ $\Delta t = 6 \text{ min}$	$\Delta r = 3.7 \text{ km}$
- S=10.000 ha	→ $\Delta t = 12 \text{ min}$	$\Delta r = 5.2 \text{ km}$

- realizzare un database di eventi storici al fine di valutare il livello di rischio associato ad una determinata intensità di pioggia (mappa del rischio);
- realizzare un modello idraulico della rete per simulare l'evento previsto e le ripercussioni sulla rete;
- database delle procedure associate al livello di rischio per preallertare/allertare la popolazione e intervenire in maniera preventiva sulla rete.

Se a questo sistema previsionale si associa un sistema di controllo in tempo reale, gli interventi sulla rete avvengono in maniera automatica poiché i due sistemi interagiscono tra di loro modificando i data-set del sistema RTC in funzione dell'evento previsto dal monitoraggio EW.

Per la realizzazione di un sistema di controllo in tempo reale su una rete fognaria è indispensabile una conoscenza approfondita della rete in termini di struttura complessiva, geometria, disponibilità di misure di portata e qualità, bisogna approfondire le caratteristiche di ogni parte del sistema al fine di poterlo ricostruire sul software di simulazione idraulica.

Riassumendo, le informazioni preliminari necessarie sono:

- geometria di ogni singolo elemento della rete (dimensioni, sezioni, pendenze, lunghezza, ricoprimento);
- struttura generale della rete;
- pozzetti di misurazione ed eventuali organi di regolazione;
- misure di portata e qualità per la calibrazione del modello;
- geometria, ubicazione e tipo di scaricatori di piena;
- presenza di invasi (geometria e funzionamento);
- morfologia dell'area drenata;
- scenari di carico e potenziale di invaso.

Sulla base delle informazioni raccolte, si procede all'implementazione del controllo in tempo reale per step:

1. Obiettivi sistema di drenaggio con RTC:
 - Minimizzare gli allagamenti urbani
 - Minimizzare gli sversamenti nel corpo idrico ricettore con conseguente abbattimento degli inquinanti immessi nell'ambiente
 - Massimizzare la capacità di trattamento degli impianti di depurazione.
2. Realizzazione del modello idraulico con il software SWMM 5.1
3. Fissare la massima capacità di invaso che si vuole ottenere con l'inserimento degli organi regolatori (il valore consigliato è pari all'80-85% dell'altezza totale della tubazione)
4. Calcolo del parametro CH per ogni ramo della rete:

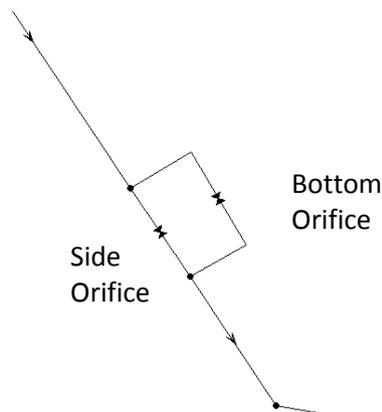
$$CH = \frac{W_s \cdot R}{i \cdot Q_c}$$

Dove:

- W_s = volume specifico $W_{s_i} = \frac{\text{Volume del ramo } i\text{-esimo}}{\text{Area impermeabile } i\text{-esima} \cdot \text{coefficiente di deflusso}} = \frac{W_i}{A_{imp_i} \cdot \phi_i}$ [m³/ha]
 - R = ricoprimento medio [m]
 - i = pendenza del ramo i -esimo [m/m]
 - Q_c = rapporto tra la portata massima transitabile nella sezione i -esima e la portata che transita in condizioni di moto uniforme $Q_c = \frac{Q_{max}}{Q_{uni}}$ [m³/s]
 - Se:
 - $> 6 \cdot 10^5$ → sicuramente idoneo
 - $2.5 \cdot 10^5 \div 6 \cdot 10^5$ → idoneo
 - $< 2.5 \cdot 10^5$ → non idoneo
5. Inserimento di un organo regolatore alla volta (procedimento iterativo), partendo da valle verso monte, nei collettori idonei secondo il parametro CH nel punto dove si sviluppa una sottorete rispetto al collettore principale. Inserita un organo di regolazione si procede con la simulazione della rete per valutarne l'efficacia attraverso il calcolo del rapporto per la tubazione interessata tra l'altezza massima raggiunta e l'altezza massima della tubazione.

