

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Confronto di metodologie di calcolo dell'invarianza idraulica su area vasta: il caso del Comune di Torino

Relatori:

Prof. Pierluigi Claps
Prof. Daniele Ganora

Candidato:

Federico Morganti

Sommario

1-Introduzione	5
1.1-Invarianza idraulica e Invarianza idrologica	6
2- Inquadramento normativo	8
2.1-Livello Europeo	8
2.2- Livello nazionale	9
2.2.1-Decreto legislativo 152/2006, “Norme in materia ambientale”	10
2.2.2 Decreto legislativo 49/2010, recepimento della 2007/60/CE	12
2.2.3 Piano di Gestione del rischio di alluvioni	12
3- Applicazione Invarianza idraulica in Italia	13
3.1-Invarianza idraulica Emilia Romagna	13
3.2- Applicazione Invarianza Idraulica Veneto	15
3.3- Applicazione Invarianza Idraulica Bolzano	17
3.4- Applicazione Invarianza Idraulica Lombardia	19
4-Piemonte e Città di Torino	27
4.1- Quadro normativo	27
4.1.1 Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PAI)	29
4.1.2 Piano Tutela delle Acque (PTA)	32
4.1.3 Piano Territoriale Regionale (PTR)	32
4.1.4 Piano Paesaggistico Regionale (PPR)	33
4.1.5 Piano Regolatore Generale Comunale (PRGC)	33
4.1.6 Piano di resilienza Climatica della Città di Torino	33
5-Nuova metodologia di calcolo a supporto del progetto di trasformazione urbana	35
5.1-Programma di calcolo	35
5.1.1-Il software di calcolo SWMM	36
5.1.2-La struttura del programma SWMM	36
5.1.3- I moduli di progetto di SWMM	38
5.1.4-Modulo idrologico (Hydrology)	39
5.1.5-Modulo idraulico (Hydraulics)	40
5.1.5.1-I nodi	40
5.1.5.2-I collegamenti o rami	41
5.1.6-Opzioni di simulazione	41
5.1.7-Deflusso superficiale	42
5.1.8-Infiltrazione (Infiltration)	42
5.2-Coefficiente di Deflusso	43
6-Calibrazione Del Modello	48
6.1-Eventi Di Pioggia	48
6.1.1-Evento Del 28-29 Luglio 2014 (Descrizione dai rapporti di evento ARPA)	48

6.1.2-Evento Del 29 Agosto 2016	49
6.2-Modelli Qgis	51
6.3-Il metodo cinematico o razionale	54
6.3.1-Coefficiente di deflusso	55
6.3.2-Intensità di pioggia	57
6.4-Il metodo SCS Curve Number	59
7-Proposta metodologica	73
7.1-Intensità di pioggia	74
7.2-Metodo delle sole Piogge	77
7.3-Applicazione del modello al caso di studio	80
7.3.1-Corso Romania	80
7.4-Dimensionamento Vasca	92
8-Conclusioni	102

1-Introduzione

Il continuo ed incontrollato cambiamento che sta subendo il mondo in cui viviamo è frutto innanzitutto del lavoro dell'uomo, che si è imposto sullo status naturale delle cose e che adesso è il primo a pagarne le conseguenze. L'operato umano ha avuto influenza su tutti i campi possibili sia in termini di risorse consumate sia in termini di peggioramento delle condizioni di equilibrio che vigevano prima del suo intervento.

Fra le conseguenze la più significativa è sicuramente il cambiamento climatico, frutto dei processi di industrializzazione e di urbanizzazione che hanno subito le grandi città e che si ripercuotono successivamente sulla sicurezza dei cittadini che fronteggiano le conseguenze di questi fenomeni ormai incontrollati.

Benché le conseguenze siano tutte collegate fra di loro, in questo lavoro verrà trattato come tema quello del ciclo dell'acqua e di come questi cambiamenti abbiano portato alla necessità di trattare questo problema soprattutto nelle realtà urbane in cui l'urbanizzazione continua ha portato alla metamorfosi del suolo.

Alla base di queste trasformazioni vi è l'impermeabilizzazione del suolo stesso, che porta quindi a variarne la natura e le interazioni con i fenomeni che lo riguardano. Si evidenzia quindi come l'intervento umano in determinate zone del paesaggio abbia portato, in caso di evento di pioggia, a fenomeni di deflusso superficiale maggiore di quello presente in tempi passati. Da qui risulta di primaria importanza l'individuazione di meccanismi atti a ristabilire "l'ordine delle cose" in modo da abbattere il rischio idro-geologico derivante dalle opere antropiche.

Sono quindi stati implementati a partire dagli anni 70 quelli che vengono definiti "sistemi di drenaggio urbano" ossia opere coerenti con il territorio con il compito di allontanare e stoccare le acque meteoriche ristabilendo un ciclo compatibile con quello presente prima dell'impermeabilizzazione del terreno. Tali sistemi, che si sono perfezionati nel tempo, operano in modi diversi a seconda della disponibilità sia del territorio che delle opere urbanistiche presenti al suo interno.

In quest'ottica il presente lavoro, frutto anche di una collaborazione con il Comune di Torino, si pone l'obiettivo di affrontare il tema dell'invarianza idraulica sotto più punti di vista e di proporre una metodologia di calcolo efficace per la progettazione urbana ai fini della stesura di un piano regolatore, di cui al momento la città è sprovvista, per garantire il rispetto dei

principi di invarianza, sul quale il progettista farà affidamento per il buon funzionamento del sistema urbanizzazione-ciclo delle acque.

1.1-Invarianza idraulica e Invarianza idrologica

Si intende con invarianza idraulica il “principio in base al quale le portate massime di deflusso meteorico scaricate dalle aree urbanizzate nei ricettori naturali artificiali di valle non siano maggiori di quelle preesistenti sull’urbanizzazione” (Regione Lombardia, 2017).

Per invarianza idrologica si intende invece il “principio in base al quale sia le portate e sia i volumi di deflusso meteorico scaricati dalle aree urbanizzate nei ricettori naturali o artificiali di valle non siano maggiori di quelli preesistenti all’urbanizzazione” (Regione Lombardia, 2017)

L’applicazione di questi due principi si esplica nella trasformazione degli idrogrammi di piena, prima e dopo la realizzazione delle opere urbane. L’urbanizzazione di fatto comporta l’impermeabilizzazione di una specifica area variandone quindi il deflusso e l’infiltrazione nel suolo.

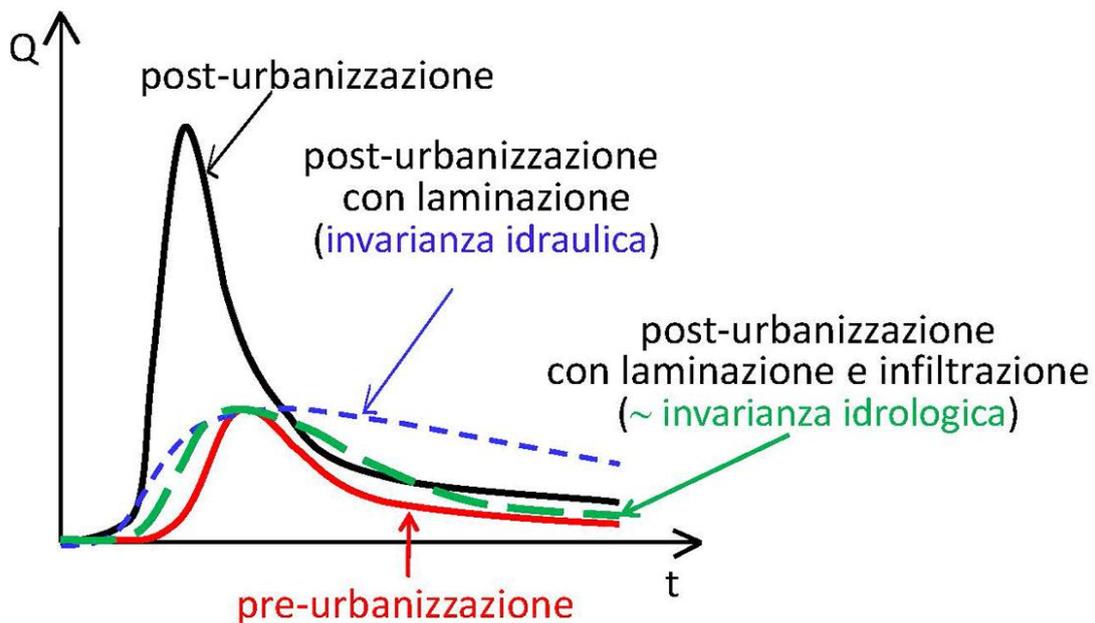


Fig.1 Idrogramma di piena di un evento pre e post urbanizzazione e con applicazione dei principi di invarianza

La trasformazione dell'idrogramma, con conseguente variazione sul picco di piena, genera effetti sfavorevoli sui sistemi fognari e sui corpi ricettori preposti all'accoglimento delle acque meteoriche.

I sistemi infatti, dimensionati per un dato picco di portata, risultano inadatti ai valori presenti dopo la trasformazione e ciò genera deflusso superficiale che, in ambito urbano, rappresenta una delle problematiche più importanti soprattutto in caso di eventi eccezionali di forte intensità.

Da qui la necessità di intervenire per la diminuzione del rischio idraulico, grandezza che tiene conto della presenza sia di persone che di beni che potrebbero essere danneggiati o distrutti. Questo risulta ottenibile attraverso la costruzione di opere atte a garantire l'invarianza; queste possono essere vasche di laminazione per immagazzinare temporaneamente parte del deflusso o Sistemi di drenaggio urbano sostenibili (SUDS) che permettono inoltre l'infiltrazione di parte della portata defluente nel terreno.

Gli approcci passati di dimensionamento e verifica delle opere per il deflusso delle acque non tenevano minimamente di conto dell'evoluzione delle città che si sarebbe verificata di lì a pochi anni. Questo con la crescita demografica e degli insediamenti ha portato tali opere ad essere assolutamente inadatte a fronteggiare la grande quantità di eventi eccezionali che si presentano ai giorni presenti.

“Le soluzioni tradizionali di drenaggio, che prevedevano l'allontanamento delle acque di pioggia attraverso condutture, hanno spesso finito col trasferire i problemi più a valle, con un aumento del rischio e con lo spreco di preziose risorse idriche.” (Langella, Politiche per il governo delle acque meteoriche urbane nell'Unione Europea, 2012)

Con la crescita dell'impermeabilizzazione si ha una conseguenza diretta anche sul clima della zona, in quanto, diminuendo i fenomeni di evapotraspirazione viene intaccata l'umidità dell'aria e si ha quindi una forte variazione delle temperature che intacca direttamente i fenomeni meteorologici che interessano la zona.

