



Ricerca di Sistema elettrico

NATURE BASED SOLUTION (NBS) E REAL TIME CONTROL (RTC) A SERVIZIO DEI SISTEMI DI DRENAGGIO URBANO

Marco Maglionico, Margherita Altobelli, Sara Simona Cipolla



NATURE BASED SOLUTION (NBS) E REAL TIME CONTROL (RTC) A SERVIZIO DEI SISTEMI DI DRENAGGIO URBANO

Marco Maglionico, Margherita Altobelli, Sara Simona Cipolla (DICAM)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: N.1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 – Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali

Work package: 5 - Efficiamento energetico degli impianti di depurazione municipale e del trattamento delle acque reflue in ambito industriale

Linea di attività: LA5.4 - Nature Based Solution (NBS) e Real Time Control (RTC) a servizio dei sistemi di drenaggio urbano

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Davide Mattioli, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Efficientamento energetico ed ottimizzazione funzionale 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.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 GESTIONE DELLE ACQUE SUPERFICIALI: NATURE BASED SOLUTIONS (NBS) E VASCHE DI ACCUMULO IN AMBITO URBANO.....	6
2.1 INTERVENTI LOCALIZZATI: INVASI	7
2.2 INTERVENTI DIFFUSI A SCALA DI EDIFICIO.....	10
2.2.1 <i>Tetti verdi</i>	10
2.2.2 <i>Recupero e riuso dell'acqua meteorica</i>	14
2.3 INTERVENTI DIFFUSI A SCALA DI QUARTIERE	15
2.3.1 <i>Aree ad allagamento controllato</i>	15
2.3.2 <i>Fasce filtro</i>	17
2.3.3 <i>Bioretention</i>	17
2.3.4 <i>Pavimentazioni e aree permeabili</i>	18
2.4 INTERVENTI NON STRUTTURALI: SISTEMI DI REAL TIME CONTROL (RTC)	20
3 MODELLAZIONE DELLA RETE DI DRENAGGIO	25
3.1 SOFTWARE OPEN SOURCE SWMM 5.1	25
3.2 MODELLO IDRAULICO DEL BACINO SPERIMENTALE DEL FOSSOLO E SCENARI IPOTIZZATI	27
3.3 SCENARIO 0: RETE REALE	29
3.4 SCENARIO 1: IMPLEMENTAZIONE DELLA RETE CON UN SISTEMA RTC.....	31
3.5 SCENARIO 2: INTRODUZIONE DELLE COPERTURE VERDI (CON E SENZA SISTEMA RTC).....	33
3.6 SCENARIO 3: AUMENTO DELLA PERMEABILITÀ (CON E SENZA SISTEMA RTC).....	36
3.7 SCENARIO 4: AUMENTO DELLA PERMEABILITÀ INTRODUCENDO LE COPERTURE VERDI (CON E SENZA SISTEMA RTC).	38
3.8 SCENARIO 5: AUMENTO DELLA PERMEABILITÀ DEL 15% DELLE AREE IMPERMEABILI (CON E SENZA SISTEMA RTC).	40
3.9 SCENARIO 6: INTRODUZIONE DI IMPIANTI PER IL RECUPERO E IL RIUSO DELLE ACQUE METEORICHE PER SCOPI NON POTABILI (CON E SENZA SISTEMA RTC).	42
3.10 SCENARIO 7: INTRODUZIONE DI INVASI DISTRIBUITI LUNGO LA RETE (CON E SENZA RTC).....	47
4 CONCLUSIONI.....	51
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	56
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	59

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 l'applicabilità di soluzioni basate sulla natura (Nature Based Solutions, NBS) in ambito urbano per la gestione delle acque meteoriche in integrazione con sistemi di Real Time Control (RTC) ed Early Warning (EW) al fine di contenere le problematiche di natura idraulica legate a fenomeni di allagamento delle aree urbane e all'inquinamento dei corpi idrici ricettori e allo stesso tempo massimizzando l'efficienza dell'impianto di depurazione.

Sono state analizzate le differenti tipologie di NBS, a scala di quartiere, valutando come esse 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 di valutare quanto queste tecnologie verdi influiscono sulla riduzione dei picchi di portata e sulla qualità dell'acqua inviata al corpo idrico ricettore.

Implementando un modello idraulico relativo ad una rete reale del comune di Bologna, è stato valutato l'impatto della tecnologia verde, singolarmente e combinata con sistema RTC, sul sistema fognario e sull'ambiente, confrontando differenti scenari.

1 Introduzione

Il presente documento di inserisce all'interno del progetto *D.7 "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 l'applicabilità di soluzioni "verdi" quali le Nature Based Solutions (NBS) in ambito urbano per la gestione delle acque meteoriche, anche in integrazione a sistemi di Real Time Control.

Lo scopo principale dell'attività è valutare come queste tecnologie possano ottimizzare la gestione dell'intero sistema rendendolo resiliente e tecnologico.

Come previsto dall'attività di ricerca si analizzano le NBS a scala di quartiere, invasi distribuiti e aree ad infiltrazione, modellando casi semplici per valutare la risposta della singola tecnologia verde, per poi procedere alla modellazione di una rete esistente in ambito territoriale regionale per valutarne l'effetto a scala di quartiere anche in relazione all'inserimento di un sistema di RTC ad esso connesso.

2 Gestione delle acque superficiali: Nature Based Solutions (NBS) e vasche di accumulo in ambito urbano

L'urbanizzazione determina un'importante alterazione del naturale ciclo idrologico. L'aumento delle superfici impermeabili, fenomeno tipico dell'espansione urbana, da un lato riduce i volumi di acqua meteorica che si infiltrano naturalmente nel sottosuolo ricaricando le falde, dall'altro determina l'incremento delle velocità, delle portate e dei volumi dei deflussi superficiali. A tali fenomeni si somma il deterioramento qualitativo dell'acqua che, scorrendo sulle superfici urbane, dilava un'ingente quantità di sostanze inquinanti. Un rapido confronto tra la situazione pre-urbana e quella urbana mostra quindi un importante aumento dei coefficienti di deflusso, la progressiva riduzione dei tempi di concentrazione e un significativo deterioramento qualitativo delle acque che scorrono per deflusso superficiale.

I sistemi di drenaggio urbano nascono con l'obiettivo di risolvere tutte queste problematiche attraverso il convogliamento delle acque reflue verso il depuratore o il ricettore. Negli ultimi anni assistiamo tuttavia ad un progressivo invecchiamento e deterioramento qualitativo delle condotte e a un incremento della frequenza e delle intensità degli eventi meteorici estremi a causa dei cambiamenti climatici. Per risolvere queste criticità, aumentando al contempo la resilienza delle nostre città, nel tempo si sono introdotti sistemi e manufatti capaci di ridurre il rischio di allagamento urbano e di minimizzare il volume di sostanze inquinanti sversate nei ricettori. Ciò avviene principalmente mediante l'introduzione di interventi strutturali usualmente collocati "end of pipe" quali gli invasi di laminazione e prima pioggia. Negli ultimi anni inoltre si sta cercando di risolvere tali criticità attraverso un approccio olistico capace di combinare i benefici idraulici, il miglioramento del microclima urbano, la salvaguardia della biodiversità e l'amenità dei luoghi pubblici attraverso l'introduzione di interventi strutturali che si ispirano alla natura, noti a livello internazionale con il nome di Nature Based Solutions (NBS). Tali tecnologie operano direttamente all'origine favorendo l'infiltrazione e riducendo i volumi di acque meteoriche convogliati in fognatura, ripristinando quindi una situazione idrologica comparabile a quella pre-urbana.

L'introduzione di tutti questi interventi determina un incremento della complessità dei sistemi di drenaggio urbano che viene sempre più risolta attraverso l'introduzione di interventi non strutturali, quali i sistemi di controllo in tempo reale (RTC) che consentono di ottimizzare il funzionamento delle singole tecnologie e della rete nel suo complesso, sfruttando al contempo la massima capacità di invaso della rete.

Riassumendo quanto sopra i provvedimenti più comunemente adottati per la risoluzione o riduzione delle problematiche idraulico-ambientali legate alle precipitazioni possono essere suddivisi in due categorie: interventi strutturali e interventi non strutturali.

I primi prevedono la realizzazione di manufatti o strutture e si suddividono in:

- **Interventi localizzati:** consistono nella realizzazione di invasi che hanno la funzione di trattenere provvisoriamente una parte dei volumi idrici derivanti dagli eventi meteorici, per inviarli successivamente alla depurazione (vasche di prima pioggia) o per restituirli alla rete a valle o al ricettore con portata con essi compatibile (vasche volano);
- **Interventi diffusi:** nature based solutions distribuite sull'area urbanizzata:
 - **a scala di edificio** → coperture e pareti verdi, recupero e riuso dell'acqua meteorica nelle abitazioni;
 - **a scala di quartiere** → aree ad allagamento controllato, fasce filtro, pavimentazioni e aree permeabili;

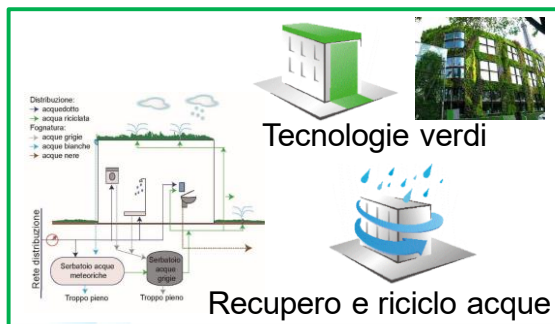
Gli Interventi non strutturali, invece, non comportano la realizzazione di manufatti o strutture; hanno lo scopo di sfruttare al meglio la rete di drenaggio esistente, massimizzandone la capacità d'invaso, o di ridurre gli inquinanti inviati al ricettore; fanno parte di questa categoria i sistemi di controllo in tempo reale RTC.

Le Nature Based Solutions (NBS) sono strategie e tecnologie per il drenaggio urbano sostenibile che puntano alla riduzione del picco di portata e, allo stesso tempo, alla limitazione del carico inquinante indirizzato al corpo idrico ricettore. Sono soluzioni che agiscono "a monte", riducendo i deflussi meteorici mediante politiche urbanistiche "verdi" di incremento della capacità di infiltrazione e di invaso. Le NBS sono

soluzioni ispirate e basate sulla natura, nate per conciliare i benefici idraulici con quelli ambientali. Sono soluzioni economicamente vantaggiose, in grado di fornire benefici per l'ambiente, la società e l'economia e di contribuire ad aumentare la resilienza dello spazio urbano.

I punti di forza delle NBS si possono sintetizzare in:

- Uso sostenibile dei materiali e dell'energia;
- 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.

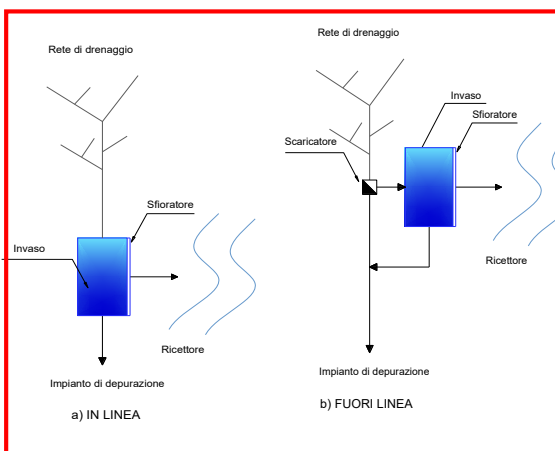


NBS a scala di edificio

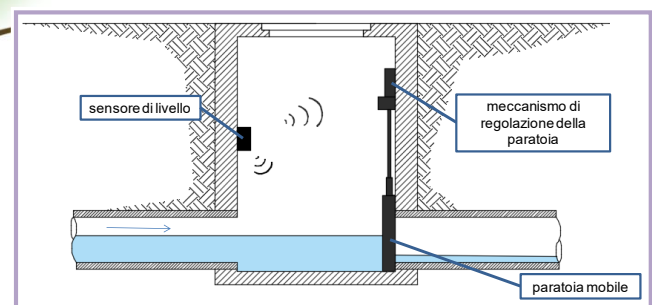


NBS a scala di quartiere

Scala di quartiere



Invasi in linea e fuori linea



Sistemi di Real Time Control

Figura 2-1: esempi dei provvedimenti più comunemente adottati per la risoluzione o riduzione delle problematiche idraulico-ambientali legate alle precipitazioni

2.1 Interventi localizzati: invasi

Gli invasi rappresentano il mezzo più efficace per garantire la protezione idraulica e ambientale del territorio urbano. Vengono inseriti nelle reti di drenaggio con la funzione di accumulare provvisoriamente una parte dei deflussi superficiali che successivamente vengono inviati alla depurazione (vasche di prima pioggia) o alla rete a valle o al ricettore finale con portata ridotta (vasche di laminazione). La prima tipologia viene utilizzata per contenere il volume di sostanze inquinanti dilavato dalla prima pioggia, le seconde

vengono utilizzate per garantire l'invarianza idraulica del bacino abbattendo le portate al colmo e rallentando la propagazione della piena a valle.

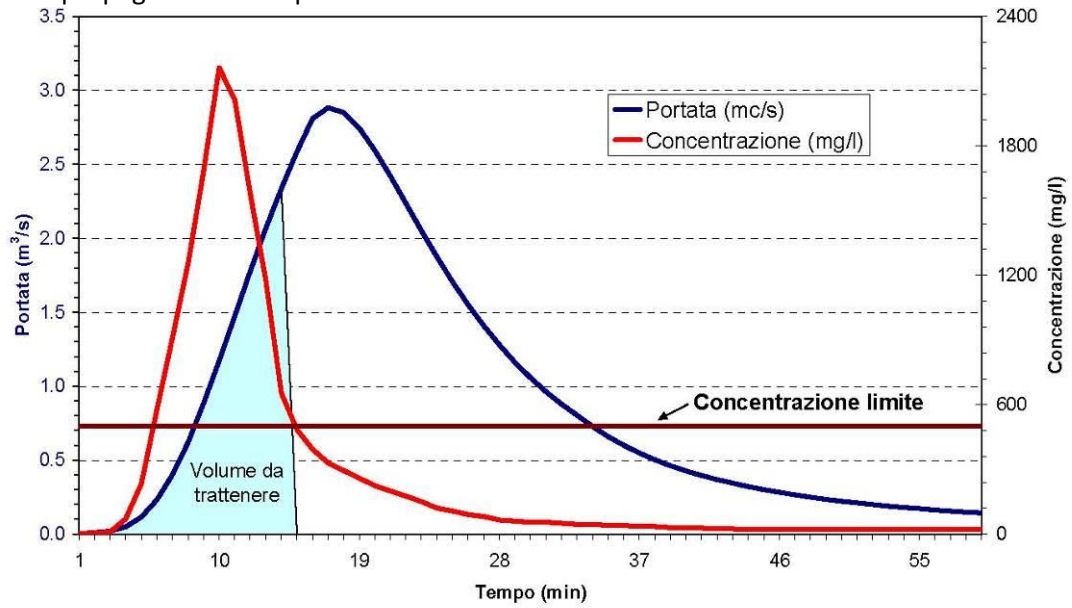


Figura 2-2: Schema di idrogramma e pollutogramma per individuare il volume da assegnare alla vasca di prima pioggia.

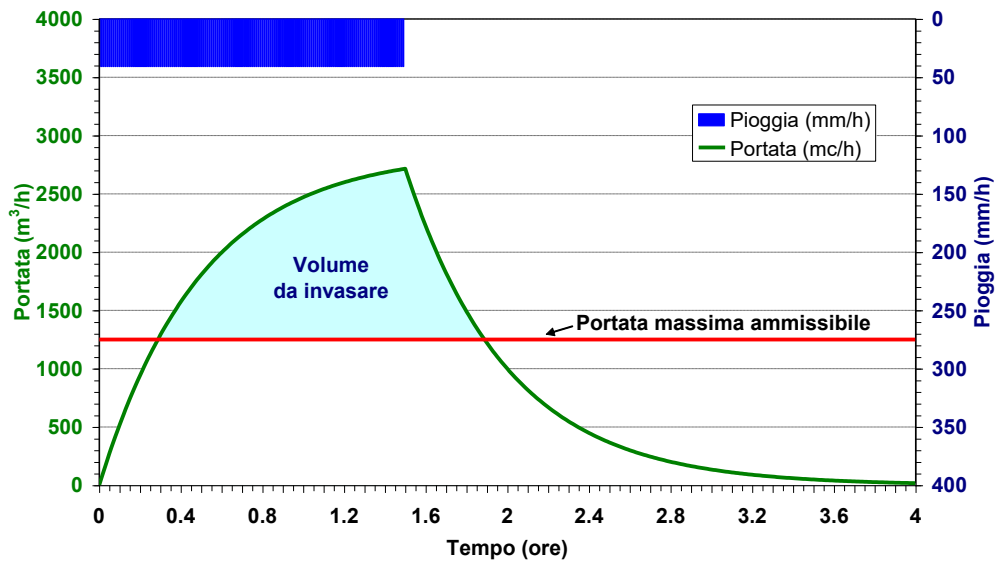


Figura 2-3: Grafico che evidenzia il volume da assegnare all'invaso di laminazione. Noto l'idrogramma in ingresso e la portata massima ammissibile in uscita costante.

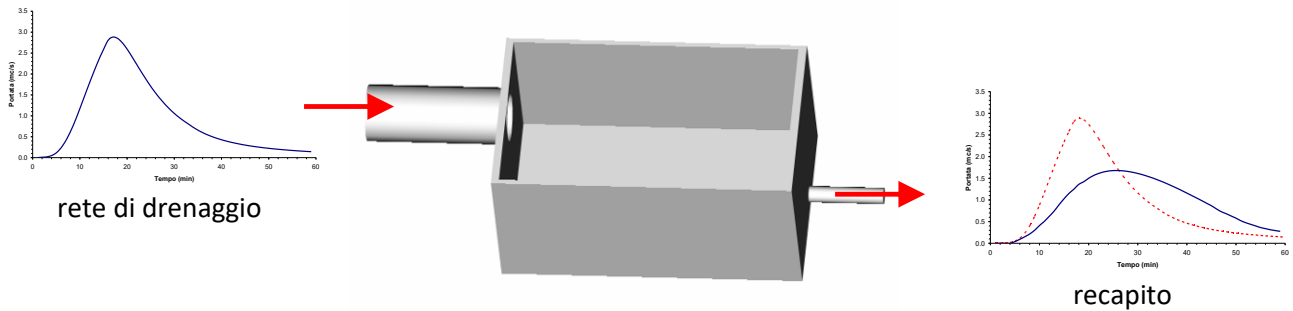


Figura 2-4: Schema semplificato di funzionamento di una vasca di laminazione

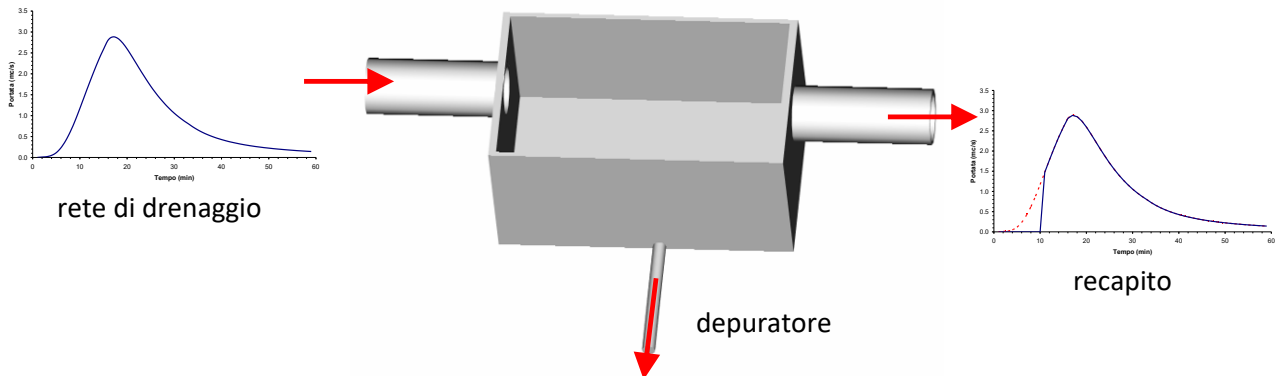


Figura 2-5: semplificato di funzionamento di una vasca di "prima pioggia"

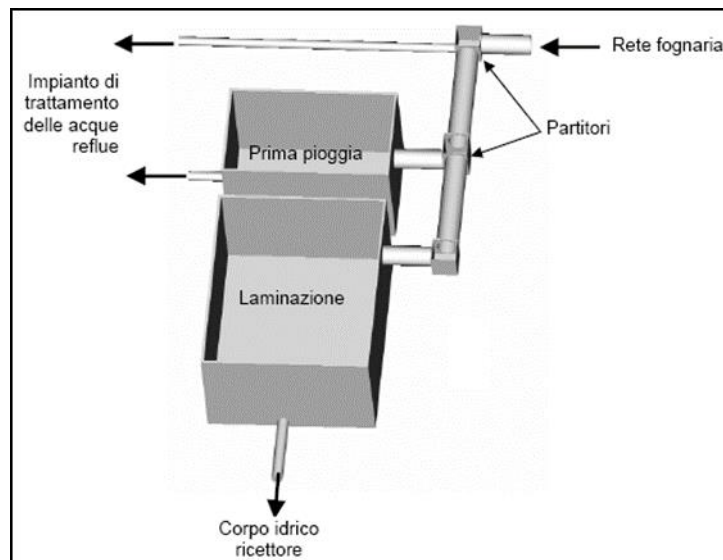


Figura 2-6: Vasca di prima pioggia abbinata ad un invaso di laminazione [Maglionico, 2004]

Le vasche di prima pioggia, spesso realizzate in accoppiamento ad uno scaricatore di piena, mirano all'accumulo temporaneo del volume iniziale di piena che, ad evento meteorico terminato, verrà inviato alla depurazione. Lo svuotamento di tali invasi avviene o mediante scarico di fondo opportunamente tarato e dotato di paratoia o mediante l'utilizzo di un impianto di sollevamento. Generalmente le vasche di "prima pioggia" sono dei manufatti di modesta dimensione il cui volume è orientativamente pari a 50 m^3 per ogni ettaro di superficie impermeabile drenata. Sono invasi impermeabilizzati e dotati di un sistema automatico di manutenzione e pulizia.

Le vasche di laminazione nascono invece con l'obiettivo di creare un volume in cui l'acqua in arrivo dal sistema fognario si può espandere e invasare temporaneamente, attenuando e ritardando il valore di

colmo della portata. Il volume attribuito all'invaso dipende dalle capacità di convogliamento delle portate da parte del sistema idraulico a valle ed è usualmente pari a 500 m³ per ogni ha di superficie drenata.