Per la simulazione della paratoia in SWMM 5.1 è necessario:

- Inserire un "*side orifice*" e un "*bottom orifice*":



Side Orifice (laterale): simula il comportamento della paratoia attraverso l'impostazione di regole di controllo PID;

Bottom orifice (sul fondo): permette alla portata nera di fluire, garantendo il normale flusso dell'acqua, andrà quindi dimensionato in funzione della Q_n .

Figura 8.1: Schema relativo all'inserimento di una paratoia in SWMM 5.1

- Definire le regole di controllo:

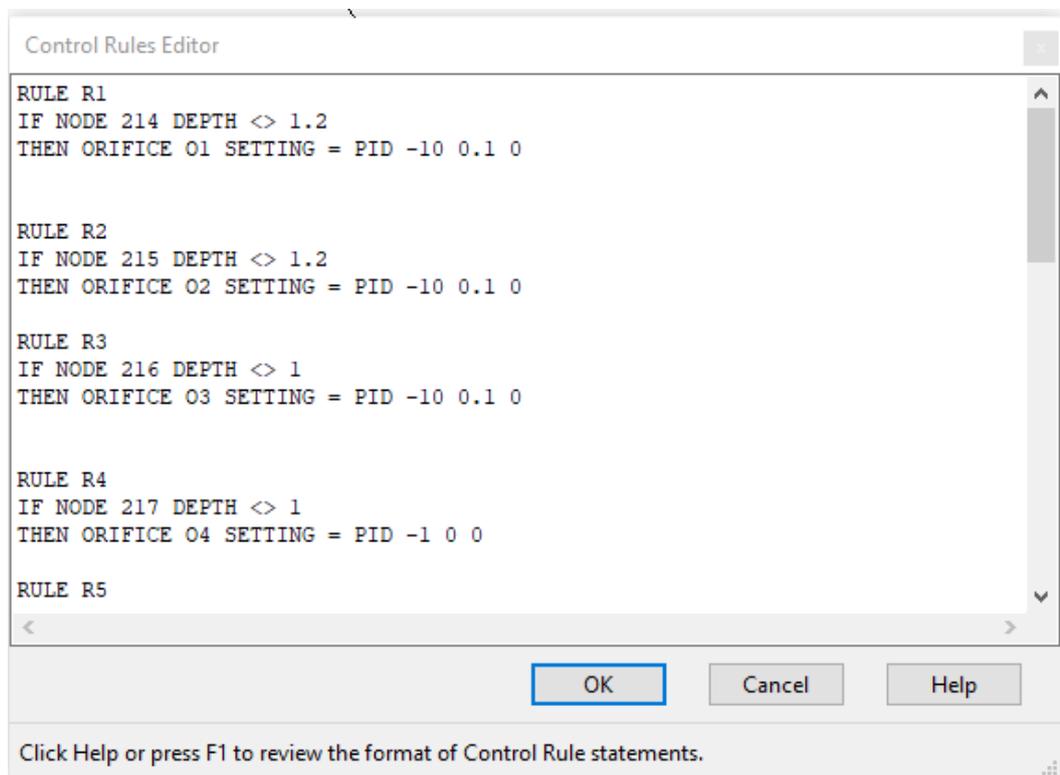


Figura 8.2: Finestra relativa alle regole di controllo in SWMM 5.1

Le regole di controllo per definire l'apertura della paratoia (side orifice) si basano sulla definizione dei coefficienti PID, nello specifico quando si fa riferimento alla portata di un ramo o di un nodo a monte dell'organo regolatore, SWMM richiede un valore negativo del coefficiente K_p , mentre se il controllo viene effettuato su un elemento a valle tale coefficiente sarà positivo.