E' stato quindi necessario un brusco cambio di rotta nelle politiche nazionali per prevedere accorgimenti atti a ristabilire il ciclo naturale delle cose ed evitare conseguenze devastanti a livello economico e ambientale nei centri abitati

2- Inquadramento normativo

Al momento le misure e i principi atti a garantire la sicurezza e il rispetto delle norme nazionali sono raccolte nei PGRI (Piano Gestione Rischio Alluvionale). Ogni regione dispone del proprio piano che si adatta alle condizioni del proprio territorio. Tali provvedimenti sono tuttavia solo l'ultimo step di una serie di normative e raccomandazioni in merito all'argomento che fanno riferimento all'Unione Europea.

Negli anni infatti il tema è diventato di primaria importanza e si è giunti quindi a proposte di soluzioni sia in modo quantitativo che qualitativo con un focus ben preciso anche sulla purifica e riutilizzo delle acque meteoriche. Le direttive vengono messe in atto a più livelli, a partire dal piano internazionale fino a giungere al livello regionale e comunale.

2.1-Livello Europeo

Il primo importante traguardo raggiunto è rappresentato dalla Direttiva Acque del 2000 frutto di una serie di provvedimenti emanati durante gli anni 90 per il trattamento della qualità delle acque di origine urbana, agricola e per il consumo umano. La direttiva ha il merito di aver istituito il Piano di gestione a livello di distretto idrografico raccogliendo sotto un unico provvedimento tutti i piani settoriali presenti fino a quel momento.

La Direttiva si propone come obiettivi generali di ampliare la protezione delle acque, un miglioramento della qualità delle acque comunitarie e una corretta gestione delle risorse idriche da parte dei diversi distretti idrografici. Questa è stata successivamente implementata con la Direttiva 2006/7/CE per la gestione delle acque di balneazione, la Direttiva 2006/118/CE per il controllo dell'inquinamento delle acque sotterranee e la Direttiva 2013/39/CE che amplia l'elenco delle sostanze chimiche nocive per l'ambiente acquatico.

Nel 2007 è stata poi emanata la Direttiva Alluvioni, che introduce il PGRI a livello di distretto idrografico e istituisce un *"quadro per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni, volto a ridurre le conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche connesse con le alluvioni all'interno della Comunità"* (Art. 1).

Vengono proposti nella direttiva approcci specifici per la gestione del Rischio alluvionale sulla base della stesura delle mappe di Pericolosità e di Rischio su tutto il territorio

interessato. Ogni stato membro dovrà emanare il PGRA sul proprio territorio e garantire il rispetto delle condizioni basilari imposte a livello comunitario. Per questo risulta necessaria la stesura dettagliata di tutti gli eventi alluvionali che hanno colpito la zona negli anni passati in modo da poter prevedere e mitigare tempestivamente gli effetti futuri.

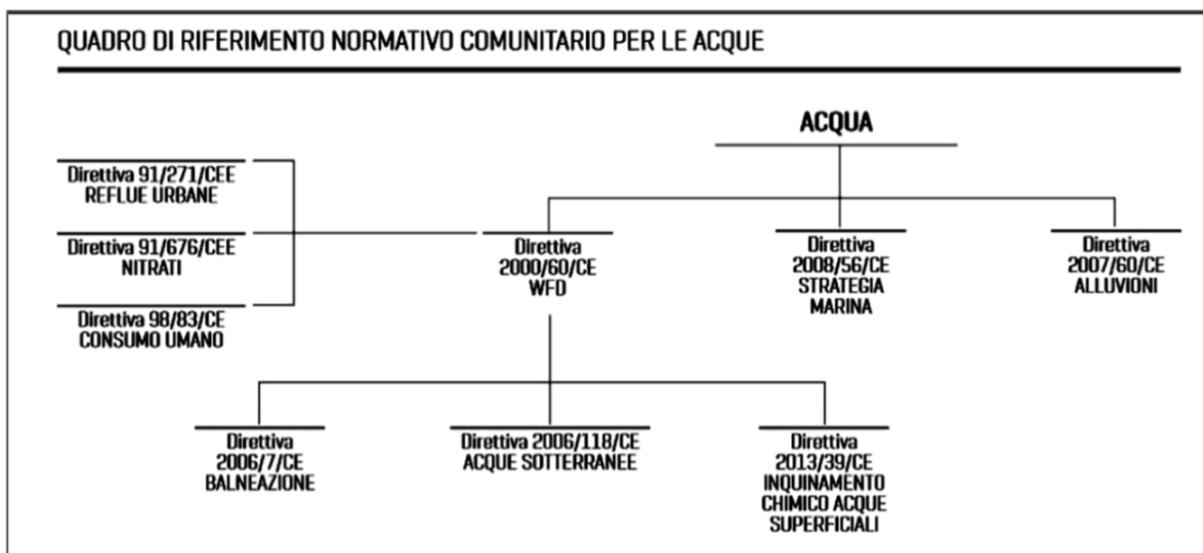


Figura 2- Quadro di riferimento normativo comunitario per le acque. Fonte: Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, 2016.

2.2- Livello nazionale

Le due direttive sopra citate sono state riportate sul territorio nazionale sotto la forma del Decreto Legislativo del 2006, n.152 e dal Decreto Legislativo del 2010, n.49. Nella complessità normativa presente all'interno del quadro Italiano si riscontra un netto cambio di tendenza con la legge 183/1989.

La legge "Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo" si staccava dal precedente approccio prevedendo una stretta collaborazione fra stato e regioni piuttosto che una serie di attività slegate tra di loro come era previsto. Veniva qui introdotto il concetto di Bacino Idrografico come ambito di riferimento ed assegnata la sua gestione alle Autorità di Bacino. Da Qui poi la necessità della stesura di un Piano di Bacino come strumento per la pianificazione degli interventi all'interno del distretto di interesse. La stesura del Piano prevede più parti fortemente interconnesse fra loro; si prevede infatti:

-

- Una parte conoscitiva con valutazioni preventive
- Una parte strategica con la programmazione della difesa del suolo
- Una parte operativa con opere e interventi richiesti
- Una parte normativa

A seguito di una serie di eventi catastrofici verificatisi alla fine degli anni 90, la norma italiana si è focalizzata maggiormente sulla necessità di accelerare le attività di programmazione e pianificazione in termini di difesa del suolo in modo da adottare i “Piani stralcio di Assetto Idrogeologico “(PAI).

2.2.1-Decreto legislativo 152/2006, “Norme in materia ambientale”

Come riportato nel decreto si legge:

“1. Il presente decreto legislativo disciplina, in attuazione della legge 15 dicembre 2004, n. 308, le materie seguenti:

- a) nella parte seconda, le procedure per la valutazione ambientale strategica (VAS), per la valutazione d'impatto ambientale (VIA) e per l'autorizzazione ambientale integrata (IPPC);*
- b) nella parte terza, la difesa del suolo e la lotta alla desertificazione, la tutela delle acque dall'inquinamento e la gestione delle risorse idriche;*
- c) nella parte quarta, la gestione dei rifiuti e la bonifica dei siti contaminati;*
- d) nella parte quinta, la tutela dell'aria e la riduzione delle emissioni in atmosfera;*
- e) nella parte sesta, la tutela risarcitoria contro i danni all'ambiente.”*

Tale decreto ha come obiettivo primario la promozione dei livelli di qualità della vita umana, da realizzare attraverso la salvaguardia ed il miglioramento delle condizioni dell’ambiente e l’attenta utilizzazione delle risorse naturali.

Il decreto istituisce inoltre l’ Autorità di Bacino distrettuale che ha lo scopo di elaborare il Piano di Bacino distrettuale in linea con gli obiettivi degli altri piani, nazionali e regionali con finalità di difesa del suolo e tutela delle risorse idriche. Inoltre grazie al recepimento della Direttiva Acque il territorio nazionale è stato diviso in sette distretti idrografici:

- Distretto idrografico delle Alpi orientali;
- Distretto idrografico Padano;
- Distretto idrografico dell’Appennino settentrionale;

- Distretto idrografico dell'Appennino centrale;
- Distretto idrografico dell'Appennino meridionale;
- Distretto idrografico della Sardegna;
- Distretto idrografico della Sicilia.



Figura 3- Mappa dei Distretti Idrografici in Italia

2.2.2 Decreto legislativo 49/2010, recepimento della 2007/60/CE

Il Decreto legislativo 49/2010, “Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni”, ha lo scopo di espandere la Direttiva Alluvioni a livello nazionale, definendo l’operato delle Autorità di bacino distrettuali nell’ambito della gestione del rischio di alluvioni. Questo prevede, in sintesi, la valutazione preliminare del rischio alluvioni mediante l’utilizzo di carte tematiche di uso del suolo, la presenza di una mappatura della pericolosità alluvionale sul territorio interessato, secondo i tre scenari previsti dalla Direttiva Alluvioni, che tenga conto dei beni e della popolazione presente sul territorio nonché la redazione dei PGRA riguardanti gli aspetti di prevenzione, protezione e previsione del fenomeno alluvionale.

2.2.3 Piano di Gestione del rischio di alluvioni

Approvato con il d.lgs. n. 49 del 2010 Il **Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA)** è lo strumento con il quale lo stato italiano individua e programma gli interventi necessari alla sicurezza della popolazione nei diversi distretti idrografici.

Le misure del PGRA hanno lo scopo di migliorare la sicurezza delle popolazioni esposte a rischio alluvionale nonché la riduzione di danni economici a seguito di eventi alluvionali e trarre da tali esperienze basi per la prevenzione futura.

Gli obiettivi e le strategie promossi dal Piano sono:

- Miglioramento della conoscenza del rischio con un focus particolare sulla collaborazione dei diversi enti che devono collaborare fra loro durante le fasi dell’emergenza. Questo è possibile grazie alla creazione di una fitta rete di comunicazioni e collaborazioni fra esperti e pianificatori
- Miglioramento dei sistemi difensivi esistenti con la previsione di programmi di manutenzione e di adeguazione .
- Riduzione dell’esposizione al rischio soprattutto nelle aree in cui l’antropizzazione ha portato a un forte mutamento delle caratteristiche del suolo.
- Difesa delle città e delle aree metropolitane, in quanto zone più esposte a rischio alluvionale, a seguito dell’elevato numero di beni esposti e l’elevata densità di popolazione

3- Applicazione Invarianza idraulica in Italia

L'applicazione delle misure di invarianza idraulica risultano, nella pratica, non banali in quanto entrano in gioco diversi fattori che interagiscono, spesso, in maniera non lineare fra di loro. Proprio per questo, pur rifacendosi a delle linee guida comuni a livello nazionale, ogni regione si è provvista in maniera autonoma di un metodo che permettesse di rispettare le misure di invarianza necessarie alla sicurezza del territorio.