Le vasche di laminazione richiedono ingenti volumi, spesso difficilmente inseribili all'interno del contesto urbano. Per ovviare a questa criticità, in particolare in passato, si sono costruiti grossi invasi di laminazione interrati mediante la realizzazione di vasche in calcestruzzo oppure utilizzando tubi di grandi dimensioni. In generale con le vasche in cemento armato, per la loro sezione rettangolare e per il fatto che forniscono un volume continuo, si ottiene un maggiore volume d'invaso per unità di area scavata rispetto a quello ottenibile con tubi circolari di grande diametro.

Una volta determinato il volume da assegnare all'invaso, la scelta dell'una o dell'altra tipologia costruttiva dipende da vari fattori: conformazione e caratteristiche fisiche dell'area oggetto di intervento, costo dei materiali, costo delle operazioni di scavo, regolamenti locali, ecc.

In generale con le vasche in cemento armato, per la loro sezione rettangolare e per il fatto che forniscono un volume continuo, si ottiene un maggiore volume d'invaso per unità di area scavata rispetto a quello ottenibile con tubi circolari di grande diametro. Ciò è dovuto anche al fatto che i tubi devono essere reciprocamente distanziati di una quantità minima, per ragioni di integrità strutturale. D'altra parte i sistemi di tubi hanno una maggiore flessibilità di impiego e perciò si utilizzano laddove le caratteristiche dello spazio disponibile non consentono l'inserimento di una vasca.

Quando possibile si preferisce evitare la costruzione di invasi di laminazione interrati in materiale lapideo optando per la realizzazione di invasi in terra che presentano notevoli vantaggi dal punto di vista progettuale e gestionale.

Gli invasi in terra possono essere non-permanenti o permanenti. Gli invasi non permanenti sono aree depresse dotate di scarico di fondo e scarico di troppo pieno in cui viene inoltre favorita la naturale infiltrazione dell'acqua nel sottosuolo. Presentano lo svantaggio di richiedere grandi superfici e di rimanere vuote in gran parte dell'anno. Per contro sono soluzioni economiche, affidabili e richiedono manutenzioni minime. Nel tempo si è optato per coniugare i benefici idraulici di queste opere con la creazione di spazi fruibili dalla collettività, integrati nel contesto urbano e capaci di migliorare il microclima urbano. Appartengono a questa famiglia i bacini di laminazione permanenti in cui, come dice la parola stessa, una parte di essi è permanentemente piena d'acqua. Spesso si presentano come laghetti inseriti all'interno delle aree verdi urbane in cui si favorisce l'infiltrazione e si sfrutta la capacità fitodepurativa della vegetazione per migliorare la qualità dell'acqua invasata. Gli invasi permanenti vengono dimensionati considerando eventi con tempo di ritorno compreso tra i 2 e i 10 anni. In occasione di eventi pluviometrici con tempo di ritorno maggiore un troppo pieno di emergenza evita il rischio di allagamenti. La profondità ottimale risulta compresa tra 1 e 3 metri dato un tempo di resistenza idraulica di due settimane [Hartigan, 1988], evitando la sospensione di solidi, nel caso di profondità troppo piccole, oppure il verificarsi di condizioni anossiche sul fondo, nel caso di altezza eccessive.

2.2 *Interventi diffusi a scala di edificio*

2.2.1 *Tetti verdi*

I tetti costituiscono una consistente percentuale dell'area urbana, circa il 20-30%, e la conversione di tali superfici in coperture verdi può fornire benefici in termini di isolamento termico, di riduzione delle isole di calore e dei consumi di energia ma può fornire anche una valida soluzione al problema dell'impermeabilizzazione del suolo negli agglomerati urbani.

In generale le coperture verdi possono migliorare le condizioni di vita delle zone urbane grazie a vantaggi ambientali quali:

- Mitigazione microclimatica: i giardini pensili diminuiscono la temperatura dell'ambiente sono uno strumento per la mitigazione dell'isola di calore urbana;
- Riduzione dell'inquinamento sonoro: il substrato assorbe onde a basse frequenze e la vegetazione onde ad alte frequenze;
- Assorbimento dell'elettrosmog: secondo uno studio dell'Università militare di Monaco, utilizzando uno spessore di substrato di 15 cm (equiparabile a un intensivo leggero) si può ridurre il campo di

frequenza della rete cellulare di 22 dB, pari al 99.4%, mentre coperture in argilla raggiungono valori superiori di 49 dB, pari al 99.9%;

- Fissaggio delle polveri e depurazione dell'aria;
- Superfici di compensazione e biodiversità: il verde pensile è riconosciuto come strumento per la compensazione delle superfici naturali sottratte a causa dell'edificazione;
- 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.

Da un punto di vista funzionale, le coperture a verde assicurano una maggiore protezione meccanica degli strati componenti la copertura (membrana impermeabilizzante, solaio ecc..) e, da un punto di vista economico, consentono, grazie alle funzioni d'isolamento termico, un risparmio sui costi energetici. Inoltre, dal punto di vista idraulico, vista la progressiva impermeabilizzazione del suolo dovuta alla crescita delle aree urbanizzate che ha alterato irrimediabilmente il naturale ciclo idrologico, causando un deterioramento qualitativo delle acque di scorrimento e riducendo i volumi di precipitazione che si possono infiltrare, le coperture verdi forniscono una soluzione al sovraccarico dalla rete fognaria aumentando l'assorbimento delle acque meteoriche e ritardando il loro ingresso in fognatura. Con l'incremento di tetti verdi si può quindi ridurre e controllare il runoff superficiale delle acque meteoriche che si riversano nei bacini di drenaggio e in fognatura. Per la sua struttura, la copertura verde permette l'accumulo e la ritenzione di buona parte della precipitazione; essa consiste nella sovrapposizione di più strati, ciascuno con una funzione bene specifica, al di sopra dei quali viene fatta crescere la vegetazione. I pacchetti che formano i tetti verdi possono essere anche molto differenti tra loro sia per il numero e lo spessore degli strati sia per la loro inclinazione.

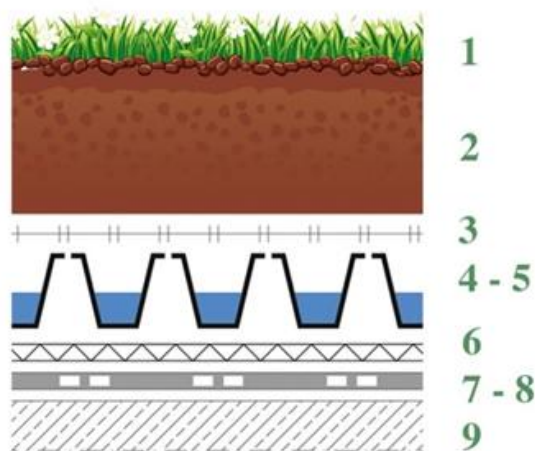


Figura 2-7: stratigrafia della copertura verde (www.leca.it)

Generalmente è però sempre prevista la presenza, partendo dal basso verso l'alto, dei seguenti elementi:

a) Vegetazione

La scelta della tipologia di vegetazione è legata a diversi fattori che vanno dalle più semplici esigenze estetiche e di manutenzione fino agli aspetti più tecnici come l'ottimizzazione dei flussi termici ed idrici, l'assorbimento degli inquinanti e del rumore ambientale. Nella scelta della vegetazione vanno tenute in considerazione, inoltre, le caratteristiche climatiche locali e l'esposizione al vento e al sole diretto. (Pittaluga et al. 2009; Schunk et al. 1998; Andri et al. 2012).

b) Substrato o strato culturale

È lo strato di terreno che contiene le sostanze nutritive e accumula l'acqua per la vegetazione deviandone la parte in eccesso. Il ridotto spessore dello strato fa sì che esso debba soddisfare esigenze superiori a quelle di normale terreno di campo; è necessario, quindi, ricorrere ad un terreno

“ammendato” con determinate caratteristiche di pH e conducibilità elettrica (UNI EN 13037) o di controllo della ritenzione idrica (UNI EN 13041). Generalmente si impiegano varie di minerali (pomice e laterizio) a cui si aggiungono componenti organiche in grado di favorire l’attecchimento della vegetazione (torba, fibra di cocco ecc.). Lo spessore del substrato varia, a seconda del tipo di vegetazione scelta, da un minimo di 8 cm per il *Sedum* fino a spessori di oltre 40 cm per arbusti di prima grandezza.

c) Strato filtrante

Il filtro ha lo scopo di impedire che eventuali particelle provenienti dal substrato vadano ad ostruire il drenaggio sottostante; in questo modo solo l’acqua può passare attraverso questo strato. Può essere realizzato tramite tappetini o lastre di diversi materiali (polimerici, fibre di vetro o lana di roccia) oppure con tessuti geotessili. Per un corretto funzionamento, l’elemento filtrante deve avere una permeabilità all’acqua almeno 10 volte superiore rispetto a quella dello strato colturale, e comunque maggiore di 0,3 cm/s, così come indicato dalla normativa UNI 11235.

d) Elemento drenante e di accumulo idrico

Svolge la doppia funzione di smaltimento dell’acqua in eccesso e di riserva idrica per la vegetazione; allo stesso tempo garantisce l’aerazione del substrato e la creazione di un strato d’aria che incrementa l’inerzia termica del sistema. Può essere costituito da vari tipi di aggregati (argilla espansa, perlite espansa, pietrisco) oppure realizzato mediante elementi prefabbricati in polistirene o plastica.

6. Membrana antiradice (elemento di protezione meccanica)

Può essere o meno integrata alla membrana impermeabilizzante (UNI 11235:2007) ed ha il compito di bloccare il passaggio delle radici e dei microorganismi le quali potrebbero compromettere la struttura sottostante.

8. Membrana bituminosa impermeabilizzante

Ha la funzione di impedire il passaggio dell’acqua al fine di proteggere la struttura della copertura sottostante.

9. Elemento portante

La normativa italiana individua nove funzioni primarie della stratigrafia della copertura verde

Funzione	Sistema	Componente	Particolarità
Inverdimento	Sistema a verde	Strato di vegetazione	
Substrato coltivo		Strato colturale	
Filtraggio		Elemento filtrante	
Accumulo idrico		Elemento di accumulo idrico	Spesso integrate in un unico elemento
Drenaggio		Elemento drenante	
Protezione meccanica		Elemento di protezione meccanica	
Protezione dell'azione delle radici	Sistema di impermeabilizzazione	Elemento di protezione dalle radici	Spesso integrate in un unico elemento
Impermeabilizzazione		Elemento di tenuta	
Funzione strutturale		Elemento portante	

Generalmente i tetti verdi possono essere classificati in intensivi o estensivi. Una realizzazione del primo tipo include veri e propri giardini pensili in grado di costituire un ecosistema in miniatura in cui possono crescere erbe, cespugli ed alberi. Per questo motivo richiedono spessori di substrato considerevoli che vanno dai 30 mm fino a raggiungere anche i 200 mm e il carico strutturale aggiuntivo può essere notevole,

tra i 300 e i 750 kg/m². I tetti verdi estensivi, invece, sono caratterizzati da profondità del substrato molto minori, comprese tra 2,5 e 15 cm e vengono realizzati generalmente per ottenere vantaggi di tipo ambientale. Le realizzazioni di tipo estensivo sono caratterizzate da una scelta della vegetazione più limitata ma richiedono poca cura e manutenzione e sono facilmente realizzabili anche su tetti inclinati. In questo caso il carico aggiuntivo sulla struttura dell'edificio è molto inferiore al precedente, tra i 60 e i 150 kg/m², per cui possono essere applicati anche su edifici già esistenti (Stefanutti 2009; Berardi, GhaffarianHoseini, and GhaffarianHoseini 2014).

Le peculiarità delle coperture verdi, legate alla loro struttura, si possono riassumere in:

- Capacità di accumulo idrico: durante l'evento meteorico, o le irrigazioni, l'elemento di accumulo trattiene acqua per cederla nei periodi di necessità. questa proprietà varia in funzione del contesto in cui viene installata la copertura poiché strettamente relazionata al clima e al tipo di soluzione tecnica e vegetale adottata;
- Capacità drenante: funzione del substrato;
- Capacità di aerazione dello strato drenante: l'elemento drenante deve garantire almeno il 60% di volume d'aria per non deteriorare le radici delle piante e che, fra la superficie dell'acqua eventualmente presente e l'elemento filtrante, vi sia una quantità di aria pari almeno al 30% dello spessore dell'elemento drenante con un minimo di 1 cm;
- Capacità di aerazione dello strato colturale;
- Capacità agronomica: ovvero la capacità del suolo di trattenere alcuni elementi nutritivi per la crescita delle piante.

Il contributo alla regimazione idrica è uno dei benefici più importanti dei tetti verdi i quali, grazie alla loro capacità di trattenere, accumulare e restituire all'ambiente l'acqua, sono in grado di ripristinare almeno in parte il ciclo idrologico (Pittaluga et al. 2009). Infatti, la cementificazione ha fatto sì che le acque piovane vengano quasi totalmente intercettate e convogliate nella rete fognaria mettendo spesso in crisi l'intera rete di smaltimento delle acque bianche, specialmente in occasione di forti eventi atmosferici ormai sempre più frequenti. La copertura verde, con la capacità di ritenzione idrica che la contraddistingue, rallenta il deflusso delle acque meteoriche verso le condotte di scarico, alleggerendo così il carico sul sistema di smaltimento. La capacità del tetto verde di regimare le acque è misurata dal coefficiente di deflusso Y che definisce il rapporto tra l'acqua piovana che viene rilasciata e quella che viene captata, in uno specifico intervallo di tempo. Per le coperture impermeabili il coefficiente di deflusso varia da 0.80 a 1, in funzione dell'inclinazione del tetto, per le coperture verdi il coefficiente dipende non solo dall'inclinazione ma anche dallo spessore della stratigrafia come evidenziato nella Tabella 2-1.

Spessore stratificazione [cm]	Y Inclinazione <15°	Y Inclinazione >15°
>50	0.1	-
25-50	0.2	-
15-25	0.3	-
10-15	0.4	0.5
6-10	0.5	0.6
4-6	0.6	0.7
2-4	0.7	0.8

Tabella 2-1: coefficienti di deflusso per coperture verdi in funzione dello spessore e dell'inclinazione ("Il verde pensile" Paolo Abram)

Durante un evento meteorico, l'acqua intercettata dalla copertura verde attraversa il substrato, dove viene accumulata fino a saturazione, per poi essere stoccata nello strato drenante; solo l'acqua in eccesso viene, quindi, invece deviata verso il sistema fognario (Stovin, Vesuviano, and Kasmin 2012). Parte delle acque meteoriche, inoltre, torna in atmosfera grazie all'evapotraspirazione, un processo fisico che include l'evaporazione dalla superficie del terreno e la traspirazione dagli apparati fogliari delle piante (Cipolla 2015).

Il comportamento idrologico del tetto verde garantisce, quindi, non solo una portata minore in ingresso alla rete fognaria, con conseguente riduzione dei volumi diretti verso i corpi idrici ricettori, ma anche il periodo di scarico risulta dilatato.

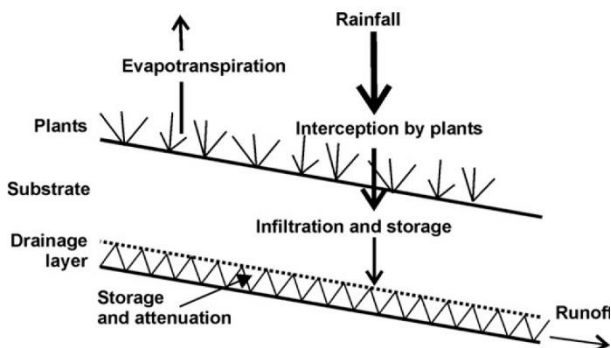


Figura 2-8: Processi idrologici del tetto verde (Stovin, Vesuviano, and Kasmin 2012)

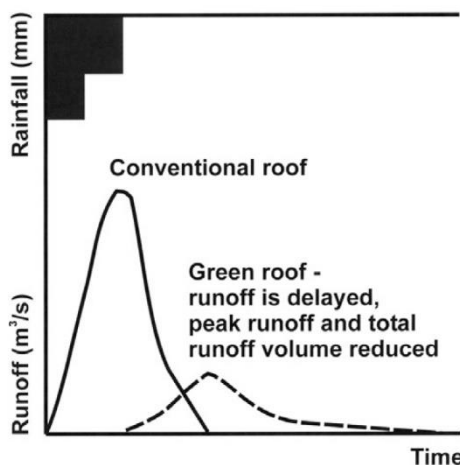


Figura 2-9: Risposta del tetto verde alle precipitazioni (Stovin, Vesuviano, and Kasmin 2012)

La capacità di ritenzione del tetto verde dipende sia dalla stratigrafia della copertura stessa, spessore del substrato in primis, che dalle condizioni meteorologiche del sito di installazione. Studi condotti sul comportamento idrologico dei tetti verdi hanno dimostrato che le realizzazioni estensive sono in grado di ridurre annualmente il deflusso di una percentuale che varia dal 22% al 75% e che per substrati più profondi si supera l'80% (Palla, Gnecco, and Lanza 2010).

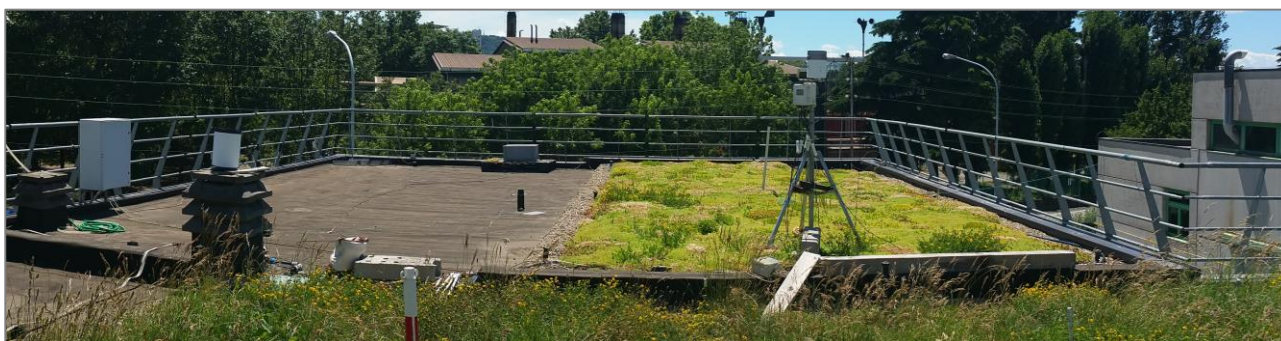


Figura 2-10: tetto verde sperimentale presso la Scuola di Ingegneria dell'Università di Bologna

2.2.2 Recupero e riuso dell'acqua meteorica

Gli impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche prevedono l'accumulo di tali acque in un serbatoio e il loro riutilizzo, mediante una rete di distribuzione duale, per soddisfare alla domanda di acqua non potabile (alimentazione WC, irrigazione giardino, etc) interna all'edificio. Tali tecnologie consentono di laminare i deflussi riducendo al contempo i consumi di acqua potabile.

I vantaggi offerti dall'installazione di impianti di raccolta dell'acqua piovana per uso individuale non sono goduti solo a livello privato ma si riflettono positivamente nella sfera dell'intervento pubblico. Sono essenzialmente dei piccoli invasi di laminazione diffusi che consentono di ridurre e rallentare la portata al colmo. La loro diffusione capillare sul territorio porterebbe ad una riduzione delle portate meteoriche in fognatura che si riflette in una riduzione del rischio di insufficienza idraulica dei collettori e in un incremento dell'efficienza dei depuratori (laddove le reti fognarie bianca e nera non siano separate), che attualmente risentono, in particolare nel comparto biologico, della diluizione del refluo operata dalle acque

meteoriche. Un altro punto di forza nel riutilizzo delle acque meteoriche è dovuto al fatto che esse presentano una bassa concentrazione di inquinanti eliminabile attraverso un semplice filtraggio prima dell'invaso e un affinamento prima del riutilizzo all'interno dell'edificio. In un'ottica di cambiamento climatico e di riduzione delle fonti di approvvigionamento tradizionale, le acque meteoriche rappresentano una fonte locale di acqua utilizzabile per sopperire alla domanda di acqua non potabile attualmente soddisfatta con acqua di alta qualità.

Il recupero e il riciclaggio delle acque meteoriche sono tra i sistemi in grado di offrire un immediato contributo

Gli impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche si compongono principalmente dei seguenti elementi: a) un sistema di captazione, b) un filtro d'ingresso, c) una vasca di calma e serbatoio d'accumulo, d) un'unità per il trattamento finale; e) un sistema di prelievo, pompaggio e controllo, f) un troppo pieno, g) una rete duale di distribuzione e infine h) un sistema per il reintegro da acquedotto.

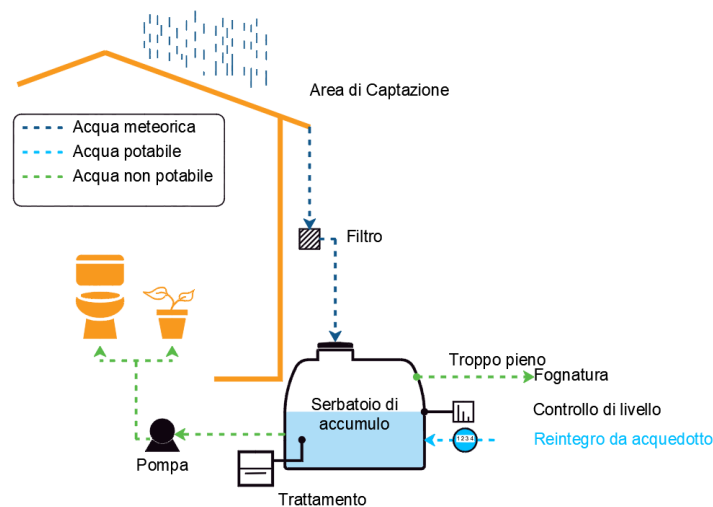


Figura 2-11: schema impianto per il recupero e il riuso delle acque meteoriche e/o grigie

2.3 Interventi diffusi a scala di quartiere

2.3.1 Aree ad allagamento controllato

Sono generalmente dei piccoli invasi profondi 30-60 cm distribuiti nel territorio, spesso chiamati "giardini della pioggia" perché accumulano temporaneamente le acque di pioggia. Drenano superfici inferiori ai 2 ha e smaltiscono l'acqua principalmente per infiltrazione nel sottosuolo. 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. Devono essere collocati in aree in cui non si ha una falda troppo superficiale per evitare la contaminazione di quest'ultima. Quando il suolo nel quale vengono realizzate non raggiunge la permeabilità minima si prevede l'aggiunta di sabbia, ghiaia e sostanze organiche. L'elevata permeabilità di questo tipo di bacini viene garantita dalla presenza di essenze vegetali erbacee rustiche. La forma dei bacini dipende dallo spazio disponibile in sito e dalle esigenze architettoniche e paesaggistiche, presentano il vantaggio di essere versatili e facilmente inseribili nel contesto 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 filtraggio del materiale più grossolano e di rallentamento della velocità di deflusso. Nell'area di ristagno si ha 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 microorganismi 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.