La ricerca dei coefficienti ottimali parte dall'impostazione del set point relativo alla massima capacità di invaso che si vuole ottenere (80-85%), per tentativi si ricerca la combinazione ottimale tra i valori 10, 1 e 0.1, osservando di volta in volta il grafico relativo al livello del nodo si ricercherà la soluzione che riduce al minimo il numero di aperture e chiusure per mantenere il livello prefissato.

6. Procedere iterativamente nell'inserimento delle paratoie

Nel caso in cui si voglia realizzare un modello relativo ad una porzione di rete, sarà necessario apportare delle modifiche al tratto conclusivo della rete al fine di simulare il comportamento di un ipotetico depuratore e del ricettore.

Modificare il tratto conclusivo della rete in esame comporta l'inserimento di un *outfall* che simula il depuratore, una *weir* che rappresenta lo scolmatore di piena verso un ulteriore *outfall* che schematizza il corpo idrico ricettore.

Nel caso in cui si voglia massimizzare la capacità di trattamento dell'impianto di depurazione bisognerà inserire un *orifice* nel tratto verso il depuratore.

Nello specifico verranno dimensionati:

1. *Weir*: l'altezza della soglia verrà impostata in funzione del grado di diluizione previsto dalla normativa di riferimento, nello specifico per la regione Emilia-Romagna tale valore è fissato pari a 5 volte la portata media nera; in ogni caso la soglia non dovrà risultare più bassa rispetto al diametro della tubazione in uscita verso il depuratore.
2. *Orifice*: permette di regolare la portata indirizzata al depuratore attraverso delle regole di controllo, definito il diametro commerciale in funzione della portata da inviare al depuratore ($5Q_n$). Noti il coefficiente di deflusso μ , la portata Q , e il tirante H , si discretizza quest'ultimo ad intervalli regolari e assegnando ad ogni passo un grado di apertura dell'orifice: fino alla quota di corrispondente al diametro della tubazione, il coefficiente sarà pari ad 1 e successivamente si andrà via via riducendo fino ad arrivare prossimi allo zero. In questo modo si crea una curva per il tratto finale verso l'impianto di depurazione per impostare il comando di controllo della paratoia verso il depuratore.

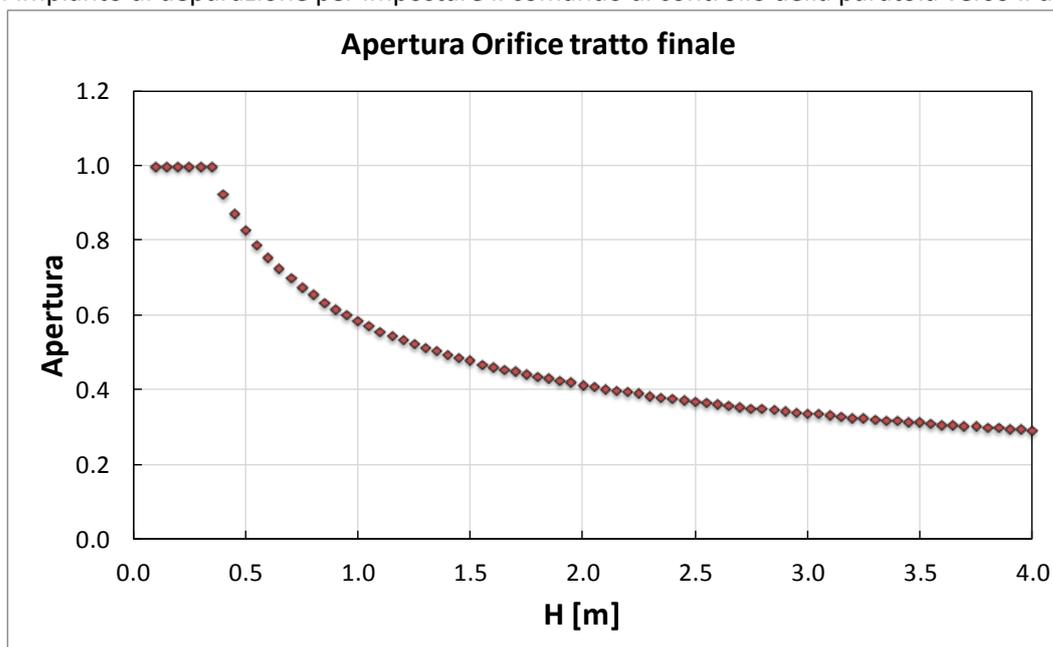


Figura 8.3: Esempio di curva relativa alla chiusura progressiva della paratoia nel tratto verso il depuratore