3.1-Invarianza idraulica Emilia Romagna

Questo metodo tiene conto sia della variazione della permeabilità del terreno dovuta alla realizzazione delle opere previste dal progetto, sia dei parametri delle curve di possibilità pluviometrica tramite cui è possibile calcolare i volumi di pioggia che si accumulano. E' prevista quindi la realizzazione di volumi di invaso atti alla raccolta delle acque superficiali non smaltibili direttamente dal sistema fognario grazie a i quali sarà possibile rallentare l'idrogramma in uscita in una data sezione di chiusura. Innanzitutto è necessario il calcolo del coefficiente udometrico, definito come il rapporto fra la portata in uscita in una data sezione di chiusura e l'area S del bacino affluente in quella sezione

$$u = \frac{Q_m}{S}$$

Attraverso considerazioni sul metodo dell'invaso lineare è possibile calcolare il coefficiente udometrico come:

$$u = \frac{p_0 n (\varphi a)^{\frac{1}{n}}}{w^{\frac{1}{n}-1}}$$

- p_0 : parametro che dipende dalle unità di misura richieste e dalla tipologia di bacino;
- φ : coefficiente di deflusso;
- a e n : coefficienti della curva di possibilità pluviometrica;
- w : volume specifico di laminazione da calcolare (m³ /ha)

La legge di incremento di volume, noto il coefficiente udometrico e i coefficienti di deflusso pre e post urbanizzazione è data da:

$$w = w^0 \left(\frac{\varphi^0}{\varphi} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

– w_0 = volume specifico naturalmente disponibile (m^3 /ha) per la laminazione delle piene prima della trasformazione del suolo (ANTE OPERAM).

Si ha generalmente:

– w_0 = $100 \div 150 m^3 /ha$ nel caso di trasformazione di aree agricole e di bonifica (ad es. in dipendenza dallo stato dei terreni e loro sistemazione, tipo di lavorazione, stato vegetazionale)

– w_0 = $40 \div 50 m^3 /ha$ nel caso di trasformazione di aree in ambito urbano non completamente impermeabilizzate e dotate di fognatura (piccoli invasi dovuti, ad es., a velo idrico, caditoie stradali, ristagni in piccoli avvallamenti del terreno)

– w_0 = $10 \div 15 m^3 /ha$ nel caso di trasformazione di aree in ambito urbano (territorio impermeabilizzato) tenendo conto solo del velo idrico superficiale

Tali valori sono riportati in “L’invarianza idraulica nei territori sottoposti a rapida urbanizzazione” di Armando Brath et alii.

Si giunge quindi alla stima dei volumi specifici da invasare per mantenere costante il coefficiente udometrico tramite la formula

$$w = w^0 \left(\frac{\varphi^0}{\varphi} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 15I - w^0 P$$

Con I e P quote del terreno rispettivamente impermeabile e permeabile. Da qui sarà dunque possibile calcolare il volume totale da laminare per mezzo di vasche di laminazione o di sistemi SUDS

$$W = Aw$$

dove:

- A è l’area totale espressa in ettari [ha].

L’altro fattore che porta a problematiche nella stima dei volumi è la definizione del coefficiente di deflusso che richiede una stima dettagliata attraverso la conoscenza della condizione di permeabilità del terreno. Questo può essere stimato tramite il Curve Number SCS o la legge d’infiltrazione di Horton. Il calcolo del coefficiente di deflusso viene fatto secondo la relazione:

$$\varphi = \varphi_I Imp + \varphi_p Per$$

- ϕI è il coefficiente del terreno impermeabilizzato;
- Imp è la quota di area impermeabilizzata;
- ϕP è il coefficiente del terreno in condizioni di permeabilità naturale;
- Per è la quota di area non impermeabilizzata.

Vengono riportati i valori di coefficienti proposti da Paoletti & et al.(Sistema di Fognatura. Manuale di Progettazione., 1997), dipendenti dal tempo di ritorno:

TEMPO DI RITORNO	ϕI	ϕP
< 2 anni	0,7	0 - 0,01
2 - 10 anni	0,8	0,05 - 0,15
oltre 10 anni	0,9	0,1 - 0,2
Tempi di ritorno particolarmente elevati	0,95	0,25 - 0,5

Tabella 1-Coefficienti di deflusso in funzione del tempo di ritorno (Sistema di Fognatura. Manuale di Progettazione., 1997)

Per la stima dei coefficienti ante e post operam si fa riferimento alla formula sopra riportata applicata alle due condizioni:

Ante Operam:

$$\varphi^0 = \varphi_I^0 Imp + \varphi_P^0 Per$$

Post Operam:

$$\varphi = \varphi_I Imp + \varphi_P Per$$

3.2- Applicazione Invarianza Idraulica Veneto

Con la " DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE n. 2948 del 06 ottobre 2009", la regione ha avviato una campagna volta alla conoscenza e alla valutazione della possibilità di costruzione di nuove aree edificate senza l'alterazione del regime idraulico presente.

L'aumento del coefficiente di deflusso e quindi del coefficiente udometrico delle aree porta alla necessità di uno studio di dettaglio affinché una volta attuata la trasformazione dell'area la portata scaricabile in fognatura non venga alterata dalla condizione precedente all'intervento. Attraverso le "Linee guida della valutazione di compatibilità idraulica" del

2009, vengono fornite indicazioni più dettagliate per guidare il progettista verso la scelta migliore per la progettazione nel rispetto dell'invarianza idraulica.

Le diverse metodologie permettono di determinare l'evento di piena di progetto che servirà poi per calcolare i volumi da laminare e quindi le dimensioni delle opere atte a garantire l'invarianza. Fondamentale è l'assegnazione del tempo di ritorno che viene definito in fase di progetto pari a 50 anni. Vengono inoltre suddivise le classi d'intervento a seconda dell'entità del lavoro da realizzare.

Classe di Intervento		Definizione	Criteri da adottare
1	Trascurabile impermeabilizzazione potenziale	$S < 200\text{m}^2$	0
2	Modesta impermeabilizzazione	$200\text{ m}^2 < S < 1000\text{ m}^2$	1
3	Modesta impermeabilizzazione potenziale	$1000\text{ m}^2 < S < 10000\text{ m}^2$	1
4	Significativa impermeabilizzazione potenziale	$10000\text{ m}^2 < S < 100000\text{ m}^2$	2
		$S > 100000\text{ m}^2$ e $\phi < 0,3$	2
5	Marcata impermeabilizzazione potenziale	$S > 100000\text{ m}^2$ e $\phi > 0,3$	3

Tabella 2- Criteri da adottare in funzione della classe di intervento (DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE n. 2948 del 06 ottobre 2009)

Maggiore è la classe d'intervento, maggiore è il livello di dettaglio richiesto per le analisi e le verifiche. La classe 5 corrisponde al dettaglio maggiore tramite il criterio n. 3 in cui è "richiesta la presentazione di uno studio dettagliato molto approfondito" [Regione Veneto, Linee guida di valutazione di compatibilità idraulica , 2009]. Il criterio 1 e 2 si basano invece su ipotesi semplificate per i calcoli rispettivamente il " metodo dell'invaso lineare" e il "metodo delle sole piogge

Il volume calcolato dovrà essere confrontato con i valori presenti nel documento" Analisi regionalizzata delle precipitazioni per l'individuazione di curve di possibilità pluviometrica di riferito" ricavati in funzione della località considerata e dei parametri della curva di possibilità pluviometrica. L'invarianza viene garantita quindi non tramite l'idrogramma di progetto ante e post operam ma con il confronto dei valori calcolati con quelli forniti da Norma.

3.3- Applicazione Invarianza Idraulica Bolzano

Diverso è l'approccio del Comune di Bolzano che non affronta il prole con metodologie di calcolo dettagliate ma attraverso un approccio semplice e di facile applicazione.

Lo strumento utilizzato, prende il nome di "indice R.I.E – Indice di Riduzione Impatto Edilizio" grazie al quale è possibile valutare l'impatto ambientale apportato dal nuovo intervento . Si cerca dunque di evidenziare quanto la nuova realizzazione si compatibile o meno con l'ambiente circostante.

Maggiore è l'indice RIE migliore è la gestione del territorio e delle acque meteoriche. Tale indice varia da un valore di 0 (effetti negativi) a un valore di 10 (corretto trattamento del territorio). Per le aree urbanizzate il Comune di Bolzano indica dei valori minimi di 4 e 1,5 per le zone residenziali e le zone produttive.

La formula dell'algoritmo è la seguente:

$$RIE = \frac{\sum_{i=1}^a S_{Vi} \frac{1}{\psi_i} + (S_e)}{\sum_{i=1}^n S_{Vi} + \sum_{i=1}^l S_{Ij} \psi_i}$$

dove:

- con SV_i si indica i-esima superficie permeabile, impermeabile o sigillata trattata a verde (ad esempio giardini, terreni incolti, verde pensile, pavimentazioni permeabili);
- con SI_j si indica j-esima superficie permeabile, impermeabile o sigillata non trattata a verde (ad esempio coperture, pavimentazioni impermeabili);
- con ψ_i il coefficiente di deflusso della i-esima superficie considerata, tabellato dalla normativa per ogni tipologia di superficie;
- con Se le superfici equivalenti alberature, ovvero le superfici caratterizzate da vegetazione con altezza superiore ai 4 metri.

3.4- Applicazione Invarianza Idraulica Lombardia

La regione Lombardia presenta uno dei modelli di maggior interesse per quanto riguarda il problema dell'invarianza idraulica ed idrologica. Le indicazioni vengono raccolte nel "Testo coordinate del regolamento regionale 23 novembre 2017 n.7" dove vengono sia definiti i criteri e i principi da adottare sia le metodologie per garantire l'invarianza.

Tali indicazioni vengono messe in atto ogni qualvolta siano previste opere di nuova costruzione o adeguamenti e ristrutturazioni di edificati già esistenti.

La classificazione degli interventi è simile a quella eseguita da Regione Veneto, ossia la suddivisione in classi di intervento con importanza crescente a cui viene associato un dettaglio metodologico sempre maggiore. Le classificazioni vengono fatte sulla base dell'ampiezza dell'area interessata sia sul coefficiente di deflusso medio ponderale al momento della realizzazione dell'opera. Le classi vengono elencate nella tabella successiva:

CLASSE DI INTERVENTO	SUPERFICIE INTERESSATA DALL'INTERVENTO	COEFFICIENTE DEFUSSO MEDIO PONDERALE	MODALITÀ DI CALCOLO		
			AMBITI TERRITORIALI (articolo 7)		
			Are A, B	Are C	
0	Impermeabilizzazione potenziale qualsiasi	≤ 0,03 ha (≤ 300 mq)	qualsiasi	Requisiti minimi articolo 12 comma 1	
1	Impermeabilizzazione potenziale bassa	da > 0,03 a ≤ 0,1 ha (da > 300 mq a ≤ 1.000 mq)	≤ 0,4	Requisiti minimi articolo 12 comma 2	
2	Impermeabilizzazione potenziale media	da > 0,03 a ≤ 0,1 ha (da > 300 a ≤ 1.000 mq)	> 0,4	Metodo delle sole piogge (vedi articolo 11 e allegato G)	Requisiti minimi articolo 12 comma 2
		da > 0,1 a ≤ 1 ha (da > 1.000 a ≤ 10.000 mq)	qualsiasi		
		da > 1 a ≤ 10 ha (da > 10.000 a ≤ 100.000 mq)	≤ 0,4		
3	Impermeabilizzazione potenziale alta	da > 1 a ≤ 10 ha (da > 10.000 a ≤ 100.000 mq)	> 0,4	Procedura dettagliata (vedi articolo 11 e allegato G)	
		> 10 ha (> 100.000 mq)	qualsiasi		

Tabella 3- Definizione classe di intervento ("Testo coordinate del regolamento regionale 23 novembre 2017 n.7")

Il regolamento Lombardo prevede innanzitutto la suddivisione del territorio regionale in classi di criticità idraulica dei bacini ricettori classificandoli in :

–Aree A ad alta criticità

–Aree B a media criticità

–Aree C a bassa criticità

Tale suddivisione si rispecchia nel regolamento definendo le portate massime riversabili all'interno dei corpi ricettori.