Negli ultimi anni si stanno realizzando delle aree ad allagamento controllato anche mediante la realizzazione di piazze (water squares) o campi da basketball allagabili posizionati in punti strategici dell'area urbana. All'apparenza sembrano dei semplici spazi pubblici multifunzionali che in caso di forti piogge ed inondazioni si trasformano in bacini di raccolta e stoccaggio delle acque meteoriche, così da alleggerire il carico sul sistema fognario ed eventualmente riutilizzare quanto raccolto per i momenti di scarsità idrica. Questa soluzione porta alla realizzazione di realtà urbane dinamiche.

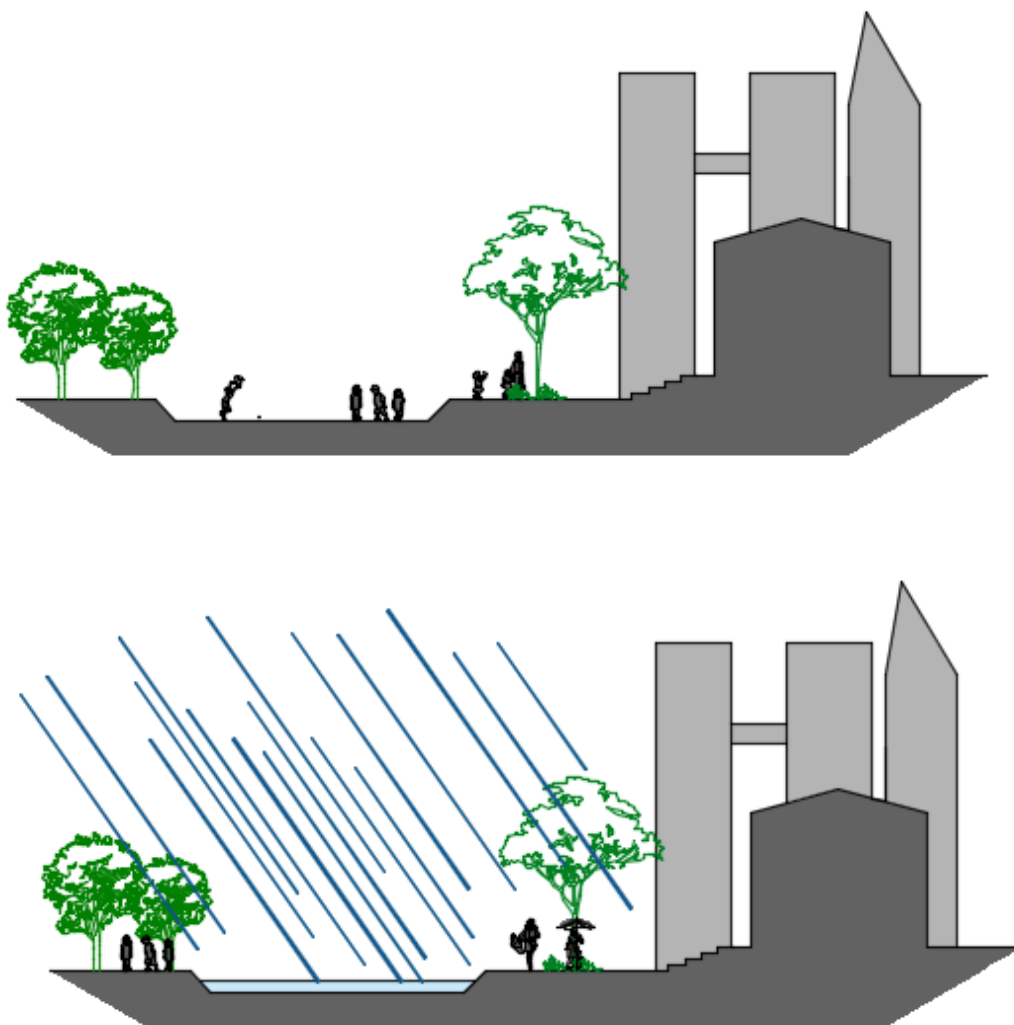


Figura 2-12: schema esemplificativo di water square, sopra si riporta il caso "asciutto", sotto il caso "allagato"

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. Sono progettate con tempo di ritorno pari a due anni e il tempo di permanenza di acqua in vasca non potrà superare le 32 ore per motivi igienici. Le "water squares" sono progettate per raccogliere l'acqua piovana proveniente dai spazi pubblici e dai tetti dei fabbricati limitrofi, però, grazie ad un attento studio delle pendenze del suolo e di canalizzazioni, tale acqua viene preventivamente indirizzata ad un impianto di

filtraggio e trattamento nascosto al disotto del terreno (chiamato “water chamber”), in modo da essere immessa nei bacini delle piazze priva dei maggiori e più dannosi inquinanti, garantendo così la salute dei cittadini.

2.3.2 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.

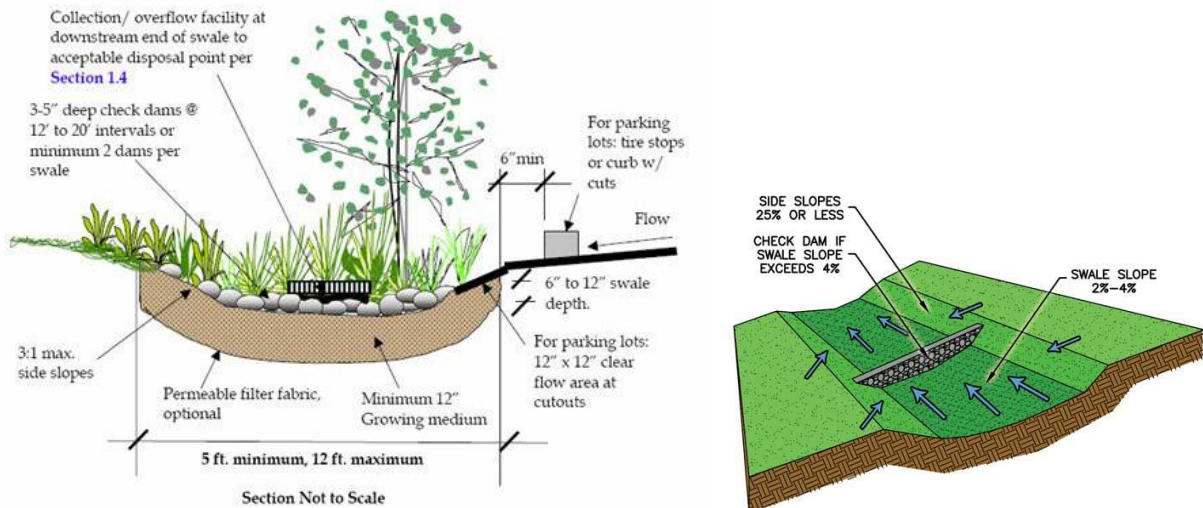


Figura 2-13: Esempio di un canale inerbita a sinistra [http://www.ci.sandy.or.us], a destra si riporta il caso di un canale inerbita con diaframma [http://www.fxbrowne.com]

Non vengono di norma progettati per controllare i picchi di portata per fare questo vengono spesso utilizzate in combinazione con altri sistemi NBS quali piccoli invasi o fasce vegetate. 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.

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, trapezia e parabolica.

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.

2.3.3 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.

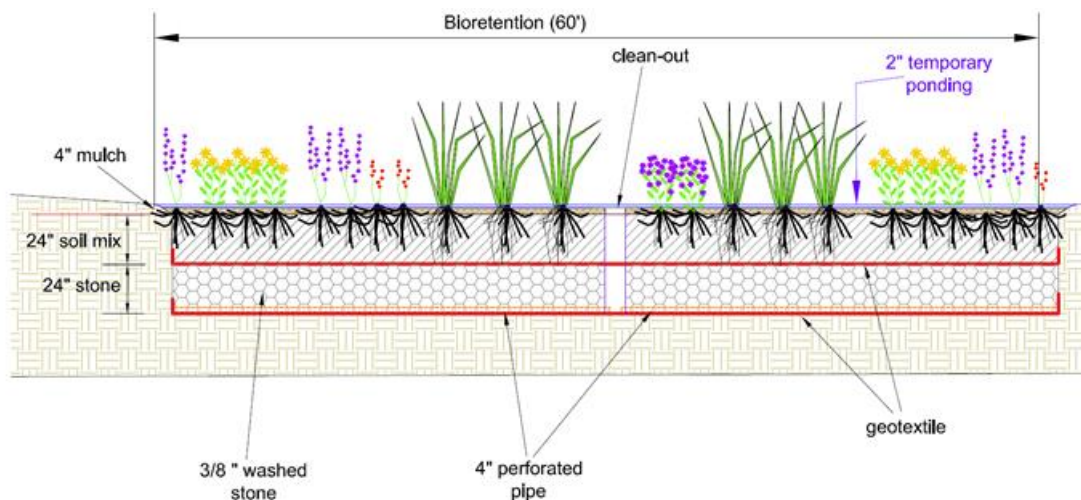


Figura 2-14 – Sezione di un Bioretention [<http://www.wetland.org>]

2.3.4 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 dell'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% [Cipolla et. Al. , 2016].

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 infiltra 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.

Sterrati inerbiti	Grigliati inerbiti	Blocchi di cls drenante	Blocchi di cls filtrante	Conglomerati cementizi filtranti
				
Suolo misto ghiaia	Materiali plastici (PEAD) o cls vibrocompresso	Cls vibrocompresso	Cls poroso	Cls poroso

Figura 2-15: tipologie di pavimentazioni permeabili

2.4 Interventi non strutturali: sistemi di real time control (RTC)

L'ottimizzazione delle reti di drenaggio urbano attraverso l'uso di sistemi di RTC consente di utilizzare la rete in maniera dinamica attraverso controlli in tempo reale, sfruttando la capacità di immagazzinamento della preesistente struttura fognaria, accumulando quei volumi che causerebbero esondazione.

La rete deve quindi essere resa dotata 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'installazione di grandi e costose opere di invaso che risultano, inoltre, di non facile installazione in zone già 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 gli sversamenti nel corpo idrico ricettore
- 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.

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.

Il sistema di controllo in tempo reale si compone di:

- un sensore (ad esempio un misuratore di livello o di portata) 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.

Ad esempio il sensore di livello rileva l'altezza d'acqua presente nella tubazione e comunica con il meccanismo di regolazione che, in funzione dei data-set impostati, agisce sul grado di apertura e chiusura della paratoia per ottimizzare la capacità di invaso.

L'implementazione del sistema RTC prevede le seguenti fasi:

1. considerazioni preliminari sul potenziale RTC (layout del sistema fognario, area drenata, capacità di invaso, strumenti e misure disponibili, simulazione dello stato attuale della rete);
2. determinazione delle funzioni obiettivo, identificazione delle variabili di processo e impostazione dei set-point (minimizzare gli sversamenti, massimizzare la capacità di invaso, ottimizzare la gestione della rete e il funzionamento dell'impianto di depurazione);
3. valutazione e validazione dei dati, confronto dei risultati con gli obiettivi prefissati (calibrazione e validazione del modello, eventuali semplificazioni del modello e implementazione delle funzioni obiettivo);
4. valutazione del modello, studio di differenti scenari con e senza RTC (definire le parti coinvolte dal sistema RTC, valutarne l'efficacia, studio degli scenari per la gestione ottimale degli obiettivi).

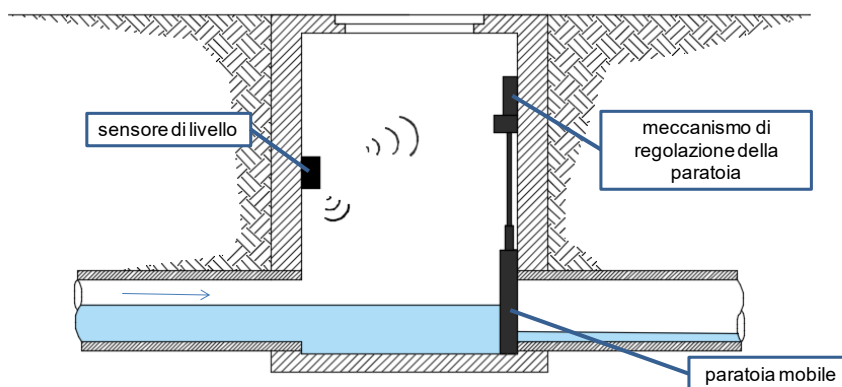


Figura 2-16: Schematizzazione del funzionamento di una paratoia mobile

Una volta determinati gli obiettivi e fissati i set point, per il posizionamento degli attuatori nella rete è stato studiato un coefficiente C , in grado di valutare l'idoneità del singolo collettore ad adottare strategie di tipo RTC:

$$C_{ij} = \frac{V_{tot} \cdot r_m}{S_{tot} \cdot \left(\frac{h}{D}\right)_{ij}}$$

Dove:

V_{tot} = volume complessivo dei collettori a monte: $V_{tot} = \sum_{k=i}^n \sum_{j=1}^n A_{kj} \cdot L_{kj}$

S_{tot} = somma delle superfici drenate a monte del collettore ij: $S_{tot} = \sum_{j=1}^n S_j$

R = ricoprimento medio del tubo [m]

i = pendenza del ramo [m/m]

h/D = rapporto tra la l'altezza d'acqua transitante nella tubazione e la massima altezza a sezione piena.

L'idoneità del collettore ad ospitare un sistema RTC è determinata attraverso tre soglie del parametro C :

- $0 < C < 30^\circ$ percentile: Non Idoneo
- $30^\circ < C < 60^\circ$ percentile: Valutabile
- $60^\circ < C < 90^\circ$ percentile: Idoneo
- $C > 90^\circ$ percentile: Sicuramente Idoneo

Per definire quali rami e, di conseguenza, quali superfici drenate contribuiscono in un determinato nodo, risulta necessario verificare i dislivelli. Osservando la figura sottostante risulta evidente che rispetto al nodo di valle I, il nodo J contribuisce come capacità di invaso al contrario del nodo Y.

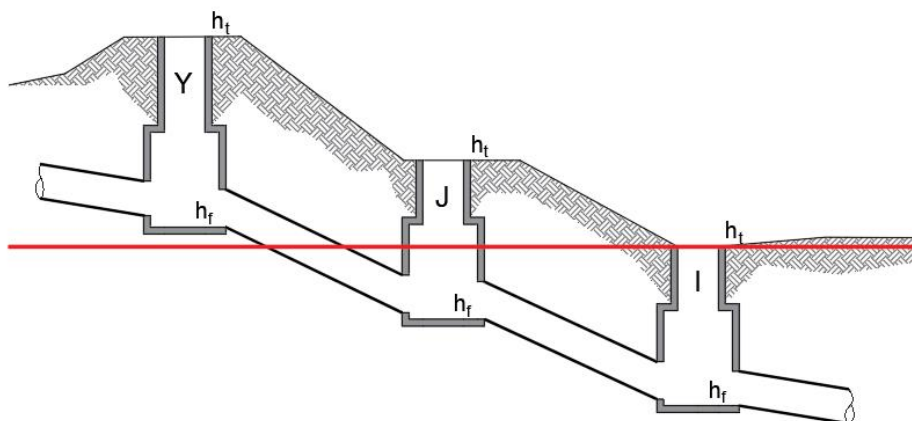


Figura 2-17: schematizzazione del profilo di una rete per valutare i dislivelli tra i nodi di valle rispetto a quelli di monte

Per poter confrontare i dislivelli della rete risulta necessario realizzare una matrice delle connessioni, in grado di definire la relazione tra i nodi e valutarne i dislivelli.

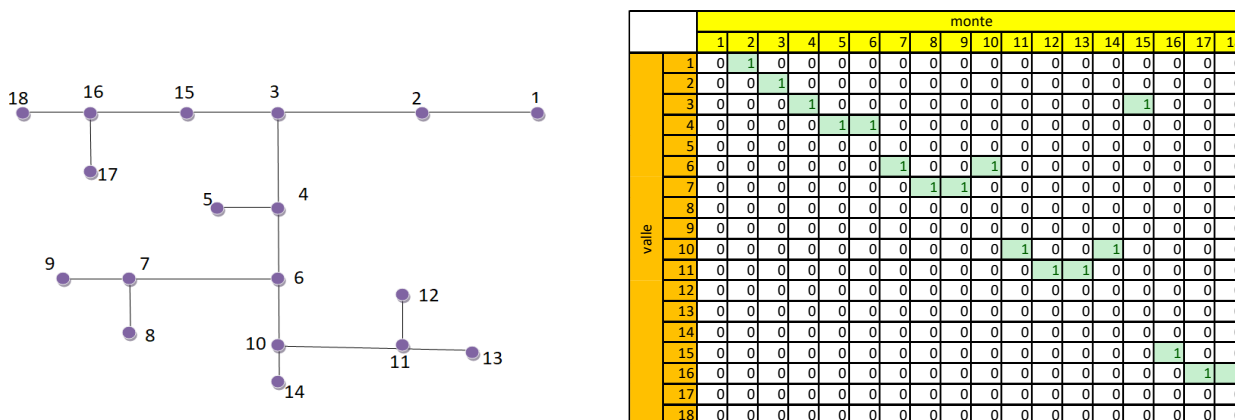


Figura 2-18: esempio di rete e relativa matrice delle connessioni

Per il calcolo del parametro C si analizza la rete in modo iterativo al fine di valutare per ciascun ramo il potenziale RTC, in Figura 2-19 si riporta il diagramma di flusso rappresentativo dell'iter di calcolo del parametro C .

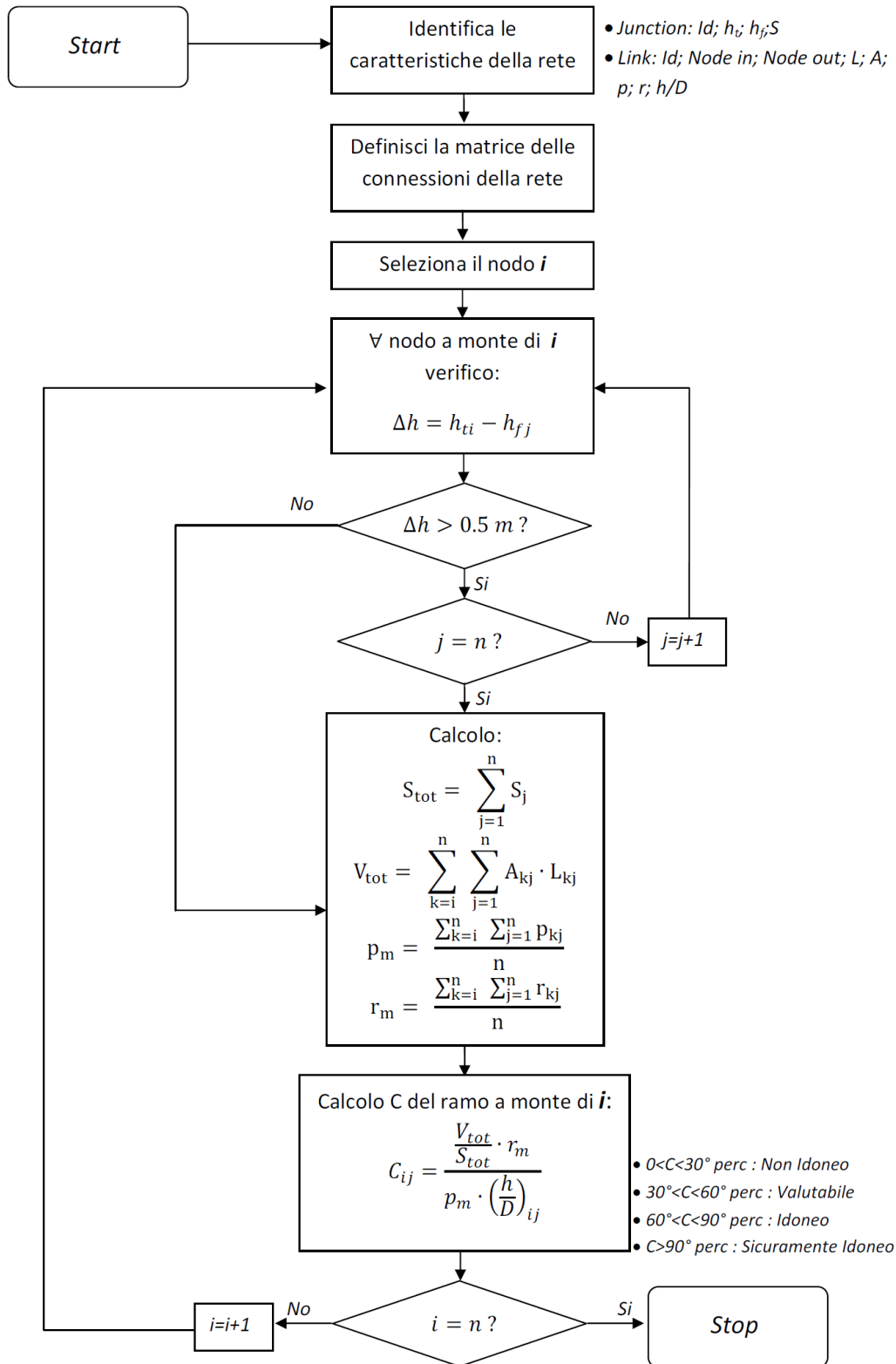


Figura 2-19: diagramma di flusso del procedimento iterativo per il calcolo del parametro C

Dopo aver individuato i collettori idonei, si procede all'inserimento degli organi regolatori nel modello; questa procedura è stata applicata nel PAR 2017 sul bacino sperimentale del Fossolo a Bologna, tale area di

studio verrà utilizzata per le modellazioni successive per valutare l'applicabilità e i benefici derivanti dall'inserimento di NBS.

3 Modellazione della rete di drenaggio

3.1 Software open source SWMM 5.1

Per modellare la rete di drenaggio del bacino sperimentale del Fossolo a Bologna è stato utilizzato il software open source SWMM 5.1. 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. 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 e in uscita dalla rete.

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:

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

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

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

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 di 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.