Il sistema integrato di EW e RTC permette di ottimizzare la gestione dell'intero sistema di drenaggio urbano, infatti, se la rete risulta idonea all'implementazione del controllo in tempo reale, attraverso l'uso del modello idraulico sarà possibile valutare la risposta della rete migliorandone la capacità di accumulo. Questa visione dinamica della rete permette di raggiungere gli obiettivi di minimizzare gli sversamenti in termini di volumi e inquinanti, limitando inoltre i rischi di allagamento urbano, senza la necessità di grandi aree per l'installazione di costose e ingombranti vasche di laminazione.

9 GESTIONE DELLE ACQUE METEORICHE E DI SCARICO NELLA SMARTWATER PLATFORM

La SmartWater Platform mira alla gestione integrata automatizzata del ciclo dell'acqua comprendendo tre sottocategorie relative alla rete fognaria, a quella acquedottistica e al trattamento delle acque reflue.

Lo sviluppo di questa piattaforma mira ad ottimizzare la gestione dei tre domini al fine di ottenere alti standard prestazionali dell'intero ciclo dell'acqua.

I tre domini convergeranno all'interno della piattaforma SmartWater, previa omogeneizzazione dei dati, che elaborerà le informazioni da fornire alla piattaforma generale denominata SmartCity Platform, fruibile dai cittadini, dai gestori e dalle amministrazioni.

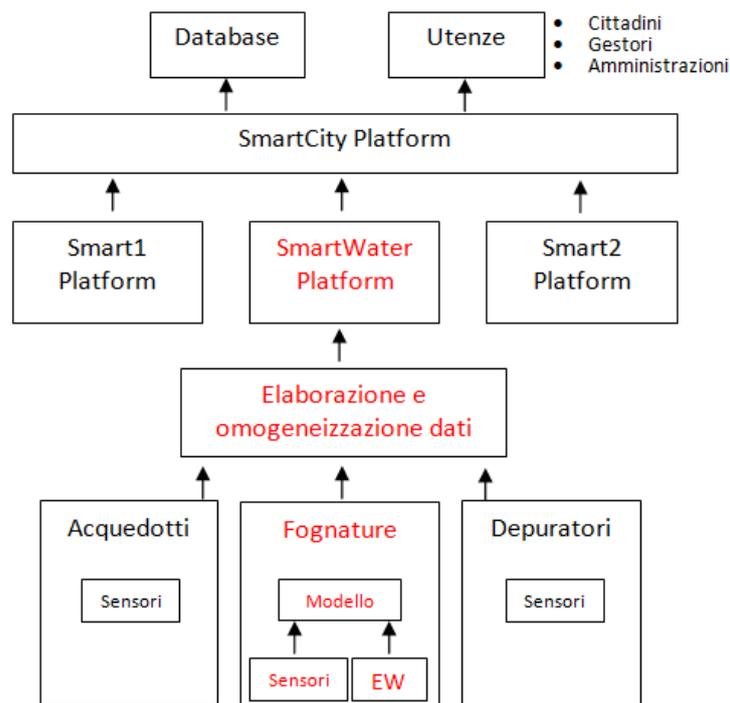


Figura 9.1: Schema strutturale SmartCity Platform

La parte relativa alla rete fognaria sfrutterà la modellazione idraulica della rete attraverso l'uso del software SMWW 5.1, sfruttando quanto detto in precedenza sui sistemi di EW e RTC.

I dati elaborati dalla piattaforma permetteranno la definizione di indicatori di prestazione (KPI), nello specifico il dominio relativo alla rete fognaria utilizzerà come dati in ingresso:

- dati provenienti dal monitoraggio radar connesso al sistema di EW;
- dati monitorati dalla rete di sensori installati sulla rete;
- dati di pioggia;
- stati di funzionamento delle pompe, se presenti, e relativi consumi energetici.