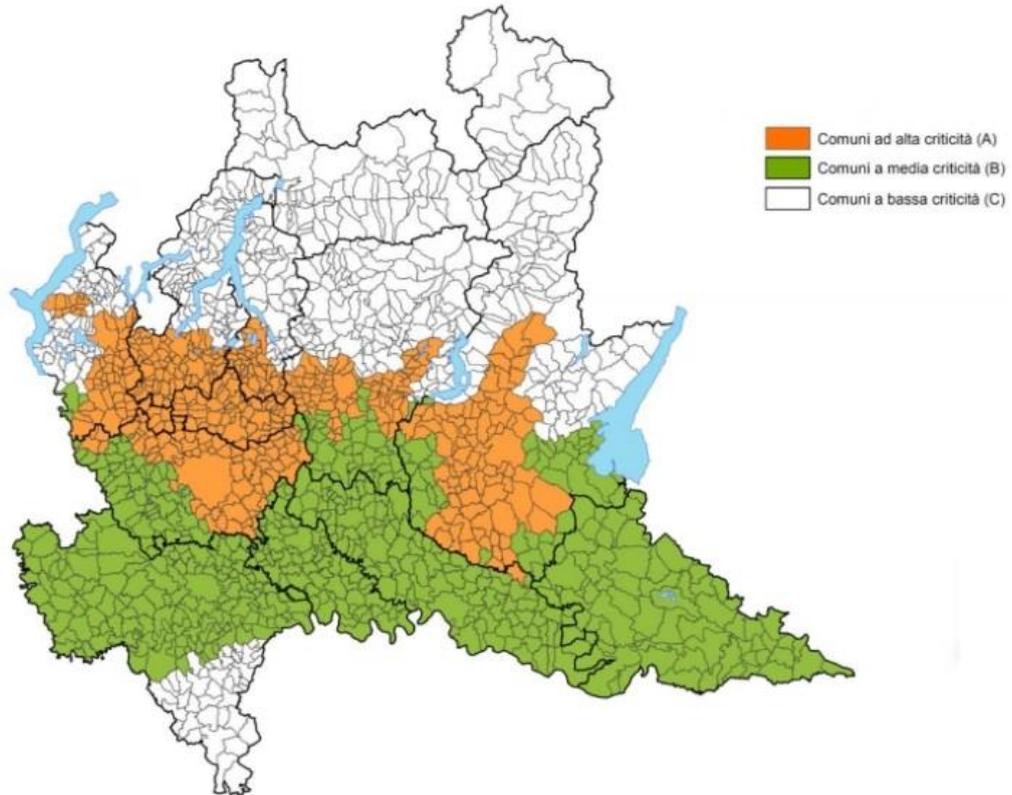


Figura 5- Suddivisione del territorio Lombardo in base alla criticità dell'area("Testo coordinate del regolamento regionale 23 novembre 2017 n.7")

Per quanto riguarda i dati pluviometrici e quindi i deflussi generati dagli eventi meteorologici, l'invarianza deve essere rispettata in particolar modo per gli eventi eccezionali e di forte intensità, quindi con tempi di ritorno alti. Proprio per questo viene adottato in fase di progettazione delle opere un tempo di ritorno pari a 50 anni e per la fase di verifica un tempo di ritorno pari a 100 anni. Il calcolo delle precipitazioni di progetto verrà effettuato tramite i dati raccolti da ARPA Lombardia.

Il regolamento inoltre si basa sulla conoscenza dei coefficienti di deflusso per la stima degli ideogrammi di piena in entrata alle opere di laminazione.

Questi sono stati raggruppati in 3 classi di seguito riportate

Coefficiente di deflusso	Tipologia di intervento
1	tetti, coperture, pavimentazioni continue
0,7	pavimentazioni drenanti, pavimentazioni semipermeabili
0,3	aree permeabili, superfici incolte e ad uso agricole

Tabella 4 - Coefficienti di deflusso ("Testo coordinate del regolamento regionale 23 novembre 2017 n.7")

Per quanto riguarda il livello di dettaglio più basso, relativo alle classi di intervento 0 e 1, denominato dei requisiti minimi il regolamento riporta quanto segue:

Art. 12 (Requisiti minimi delle misure di invarianza idraulica e idrologica)

1. Per gli interventi aventi superficie interessata dall'intervento minore o uguale a 300 mq(1), ovunque ubicati nel territorio regionale, il requisito minimo richiesto consiste in alternativa:

a) nell'adozione di un sistema di scarico sul suolo o negli strati superficiali del sottosuolo e non in un ricettore, salvo il caso in cui questo sia costituito da laghi o dai fiumi Po, Ticino, Adda, Brembo, Serio, Oglio, Chiese e Mincio. In questo caso non è richiesto il rispetto della portata massima di cui all'articolo 8 e non è necessario redigere il progetto di invarianza idraulica di cui agli artt. 6 e 10, ferme restando la compilazione e trasmissione del modulo di cui all'allegato D, come definito all'articolo 6, comma 1, lettera e), e la dichiarazione, con specifico atto, del progettista, attestante l'applicazione della casistica di cui alla presente lettera; la dichiarazione non è dovuta per gli interventi di cui all'articolo 3, comma 2, lettera d), che ricadono nell'ambito di applicazione di cui alla presente lettera(2);

b) nell'adozione del requisito minimo indicato al comma 2, per le aree C a bassa criticità idraulica di cui all'articolo 7.

2. Nel caso di interventi classificati ad impermeabilizzazione potenziale bassa, indipendentemente dalla criticità dell'ambito territoriale in cui ricadono, e nel caso di interventi classificati ad impermeabilizzazione potenziale media o alta e ricadenti nell'ambito territoriale di bassa criticità, ferma restando la facoltà del professionista di adottare la

procedura di calcolo delle sole piogge o la procedura di calcolo dettagliata descritte nell'allegato G, il requisito minimo da soddisfare consiste nella realizzazione di uno o più invasi di laminazione, comunque configurati, dimensionati adottando i seguenti valori parametrici del volume minimo dell'invaso, o del complesso degli invasi, di laminazione:

a) per le aree A ad alta criticità idraulica di cui all'articolo 7: 800 mc per ettaro di superficie scolante impermeabile dell'intervento moltiplicato per il 'coefficiente P' di cui alla tabella riportata nell'Allegato C(3);

b) per le aree B a media criticità idraulica di cui all'articolo 7: 500 mc(4) per ettaro di superficie scolante impermeabile dell'intervento;

c) per le aree C a bassa criticità idraulica di cui all'articolo 7: 400 mc per ettaro di superficie scolante impermeabile dell'intervento.

3. *I volumi di cui al comma 2 sono da adottare anche nel caso di interventi classificati ad impermeabilizzazione potenziale media o alta e ricadenti negli ambiti territoriali ad alta e media criticità, qualora il volume risultante dai calcoli di cui all'articolo 11, comma 2, lettera e), fosse minore.*

Questa metodologia, molto semplice, risulta molto a favore di sicurezza, ma assicura rapidità nei calcoli e nei risultati in quanto, nota la classe di criticità dell'area interessata è sufficiente moltiplicare il valore del volume unitario per la superficie per ottenere il volume da laminare.

La metodologia per la classe di intervento 2 è diversa e si basa su quello che viene denominato "metodo delle sole piogge". Questo metodo ci permette di stimare istante per istante la differenza di volume entrante e uscente in modo da poter individuare la durata critica dell'evento che massimizza il volume della vasca di laminazione.

Come riportato dal "Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali" sul sito "smartgreen.unimi.it", il metodo:

"fornisce una valutazione del volume d'invaso dell'opera di mitigazione sulla base della sola conoscenza della curva di possibilità pluviometrica e della portata massima in uscita, ipotizzata costante nel tempo. Con questo metodo viene trascurata completamente le perdite e i processi di laminazione che si realizzano durante la trasformazione afflussi deflussi che interessa l'area scolante a monte dell'opera"

Tale modello rappresenta dunque una semplificazione del problema non tenendo conto dei fenomeni differiti e della saturazione del terreno durante l'intero evento di pioggia. Risulta

essere tuttavia esaustivo nei risultati e ben si applica alla stesura di un regolamento chiaro per il territorio.

Il punto di partenza per la stima dei volumi risulta essere anche in questo caso la stima della pioggia di un dato evento tramite le equazioni delle CPP.

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

E' così possibile stimare i volumi di pioggia in entrata in una certa opera di mitigazione conoscendo la grandezza dell'area di interesse e il coefficiente di deflusso:

$$V_{in} = S \cdot \varphi \cdot h(t) = S \cdot \varphi \cdot a \cdot t^n$$

Dove:

φ è il coefficiente di deflusso adimensionale

S è la superficie drenata dall'opera

Il volume in uscita dall'opera può essere stimato invece come

$$V_{out} = Q_{out} \cdot t = S \cdot u_{out} \cdot t$$

Dove:

- Q_{out} e u_{out} sono rispettivamente la portata e il coefficiente udometrico imposti allo scarico espressi in l/s * ha.

Il volume invasato al generico tempo t sarà quindi dato dalla differenza:

$$V = V_{in} - V_{out} = S \cdot \varphi \cdot a \cdot t^n - Q_{out} \cdot t$$

Tuttavia il dimensionamento deve essere fatto ricavando il tempo critico di pioggia, ossia la

durata che massimizza il volume invasato nell'opera. Derivando quindi l'espressione e ponendola uguale a zero è possibile ricavare il valore t_{cr} :

$$\frac{dV}{dt} = t_{cr} = \frac{d(S \cdot \varphi \cdot a \cdot t^n - Q_{out} \cdot t)}{dt}$$

Da cui:

$$t_{cr} = \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

E quindi il volume di invaso sarà dato da:

$$V_{max} = S \cdot \varphi \cdot a \cdot \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{n}{n-1}} - Q_{out} \cdot \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

Il calcolo del volume d'invaso dipende quindi dalle grandezze citate nella formula; alcune di queste grandezze, come la superficie S e i parametri a e n, sono facilmente reperibili mentre più difficile è la stima del coefficiente di deflusso e della portata all'uscita della bocca tarata dell'opera. Come riportato nel "Testo coordinato del regolamento regionale 23 novembre 2017, n. 7" i valori massimi di portata scaricabili dall'opera sono:

Art. 8 (Valori massimi ammissibili della portata meteorica scaricabile nei ricettori)

1. *Gli scarichi nel ricettore sono limitati mediante l'adozione di interventi atti a contenere l'entità delle portate scaricate entro valori compatibili con la capacità idraulica del ricettore stesso e comunque entro i seguenti valori massimi ammissibili (ulim):*

- a) per le aree A di cui al comma 3 dell'articolo 7: 10 l/s per ettaro di superficie scolante impermeabile dell'intervento;*
- b) per le aree B di cui al comma 3 dell'articolo 7: 20 l/s per ettaro di superficie scolante impermeabile dell'intervento;*
- c) per le aree C di cui al comma 3 dell'articolo 7: 20 l/s per ettaro di superficie scolante impermeabile dell'intervento.*

2. *Il gestore del ricettore può imporre limiti più restrittivi di quelli di cui al comma 1, qualora*

sia limitata la capacità idraulica del ricettore stesso ovvero ai fini della funzionalità del sistema di raccolta e depurazione delle acque reflue.