Nei modelli presentati nei capitoli successivi, l'elemento *Orifice* sarà ampiamente utilizzato nei casi con controllo in tempo reale, poiché per il calcolo della portata transitante in questi elementi viene utilizzata una diversa logica di calcolo, risulterà un errore percentuale inferiore al 10% tra i casi con RTC e quelli privi di questa tecnologia.

3.2 Modello idraulico del bacino sperimentale del Fossolo e scenari ipotizzati

Per valutare l'applicabilità delle NBS e delle tecnologie RTC in modo integrato, al fine di evidenziare il comportamento sia del sistema fognario, ma anche l'impatto che esso produce sui ricettori naturali e, in particolare, sull'impianto di depurazione, è stato modellato il bacino sperimentale del Fossolo a Bologna, analizzato nei precedenti PAR 2017 e 2018. Il bacino urbano sperimentale del Fossolo è situato nella periferia sud-est a Bologna ed è finalizzato alla raccolta di dati utili allo studio e all'interpretazione della trasformazione afflussi-deflussi dal punto di vista quantitativo e qualitativo. Questa rete di drenaggio ha il vantaggio di essere isolata dalle reti fognarie circostanti. Gli edifici presenti nell'area sono prevalentemente ad uso residenziale o destinati ad attività terziarie minori; il numero dei residenti risulta pari a circa 10.000 unità. La superficie drenata complessiva è pari a 47,46 ettari con una percentuale impermeabile pari al 52% (27,59 ha), di cui il 17% (8.2 ha) di coperture, e permeabile pari al 48% (22.8 ha).

Per la modellazione sono stati utilizzati i dati climatici di pluviometria e temperatura dell'anno 2009; la scelta dell'anno deriva da un'analisi numerica finalizzata a individuare l'anno medio sul periodo compreso tra il 2005 e il 2016, valutando la pioggia media giornaliera sull'intero periodo e individuando l'anno che presenta la differenza minore tra il dato giornaliero dell'anno in esame e quello medio giornaliero dell'intero periodo in valore assoluto

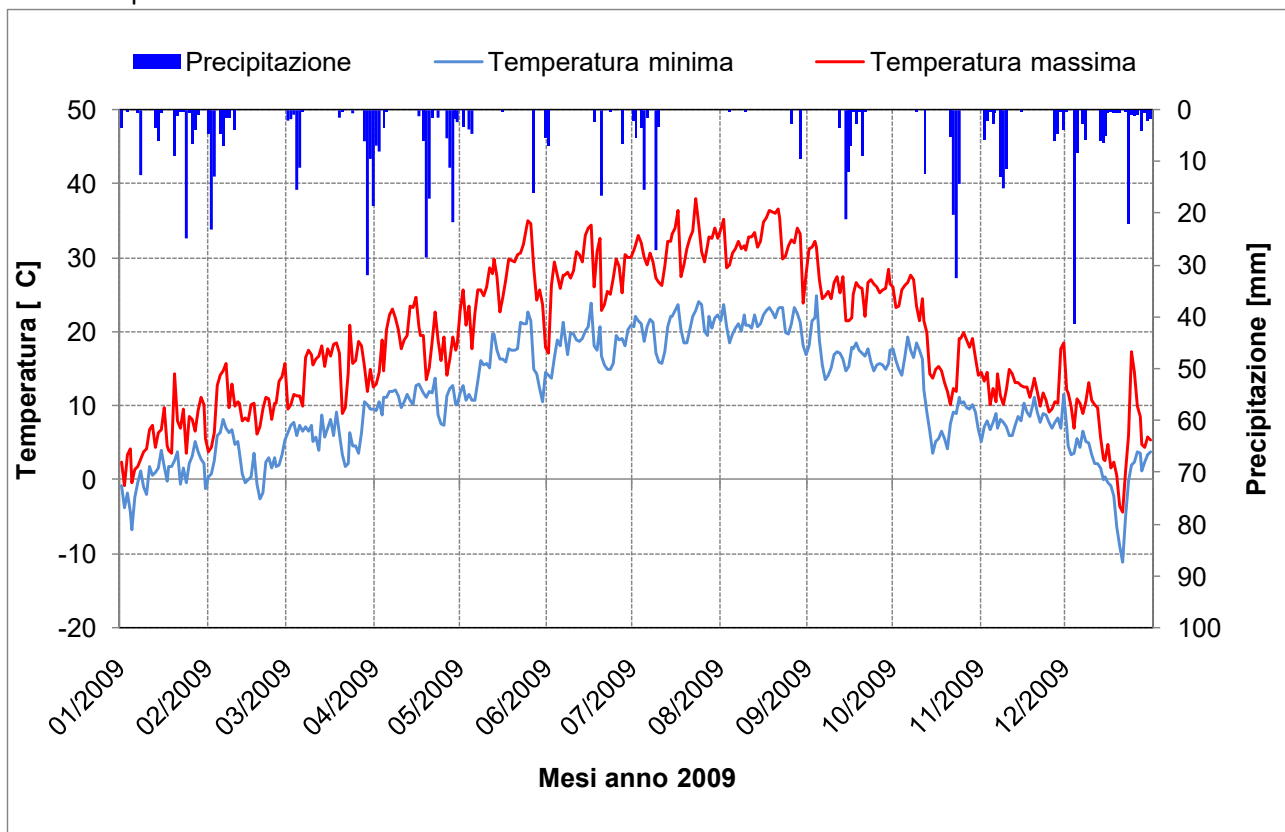


Figura 3-1: grafico relativo a precipitazione, temperature massime e minime dell'anno 2009

Sono stati ipotizzati differenti scenari:

- **Scenario 0: rete reale.** Per la modellazione della rete reale è stato inserito un pozzetto partitore nel tratto finale permettendo quindi di scollegare fittiziamente la rete in esame con il sistema di drenaggio a valle. Questo viene rappresentato nel modello in SWMM da un nodo che rappresenta il pozzetto partitore da cui partono una tubazione sul fondo diretta al depuratore e un elemento *weir* che simula il comportamento di una soglia dimensionata in modo da attivarsi al superamento di una portata pari a cinque volte la portata media nera.

- **Scenario 1: implementazione della rete con un sistema RTC.** La rete è stata implementata con un sistema RTC locale al fine di ottimizzare la capacità di invaso della rete di drenaggio utilizzando sette paratoie gestite da algoritmi PID in funzione del livello a monte della paratoia stessa. All'interno del modello, le paratoie sono state rappresentate da un elemento *Orifice* in quanto sono legati alla grandezza dell'apertura che può essere cambiata attraverso delle regole di controllo. Per garantire il regolare passaggio delle portate nere sono stati inseriti degli *Orifice* nel nodo a monte di ogni paratoia, simulando quindi la presenza di uno scarico sul fondo.
- **Scenario 2: introduzione delle coperture verdi (con e senza sistema RTC).** Per mitigare gli apporti di acqua meteorica inviata alla rete di drenaggio, è stato ipotizzato l'inserimento di coperture verdi in sostituzione alle coperture tradizionali presenti nell'area per un totale di circa 8.2 ha. Per la modellazione delle coperture verdi in SWMM è stato utilizzato il modulo LID "Bio-retention cell" costituito da quattro elementi sovrapposti che rappresentano la stratigrafia del tetto. È stato considerato uno strato di vegetazione di 3 mm, un substrato di terreno di 10 cm di spessore e un elemento drenante di 25 mm di spessore con un rapporto vuoti/pieni pari a 0.5.
- **Scenario 3: aumento della permeabilità (con e senza sistema RTC).** Al fine di simulare l'inserimento di soluzioni verdi diffuse, quali fasce filtro e pavimentazioni o aree permeabili, per la mitigazione dei deflussi immessi in rete, è stata incrementata del 100% la permeabilità dei sottobacini dell'area oggetto di studio escludendo le coperture. Pertanto nel modello è stata incrementata la permeabilità di ogni singola area escludendo gli ettari di superficie occupata dalle coperture.
- **Scenario 4: aumento della permeabilità introducendo le coperture verdi (con e senza sistema RTC).** Al fine di simulare l'inserimento di soluzioni verdi diffuse, quali fasce filtro e pavimentazioni o aree permeabili, per la mitigazione dei deflussi immessi in rete, è stata incrementata la permeabilità dei sottobacini dell'area oggetto di studio mentre per le coperture è stato utilizzato il modulo LID come descritto per lo Scenario 2.
- **Scenario 5: aumento della permeabilità del 15% delle aree impermeabili (con e senza sistema RTC).** Al fine di simulare l'inserimento di soluzioni verdi diffuse, quali fasce filtro e pavimentazioni o aree permeabili, per la mitigazione dei deflussi immessi in rete, è stata incrementata la permeabilità dei sottobacini dell'area oggetto di studio del 15%, escludendo le coperture. Pertanto nel modello è stata incrementata la permeabilità di ogni singola area del 15% escludendo gli ettari di superficie occupata dalle coperture.
- **Scenario 6: introduzione di impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche per scopi non potabili (con e senza sistema RTC).** È stato ipotizzato l'inserimento di 7 macro invasi, collocati a monte delle paratoie mobili nel caso di rete con RTC, dotati di un sistema di sollevamento per simulare il prelievo degli utenti e di un troppo pieno che reimmette in rete l'acqua in eccesso. Questi impianti sono stati dimensionati secondo normativa UNI/TS 11445 e mirano a recuperare l'acqua meteorica necessaria per soddisfare la richiesta idrica non potabile per gli scarichi dei wc di circa il 60% degli utenti residenti.
- **Scenario 7: introduzione di invasi distribuiti lungo la rete (con e senza RTC).** È stato ipotizzato l'inserimento di 6 invasi fuori linea in differenti punti della rete, alimentati attraverso l'inserimento di una soglia laterale e dimensionati per invasare:
 - **Scenario 7.a:** 10 m³/ha, per un volume complessivo di 450 m³;
 - **Scenario 7.b:** 50 m³/ha, per un volume complessivo di 2245.5 m³.

Le vasche rimettono in rete il volume invasato attraverso una pompa con portata costante in uscita pari a 3 l/(s·ha) al fine di garantire una portata inferiore a cinque volte la portata media nera.

Gli scenari sono stati analizzati valutando i volumi e la massa di solidi sospesi (TSS) inviati al ricettore, ponendo a confronto per ogni scenario la sua versione con e senza sistema di RTC.

3.3 Scenario 0: rete reale

Lo scenario 0 prevede la modellazione della rete reale; al fine di valutarne il comportamento essa è stata scollegata dal sistema di drenaggio di valle, inserendo un nodo che simula il comportamento di un pozzetto partitore da cui partono una tubazione sul fondo diretta al depuratore e un elemento *weir* che simula il comportamento di una soglia dimensionata in modo da attivarsi al superamento di una portata pari a cinque volte la portata media nera.

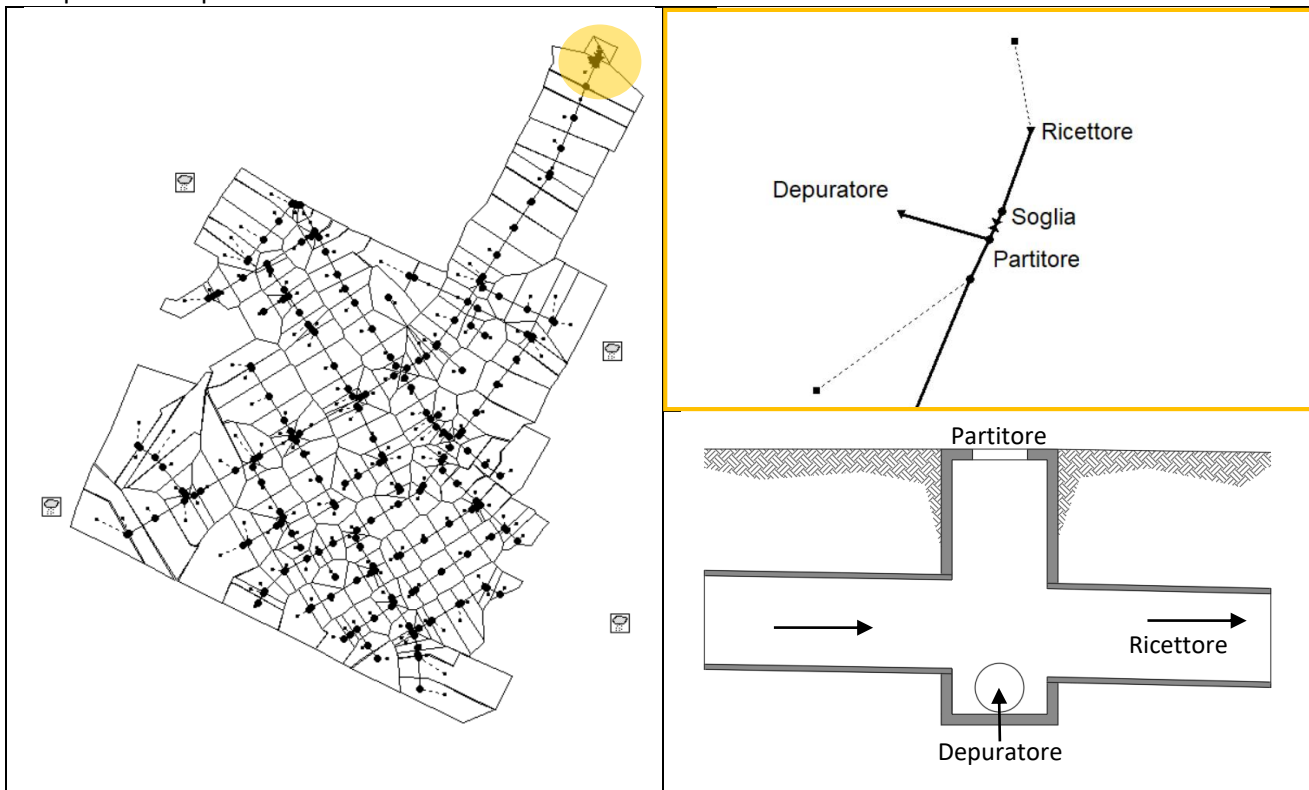


Figura 3-2: rete del bacino del Fossolo in SWMM (sinistra) e schematizzazione del pozzetto partitore (destra)

Nei nodi sono state inserite le portate di acque nere immesse in rete e il relativo andamento giornaliero, il volume annuo di acque nere in arrivo al partitore risulta essere pari a 550'613 m³/anno.

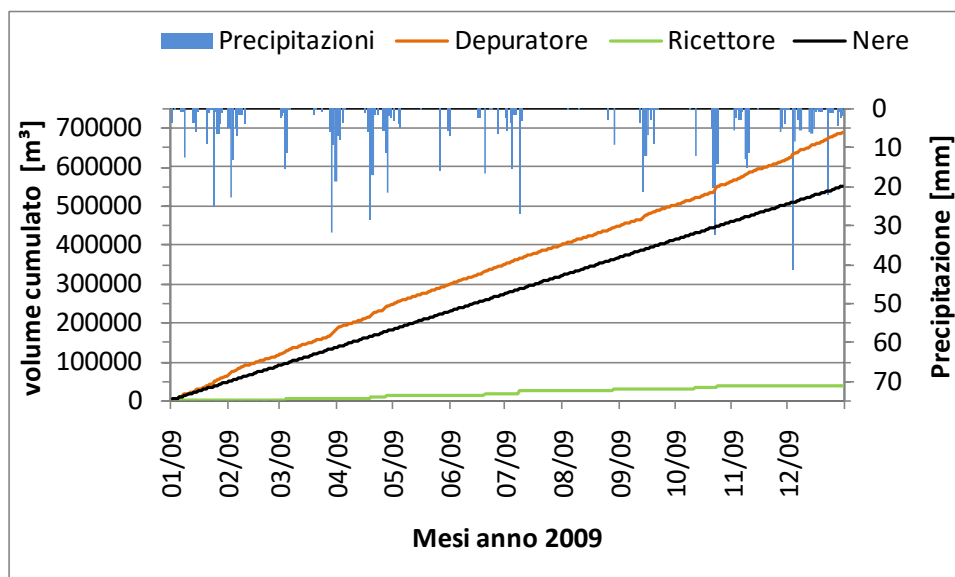


Figura 3-3: grafico dei volumi cumulati nell'anno 2009 inviati al depuratore e al ricettore

Nel grafico in Figura 3-3 si riportano i risultati ottenuti dalla modellazione della rete reale (Scenario 0) in termini di volume cumulato, per l'anno 2009, rispettivamente verso il depuratore (linea arancione), verso il ricettore (linea verde) e il volume totale cumulato di acque nere (linea nera). Nello specifico, per l'anno 2009 vengono inviati al depuratore 690'352 m³/anno e al ricettore 39'251 m³/anno, questo significa che il 94.6% delle acque immesse in rete viene inviata all'impianto di depurazione mentre il 5.4% viene immesso nel corpo idrico ricettore; va evidenziato che il totale delle acque nere ammonta a 550'613 m³/anno ossia il 75% delle acque circolanti in rete.

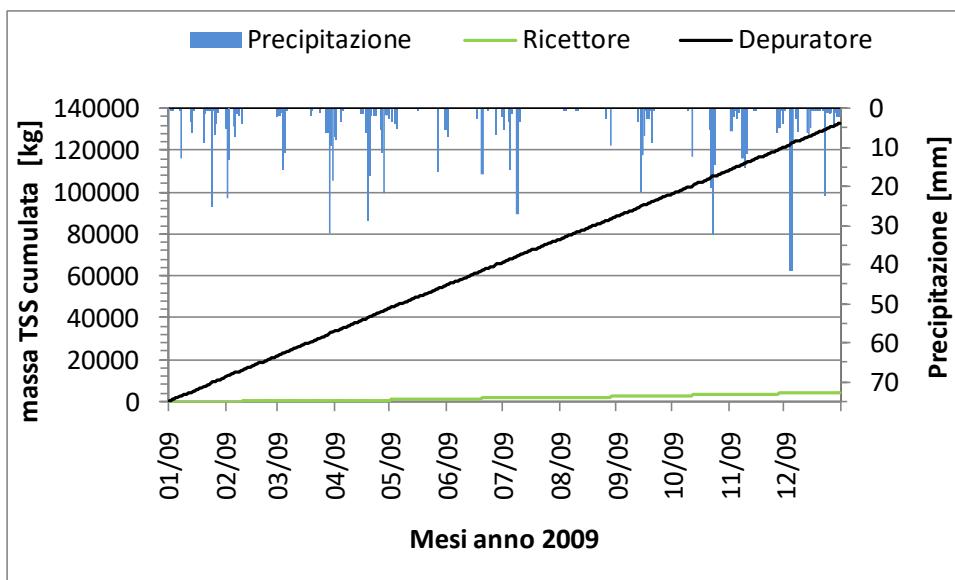


Figura 3-4: grafico della massa di solidi sospesi TSS cumulati nell'anno 2009 inviati al depuratore e al ricettore

La massa di solidi sospesi totali TSS inviata al depuratore ammonta a 133'192 kg/anno ossia il 97% del totale in arrivo al partitore, il restante 3%, corrispondente a 4100 kg/anno viene inviato al corpo idrico ricettore.

3.4 Scenario 1: implementazione della rete con un sistema RTC.

La rete è stata implementata con un sistema RTC locale al fine di ottimizzare la capacità di invaso della rete di drenaggio utilizzando sette paratoie gestite da algoritmi PID in funzione del livello a monte della paratoia stessa. 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.

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 si utilizza l'algoritmo di controllo PID, in SWMM viene richiesto un valore del coefficiente Kp 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 Kp, Ki, Kd.

Le paratoie sono state inserite definendo il parametro C relativo alla capacità di un determinato ramo di essere utilizzato efficacemente per l'inserimento di smart gate e facendo riferimento ai punti della rete dove una sottorete si immette nel collettore principale.

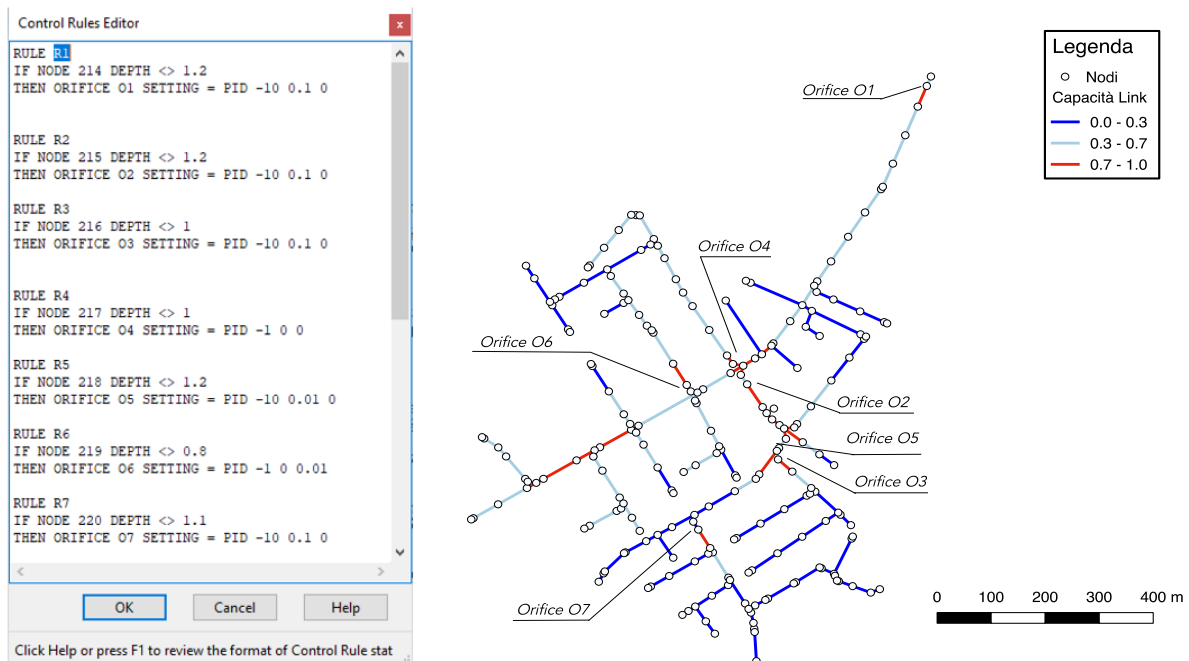


Figura 3-5: Interfaccia grafica relativa ai controls rules in SWMM (sinistra) e schema della rete e posizione delle 7 paratoie mobili (destra)

L'inserimento del sistema RTC porta a convogliare 748'000 m³/anno al depuratore, pari al 96.6% dell'acqua reflua in arrivo al partitore, il restante 3.4%, ossia 26'567 m³/anno vengono inviati al corpo idrico ricettore.

Dato che nel caso di *orifice* si ha una formula per il calcolo della portata differente da quella che avviene nei rami della rete, confrontando lo Scenario 0 relativo alla rete reale con quello modellato con RTC si evince un errore pari al 7.6% che comporta un leggero incremento della portata nello Scenario 1 con RTC.