I dati in uscita dalla piattaforma sono di tipo dinamico, quali portate e volumi inviati verso il depuratore o al corpo ricettore, livelli in rete e dati di piovosità.

L'elaborazione di queste informazioni, unite ad un sistema di EW e RTC, permette di gestire in maniera ottimizzata il sistema di drenaggio urbano, minimizzando gli sversamenti in termini di volume ed inquinanti.

Le informazioni inviate agli utenti si possono riassumere in:

- Cittadini: ricevono informazioni relative allo stato di allerta meteo, visualizzando la mappa delle zone critiche e le procedure di preallarme/allarme.
- Gestore/Amministrazione: ricevono tutte le informazioni sullo stato della rete in termini di volumi sversati e trattati, cumulati per il singolo evento o su base annuale e in termini di consumi energetici. Visualizzano la risposta della rete per l'evento previsto dal sistema di EW e adottano le

procedure di manovra manuale o RTC. Tutte le informazioni permettono quindi gestori e amministrazione di valutare l'efficienza della rete attraverso dei parametri di prestazione (KPI).

10 CONCLUSIONI

I sistemi fognari mostrano sempre più frequentemente problematiche di natura idraulica, come i fenomeni di allagamento urbano, e di natura ambientale, legate all'inquinamento dei corpi idrici ricettori.

Queste problematiche sono dovute principalmente alla crescente urbanizzazione, infatti dall'ultimo rapporto di ISPRA sul consumo di suolo in Italia, nel 2017 è stato consumato il 7,65% di suolo sul territorio nazionale, equivalenti a circa 23'062 km² in termini di superficie, circa il 4,95% in più rispetto al valore stimato negli anni '50. Questo si traduce in una riduzione della permeabilità con conseguente incremento dei deflussi superficiali che dovranno essere gestiti dal sistema fognario.

Altra problematica, che influisce nel mettere in crisi il sistema di drenaggio, è legata ai cambiamenti climatici e al manifestarsi sempre più frequentemente di eventi pluviometrici estremi che comportano sollecitazioni notevoli alla rete fognaria progettata per eventi con Tempo di Ritorno nettamente inferiori.

L'innalzamento delle portate immesse in rete dovute alla crescente urbanizzazione e ai cambiamenti climatici, porta sì alla crisi del sistema fognario, ma condiziona anche il funzionamento degli scolmatori di piena esistenti con conseguente incremento delle sostanze inquinanti dilavate dalle superfici urbane e veicolate verso l'ambiente.

Per gestire queste problematiche di natura idraulica ed ambientale sono stati analizzati i sistemi di EW e RTC. Nello specifico l'implementazione di un sistema di controllo in tempo reale su una rete esistente nel comune di Bologna (bacino sperimentale Fossolo), attraverso l'uso del software per la modellazione idraulica SWMM 5.1, ha evidenziato come tale sistema sia in grado di ridurre gli sversamenti nel corpo idrico ricettore, in termini di volume e di inquinanti. Nel caso analizzato, la riduzione percentuale tra la rete originale e quella con RTC e logica PID risulta essere pari al 35%, in termini di volumi inviati al ricettore, e pari al 50% se si osserva la massa dei Solidi Sospesi Totali sversata nel corpo idrico.

Questo sistema di controllo in tempo reale permette quindi di massimizzare la capacità di invaso della rete stessa, intervenendo in modo poco invasivo sulla rete, minimizzando di conseguenza gli sversamenti dai punti di vista del volume inviato al ricettore, ma soprattutto riducendo gli inquinanti immessi nell'ambiente.