Da regolamento deve infine essere prevista la verifica di svuotamento delle opere di laminazione in un tempo non superiore alle 48 ore dalla fine dell'evento.

Infine per la classe di intervento 3 è previsto il livello di dettaglio più alto ottenibile con prove specifiche e modelli fisicamente basati che restituiscono i comportamenti reali del sistema interessato all'intervento. A dispendio di una maggiore fase di raccolta dati e di modellazione, questa metodologia ci permette di ottenere risultati molto più precisi in termini di volume portando così ad evitare sovradimensionamenti dell'opera e quindi costi eccessivi.

Uno dei modelli utilizzabili è il software SWMM, su cui è possibile andare a ricreare le condizioni reali del bacino impostando i parametri di infiltrazione del terreno e valutare il deflusso superficiale noti gli istogrammi di pioggia in entrata. Tale software verrà preso in esame più avanti nel lavoro per le simulazioni dei modelli proposti.

4-Piemonte e Città di Torino

Il Piemonte, contrariamente ad altre regioni italiane, è sprovvisto di un regolamento autonomo che regola la progettazione e la verifica in termini di invarianza idraulica. Non sono presenti infatti, all'interno dei suoi piani regionali soluzioni o metodologie per la pianificazione di opere laddove sia necessario garantire i principi di invarianza. Gran parte dei progettisti, di fatto, si affidano al metodo proposto da Regione Lombardia per la progettazione.

Tuttavia da molto tempo si discute della necessità della stesura di un piano univoco regionale con un approccio dettagliato al problema, che tenga conto di tutte le problematiche e le possibili situazioni.

Il presente lavoro è di fatto frutto anche di una personale esperienza di tirocinio presso il Comune di Torino, nel periodo da Aprile a Giugno 2021, durante il quale è stato affrontato il tema e sono state ricercate soluzioni per la stesura di un regolamento che si basasse su prove ed evidenze ottenute a partire da casi di studio reali.

4.1- Quadro normativo

Innanzitutto è stato analizzato a fondo il quadro normativo vigente sul territorio torinese in quanto qualunque tipo di nuovo regolamento deve in ogni caso attenersi alle disposizioni già vigenti sul territorio.

In particolare di fondamentale importanza risulta il *“Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale”* (PTCP2) dove sono riportate linee guida per i problemi di invarianza.

“A tutti gli interventi di nuova urbanizzazione o di trasformazione urbanistica si applica in generale il principio dell’invarianza idraulica. Per trasformazione del territorio a invarianza idraulica si intende la trasformazione di un’area che non provochi un aggravio della portata di piena del corpo idrico ricevente i deflussi superficiali originati dall’area stessa.

Nel caso in cui il corpo idrico ricevente sia ritenuto in condizioni critiche (ovvero un bacino e relativo tronco di chiusura per il quale non sono ammessi ulteriori apporti) o particolarmente critiche (ovvero un bacino e relativo tronco di chiusura in cui si evidenzia la necessità inderogabile di interventi di riequilibrio idraulico) si applica il criterio dell’attenuazione

idraulica.

Per trasformazione del territorio ad attenuazione idraulica si intende la trasformazione di un'area che determini una riduzione della portata di piena del corpo idrico ricevente i deflussi superficiali originati dall'area stessa. La riduzione della portata deve essere pari almeno al 50% rispetto alla portata in condizione ante-operam.

Per gli interventi di nuova urbanizzazione o di trasformazione urbanistica, la rete di drenaggio e le eventuali vasche di laminazione devono essere dimensionate in modo da garantire l'invarianza o la riduzione idraulica.

Il metodo per il dimensionamento delle opere di cui sopra può essere strutturato in 3 fasi:

- costruzione dello ietogramma di progetto, non ragguagliato per maggior cautela, e di durata definita in funzione del tempo di corrivazione del bacino, rappresentante l'intervallo temporale necessario a una particella di pioggia a percorrere il tracciato ideologicamente più lungo all'interno del bacino;*
- calcolo delle perdite idrologiche inglobate nel coefficiente di deflusso medio (rapporto tra il volume dell'onda defluente e del volume totale della precipitazione);*
- calcolo delle portate di piena mediante un modello di trasformazione afflussi-deflussi. Il metodo deve essere applicato nelle due situazioni seguenti:*
 - condizioni ante operam;*
 - condizioni post-operam.*

Il confronto tra situazioni ante-operam e post-operam permette il dimensionamento delle opere necessarie a garantire l'invarianza o l'attenuazione idraulica.

Dal punto di vista progettuale:

- il tempo di ritorno di riferimento per il dimensionamento della rete di drenaggio delle acque meteoriche interna al comparto è $T_{rete}=20$ anni; il tempo di ritorno di riferimento per il dimensionamento della vasca di laminazione delle portate meteoriche: $T_{vasca}=50$ anni. I parametri di pioggia utili alla definizione dello ietogramma possono essere dedotti dal sistema VAPI della Regione Piemonte.*
- il calcolo delle perdite idrologiche può essere eseguito facendo uso di standard metodologici, quale il metodo CN-SCS."*

Oltre al PTCP2 sono presenti sul territorio una serie di altri regolamenti per la salvaguardia del territorio e la sicurezza delle persone. Questi vanno ad aggiungersi al già citato PGR di cui il Piemonte è provvisto. L'altro provvedimento altrettanto importante è il PAI.

4.1.1 Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)

Il PAI redatto, adottato e approvato ai sensi della Legge n. 183 del 18 maggio 1989 disciplina le azioni riguardanti la difesa idrogeologica e della rete idrografica del bacino del Po.

Secondo quanto riportato nell'Art. 9 relativo alle limitazioni alle attività di trasformazione e d'uso del suolo derivanti dalle condizioni di dissesto idraulico e idrogeologico, sono consentite le opere di difesa, sistemazione idraulica e monitoraggio dei fenomeni. Gli interventi ammissibili devono in ogni caso essere soggetti ad uno studio di compatibilità con le condizioni del dissesto validato dall'Autorità competente.

In particolare, l'Art. 12 - *Limiti alle portate scaricate dalle reti di drenaggio artificiali* dichiara che in seguito alla realizzazione di interventi di urbanizzazione e infrastrutturali deve essere limitato il consumo di suolo, relativamente alle aree impermeabili, e la definizione di opportune aree atte a favorire l'infiltrazione e l'invaso temporaneo diffuso delle precipitazioni meteoriche.

Il PAI ha il compito di *“garantire al territorio del bacino del fiume Po un livello di sicurezza adeguato, rispetto ai fenomeni di dissesto idraulico e idrogeologico, attraverso il ripristino degli equilibri idrogeologici e ambientali, il recupero degli ambiti fluviali e del sistema delle acque, la programmazione degli usi del suolo ai fini della difesa, della stabilizzazione e del consolidamento dei terreni [...]”* (Norme tecniche di attuazione, articolo 1). Il PAI inoltre si occupa della suddivisione in fasce di pericolosità alluvionale per il territorio di interesse. Si distinguono infatti all'interno del piano:

- Fascia di deflusso della piena (Fascia A) che è la sede principale della corrente in condizioni regolari
- Fascia di esondazione (Fascia B), esterna alla precedente: Questa fascia fa riferimento a piene associate a tempi di ritorno elevati. I limiti di tale fascia sono indicati come le zone in cui devono essere previste, qualora necessarie, opere idrauliche per il controllo delle esondazioni
- Fascia di inondazione per piena catastrofica (Fascia C), esterna alla precedente, che fa riferimento ad eventi di piena con tempi di ritorno molto elevati.

Direttiva Alluvioni		Pericolosità
Scenario	Tempo di ritorno	
Aree allagabili – scenario frequente Elevata probabilità di alluvioni (H = high)	20-50 anni (frequente)	P3 elevata
Aree allagabili – scenario poco frequente Media probabilità di alluvioni (M = medium)	100-200 anni (poco frequente)	P2 media
Aree allagabili – scenario raro Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi (L = low)	500 anni o massimo storico registrato	P1 bassa

Tabella 5- Didascalia delle mappe di pericolosità alluvionale (PGRA Regione Piemonte)

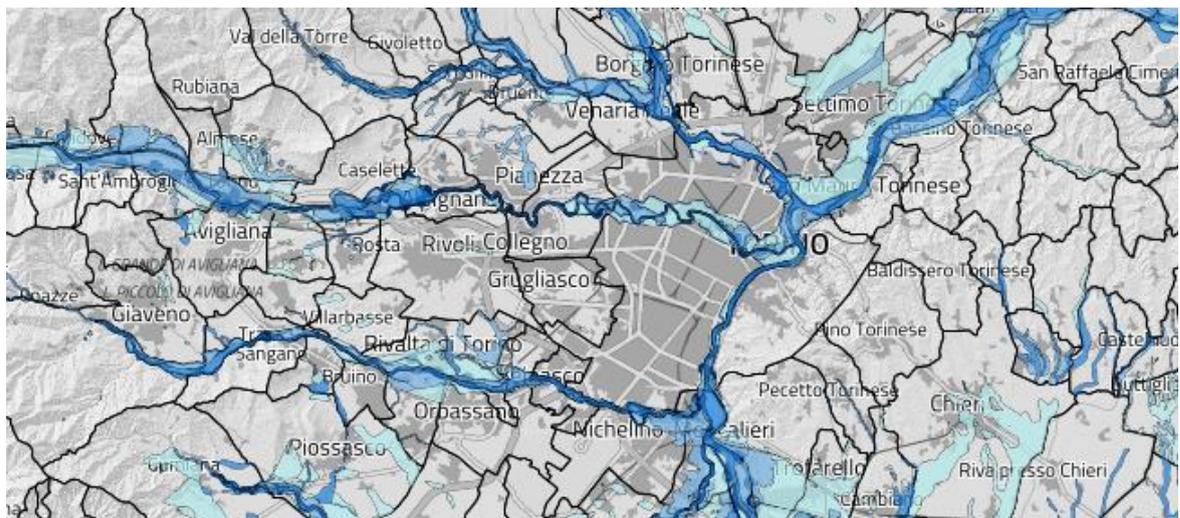


Figura 6- Mappe di pericolosità alluvionale (Geoportale Regione Piemonte)

Alle mappe di pericolosità sono poi associate le mappe di rischio idraulico che tengono conto, oltre che delle aree inondabili, anche dei beni e della popolazione presente su tale territorio. Il rischio idraulico è infatti calcolato come il prodotto di pericolosità e costo dei beni presenti sul territorio.