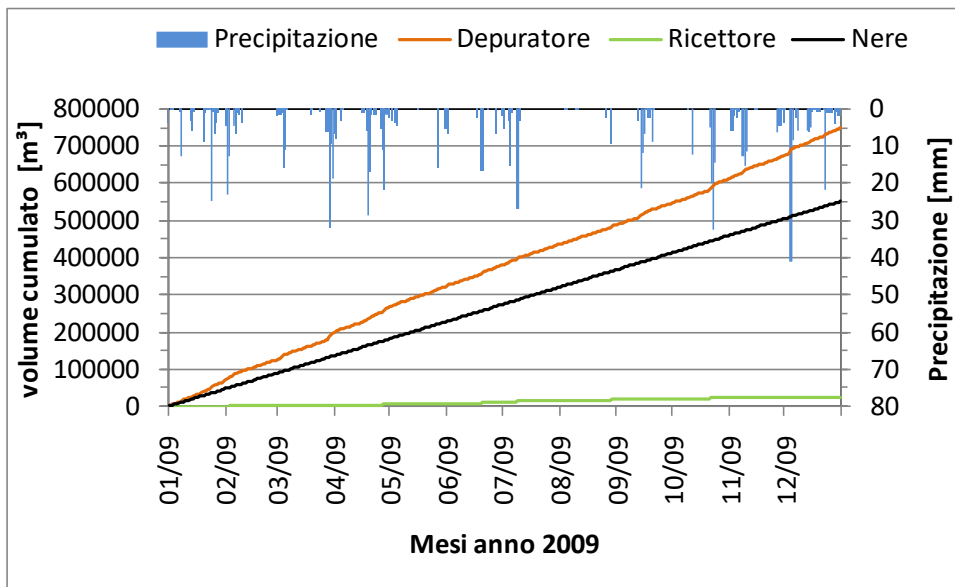


Figura 3-6: grafico dei volumi cumulati nell'anno 2009 inviati al depuratore e al ricettore

La massa di solidi sospesi totali TSS inviata al depuratore ammonta a 140'278 kg/anno ossia il 98.7% del totale in arrivo al partitore, il restante 1.4%, corrispondente a 1960 kg/anno viene inviato al corpo idrico ricettore.

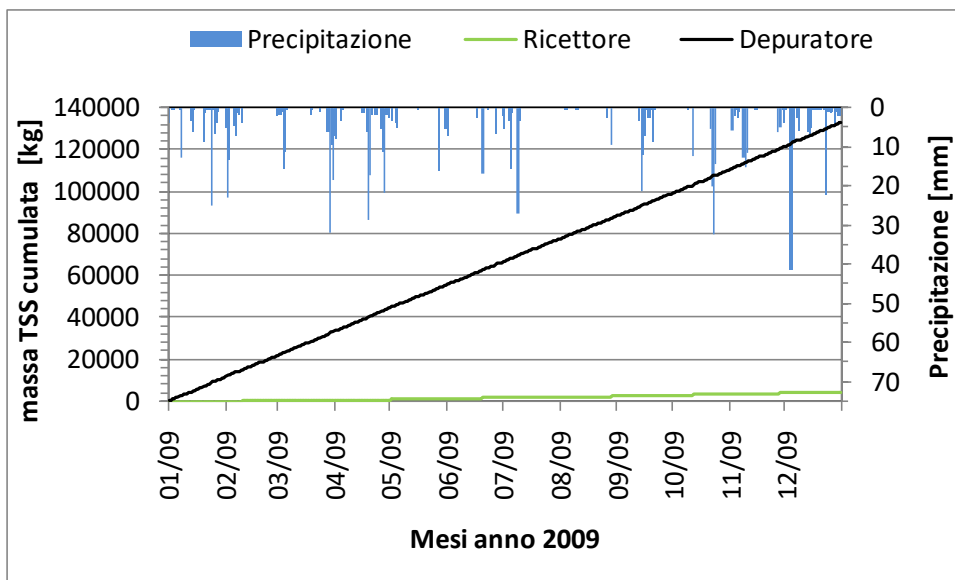


Figura 3-7: grafico della massa di solidi sospesi TSS cumulati nell'anno 2009 inviati al depuratore e al ricettore

Confrontando lo Scenario 1 con il caso reale (Scenario 0) si evince una riduzione del 32% in termini di volume e del 52% di TSS inviati al ricettore.

3.5 Scenario 2: introduzione delle coperture verdi (con e senza sistema RTC).

Per mitigare gli apporti di acqua meteorica inviata alla rete di drenaggio, è stato ipotizzato l'inserimento di coperture verdi in sostituzione alle coperture tradizionali presenti nell'area per un totale di circa 8.2 ha. Le proprietà fisiche della stratigrafia delle coperture verdi derivano da un'analisi sperimentale svolta nel corso degli anni presso la copertura verde pilota installata presso il plesso del Lazzaretto della Scuola di Ingegneria e Architettura di Bologna. Nello specifico sono stati utilizzati i parametri riportati in Tabella 3-2. Il tetto verde pilota è realizzata con il pacchetto *Verde pensile estensivo-Sistema Seic mediterranean green roof* commercializzato dalla SEIC Verde Pensile- Harpo Spa (Figura 3-8); è essenzialmente costituito da una membrana antiradice, da un feltro di protezione, da un elemento di drenaggio/accumulo/aerazione, da un filtro di protezione, da un substrato di 10 cm di spessore e da uno strato di vegetazione composto da un mix di specie del genere Sedum.

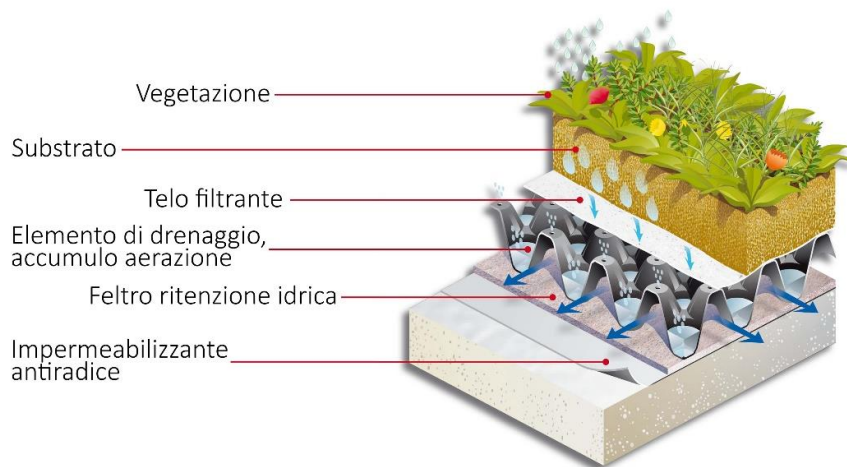


Figura 3-8: stratigrafia verde pensile estensivo-Sistema Seic mediterranean green roof commercializzato dalla SEIC Verde Pensile- Harpo Spa

Performance del sistema	
Spessore totale	c.a 12.5 cm
Spessore del substrato compattato	c.a 10 cm
Peso del sistema a massima saturazione idrica esclusa vegetazione	c.a 130 kg/m ²
Volume d'aria presente nel sistema	>40 l/m ²
Capacità di accumulo idrico del sistema	34 l/m ²
Acqua disponibile per le piante	> 28 l/m ² ; con un quantitativo di acqua libera contenuta nel pannello non superiore a 3 l/m ²
Coefficiente di deflusso	0.44
Caratteristiche del substrato	a norma UNI 11235

Tabella 3-1: performance del pacchetto verde pensile estensivo (Harpo group s.p.a.)

Per la modellazione delle coperture verdi in SWMM è stato utilizzato il modulo LID "Bio-retention cell". Il modulo LID "Bioretentio cell" è costituito da diversi layers sovrapposti che consentono di simulare tutti i diversi elementi che compongono un tetto verde:

- "Surface layer": rappresenta la vegetazione;
- "Solil layer": rappresenta il substrato;
- "Storage layer": rappresenta l'elemento di drenaggio e accumulo, lo strato di filtro e l'eventuale feltro di protezione.

Tabella 3-2: parametri utilizzati per la modellazione in SWMM della copertura verde relativi al modulo LID Bio-retentio cell

Layer	Parametro	Unità	Valore Bio-retention cell
Surface	Berm height	mm	3
	Vegetation volume fraction		0.15
	Surface roughness		0.2
	Surface slope	%	0.75
Soil	Thickness	mm	100
	Porosity	%	0.65
	Field capacity	m ³ / m ³	0.35
	Wilting point	m ³ / m ³	0.06
	Conductivity	mm/h	2280
	Conductivity slope		5
	Suction head	mm	25
Storage	Thickness	mm	25
	Void ratio		0.5
	Infiltration rate		0
	Clogging factor		0
Underdrain	Drain coefficient		0.15
	Drain exponent		1.6
	Offset height	mm	3

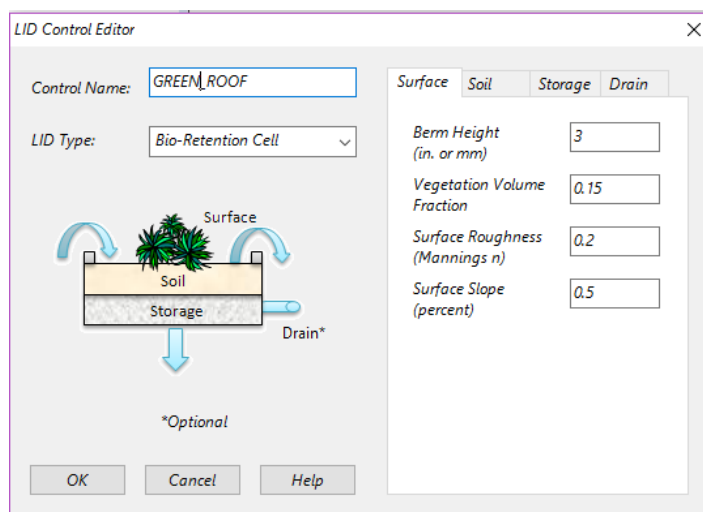


Figura 3-9: esempio di schermata relativa al controllo LID in SWMM

Dalla modellazione di evince una riduzione percentuale data dall’inserimento del sistema RTC pari al 39% in termini di volume e del 52% di massa TSS inviati al ricettore (vedi Tabella 3-3).

Tabella 3-3: sintesi dei volumi e delle masse TSS relativi allo Scenario 2 con e senza RTC

Volume totale				
Soluzione		Volume inviato al depuratore (m3/anno)	Volume inviato al ricettore (m3/anno)	Riduzione % volume inviato al ricettore
SCENARIO 2	ORIGINALE	634122	21716	
	RTC	688204	13235	39%
Massa TSS				
Soluzione		TSS inviati al depuratore (kg/anno)	TSS inviati al ricettore (kg/anno)	Riduzione % TSS inviato al ricettore
SCENARIO 2	ORIGINALE	130574	2592	
	RTC	139402	1153	56%

Confrontando lo Scenario 2 definito Originale, ossia privo di sistema RTC, con lo scenario reale (Scenario 0) si ottiene una riduzione dovuta all’inserimento delle coperture verdi pari al 45% in termini di volume sversato al ricettore e de37% osservando la massa di solidi sospesi totali TSS inviati al corpo idrico ricettore. Allo stesso modo sono stati messi a confronto lo Scenario 2 con sistema RTC con lo Scenario 1, la riduzione percentuale aumenta fino al 50% per quanto riguarda il volume sversato e del 41% per la massa TSS inviata al ricettore.

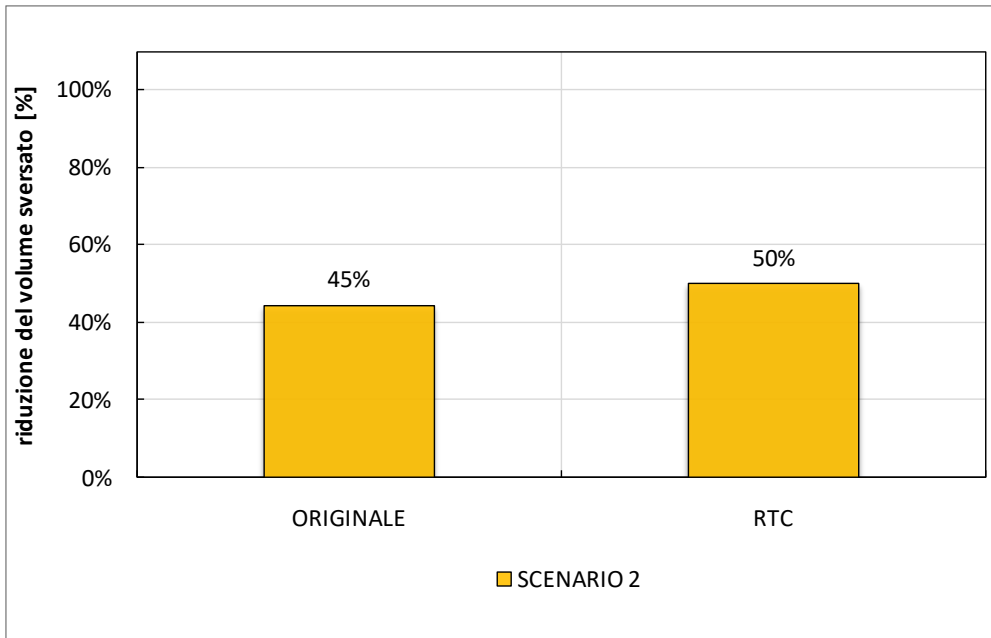


Figura 3-10: grafico relativo alla riduzione percentuale di volume inviato al ricettore derivante dal confronto tra il caso 2 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

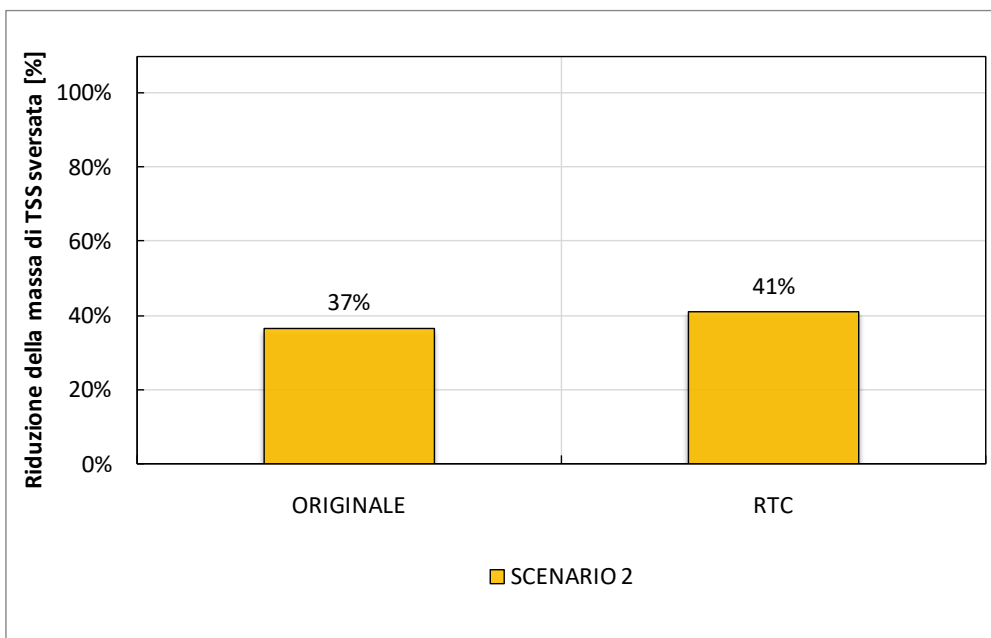


Figura 3-11: grafico relativo alla riduzione percentuale di massa TSS inviata al ricettore derivante dal confronto tra il caso 2 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

L’introduzione del sistema di RTC all’interno dello Scenario 2 provoca una riduzione di volume inviato al ricettore del 39%, in termini di massa di solidi sospesi sversati al ricettore la riduzione percentuale risulta pari al 56%.

3.6 Scenario 3: aumento della permeabilità (con e senza sistema RTC).

Al fine di simulare l’inserimento di soluzioni verdi diffuse, quali fasce filtro e pavimentazioni o aree permeabili, per la mitigazione dei deflussi immessi in rete, è stata incrementata del 100% la permeabilità dei sottobacini dell’area oggetto di studio escludendo le coperture. Pertanto nel modello è stata incrementata la permeabilità di ogni singola area escludendo gli ettari di superficie occupata dalle coperture. Questo aumento della permeabilità porta ad avere 8.2 ha impermeabili mentre i restanti 39 ha circa sono stati trasformati in aree permeabili

Dalla modellazione si ottiene una ulteriore riduzione sia in termini di volume sia di massa TSS inviata al ricettore rispetto agli scenari 0 e 1; nello specifico confrontando lo Scenario 3 definito Originale, ossia privo di sistema RTC, con lo scenario reale (Scenario 0) si ottiene una riduzione dovuta all’aumento della permeabilità pari al 89% in termini di volume sversato al ricettore e del 64% osservando la massa di solidi sospesi totali TSS inviati al corpo idrico ricettore mentre dal confronto tra lo Scenario 3 con sistema RTC con lo Scenario 1, la riduzione percentuale aumenta fino al 94% per quanto riguarda il volume sversato e del 80% per la massa TSS inviata al ricettore.

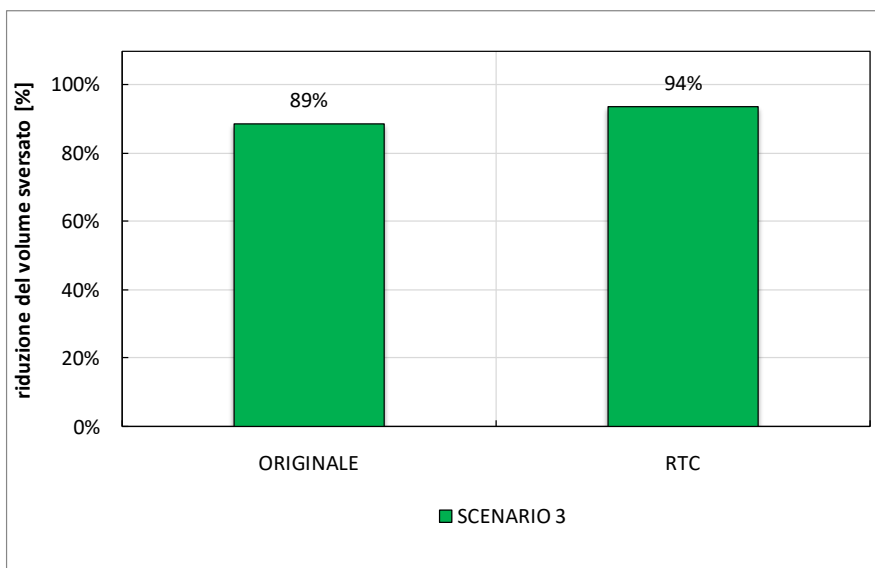


Figura 3-12: grafico relativo alla riduzione percentuale di volume inviato al ricettore derivante dal confronto tra il caso 3 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

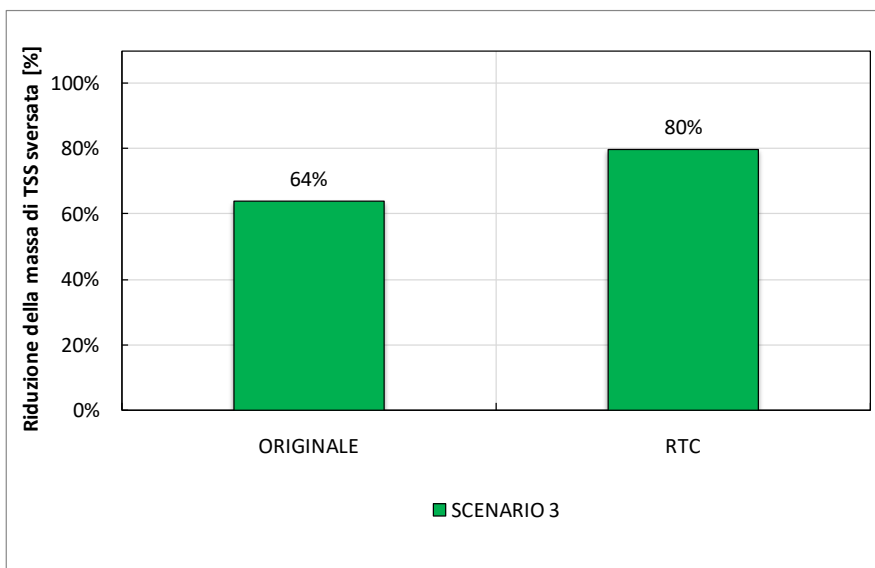


Figura 3-13: grafico relativo alla riduzione percentuale di massa TSS inviata al ricettore derivante dal confronto tra il caso 3 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

L'introduzione del sistema di RTC all'interno dello Scenario 3 provoca una riduzione di volume inviato al ricettore del 62%, in termini di massa di solidi sospesi sversati al ricettore la riduzione percentuale risulta pari al 73%.

Tabella 3-4: sintesi dei volumi e delle masse TSS relativi allo Scenario 3 con e senza RTC

Volume totale				
Soluzione		Volume inviato al depuratore (m3/anno)	Volume inviato al ricettore (m3/anno)	Riduzione % volume inviato al ricettore
SCENARIO 3	ORIGINALE	605715	4324	
	RTC	653892	1626	62%
Massa TSS				
Soluzione		TSS inviati al depuratore (kg/anno)	TSS inviati al ricettore (kg/anno)	Riduzione % TSS inviato al ricettore
SCENARIO 3	ORIGINALE	131964	1475	
	RTC	140087	395	73%

3.7 Scenario 4: aumento della permeabilità introducendo le coperture verdi (con e senza sistema RTC).

Al fine di simulare l’inserimento di soluzioni verdi diffuse, quali fasce filtro e pavimentazioni o aree permeabili, per la mitigazione dei deflussi immessi in rete, è stata incrementata del 100% la permeabilità dei sottobacini dell’area oggetto di studio, come per lo Scenario 3, in più è stato ipotizzato di trasformare le coperture in tetti verdi. Per la modellazione delle coperture verdi è stato utilizzato il modulo LID come descritto per lo Scenario 2.