11 Riferimenti bibliografici

- [1] Artina S., Maglionico M., Marinelli A.. " Le misure di qualità nel bacino urbano Fossolo". CSDU, Milano, 1996.
- [2] Barbero S., Cremonini R., Tiranti D., " Effetti delle piogge intense nei grandi insediamenti urbani: il sistema di monitoraggio e allarme per la Città di Torino", *Geologia dell'Ambiente - Italian Magazine of Environmental Geology*, 2014
- [3] Berne A., Delrieu G., Creutin J. D., Obled C. "Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology". *Journal of hydrology* 299, 166-179 2004.
- [4] Bruni G., Reinoso R., Van de Giesen N.C., Clemens F.H.L.R., Ten Veldhuis J.A.E. "On the sensitivity of urban hydrodynamic modelling to rainfall spatial and temporal resolution". *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19 (2), 691–709, 2015.
- [5] Campisano A., Cabot Ple, J., Muschalla, D., Pleau, M., Vanrolleghem P. A. " Potential and limitations of modern equipment for real time control of urban wastewater systems". *Urban Water Journal*, 10(5), 300-311, 2013.
- [6] Campisano A., Modica, C. "P units calibration for the RTC of sewer collectors using a dimensionless approach". In *Global Solutions for Urban Drainage*, 2002.
- [7] Campisano A., Modica, C. "PID and PLC units for the real-time control of sewer systems." *Water science and technology*, 45(7), 95-104, 2002.
- [8] Campisano A., Sanfilippo U. "Controllo in tempo reale dei sistemi di fognatura", *Centro Studi Idraulica Urbana*, 2011.
- [9] Campisano, A., Creaco, E., Modica, C."P controller calibration for the real time control of moveable weirs in (proportional) sewer channels". *Water science and technology*, 59(11), 2237-2244, 2009.
- [10] Cembrano G., Quevedo J., Salamero M., Puig V., Figueras J., Marti J. "Optimal control of urban drainage systems. A case study". *Control Engineering Practice*, Vol. 12, pp. 1-9, 2014.
- [11] Comune di Firenze, IRIDRA srl, "Linee guida per un regolamento del verde. Migliori pratiche per la gestione integrata sostenibile delle acque in aree urbane".
- [12] Cristiano E., Ten Veldhuis M. C., Gaitan S., Ochoa-Rodriguez S., Van de Giesen N."Identificazione di scale spaziali e temporali critiche per l'analisi della risorsa idrologica in aree urbane". XXXVI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Ancona, 2018.
- [13] Davini P., Cremonini R., Bechini R., Cassardo C. " Radar-Based Analysis of Convective Storms over Northwestern Italy", *Atmosphere*, 3, 33-58, 2011.
- [14] DWA (2005) Framework for planning of real time control of sewer networks, German DWA Rules and Standards, Advisory Leaflet DWA-M 180E.
- [15] Entem S., Lahoud A., Yde L., Bendsen B., "Real time control of the sewer system of Boulogne Billancourt - A contribution to improving the water quality of the Seine", *Water Science and Technology*, 37(1), 327-332, 1998.