Il rischio viene raggruppato in 4 classi come di seguito riportato:

- R1, rischio moderato o nullo;
- R2, rischio medio;
- R3, rischio elevato;
- R4, rischio molto elevato.

Scenari di rischio

-  R1 - Rischio moderato
-  R2 - Rischio medio
-  R3 - Rischio elevato
-  R4 - Rischio molto elevato
-  Limiti comunali

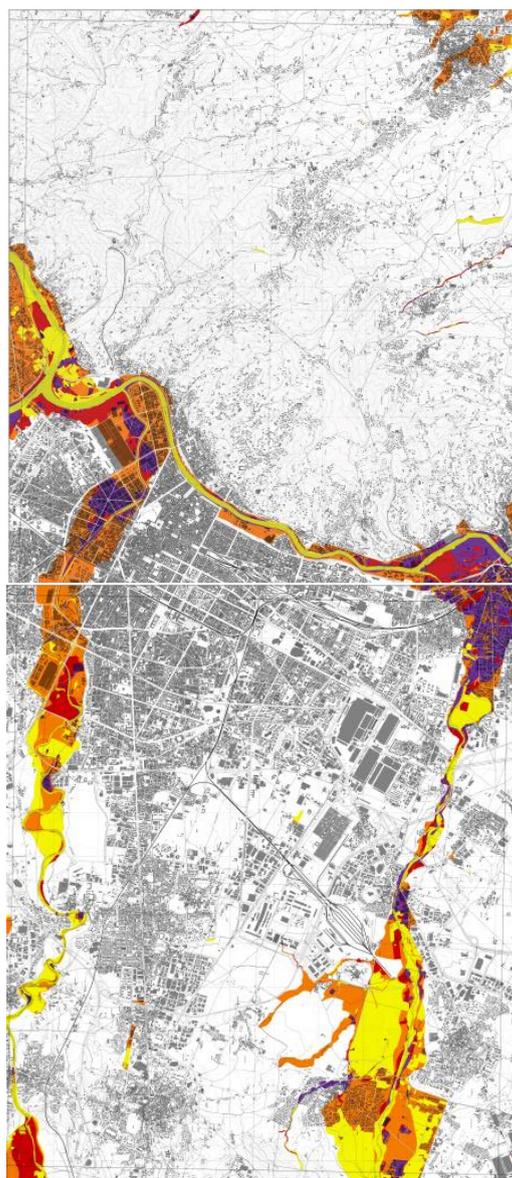


Figura 7- Mappe di rischio alluvionale (Geoportale Regione Piemonte)

4.1.2 Piano Tutela delle Acque (PTA)

Ai sensi dell'articolo 8 bis della Legge Regionale n. 56 del 5 dicembre 1977 (Tutela ed uso del suolo) viene così approvato nel 2017 il Piano Tutela delle Acque (PTA). Costituisce inoltre variante ai piani territoriali, con particolare riferimento al Piano Territoriale Regionale (PTR), approvato con D.C.R. 122-29783 del 21 luglio 2011 e al Piano Paesaggistico Regionale, approvato con D.C.R. n. 233-35836 del 3 ottobre 2017.

L'Art. 27, Titolo I, punto 4 delle Norme di Piano 2018 richiama il regolamento edilizio comunale cui prevede *“Il rispetto del principio dell'invarianza idraulica nel caso di aree di nuovo impianto, di completamento e di trasformazione, in modo tale che la portata massima complessiva in fognatura non venga incrementata dagli apporti di acque meteoriche di dilavamento” [...] Nel caso in cui non siano tecnicamente adottabili soluzioni alternative all'immissione delle acque meteoriche in pubblica fognatura, la realizzazione di adeguate vasche di accumulo e laminazione che consentano il graduale rilascio in fognatura dei deflussi, in particolare durante gli eventi piovosi di forte intensità, condividendo con il gestore della rete gli aspetti tecnici delle soluzioni previste”.*

4.1.3 Piano Territoriale Regionale (PTR)

Con la DCR n. 122-29783 del 21 luglio 2021 viene approvato il Piano territoriale regionale che definisce le strategie e gli obiettivi di livello regionale, e ne affida l'attuazione agli enti che operano a scala provinciale e locale.

Le strategie affrontate, congiuntamente con il Piano paesaggistico regionale (Ppr) riguardano:

- riqualificazione territoriale, tutela e valorizzazione del paesaggio;
- sostenibilità ambientale, efficienza energetica;
- integrazione territoriale delle infrastrutture di mobilità, comunicazione, logistica;
- ricerca, innovazione e transizione economico-produttiva;
- valorizzazione delle risorse umane, delle capacità istituzionali e delle politiche sociali.

In particolare, il PTR secondo quanto dichiarato nell'Art. 32 delle Norme di Attuazione ha l'obiettivo di promuovere l'attuazione di interventi, strutturali e non, per la mitigazione del

rischio idraulico e azioni di pianificazione coerenti con le caratteristiche di vulnerabilità presenti nel territorio regionale.

4.1.4 Piano Paesaggistico Regionale (PPR)

Il presente piano è stato approvato con D.C.R. n.233-35836 del 3 ottobre 2017 e rappresenta lo strumento di tutela e promozione del paesaggio piemontese. Con particolare riferimento alle strategie adottate e sopra riportate, i temi su cui il Ppr pone dei *focus*, oltre alla valorizzazione del patrimonio territoriale, sulle tematiche connesse alla protezione e salvaguardia dell'ambiente: conservazione della natura, difesa del suolo e gestione delle acque.

4.1.5 Piano Regolatore Generale Comunale (PRGC)

Le Norme di Attuazione del presente Piano definisce che i SUE relativi ad interventi di ristrutturazione urbanistica devono essere corredati da documentazione atta a dimostrare l'invarianza idraulica degli interventi anche attraverso l'applicazione dei principi e metodi del drenaggio urbano sostenibile con valutazione di proposte compensative per il miglioramento della rete di drenaggio ed opere di mitigazione del fenomeno recependo quanto contenuto nel Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP2).

4.1.6 Piano di resilienza Climatica della Città di Torino

Il Piano di Resilienza della Città di Torino è stato sancito dall'organo esecutivo locale con Deliberazione di Giunta Comunale mecc, 2020 – 01683/112 del 28 luglio 2020 e proposto in approvazione al Consiglio Comunale.

Il suddetto piano prescrive che “Il principio dell’invarianza idraulica dovrà essere previsto negli interventi attuati con titolo abilitativo edilizio diretto, Permesso di Costruire Convenzionato (PCC) o con Strumento Urbanistico Esecutivo (SUE), nonché negli interventi nelle aree a servizi; sino all’aggiornamento del Piano Regolatore Generale, tali obiettivi sono assunti nel quadro delle Valutazioni Ambientali di Piani, Programmi e Progetti. Il principio dell’attenuazione idraulica, con una riduzione di portata di almeno il 50% rispetto al valore di deflusso dell’area oggetto di intervento in condizioni ante-operam, dovrà essere applicato prioritariamente nelle aree della città che già presentano situazioni di criticità in termini di

allagamenti (Fig. 18), determinate dagli attuali livelli di pioggia registrati; in particolare, dovrà essere previsto per interventi su aree pubbliche, negli ambiti di riqualificazione dello spazio pubblico e, per gli interventi privati, nel caso di ristrutturazioni urbanistiche di specifici ambiti individuati da programmi di Deimpermeabilizzazione. Sarà, tuttavia, necessario monitorare continuamente le criticità del territorio con riferimento alla capacità della rete esistente di smaltire le portate che si determineranno a causa di eventi meteorici sempre più intensi e con riferimento alla manutenzione delle infrastrutture d'ingresso alla rete esistente. I suddetti principi devono essere garantiti principalmente mediante l'applicazione dei metodi del drenaggio urbano sostenibile o, in caso di dimostrata impossibilità, prevedendo azioni di miglioramento della rete di drenaggio con la realizzazione di opere di mitigazione del fenomeno. In particolare, nel caso dell'applicazione dell'attenuazione idraulica, la realizzazione di infrastruttura grigia deve essere adottata solo per raggiungere il suddetto valore di riduzione della portata (almeno 50%) e solo in modo integrativo nel caso risulti non raggiungibile con l'applicazione esclusiva delle soluzioni naturali. In tutti gli altri casi, anche per interventi di ridotte dimensioni ma diffusi sul territorio, dovrà comunque essere prevista la realizzazione di sistemi di drenaggio urbano per l'attenuazione delle rispettive portate di deflusso e, quindi, la riduzione di impatti anche marginali.”

5-Nuova metodologia di calcolo a supporto del progetto di trasformazione urbana

La necessità di un piano regolatore con indicazioni precise sui metodi di calcolo al fine di attuare i principi di invarianza idraulica sul territorio Torinese ha portato, a partire da quanto riportato nel PTCP2, alla proposta metodologica di seguito riportata.

La proposta basa la sua intera analisi sulla conoscenza del coefficiente di deflusso della zona interessata dall'intervento; tali valori sono riportati in letteratura tramite apposite tabelle. La validazione del modello proposto passa dalle simulazioni condotte tramite il software SWMM che è in grado di integrare le equazioni di continuità per restituire un modello di afflussi-deflussi che rispecchi l'andamento reale del territorio analizzato. Proprio per questi due fattori è necessario innanzitutto una calibrazione del coefficiente di deflusso applicato alle aree di studio di interesse con cui sono state eseguite le simulazioni su SWMM. Seguendo quindi questo ragionamento e implementando quanto riportato nel PTCP2 il seguente lavoro si articola come segue:

- 1) Calibrazione del modello su SWMM verificandone la validità mettendo a confronto gli effetti generati da eventi reali sulle zone interessate e ciò che invece restituisce SWMM in termini di risultati;
- 2) Costruzione dello ietogramma di progetto, con i tempi di ritorno riportati nel piano pari a 50 anni;
- 3) Calcolo delle perdite idrologiche calcolate tramite l'assegnazione del coefficiente di deflusso;
- 4) Confronto dei risultati con le altre metodologie proposte

5.1-Programma di calcolo

I software di calcolo sono strumenti estremamente utili nell'ambito ingegneristico sia in fase di progettazione che in fase di verifica. A monte di dettagliate conoscenze del sistema e di una rappresentazione del modello molto dettagliata restituiscono allo stesso modo un livello di dettaglio delle risposte che permette una precisa stima dei valori che entrano in gioco.

Il modello di simulazione idraulica proposta ha lo scopo di misurare le portate che defluiscono da una particolare area in analisi a seguito dell'introduzione di piogge di progetto che rappresentano gli afflussi che l'opera di invarianza avrà il compito di gestire.

5.1.1-Il software di calcolo SWMM

Il programma di calcolo che ha permesso la realizzazione del modello idraulico dell'area interessata è SWMM (*Storm Water Management Model* ossia il modello di gestione delle acque piovane). Il programma rappresenta un modello dinamico di gestione delle acque, capace di riportare un modello di afflussi-deflussi per eventi di durata variabile.