Dalla modellazione si ottiene una riduzione sia in termini di volume sia di massa TSS inviata al ricettore rispetto agli scenari 0 e 1; confrontando lo Scenario 4 definito Originale, ossia privo di sistema RTC, con lo scenario reale (Scenario 0) si ottiene una riduzione dovuta all’aumento della permeabilità e all’introduzione delle coperture verdi pari al 96% in termini di volume sversato al ricettore e del 92% osservando la massa di solidi sospesi totali TSS inviati al corpo idrico ricettore mentre dal confronto tra lo Scenario 4 con sistema RTC con lo Scenario 1, la riduzione percentuale aumenta fino al 98% per quanto riguarda il volume sversato e del 96% per la massa TSS inviata al ricettore.

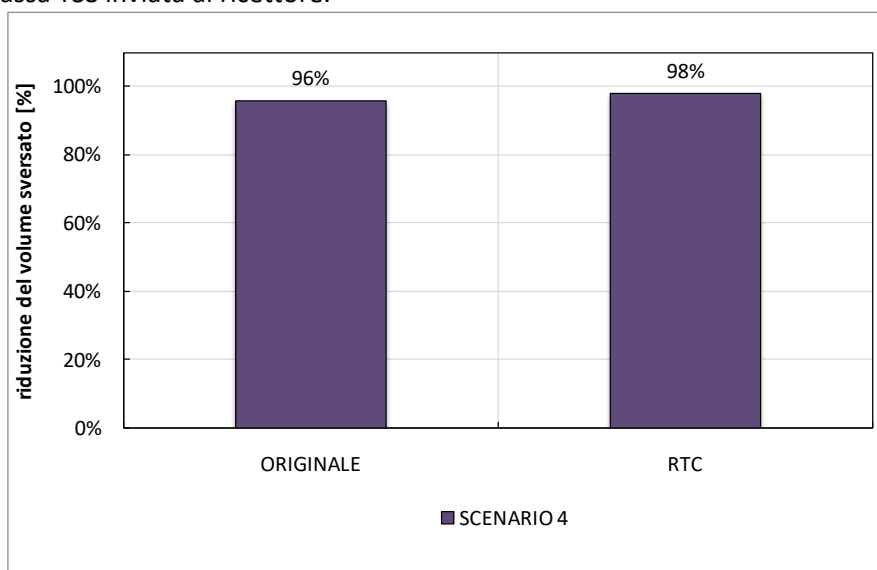


Figura 3-14: grafico relativo alla riduzione percentuale di volume inviato al ricettore derivante dal confronto tra il caso 4 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

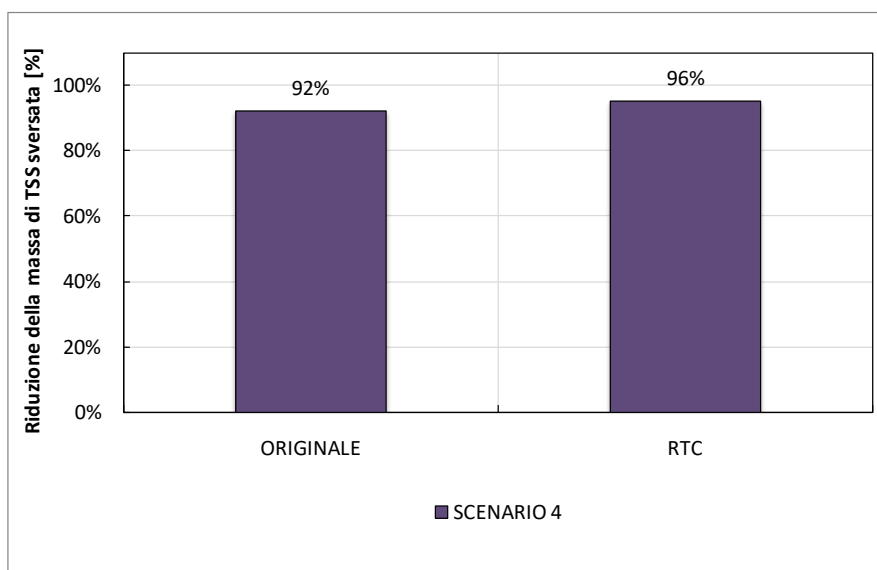


Figura 3-15: grafico relativo alla riduzione percentuale di massa TSS inviata al ricettore derivante dal confronto tra il caso 4 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

Come per i casi precedenti, l'introduzione del sistema RTC all'interno dello Scenario 4 risulta performante, provocando una riduzione di volume inviato al ricettore del 67% e pari al 72% in termini di massa di solidi sospesi sversati al ricettore.

Tabella 3-5: sintesi dei volumi e delle masse TSS relativi allo Scenario 4 con e senza RTC

Volume totale				
Soluzione		Volume inviato al depuratore (m3/anno)	Volume inviato al ricettore (m3/anno)	Riduzione % volume inviato al ricettore
SCENARIO 4	ORIGINALE	583848	1604	
	RTC	630395	521	67%
Massa TSS				
Soluzione		TSS inviati al depuratore (kg/anno)	TSS inviati al ricettore (kg/anno)	Riduzione % TSS inviato al ricettore
SCENARIO 4	ORIGINALE	128202	312	
	RTC	137326	88	72%

3.8 Scenario 5: aumento della permeabilità del 15% delle aree impermeabili (con e senza sistema RTC).

Lo Scenario 5 simula anch'esso l'inserimento di soluzioni verdi diffuse, quali fasce filtro e pavimentazioni o aree permeabili, per la mitigazione dei deflussi immessi in rete; in questo caso è stata incrementata la permeabilità dei sottobacini dell'area oggetto di studio del 15%, escludendo le coperture. Pertanto nel modello è stata incrementata la permeabilità di ogni singola area del 15% escludendo gli ettari di superficie occupata dalle coperture. Questa soluzione, rispetto alle precedenti con incremento della permeabilità del 100%, risulta meno "estrema" e di più facile realizzazione.

Dalla modellazione, la riduzione che si ottiene dall'incremento del 15% della permeabilità è ovviamente inferiore rispetto ai precedenti scenari 3 e 4, ciononostante confrontando lo Scenario 5 definito Originale, ossia privo di sistema RTC, con lo scenario reale (Scenario 0) si ottiene una riduzione pari al 58% in termini di volume sversato al ricettore e del 21% osservando la massa di solidi sospesi totali TSS inviati al corpo idrico ricettore mentre dal confronto tra lo Scenario 5 con sistema RTC con lo Scenario 1, la riduzione percentuale aumenta fino al 68% per quanto riguarda il volume sversato e del 50% per la massa TSS inviata al ricettore.

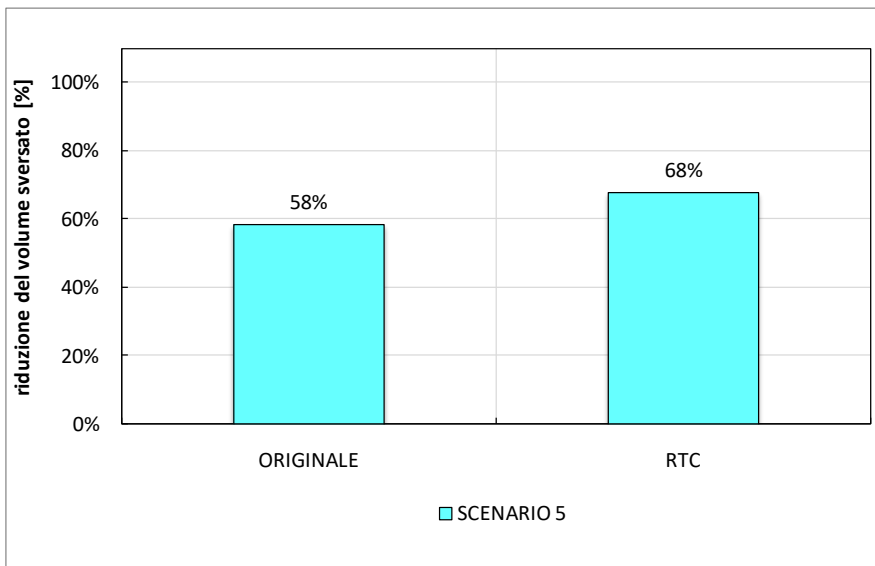


Figura 3-16: grafico relativo alla riduzione percentuale di volume inviato al ricettore derivante dal confronto tra il caso 5 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

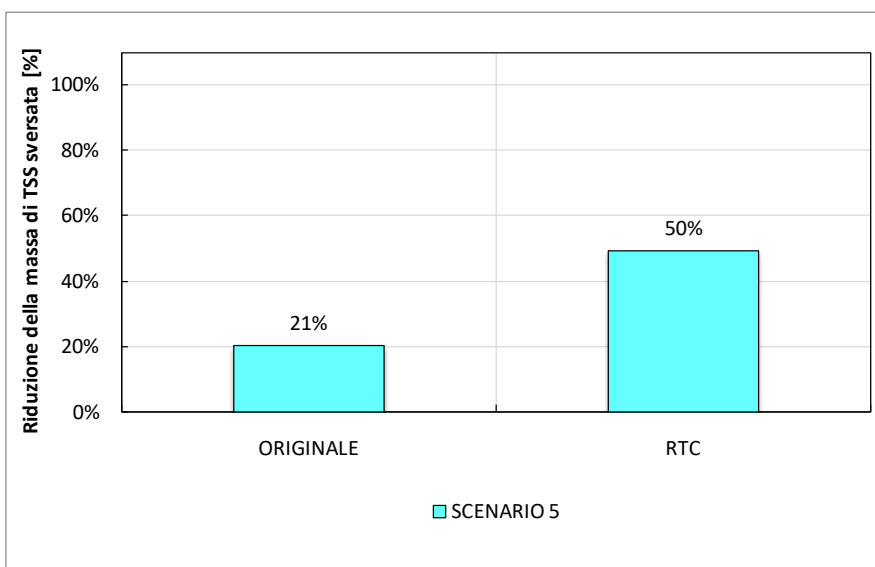


Figura 3-17: grafico relativo alla riduzione percentuale di massa TSS inviata al ricettore derivante dal confronto tra il caso 5 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

L'introduzione del sistema RTC all'interno dello Scenario 5 provoca una riduzione di volume inviato al ricettore del 48% e pari al 70% in termini di massa di solidi sospesi sversati al ricettore.

Tabella 3-6: sintesi dei volumi e delle masse TSS relativi allo Scenario 5 con e senza RTC

Volume totale				
Soluzione		Volume inviato al depuratore (m3/anno)	Volume inviato al ricettore (m3/anno)	Riduzione % volume inviato al ricettore
SCENARIO 5	ORIGINALE	623985	16304	
	RTC	676646	8537	48%
Massa TSS				
Soluzione		TSS inviati al depuratore (kg/anno)	TSS inviati al ricettore (kg/anno)	Riduzione % TSS inviato al ricettore
SCENARIO 5	ORIGINALE	132317	3258	
	RTC	140776	987	70%

3.9 Scenario 6: introduzione di impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche per scopi non potabili (con e senza sistema RTC).

È stato ipotizzato l’inserimento di 7 macro invasi, collocati a monte delle paratoie mobili nel caso di rete con RTC, dotati di un sistema di sollevamento per simulare il prelievo degli utenti e di un troppo pieno che reimmette in rete l'acqua in eccesso. Questi impianti sono stati dimensionati secondo normativa UNI/TS 11445 e mirano a recuperare l'acqua meteorica necessaria per soddisfare la richiesta idrica non potabile per gli scarichi dei wc di circa il 60% degli utenti residenti.

La raccolta e il riutilizzo delle acque meteoriche in ambito urbano consente di ridurre il consumo di acqua potabile e mitigare l’impatto dell’edificio in termini di portate meteoriche convogliate dalle superfici impermeabili al sistema fognario. La normativa italiana (D.M. 185/2003, Art. 3) consente il riutilizzo di per scopi irrigui, per alimentare lo scarico dei WC, per gli impianti di lavaggio delle superfici di pertinenza e altri usi non potabili. La normativa inoltre impone la realizzazione di una rete di distribuzione duale opportunamente. In altri paesi, come ad esempio la Germania, è consentito il riuso delle acque piovane per alimentare elettrodomestici come la lavatrice, data la bassa durezza e la bassa concentrazione di sali.

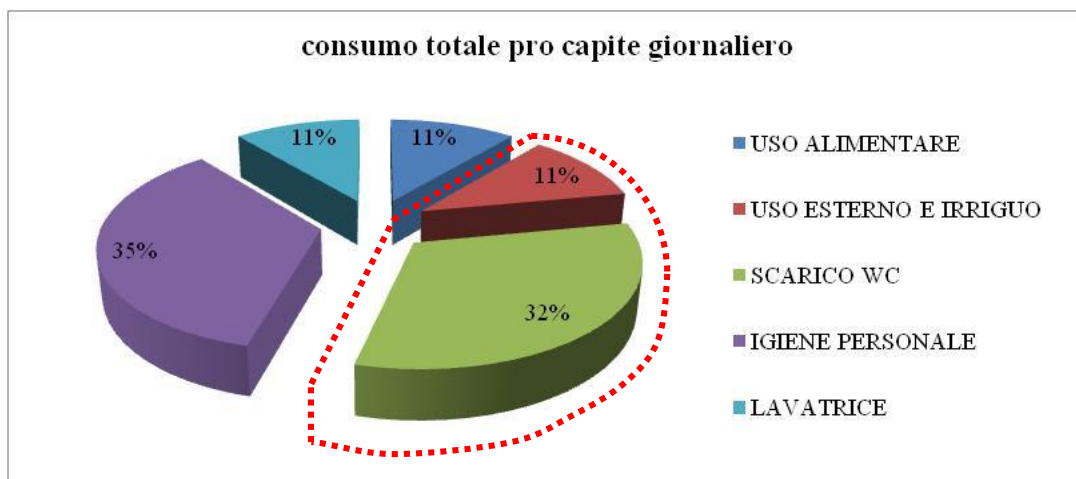


Figura 3-18: caratterizzazione dei consumi domestici

In Figura 3-18 vengono evidenziate le attività che prevedono la possibilità di sfruttare l'acqua piovana riciclata, esse rappresentano il 43% delle acque consumate giornalmente in ambito domestico; se si considerasse anche la possibilità di utilizzare l'acqua di riciclo anche per alimentare la lavatrice la percentuale salirebbe al 54%, ovvero più della metà dell'acqua che consumiamo non necessita di essere di tipo potabile. Nel caso modellato è stato previsto di riutilizzare le acque meteoriche unicamente per l'alimentazione delle cassette dei wc.

Un impianto per il recupero e il riuso delle acque meteoriche si compone usualmente dei seguenti elementi:

- Sistema di captazione:** è costituito dalla copertura dell’edificio in cui l’acqua 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.
- Filtro d'ingresso:** in un impianto per recupero acqua piovana il filtraggio dell'acqua è necessario per eliminare i detriti, le foglie, sassolini, terra o altro materiale in arrivo dai tetti o dalle aree di recupero dell'acqua. L’ingresso di tali materiali nel serbatoio determina un repentino deterioramento qualitativo dell’acqua e può compromettere il funzionamento delle successive unità di trattamento.
- Vasca di calma e serbatoio d'accumulo:** è il contenitore che accumula l'acqua piovana filtrata. L'immissione dell’acqua piovana nel serbatoio, una volta filtrata, avviene attraverso un tubo verticale che si protrae fino sul fondo e termina con una vasca di calma. Questa serve per rallentare il flusso

d'acqua in ingresso alla cisterna evitando turbolenze e la conseguente flottazione di eventuali sedimenti presenti sul fondo, diversamente questi potrebbero intasare il filtro della pompa quando è in fase di aspirazione. La vasca di calma assicura un continuo flusso di acqua ossigenata, che arrivando sul fondo del serbatoio permette di eliminare o ridurre fortemente la formazione di batteri anaerobici e di mantenere una condizione ottimale di stoccaggio dell'acqua. Viene dimensionata in funzione della portata massima dell'impianto, e viene realizzata generalmente in polietilene ad alta densità. Prevede manutenzione annuale quale controllo visivo dell'acqua e del fondo della vasca e controllo olfattivo per evitare cattivi odori segno di ristagno; e pulizia quinquennale salvo depositi di detriti sul fondo. I serbatoi d'accumulo rappresentano l'elemento cardine dell'impianto sia perché il suo dimensionamento necessita di alcuni accorgimenti sia perché è l'elemento più costoso dell'impianto. Le dimensioni variano dai 150 ai 180.000 litri, il dimensionamento deve tener conto delle caratteristiche ambientali del luogo in cui viene installato, delle superfici di captazione e delle prestazioni richieste. I serbatoi di media e grande capienza hanno generalmente forma cilindrica con asse disposto in senso orizzontale o verticale.

I materiali più utilizzati per questo genere di manufatto sono il polietilene ad alta densità, che è un materiale riciclabile, la vetroresina, il cemento e meno frequentemente l'acciaio. In fase di progettazione è bene prevedere le operazioni di manutenzione, per il mantenimento in efficienza del manufatto, quali: annualmente il controllo visivo e olfattivo dell'acqua accumulata e della chiusura dei pozzetti di accesso al serbatoio e almeno ogni 5 anni è prevista la pulizia interna della vasca.

- d) 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. Nei manufatti che necessitano di manutenzione, ossia quelli non autopulenti, bisogna procedere con verifiche e controlli con periodicità mensile o bimensile. Questi componenti tecnici, in genere vengono alloggiati nei locali impiantistici degli edifici.
- e) 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. I gruppi di pompaggio sono di due tipologie e si distinguono dalla presenza o dalla non presenza a bordo del sistema di reintegro automatico. Il gruppo di pompaggio con sistema di reintegro automatico integrato deve essere conforme alla norma DIN 1989 in quanto mette in comunicazione la rete idrica potabile pubblica con la rete dell'acqua meteorica non potabile. In sostanza si tratta di una valvola motorizzata a tre vie che commuta il prelievo dell'acqua piovana presente nel serbatoio a quella proveniente dalla rete pubblica o viceversa. A determinare questa funzione è il sensore di livello posto nel serbatoio; quando viene raggiunto il livello minimo dell'acqua meteorica il sensore di livello lo rileva e comunica alla centralina di commutare la valvola deviatrice a tre vie verso la rete idrica pubblica. Il gruppo di pompaggio privo di sistema di reintegro è una semplice pompa esterna o sommersa che può aspirare e pressurizzare solo l'acqua presente in cisterna. Quando vengono utilizzate pompe senza gruppo di reintegro automatico a bordo è necessario installare una centralina che, rilevando il livello scarso all'interno del serbatoio, preleva l'acqua direttamente dall'acquedotto per evitare di rimanere senza acqua nella cisterna e quindi nell'impianto. Per entrambi i sistemi di pompaggio è indispensabile installare un apposito tubo di aspirazione con galleggiante provvisto anch'esso di filtro. Questo serve per far in modo che l'aspirazione dell'acqua avvenga sempre ad una profondità costante rispetto alla superficie, ad esempio a circa 10 cm dalla superficie, garantendo così di pescare acqua sempre pulita, indipendentemente dal livello presente all'interno del serbatoio. Se il pescaggio risultasse troppo vicino al fondo, infatti, zona in cui si possono accumulare delle impurità, il galleggiante di attivazione/disattivazione della pompa provvederebbe a disattivarla. Appena il serbatoio torna riempirsi il sistema ricomincia a funzionare. Questi accorgimenti servono sia a garantire la massima qualità dei fluidi prelevati che a preservare da eventuali danni le pompe e

gli impianti idraulici. Il mantenimento in efficienza dei gruppi di pompaggio prevede annualmente l'ispezione visiva, la pulizia dei filtri e della vasca di reintegro e la prova del corretto funzionamento della pompa.

- f) 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. Il sifone, con tipica forma ad U, presenta una griglia di protezione contro l'ingresso di piccoli animali. Può presentarsi dritto o a forma inclinata, tale inclinazione permette una migliore fuoriuscita dell'acqua in eccesso e di eventuali detriti in galleggiamento.
- g) 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. Come da Decreto Ministeriale 185/2003, le tubazioni che compongono la rete duale di adduzione delle acque riciclate devono essere distinguibili da quelle potabili mediante diametri e colorazioni differenti, e uguale deve essere fatto per i terminali di erogazione destinati all'acqua di recupero che devono essere contrassegnati in maniera inequivocabile come non potabili.

Il corretto dimensionamento del serbatoio di accumulo è fondamentale per garantire un corretto funzionamento dell'intero sistema e per limitare al minimo i costi dell'impianto. Dimensionare il serbatoio di recupero in modo completo ed efficiente è alquanto complesso poiché bisogna considerare svariate variabili alcune delle quali, come il regime di pioggia, non sono prevedibili e quantificabili in modo preciso. La normativa italiana e ancora di più quella tedesca forniscono formule e tabelle per valutare un dimensionamento di massima per tale tipo di impianto. Quello che risulta complicato è riuscire ad assicurare un determinato livello di efficienza dell'impianto considerando che possono esserci periodi più piovosi di altri, non solo valutando il regime piovoso in ottica stagionale, ma anche in funzione del tempo secco medio che può variare da mese a mese e di anno in anno.

La normativa tecnica italiana, UNI/TS 11445 "Impianti per la raccolta e utilizzo dell'acqua piovana per usi diversi dal consumo umano", definisce i requisiti generali per la progettazione, la realizzazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti di recupero delle acque meteoriche per usi non potabili in ambito residenziale. Tali impianti devono essere separati e distinti dalla rete di distribuzione dell'acqua potabile all'interno dell'edificio e possono essere utilizzati per l'irrigazione di giardini, lo scarico dei WC, gli impianti di lavaggio delle superfici di pertinenza e altri usi non potabili consentiti dalla legislazione vigente.

Per quanto riguarda la progettazione entrano in gioco diversi parametri per poter dimensionare in modo ottimale e funzionale il sistema di accumulo:

- luogo dell'installazione ovvero il regime pluviometrico della zona;
- la tipologia e la dimensione del manufatto dovranno tener conto della dimensione e della tipologia della superficie di captazione, della domanda richiesta dalle utenze per scopi non potabili attuali e futuri.

La modellazione dell'impianto per il recupero e il riuso delle acque meteoriche all'interno del bacino sperimentale del Fossolo, eseguita mediante il software open source SWMM 5.1, prevede l'inserimento di 7 impianti, dimensionati secondo normativa UNI/TS 11445, che mirano a recuperare l'acqua meteorica necessaria per soddisfare la richiesta idrica non potabile per gli scarichi dei wc del 60% degli utenti residenti (circa 5800 abitanti). Gli invasi sono stati collocati in idonei punti della rete, avendo cura di ottenere una configurazione che non generasse instabilità nel modello. Ogni serbatoio è stato dotato di un sistema di sollevamento per simulare il prelievo degli utenti e di un troppo pieno che reimmette in rete l'acqua in eccesso.