- [16] Fabry F., Bellon A., Duncan M.R., Austin G.L. "High resolution rainfall measurements by radar for very small basins: the sampling problem reexamined". J. Hydrol. 161, 415–428, 1994.
- [17] Faure D., Schmitt J.P., Achet P., "Limits of radar rainfall forecasting for sewage system management : results and application in Nancy". 8th ICUSD, 1999.
- [18] Fradet O., Pleau M., Desbiens A., Colas H., "Theoretical and field validation of solutions based on simplified hydraulic models for real time control of sewer networks". International Conference Novatech, 2010.
- [19] García L. , Barreiro-Gomez J., Escobara E., Téllez D., Quijano N., Ocampo-Martinez C., "Modeling and real-time control of urban drainage systems: A review", Advances in Water Resources 85, 2015.
- [20] Hempel U., Auge J., Schutze M., Engel C., "Sensor-actuator-based network for an early-warning system in extreme weather conditions". 2nd IFAC Symposium on Telematics Application, Politehnica University, Timisoara, 5/8-10, 2010.
- [21] Kopecny E., Entem S., Lahoud A., Moeller A., Yde L., Soulier M., "Real time control of the sewer system of Boulogne Billancourt a contribution to improving the water quality of the Seine".
- [22] Koriche S. A., Rientjes T.H.M., "Application of satellite products and hydrological modelling for flood early warning". Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 93, pp. 12-23, 2016.
- [23] Lombardo F., Napolitano F., Russo F., Zarlenga A. "Su di un modello di nowcasting della precipitazione basato su dati radar", XXX° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - IDRA 2006.
- [24] Lowe R., Vezaro L., Mikkelsen P.S., Grum M., Madsen H., "Probabilistic runoff volume forecasting in risk-based optimization for RTC of urban drainage system". Environmental Modelling & Software, Vol. 80, pp. 143-158, 2016.
- [25] Masseroni D., Massara F., Gandolfi C, Bischetti G. B. "Manuale sulle buone pratiche di utilizzo dei sistemi di drenaggio urbano sostenibile". 2018.
- [26] Mollerup A.L, Mikkelsen P.S., Sin G. "A methodological approach to the design of optimizing control strategies for sewer systems". Environmental modelling and software, 2013.
- [27] Ochoa-Rodriguez S., Wang L.P., Gires A., Pina R.D., Reinoso-Rondinel R., Bruni G., Ichiba A., Gaitan S., Cristiano E., Van Assel J., Kroll S., Murlà-Tuyls D., Tisserand B., Schertzer D., Tchiguirinskaia I., Onof C., Willems P., Ten Vedhuis M.C. "Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: a multi-catchment investigation". Journal of Hydrology 531, 389-407, 2015.
- [28] Piro, P., Carbone, M., Garofalo, G. " Distributed vs. concentrated storage options for controlling CSO volumes and pollutant loads". Water Practice and Technology, 2010.
- [29] Pleau M., Colas H., Lavallee P., Pelletier G., Bonin R., "Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system". Environmental Modelling & Software, Vol. 20, pp. 401-413, 2005.
- [30] Pleau M., Fradet O., Colas H., Marcoux C., " Giving the rivers back to the public. Ten years of Real Time Control in Quebec City", Novatech, 2010.
- [31] Schilling W. "Rainfall data for urban hydrology: what do we need?" Atmos. Res. 27, 5–21, 1991.

- [32] Schutze, M., Campisano, A., Colas, H., Schilling, W., Vanrolleghem, P. A. "Real time control of urban wastewater systems – where do we stand today?" *Journal of Hydrology*, Vol. 299, pp. 335-348, 2004.
- [33] Shultze M., Liaas U. "Real time control of a drainage system, applying the new German RTC guidelines". Novatech, 2010.
- [34] Sun C., Duran B.J., Maruejols T., Cembrano G., Meseguer J., Puig V., Litrico X., "Real time control - oriented quality modelling in combined urban drainage networks". *IFAC paperonline*, Vol. 50, pp. 3941-3946, 2017.
- [35] Thorndah S., Enfalt T., Willems P., Nielsen J.E., Veldhuis M-C, Nielsen K.A., Rasmussen M.R., Molnar P. "Weather radar rainfall data in urban hydrology". *Hydrology Earth System*, 2017.
- [36] US-EPA. Real time control of urban drainage networks, EPA Report, 2006.
- [37] Vezzaro L., Christensen M.L., Thirsing C., Grum M., Mikkelsen P.S. "Water quality-based real time control of integrated urban drainage system: a preliminary study from Copenhagen, Denmark". *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 1707-1716, 2014.
- [38] Yoon S.S. and Nakakita E., "Application of an X-Band Multiparameter Radar Network for Rain-Based Urban Flood Forecasting". *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 22-5, 2015.

12 Abbreviazioni ed acronimi

- BMP: Best Management Practices
- EW: Early Warning
- KPI: Key Performance Indicators
- LID: Low Impact Development
- RTC: Real Time Control
- SST: Solidi Sospesi Totali
- SUD: Sustainable Urban Drainage
- TR: Tempo di Ritorno