Figura 8- Ciclo idrologico urbano (manuale SWMM)

L'analisi dei processi spaziali che avvengono all'interno del bacino, viene fatta a partire dalla suddivisione in sottobacini (Subcatchments) ognuna con le proprie caratteristiche di permeabilità. Il software trasforma le piogge che precipitano sui sottobacini in deflussi superficiali o infiltrazione nel terreno.

5.1.2-La struttura del programma SWMM

Il programma è strutturato in quattro macro sezioni, le simulazioni si basano sullo scambio di flussi d'acqua fra queste unità.

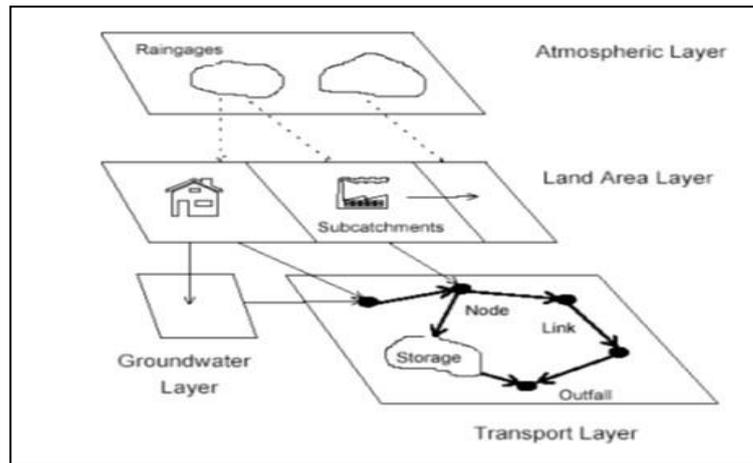


Figura 9- Struttura del software (manuale SWMM)

I "Rain Gages" hanno il compito di raccogliere le informazioni sulle precipitazioni e di trasferirle al suolo. Una volta raggiunti i sottobacini, le acque vengono inviate nel "Groundwater Layer" in caso di infiltrazione, rispedite all'"atmospheric Layer" in caso di evaporazione, oppure trasferite al "Transport Layer" trasformandosi in deflusso superficiale o della rete.

La sezione "Transport Layer" contiene gli insieme di elementi necessari al trasporto e all'immagazzinamento delle acque prima di giungere agli impianti di trattamento.

La rete viene rappresentata come un insieme di "Node" e "Links" che connessi fra loro permettono una rappresentazione idraulica del sistema di deflusso. E' possibile studiare il flusso con diverse opzioni di propagazione; si può scegliere infatti fra moto uniforme, onda cinematica o moto vario con un livello e una precisione dei risultati ottenuti via via crescente.

5.1.3- I moduli di progetto di SWMM

All'avvio della versione 5.1 del software *EPA SWMM*, si presenta un'interfaccia come si riporta in figura 36, nella quale sono riportati i principali comandi per la rappresentazione del modello. Durante la fase di progettazione iniziale vengono inserite le informazioni a disposizione riguardanti la morfologia del territorio, la conformazione della rete di drenaggio ed i dati riguardanti gli eventi atmosferici

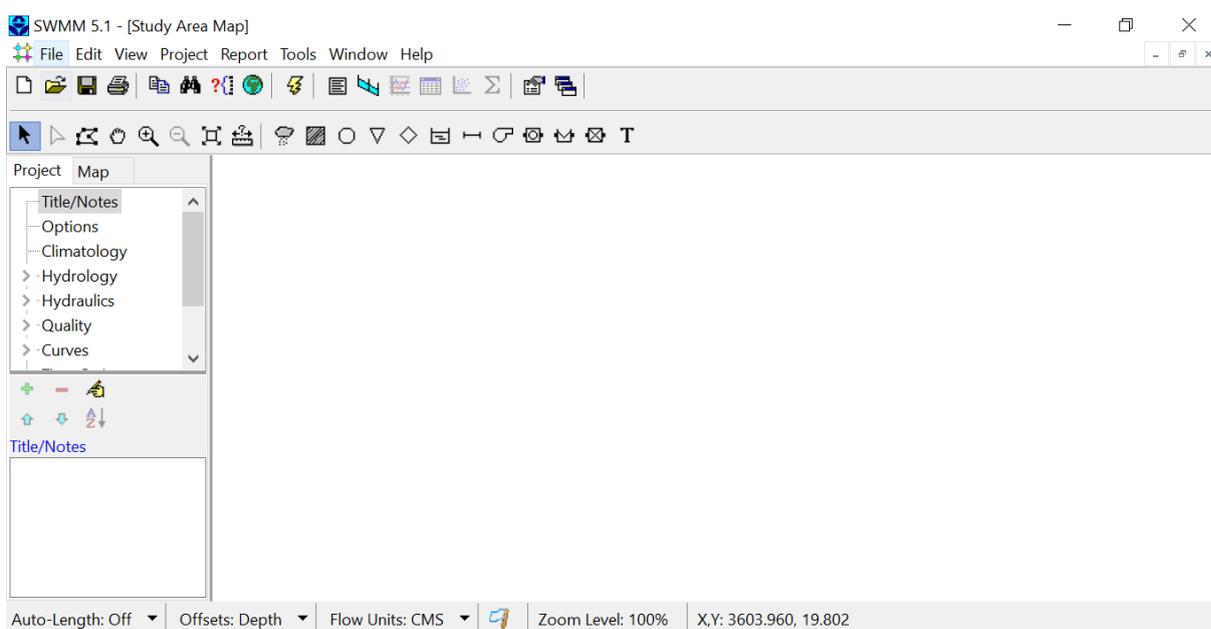


Figura 10- Schermata avvio SWMM

Il programma è suddiviso in 3 moduli di progetto principali, come riportatone nella figura 37:

- Modulo idrologico (*Hydrology*);
- Modulo idraulico (*Hydraulics*);
- Modulo di qualità (*Quality*).

Tuttavia nelle nostre analisi il modulo Qualità non è stato interrogato quindi passeremo alla sola descrizione dei primi due.

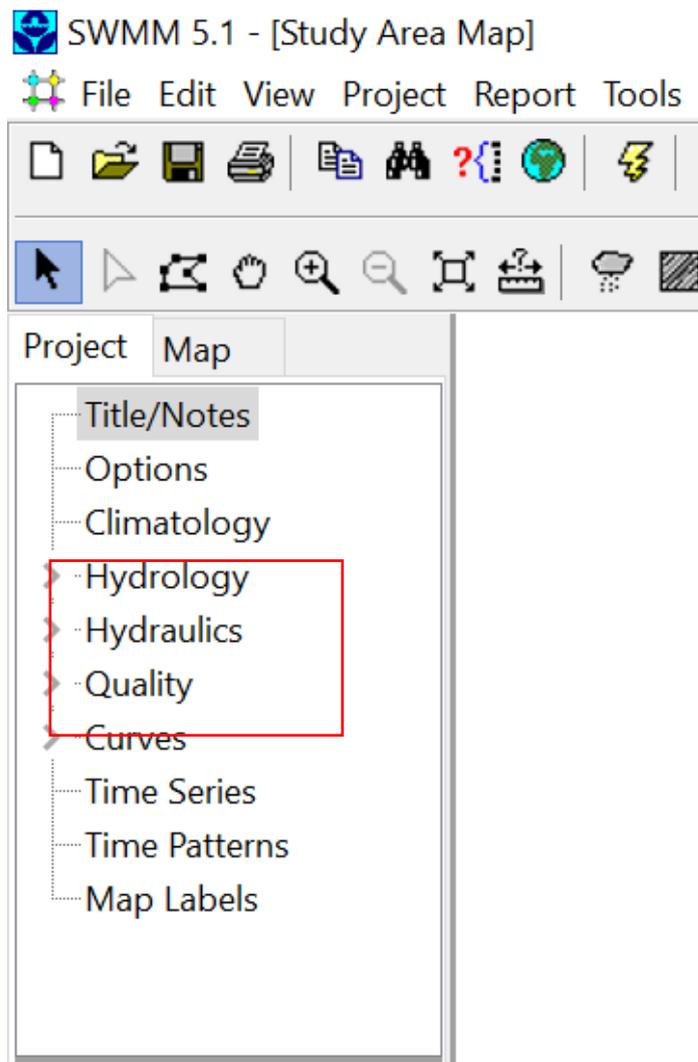


Figura 11- I moduli SWMM

5.1.4-Modulo idrologico (*Hydrology*)

Il modulo idrologico ha il compito di descrivere il territorio e l'evento di pioggia per mezzo dei Rain Gages e dei sottobacini. Grazie alla sezione dedicata è possibile descrivere infatti la zona di interesse, sia essa un bacino naturale o uno in ambito urbano, come un insieme di aree ognuna con le proprie caratteristiche.

L'evento di pioggia può essere riportato come istogramma con intensità variabile a seconda dell'istante oppure come cumulata dei volumi di pioggia precipitati. La risposta delle aree invece dipende dall'estensione, dalla pendenza media e soprattutto dal modello utilizzato per descrivere i fenomeni di infiltrazione. Infatti all'interno dell'editor dei sottobacini è possibile assegnare le proprietà dell'area tramite: *Horton*, *Horton modificato*, *Green-Ampt*, *Green-Ampt modificato* e il *Curve Number*.

5.1.5-Modulo idraulico (Hydraulics)

Nel modulo idraulico è possibile, grazie a un ampio set di comandi dedicati, impostare la rete di drenaggio responsabile della zona. Vengono infatti definiti i canali, tubazioni, vasche, strutture di diversione e unità di stoccaggio.

Il programma permette attraverso la schematizzazione sopra riportata la riproduzione discreta del modello fisico e la soluzioni alle equazioni di De Saint Venant. La rete di drenaggio viene definita descrivendo i rami che la rappresentano. Ognuno infatti necessita dell'inserimento delle informazioni geometriche quali lunghezza, diametro e pendenza. I valori idraulici quali portata e altezza della corrente vengono calcolati passo passo dal programma una volta eseguita la simulazione.