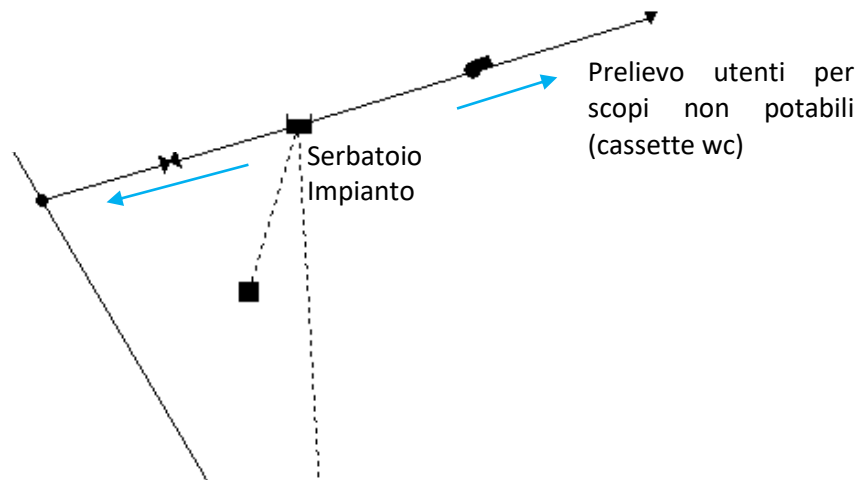


Figura 3-19: schematizzazione dell'impianto all'interno della rete del Fossolo in SWMM 5.1

Dai risultati ottenuti dalla modellazione, gli impianti risultano efficienti al 57% ossia riescono a fornire acqua in quantità tale da soddisfare il 57% della richiesta idrica per scopi non potabili.

Osservando gli sversamenti nel corpo idrico ricettore, sia in termini di volume sia di massa di solidi sospesi, si può notare come lo Scenario 6 definito Originale, ossia privo di sistema RTC, rispetto allo scenario reale (Scenario 0) fornisca una riduzione pari al 84% in termini di volume sversato al ricettore e del 77% osservando la massa di solidi sospesi totali TSS inviati al corpo idrico ricettore. Dal confronto tra lo Scenario 6 con sistema RTC con lo Scenario 1, la riduzione percentuale aumenta fino al 88% per quanto riguarda il volume sversato e fino al 87% per la massa TSS inviata al ricettore.

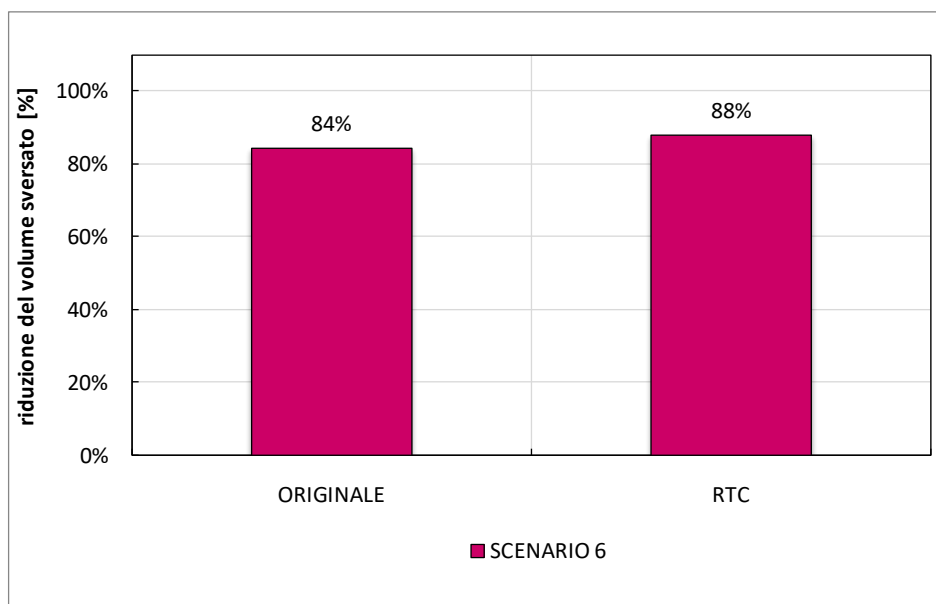


Figura 3-20: grafico relativo alla riduzione percentuale di volume inviato al ricettore derivante dal confronto tra il caso 6 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

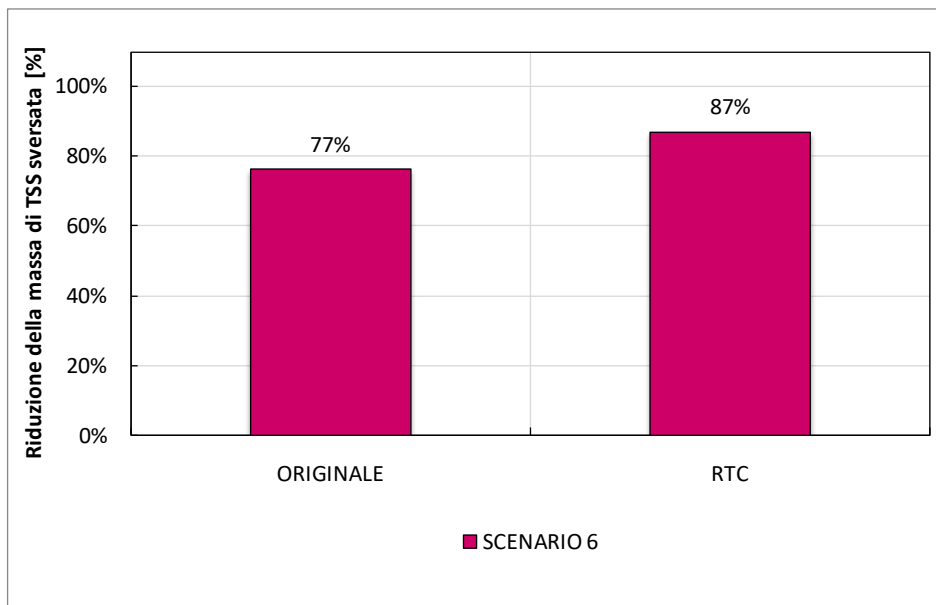


Figura 3-21: grafico relativo alla riduzione percentuale di massa TSS inviata al ricettore derivante dal confronto tra il caso 6 (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

L'introduzione del sistema RTC all'interno dello Scenario 6 provoca una riduzione di volume inviato al ricettore del 49% e pari al 74% in termini di massa di solidi sospesi sversati al ricettore.

Tabella 3-7: sintesi dei volumi e delle masse TSS relativi allo Scenario 6 con e senza RTC

Volume totale				
Soluzione		Volume inviato al depuratore (m3/anno)	Volume inviato al ricettore (m3/anno)	Riduzione % volume inviato al ricettore
SCENARIO 6	ORIGINALE	601459	6102	
	RTC	649243	3130	49%
Massa TSS				
Soluzione		TSS inviati al depuratore (kg/anno)	TSS inviati al ricettore (kg/anno)	Riduzione % TSS inviato al ricettore
SCENARIO 6	ORIGINALE	130148	962	
	RTC	138530	248	74%

Gli impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche non solo forniscono una valida soluzione per il risparmio della risorsa idrica, evitando di utilizzare acqua di elevata qualità per scopi non potabili, ma consentono anche di prevenire i sovraccarichi della rete, permettendo l'immagazzinamento di una parte dell'acqua meteorica che verrebbe inviata in rete, minimizzando il numero e la durata degli sversamenti nel corpo idrico ricettore, in termini quantitativi e qualitativi e ciò offre notevoli benefici all'ambiente.

3.10 Scenario 7: introduzione di invasi distribuiti lungo la rete (con e senza RTC).

L'inserimento di invasi di laminazione lungo la rete consente l'accumulo temporaneo dei volumi di pioggia che aumentano il tempo di concentrazione e abbattano la portata al colmo nella sezione di chiusura del bacino. Il posizionamento ottimale delle vasche lungo il reticolo fognario è stato valutato analizzando il comportamento della rete in occasione di eventi di media intensità e durata comparabile a quella critica. A titolo esemplificativo si riporta il grado di riempimento massimo dei collettori durante l'evento registrato il 09 luglio 2009 in una configurazione senza invasi (fig. 3-22) e in una configurazione con invasi (fig. 3-23).

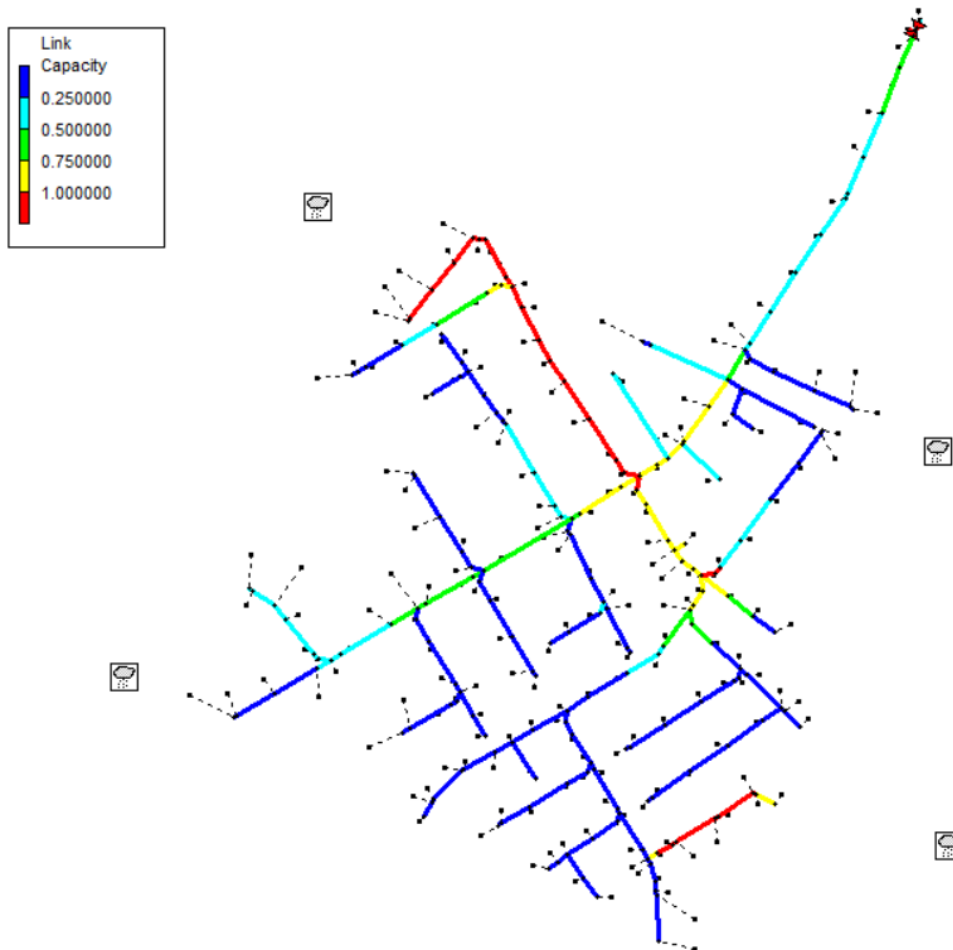


Figura 3-22: capacità di invaso delle condotte della rete del Fossolo (originale) per l'evento del 9/7/2009 utilizzando il software SWMM 5.1

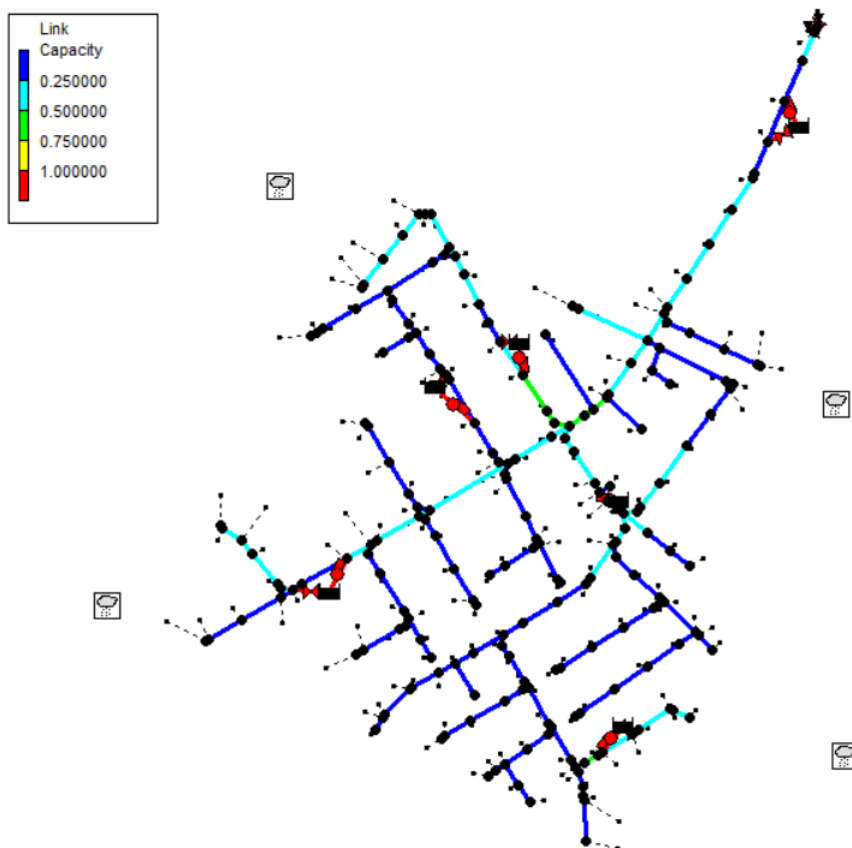


Figura 3-23: capacità di invaso delle condotte della rete del Fossolo con l'inserimento degli invasi di accumulo per l'evento del 9/7/2009

Le vasche sono state posizionate a monte delle paratoie mobili, nel caso di rete con sistema di controllo in tempo reale, al fine di migliorarne il funzionamento.

È stato ipotizzato l'inserimento di 6 invasi fuori linea in differenti punti della rete, alimentati attraverso l'inserimento di una soglia laterale e dimensionati per invasare:

- **Scenario 7.a:** 10 m³/ha, per un volume complessivo di 450 m³;
- **Scenario 7.b:** 50 m³/ha, per un volume complessivo di 2245.5 m³.

Le vasche rimettono in rete il volume invasato attraverso una pompa con portata costante in uscita pari a 3 l/(s·ha) al fine di garantire una portata inferiore a cinque volte la portata media nera.

Dalla modellazione, la riduzione che si ottiene dall'introduzione degli invasi dimensionati per trattenere 10 m³/ha, Scenario 7.A Originale, ossia privo di sistema RTC, con lo scenario reale (Scenario 0) si ottiene una riduzione pari al 55% in termini di volume e di massa di solidi sospesi inviati al ricettore; confrontando il medesimo scenario con sistema RTC con lo Scenario 1, la riduzione percentuale aumenta fino al 97% per quanto riguarda il volume sversato e per la massa TSS inviata al ricettore.

Lo Scenario 7.B, dimensionato per invasare 50 m³/ha, nel caso originale senza sistema RTC evidenzia una riduzione rispetto allo Scenario 0 del 62% in termini di volume sversato e del 56% facendo riferimento alla massa TSS inviata al ricettore. Questa riduzione aumenta significativamente nel caso con RTC confrontato con lo Scenario 1, le percentuali di riduzione di volume e massa TSS corrispondono a quelle appena enunciate riferite allo Scenario 7.A.

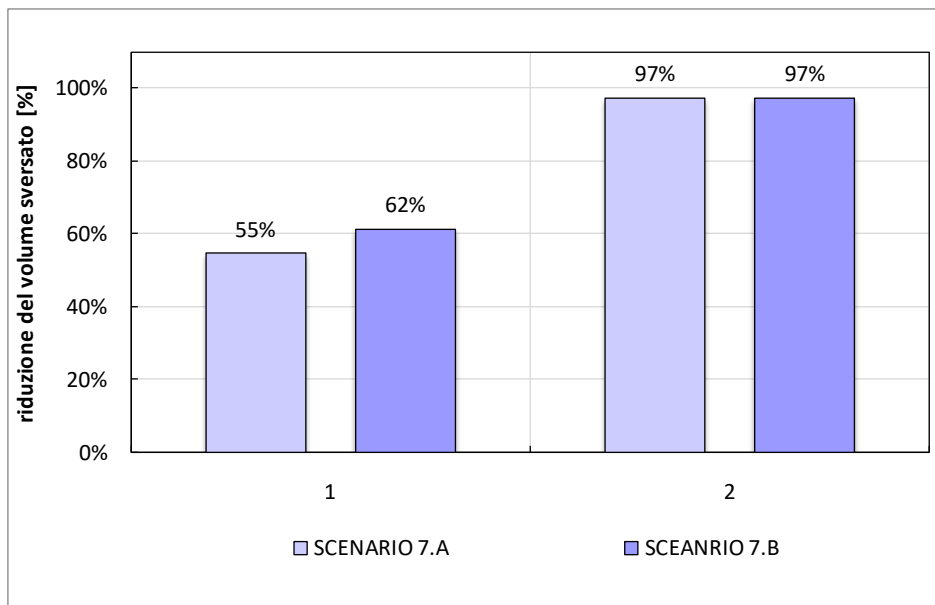


Figura 3-24: grafico relativo alla riduzione percentuale di volume inviato al ricevitore derivante dal confronto tra il caso 7.A e 7.B (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

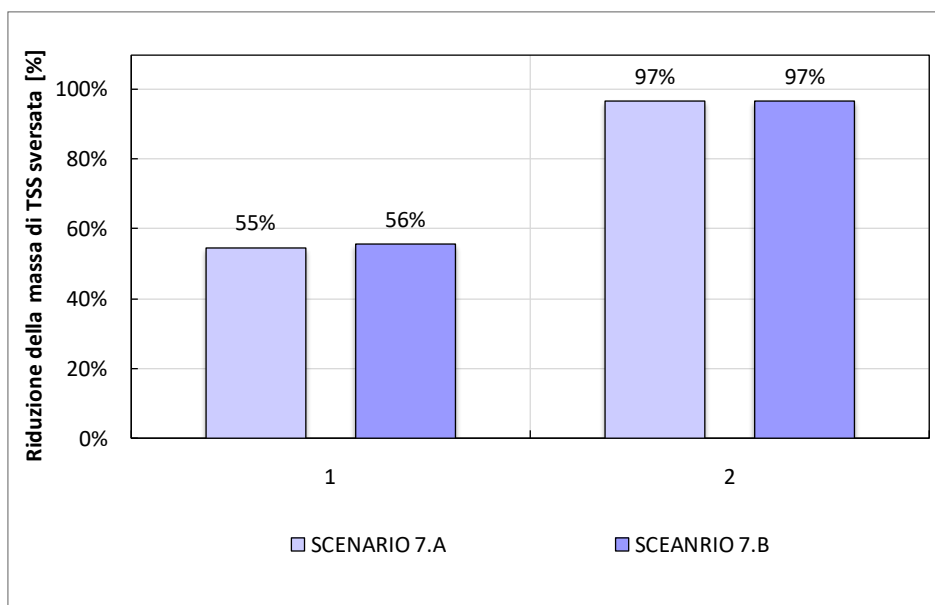


Figura 3-25: grafico relativo alla riduzione percentuale di massa TSS inviata al ricevitore derivante dal confronto tra il caso 7.A e 7.B (con e senza RTC) e gli Scenari 0 e 1

In Tabella 3-8: sintesi dei volumi e delle masse TSS relativi allo Scenario 7.A e 7.B con e senza RTC. Tabella 3-8 sono sintetizzati i dati emersi dalle simulazioni, il sistema RTC produce una riduzione in termini di volume sversato pari al 96% e una riduzione di massa TSS inviata al corpo idrico ricevitore pari al 97% per entrambi gli Scenari 7.A e 7.B.

Tabella 3-8: sintesi dei volumi e delle masse TSS relativi allo Scenario 7.A e 7.B con e senza RTC

Volume totale				
Soluzione		Volume inviato al depuratore (m3/anno)	Volume inviato al ricettore (m3/anno)	Riduzione % volume inviato al ricettore
SCENARIO 7.A	ORIGINALE	699510	17723	
	RTC	722078	670	96%
SCENARIO 7.B	ORIGINALE	711213	15556	
	RTC	753924	670	96%
Massa TSS				
Soluzione		TSS inviati al depuratore (kg/anno)	TSS inviati al ricettore (kg/anno)	Riduzione % TSS inviato al ricettore
SCENARIO 7.A	ORIGINALE	133989	1864	
	RTC	134876	62	97%
SCENARIO 7.B	ORIGINALE	135191	1812	
	RTC	134266	62	97%

È evidente che il vantaggio che si ottiene dall'inserimento degli invasi di accumulo distribuiti sulla rete è riconducibile ad un miglior funzionamento della stessa. La contemporanea presenza degli invasi e degli RTC consente di sfruttare al massimo la capacità di invaso della rete evitando gli allagamenti e favorendo una gestione più automatizzata dell'intero sistema.

4 Conclusioni

Le nature based solutions (NBS) sono azioni e soluzioni basate sulla natura, un approccio ecosistemico volto a favorire e incentivare soluzioni innovative basate sull'incremento del verde pubblico e privato e su tecnologie che sfruttano il più possibile processi di trattamento naturali.

L'utilizzo di queste tecnologie verdi conduce a pensare il sistema insediativo in modo adattivo al variare delle condizioni climatiche, potenziando la resilienza delle aree urbanizzate, al fine di minimizzare i problemi connessi alla crescente impermeabilizzazione del suolo e a quelli legati agli eventi meteorici estremi sempre più frequenti.

Nel presente studio è stato analizzato l'utilizzo combinato delle tecnologie verdi NBS per la gestione delle acque meteoriche con i sistemi di Real Time Control (RTC) al fine di ottimizzare il funzionamento della rete minimizzando i rischi idraulici e ambientali. Tali soluzioni, infatti, presentano sia una valenza in termini di strategia per il miglioramento della sicurezza in ambito urbano rispetto ai cambiamenti climatici, sia una rilevanza idraulica e ambientale al fine di rendere la città più "smart" e resiliente.

Per la modellazione è stato scelto il bacino sperimentale del Fossolo a Bologna, oggetto dei precedenti PAR 2017 e 2018, utilizzando i dati di precipitazione relativi all'anno 2009. Per valutare la risposta idrologica del bacino, la rete è stata modellata mediante il software open source SWMM 5.1. Le differenti configurazioni della rete e i benefici derivanti dall'applicazione dei diversi scenari sono stati valutati in termini di riduzione dei volumi defluiti, capacità d'invaso della rete, vulnerabilità dei rami, rischio di allagamento dei nodi e masse di TSS sversate nel ricettore.