Curriculum del gruppo di lavoro

Margherita Altobelli

Assegnista di Ricerca presso l'Università di Bologna. Laureata in Ingegneria Edile-Architettura presso l'Università di Bologna a Febbraio 2017 con voto 100/110. Da Aprile 2017 a Luglio 2018 ha prestato servizio come Assegnista di Ricerca presso il Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale, nell'ambito del progetto POR-FESR GST4water (www.gst4water.it) sulla tematica del recupero e del riuso delle acque meteoriche e reflue, reperendo e analizzando le serie storiche pluviometriche della regione Emilia-Romagna al fine di valutare il corretto dimensionamento dei serbatoi di accumulo, in ambito residenziale, in funzione del sito in cui vengono installati gli impianti. Da Agosto 2018 collabora come Assegnista di Ricerca presso il Dipartimento DICAM-Costruzioni Idrauliche della Scuola di Ingegneria di Bologna nell'ambito del progetto relativo all'ottimizzazione della gestione dei sistemi acquedottistici e fognari dei Comuni di Lizzano in Belvedere e Alto Reno Terme (BO).

<https://www.unibo.it/sitoweb/margherita.altobelli>

Sara Simona Cipolla

Assegnista di Ricerca presso l'Università di Bologna. Ha conseguito la Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, indirizzo Idraulica presso l'Università di Bologna nel 2011. Da Novembre a Dicembre 2011 è titolare di una borsa di studio, presso il dipartimento DICAM, dal titolo "Modellazione numerica delle reti di drenaggio urbano". Nel 2015 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria civile, ambientale e dei materiali presso l'Università di Bologna. Da Gennaio 2015 a Aprile 2016 ha prestato servizio come Assegnista di Ricerca (L240/2010) presso il Dipartimento DICAM-Costruzioni Idrauliche della Scuola di Ingegneria di Bologna. Da Maggio 2016 a Giugno 2018 collabora come Assegnista di Ricerca (L240/2010) presso il Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale, nell'ambito del progetto POR-FESR GST4water (www.gst4water.it). L'attività di ricerca si focalizza principalmente nell'ambito del drenaggio urbano, mediante attività sperimentali volte allo studio del comportamento idrologico di tecnologie per il drenaggio urbano sostenibile (SuDS, green roofs, etc).

<https://www.unibo.it/sitoweb/sara.cipolla>

Marco Maglionico

Ricercatore confermato presso l'Università di Bologna. Ha conseguito la laurea in Ingegneria Idraulica nel 1993 all'Università di Bologna; ha quindi conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica su "Aspetti qualitativi nelle reti di drenaggio urbano" presso il Politecnico di Milano nel 1998. Ha inoltre partecipato a diversi progetti di ricerca sia Italiani che Europei. Tra i progetti internazionali si ricordano: EU INNOVATION 103401 (1996-1999) "Application for the Urban Pollution Management Procedure to River Quality Protection in European Member States"; "CARE-S: Computer Aided REhabilitation of Sewer networks" (2003-2005) nell'ambito del 5th Frame Programme; "TRUST: Transitions to the Urban Water Services of Tomorrow" (2011-2015) under the 7th Framework Programme; "LIFE15 ENV/IT7000423 AGROWETLANDS II Smart water and soil salinity management in Agro-wetlands (2016-2020)". In ambito Nazionale è stato coordinatore del gruppo di lavoro dell'Università di Bologna nell'ambito del finanziamento del MIUR PRIN 2005 del progetto: "Indicatori di prestazione per la stima, l'analisi e la valutazione delle strategie di riduzione delle perdite idriche nei sistemi acquedottistici" e del gruppo di lavoro dell'Università di Bologna nell'ambito del finanziamento del MIUR PRIN 2008 del progetto: "Impatto della riduzione delle perdite idriche sulla gestione dei sistemi di distribuzione in scenari di carenza idrica". I principali campi dell'attività di ricerca riguardano: monitoraggio e modellazione dei sistemi di drenaggio urbano sia per gli aspetti idraulici sia per gli aspetti inerenti la qualità dell'acqua; progettazione di opere per il controllo quantitativo e qualitativo nei sistemi fognari; drenaggio urbano sostenibile (LID, Tetti verdi, ecc.); modellazione numerica delle reti di distribuzione idrica in particolare per la valutazione dell'affidabilità dei sistemi acquedottistici.

<https://www.unibo.it/sitoweb/marco.maglionico>