Le differenti configurazioni analizzate sono riassumibili in:

- Scenario 0: rete reale.
- Scenario 1: implementazione della rete con un sistema RTC.
- Scenario 2: introduzione delle coperture verdi (con e senza sistema RTC).
- Scenario 3: aumento della permeabilità (con e senza sistema RTC).
- Scenario 4: aumento della permeabilità introducendo le coperture verdi (con e senza sistema RTC).
- Scenario 5: aumento della permeabilità del 15% delle aree impermeabili (con e senza sistema RTC).
- Scenario 6: introduzione di impianti per il recupero e il riuso delle acque meteoriche per scopi non potabili (con e senza sistema RTC).
- Scenario 7: introduzione di invasi distribuiti lungo la rete (con e senza RTC):
 - Scenario 7.a: 10 m³/ha;
 - Scenario 7.b: 50 m³/ha.

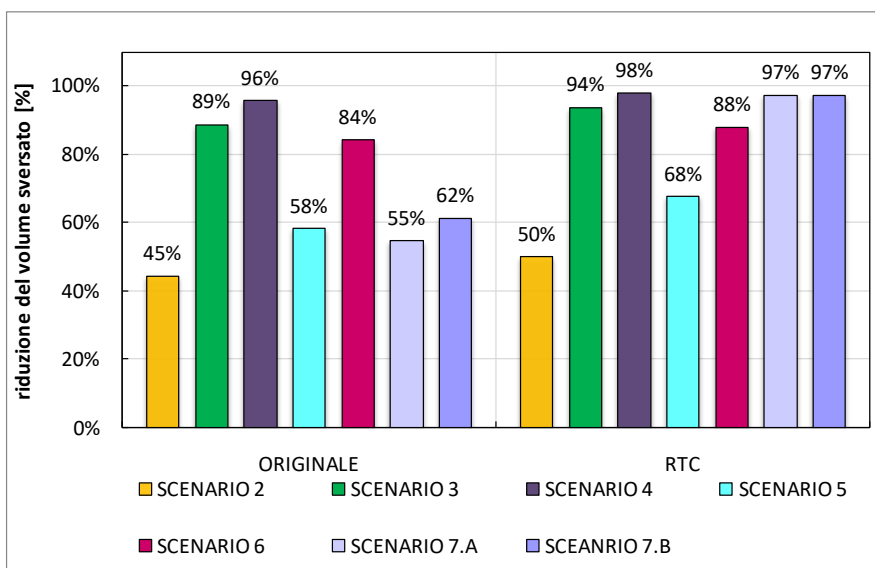


Figura 4-1: Grafico relativo alla riduzione del volume inviato al ricevitore nelle varie configurazioni confrontandole con lo Scenario 0 (ORIGINALE) e delle rispettive configurazioni con RTC rispetto allo Scenario 1 (RTC)

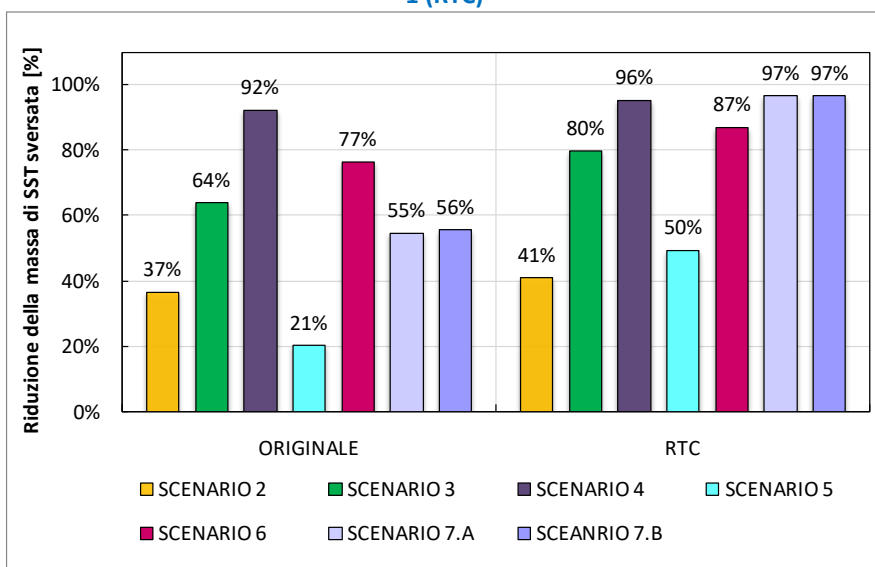


Figura 4-2: Grafico relativo alla riduzione della massa di solidi sospesi totali (SST) inviati al ricevitore nelle varie configurazioni confrontandole con lo Scenario 0 (ORIGINALE) e delle rispettive configurazioni con RTC rispetto allo Scenario 1 (RTC)

L'introduzione di soluzioni NBS porta ad una notevole riduzione sia in termini di volume sia in termini di masse SST inviate al ricevitore. Osservando il grafico in Figura 4-1 si può notare una riduzione di volume, rispetto al caso reale (Scenario 0) che varia da un massimo del 96%, nel caso estremo che prevede l'introduzione di tetti verdi e l'incremento del 100% della superficie permeabile (Scenario 4), ad un minimo del 45%, nel caso di introduzione delle coperture verdi diffuse sull'area (Scenario 2). Il grafico in Figura 4-2 mostra la riduzione in termini di massa di solidi sospesi totali inviati al ricevitore, rispetto al caso originale (Scenario 0) questi variano da un massimo del 92% (Scenario 4) ad un minimo del 37% (Scenario 2). L'introduzione di un sistema di RTC amplifica queste riduzioni, rendendo il sistema di drenaggio più resiliente riducendo notevolmente sia i volumi sia la massa di SST inviati al corpo idrico ricevitore. Osservando i grafici in Figura 4-1 e Figura 4-2, infatti, si può vedere un incremento della riduzione percentuale dei vari casi rispetto allo scenario con solo sistema RTC (Scenario 1). I grafici in Figura 4-3 e Figura 4-4 mettono in evidenza la riduzione percentuale derivante dal confronto tra la versione del sistema di drenaggio senza e con sistema RTC per ogni scenario analizzato.

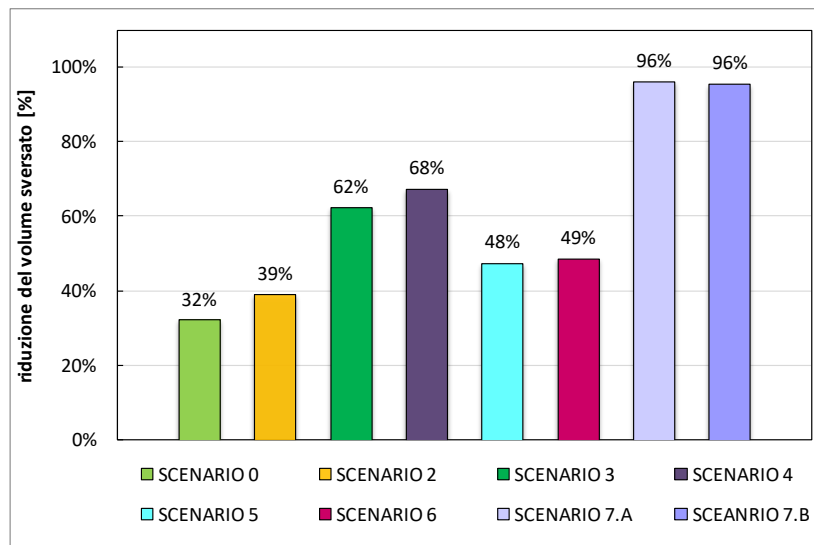


Figura 4-3: grafico relativo alla riduzione di volume inviato al ricettore per i casi analizzati ponendo a confronto la rispettiva soluzione con RTC rispetto a quella senza controlli in tempo reale

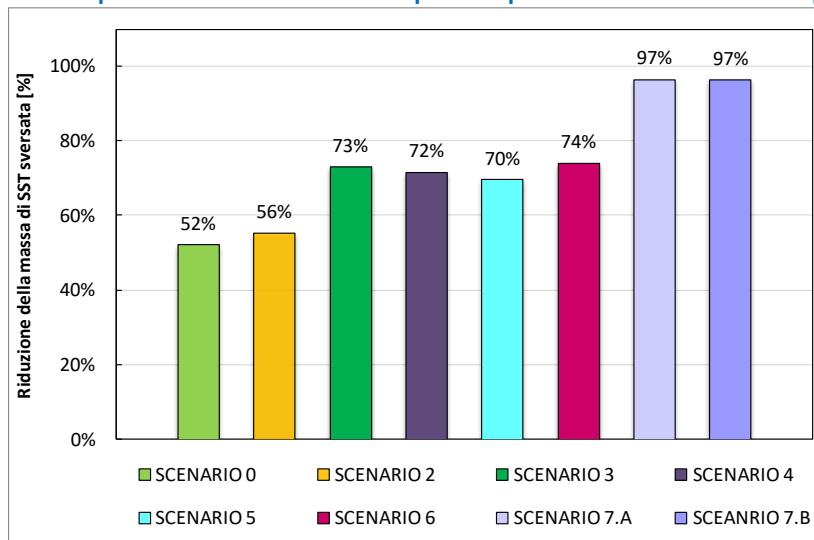


Figura 4-4: grafico relativo alla riduzione di SST inviati al ricettore per i casi analizzati ponendo a confronto la rispettiva soluzione con RTC rispetto a quella senza controlli in tempo reale

Analizzando i volumi in arrivo al pozzetto partitore nel tratto terminale della rete, sono state valutate le percentuali di acqua inviata alla depurazione e deviata verso il corpo idrico ricettore per ogni scenario ipotizzato. Annualmente vengono immessi in rete circa 0,55 Mm³ di acque nere, al pozzetto partitore arrivano in media 0,75 Mm³ di acque miste, la modellazione degli scenari con sistema RTC comporta un errore pari a circa il 7.6% dovuto alla presenza degli *Orifice* in quanto il software utilizza una differente logica di calcolo per questi elementi. Gli scenari che prevedono l'introduzione di tecnologie NBS limitano l'immissione delle acque meteoriche in rete, favorendo la naturale infiltrazione nel terreno.

Dai grafici riportati in Figura 4-5 e Figura 4-6 si può notare come la percentuale di volume e di massa inviata al ricettore sia inferiore per i casi che prevedono l'utilizzo di soluzioni NBS e come ulteriormente diminuisca nel caso con sistema RTC.

Tabella 9: volumi e masse inviate al depuratore e al ricettore per ogni scenario analizzato

	Soluzione	Volume inviato al depuratore (m ³ /anno)	Volume inviato al ricettore (m ³ /anno)	SST inviati al depuratore (kg/anno)	SST inviati al ricettore (kg/anno)
SCENARIO 0	ORIGINALE	690352	39251	133192	4100
SCENARIO 1	RTC	748003	26567	140278	1960
SCENARIO 2	ORIGINALE	634122	21716	130574	2592
	RTC	688204	13235	139402	1153
SCENARIO 3	ORIGINALE	605715	4324	131964	1475
	RTC	653892	1626	140087	395
SCENARIO 4	ORIGINALE	583848	1604	128202	312
	RTC	630395	521	137326	88
SCENARIO 5	ORIGINALE	623985	16304	132317	3258
	RTC	676646	8537	140776	987
SCENARIO 6	ORIGINALE	601459	6102	130148	962
	RTC	649243	3130	138530	248
SCENARIO 7.A	ORIGINALE	699510	17723	133989	1864
	RTC	722078	670	134876	62
SCENARIO 7.B	ORIGINALE	711213	15556	135191	1812
	RTC	753924	670	134266	62

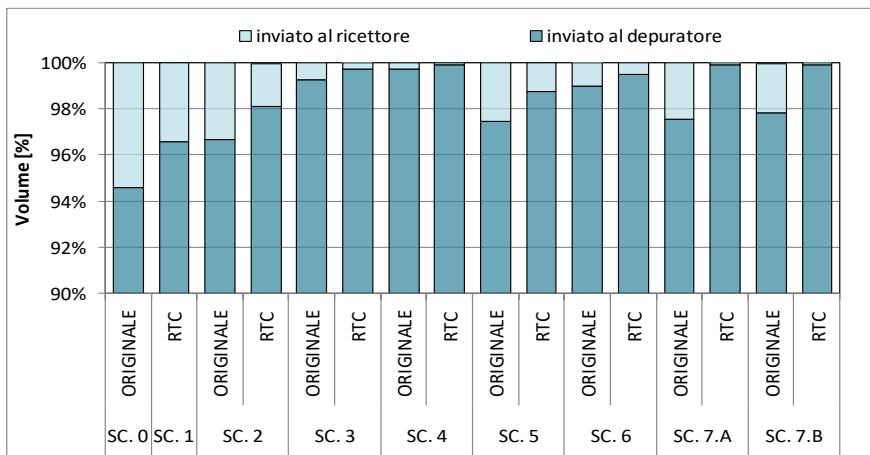


Figura 4-5: percentuale di volume inviato al depuratore e al ricettore per ogni scenario ipotizzato

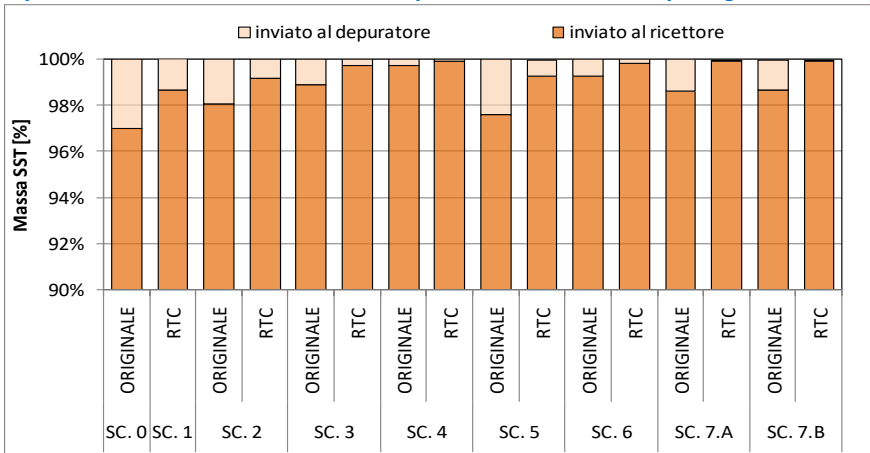


Figura 4-6: percentuale di massa di solidi sospesi totali inviata al depuratore e al ricettore per ogni scenario ipotizzato

La soluzione con controllo in tempo reale con algoritmo PID, genericamente per ogni scenario ipotizzato, permette di minimizzare i volumi e la massa inviata al ricettore, raggiungendo così l'obiettivo di ottimizzare il funzionamento complessivo della rete, limitando, allo stesso tempo, il rischio di allagamento urbano grazie all'ottimizzazione della capacità di accumulo delle condotte stesse, in tutti gli scenari ipotizzati. Dall'analisi degli scenari ipotizzati risulta evidente come l'utilizzo combinato di tecnologie verdi NBS con sistemi di controllo in tempo reale sia in grado di ridurre significativamente i volumi e gli inquinanti inviati al corpo idrico ricettore, ponendosi come soluzioni ad elevata rilevanza idraulica e ambientale, e offrendo così differenti possibili strategie per migliorare la sicurezza urbana rispetto a eventi meteorici estremi rendendo le città più resilienti.

5 Riferimenti bibliografici

- [1] Andri S., Sauli G., "Verde pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico", ISPRA Manuale e Linee Guida 78 technical report, 2012.
- [2] Artina S., Maglionico M., Marinelli A. " Le misure di qualità nel bacino urbano Fossolo". CSDU, Milano, 1996.
- [3] Artina S., Maglionico M., "Analisi comparativa di modelli per lo studio della qualità delle acque nelle reti di drenaggio urbano", CSDU, Milano, 1998.
- [4] Berardi U., GhaffarianHoseini A., GhaffarianHoseini A., "State of the art analysis of the environmental benefits of green roofs", Appl. Energy, 115:411-428, 2014.
- [5] Bonoli, A., Conte, A., Maglionico, M., Stojkov, I., "Green Roofs For Sustainable Water Management", Environ. Eng. Manag. J. 12, 153–156, 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] Cipolla S. S. "Tetti verdi: analisi sperimentale e simulazione numerica", Tesi di dottorato, Università di Bologna, 2015.
- [10] Cipolla, S.S., Altobelli, M., Maglionico, M., "Systems for rainwater harvesting and greywater reuse at the building scale : a modelling approach", Environ. Eng. Manag. J. 17, 2018.
- [11] Cipolla, S.S., Maglionico, M., Stojkov, I., "Experimental Infiltration Tests on Existing Permeable Pavement Surfaces". Clean - Soil, Air, Water 44, 89–95. doi:10.1002/clen.201400550, 2016.
- [12] Cipolla, S.S., Maglionico, M., Stojkov, I., "A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM", Ecol. Eng. 95, 876–887, 2016.
- [13] Comune di Firenze, IRIDRA srl, "Linee guida per un regolamento del verde. Migliori pratiche per la gestione integrata sostenibile delle acque in aree urbane".
- [14] 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.
- [15] DWA "Framework for planning of real time control of sewer networks", German DWA Rules and Standards, Advisory Leaflet DWA-M 180E, 2005.
- [16] Gambi, G., Maglionico, M. & Tondelli, S. "Water management in local development plans: The case of the old fruit and vegetable market in Bologna", Procedia Engineering, pp. 1110, 2011.
- [17] Garofalo G, Giordano A., Piro P., Spezzano G., A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage system, Journal of network and computer applications, 78, pp. 30-42, 2017.

- [18] Georgia Department of the Environment "Georgia Stormwater Management Manual", Volume 2 Technical Handbook, 2001.
- [19] Gobattoni F., Pelorosso R., Leone A., "Strategie di riqualificazione urbana clima-adattiva: Nature-Based Solutions per città più resilienti", Conferenza "A new cycle of Urban Planning Between Tactics and Strategy. Urbanpromo" - XIII Edizione Progetto Paese, 101-109, Triennale di Milano, 2016.
- [20] Hartigan J. P. "Basis for design of wet detention basin BMPs", Design of urban runoff quality control, American Society of Engineers, 1988.
- [21] Kroll S., Weemaes M., Van Impe J., Willems P. "A methodology for design of RTC strategies for combined sewer networks", Water 10, 2018.
- [22] Leitao J. P., Carbajal J. P., Rieckermann J., Simoes N. E., Sà Marques A., De Sousa L. M., "Identifying the best locations to install flow control devices in sewer networks to enable in-sewer storage", Journal of Hydrology, 556, 371-383, 2018.
- [23] Maglionico M., "Criteri di dimensionamento e gestione degli invasi nelle reti fognarie", Atti del Convegno: "Moderne tecniche di progettazione e gestione dei sistemi fognari e acquedottistici", 29 - 51, 2004.
- [24] Maglionico M., Stojkov I., Conte A., Bonoli A., Cipolla S.S., "Green roofs for sustainable water management in urban areas", 13th Int. Conf. Urban Drain., 1-10, Malaysia, 2014.
- [25] Marinelli, A., Maglionico, M., & Artina, S., "Water quality simulation in an urban drainage catchment", Proceedings of the European Water Resources Association Conference, 383-390, 1997.
- [26] Maryland Department Of The Environment (MDE) "Storm Water Design Manual", Sediment and Storm Water Administration, 2000.
- [27] Masseroni D., Massara F., Gandolfi C, Bischetti G. B. "Manuale sulle buone pratiche di utilizzo dei sistemi di drenaggio urbano sostenibile". 2018.
- [28] 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.
- [29] Northern Virginia Planning District Commission (NVPDC) "Maintaining your BMP", Division of Environmental Services, 2002.
- [30] Palla A., Gnecco I., Lanza L. G., "Hydrologic Restoration in the urban environment using green roofs", Water, 140-154, 2010.
- [31] Pittalunga I., Schenone C., Palla A., Lanza L.G., "Le prestazioni acustiche del verde pensile: assorbimento sonoro di coperture di diversa configurazione", 2a Giorn. Di Stud. Sull'acustica ambientale, 1-19, 2009.
- [32] Piro, P., Carbone, M., Garofalo, G. " Distributed vs. concentrated storage options for controlling CSO volumes and pollutant loads". Water Practice and Technology, 2010.
- [33] Piro P., Garofalo G., Nigro G., Principato F., Tigani F., Strategie sostenibili e controllo in tempo reale (RTC) per la mitigazione degli allagamenti in ambiente urbano: applicazioni sulla rete di drenaggio della città di Cosenza, L'Acqua, 3, 88-92, 2017.

- [34] Stovin V., Vesuviano G., Kasmin H., "The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions", *J. Hydrol.*, 414-415:148-161, 2012.
- [35] Schultze M., Erbe V., Haas U., Scheer M., Weyand M., "Sewer system real-time control supported by the M180 guideline document", *Urban Water Journal* 5, 67-76, 2008.
- [36] US. EPA. Storm Water Management Model user's manual version 5.1, 2015.
- [37] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). " Nature-based Solutions" The United Nations World Water Development Report 2018, UNESCO, 2018.

6 Abbreviazioni ed acronimi

- BMP: Best Management Practices
- NBS: Nature Based Solutions
- RTC: Real Time Control
- TSS: Solidi Sospesi Totali
- SUD: Sustainable Urban Drainage

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.altobelli3>

Sara Simona Cipolla

Assegnista di Ricerca presso il Dipartimento DICAM dell'Università di Bologna. Ha conseguito la Laurea Specialistica in Ingegneria Civile, indirizzo Idraulica presso l'Università di Bologna nel 2011 e il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali indirizzo scienza e tecnologia dell'acqua nel 2015 presso l'Università di Bologna. Da maggio 2018 collabora come Assegnista di Ricerca (L240/2010) presso il DICAM al progetto di ricerca LIFE AGROWETLANDS II - SMART WATER AND SOIL SALINITY MANAGEMENT IN AGRO-WETLANDS (www.lifeagrowetlands2.eu), dal 2016 al 2018 ha collaborato come Assegnista di Ricerca (L240/2010) presso il Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale, nell'ambito del progetto POR-FESR GST4water (www.gst4water.it), dal 2015 al 2016 ha prestato servizio come Assegnista di Ricerca (L240/2010) presso il Dipartimento DICAM-Costruzioni Idrauliche della Scuola di Ingegneria di Bologna. 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 (NBS, SuDS, Green Roofs etc), mediante attività di modellazione numerica di reti drenaggio urbano complesse e mediante lo studio di sistemi per il recupero di energia termica dai sistemi fognari. Recentemente si interessa alle tematiche legate all'agricoltura di precisione ed in particolare alla gestione sostenibile dell'acqua in aree agricole mediterranee a falda superficiale con salinizzazione del suolo.

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

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>