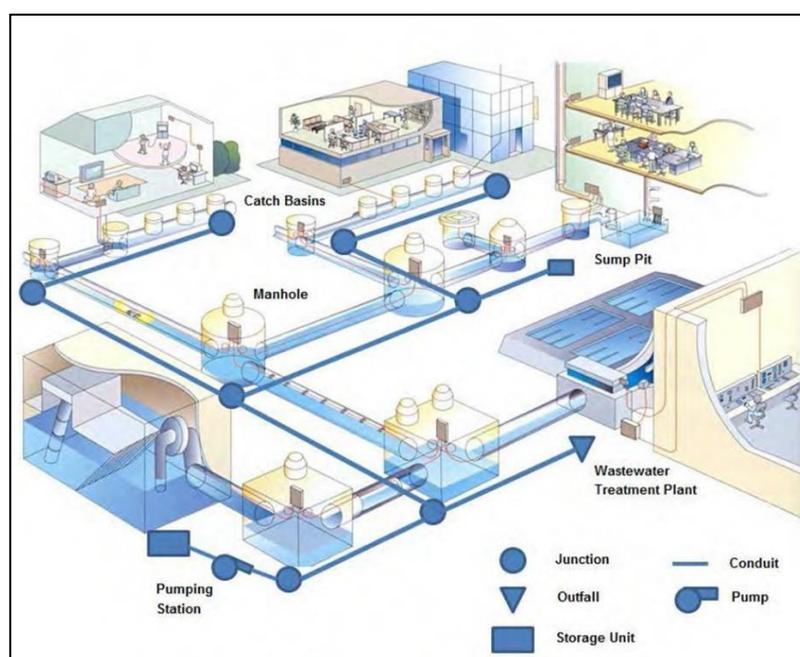


Figura 12- Rappresentazione di un sistema fognario con SWMM

5.1.5.1-I nodi

I Nodi (*Nodes*) rappresentano le diverse unità di confluenza di più rami. Le informazioni necessarie sono quelle relative alla posizione e alla quota rispetto al terreno.

Fra gli elementi presenti in “**nodi**” vi sono:

- **Giunzioni** (Junctions): punto di unione dei “Links”;
- **Bocche di scarico** (Outfalls): nodi terminali della rete, da qui le portate vengono

scaricate in un corpo ricettore;

- **Deviatori di flusso** (Deviatori): Consentono di dividere il flusso in più condotti distinti.
- **Unità di stoccaggio** (Storage): sono nodi del sistema che permettono volumi di accumulo

5.1.5.2-I collegamenti o rami

I Collegamenti (*Links*) sono elementi che permettono il transito dell'acqua da un nodo all'altro del sistema.

Gli elementi che fanno parte della voce "**collegamenti**" sono i seguenti:

- **Condotte** (*Conduits*) : possono avere forme diverse a seconda che siano sotterranei o superficiali (tubazioni o canali). Per il calcolo della portata il programma integra l'equazione di Manning che dipende da area bagnata, velocità, perimetro bagnato, pendenza e coefficiente di Manning.
- **Pompe** (*Pumps*): elementi utilizzati per il sollevamento dell'acqua a quote più elevate. E' possibile impostare una portata fissa in uscita oppure una certa quantità di energia da imprimere .
- **Uscite** (*Outlets*):Dispositivi per il controllo della portata in uscita con la possibilità di una valvola di non ritorno;

5.1.6-Opzioni di simulazione

Una volta descritta in maniera dettagliata la composizione dell'area e della rete di drenaggio vengono impostate le opzioni di simulazione.

Le categorie che possono essere settate nelle opzioni di simulazione sono:

- **Generali** (*General*): in cui si impostano i valori per le seguenti opzioni: modello di processo (*Process Models*), modello d'infiltrazione (*Infiltration Model*) e modello di propagazione (*Routing Model*);
- **Date** (*Dates*): in cui vengono impostate la data e l'ora di inizio e fine della simulazione

oltre alla data e l'ora del giorno in cui inizia il report dei risultati della simulazione.

- **Intervalli di tempo** (*Time Steps*): sono le lunghezze delle fasi temporali con cui vengono calcolati i deflussi.
- **Onda dinamica** (*Dynamic Wave*): parametri che controllano come vengono effettuati i calcoli della propagazione del flusso dell'onda dinamica.
- **File** (*Files*): Se si desidera utilizzare dei file di interfaccia per la simulazione

5.1.7-Deflusso superficiale

Il software utilizza, per convertire le precipitazioni non infiltrate in deflusso superficiale di un sottobacino utilizza un modello di serbatoio non lineare.

Il sottobacino è quindi soggetto alle precipitazioni e, una volta depurate delle perdite per infiltrazione ed evaporazione, restituisce il deflusso superficiale.

5.1.8-Infiltrazione (Infiltration)

L'infiltrazione, ossia il riempimento dei pori del terreno da parte dell'acqua, spesso rappresenta parte più consistente delle perdite su area permeabile. Il processo è teoricamente governato dall'equazione di Richards del 1931, tuttavia la grande difficoltà di risolvere l'equazione in quanto differenziale e altamente non lineare la rende inadatta all'utilizzo in SWMM. Per questo sono stati messi a punto dei modelli di infiltrazione semplificati che esprimono la capacità di infiltrare acqua nel terreno a partire dalle caratteristiche del suolo.

I modelli creati sono: il metodo di Horton, il metodo di Horton modificato, il metodo Green-Ampt, il metodo di Green-Ampt modificato, il metodo del Curve Number.

Il software dà la possibilità di scegliere fra questi modelli e all'interno del manuale indica valori tipici dei parametri che devono essere inseriti in ognuno per caratterizzare il suolo.

5.2-Coefficiente di Deflusso

La stima del coefficiente di deflusso medio ponderale dell'area presa in esame, risulta essere il punto fondamentale per il funzionamento del metodo. Il coefficiente di deflusso ha il compito di raccogliere all'interno di un solo valore i fenomeni di infiltrazione a cui è soggetto il terreno e di restituire quindi un risultato in termini di deflusso superficiale.

Il coefficiente, che è compreso fra 0 e 1, dipende principalmente dalla natura del suolo e dal tipo di elemento a cui viene assegnato; terreni con capacità di infiltrazione alta avranno un valore di coefficiente prossimo allo 0, mentre elementi impermeabili, come ad esempio costruzioni antropiche, avranno valori vicini a 1. Altro fattore che influenza il valore del coefficiente è la pendenza della superficie analizzata; pendenze elevate non permetteranno alla superficie di esplicare completamente le proprio capacità di infiltrazione e quindi il valore sarà tanto più alto quanto più alta è la pendenza dell'area considerata.

In letteratura sono presenti diversi valori di coefficienti di deflusso, spesso non coerenti fra loro. I numerosi studi condotti nelle diverse parti del mondo non hanno ancora fornito dei valori univoci per l'assegnazione di tale grandezza; vengono di seguito riportate alcune tabelle che mostrano la grande varietà presente nelle diverse fonti:

TIPOLOGIA URBANA	ϕ
parti centrali delle antiche città, con densa fabbricazione, con strade strette e lastricate	0,70 ÷ 0,90
zone urbane destinate a restare con scarse aree scoperte	0,50 ÷ 0,70
zone urbane destinate al tipo di città giardino	0,25 ÷ 0,50
zone urbane destinate a restare non fabbricate e non pavimentate	0,10 ÷ 0,30
prati e parchi	0,00 ÷ 0,25

oppure:

TIPOLOGIA URBANA	ϕ
costruzioni dense	0,80
costruzioni spaziate	0,60
aree con grandi cortili e grandi giardini	0,50
zone a villini	0,30 ÷ 0,40
giardini, prati e zone non destinate né a costruzioni né a strade	0,20
parchi e boschi	0,05 ÷ 0,10

Figura13- Tabella coefficienti di deflusso

Runoff coefficients for use in the rational method

Character of surface	Return Period (years)						
	2	5	10	25	50	100	500
Developed							
Asphaltic	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concrete/roof	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
Grass areas (lawns, parks, etc.)							
<i>Poor condition (grass cover less than 50% of the area)</i>							
Flat, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Average, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Steep, over 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Fair condition (grass cover on 50% to 75% of the area)</i>							
Flat, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Average, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Steep, over 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Good condition (grass cover larger than 75% of the area)</i>							
Flat, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Average, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Steep, over 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Undeveloped							
Cultivated Land							
Flat, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Average, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Steep, over 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Pasture/Range							
Flat, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Average, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Steep, over 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
Forest/Woodlands							
Flat, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Average, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Steep, over 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Note: The values in the table are the standards used by the City of Austin, Texas. Used with permission.

Figura 14- Tabella dei coefficienti di deflusso (Applied Hidrology Chow et al)

Valori del coefficiente di deflusso relativi ad una pioggia avente durata oraria	
Tipi di superficie scolante	ϕ
Tetti metallici	0,95
Tetti a tegole	0,90
Tetti piani con rivestimento in calcestruzzo	0,70+0,80
Tetti piani ricoperti di terra	0,30+0,40
Pavimentazioni asfaltate	0,85+0,90
Pavimentazioni in pietra	0,80+0,85
Massicciata in strade ordinarie	0,40+0,80
Strade in terra	0,40+0,60
Zone con ghiaia non compressa	0,15+0,25
Giardini e cimiteri	0+0,25
Boschi	0,10+0,30
Parti centrali di città completamente edificate	0,70+0,90
Quartieri urbani con pochi spazi liberi	0,50+0,70
Quartieri urbani con fabbricati radi	0,25+0,50
Tratti scoperti	0,10+0,30
Terreni coltivati	0,20+0,60

Figura 15- Tabella coefficienti di deflusso (Fogranture, Da Deppo e Datei)

Permeabilità dei vari tipi di rivestimento	
Tipo superficie raccolta	Coefficiente di deflusso
Tetti a falde	1,00
Lastricature con fughe ermetiche	1,00
Rivestimenti bituminosi	0,90
Coperture piane con ghiaietto	0,80
Lastricature miste, clinker, piastrelle	0,70
Lastricature medio/grandi con fughe aperte	0,60
Asfalto poroso	0,50+0,40
Rivestimenti drenanti, superfici a ghiaietto	0,50+0,40
Griglie in calcestruzzo	0,30+0,20
Coperture piane seminate a erba	0,30+0,20
Prati	0,25
Prati di campi sportivi	0,20+0,00
Superfici coperte di vegetazione	0,20+0,00

Figura 16- Tabella coefficienti di deflusso (Ciclo delle acque in ambiente costruito E.R.Treviso)

La grande incertezza ha fatto sorgere la necessità di analizzare tutte le tabelle sopra riportate e di proporre una nuova tabella che potesse raccogliere tutte le informazioni presenti, semplificando il problema, per applicarle a situazioni di deflusso urbano. Le considerazioni hanno portato dunque alla seguente compilazione:

Elementi antropici impermeabili	1
Edifici	0,9
Pavimentazioni stradali	0,85
Marciapiedi e lastricati	0,7
Strade non asfaltate ne pavimentate	0,6
Asfalto drenante	0,5
Superfici a ghiaietto o terra/materiale grossolano	0,4
Terreni coltivati	0,3
Cimiteri	0,25
Campi sportivi	0,2
Giardini e parchi	0,2
Boschi	0,15
Terreni coperti di vegetazione	0,1

Tabella 6- Coefficienti di deflusso utilizzati per lo studio

Tali valori devono essere all'occorrenza corretti per tener conto della pendenza dell'area a cui vengono assegnati.

Nota quindi la distribuzione dei coefficienti all'interno della zona e l'estensione dei singoli elementi è possibile calcolare il valore medio ponderale del coefficiente che verrà poi utilizzato all'interno dei calcoli con la formula:

$$\varphi = \frac{\sum(\varphi_i \cdot S_i)}{\sum S_i}$$

Tali valori, affinché i risultati dello studio risultino affidabili, devono innanzitutto essere calibrati; si prevede infatti la costruzione di un modello dettagliato sul software SWMM in cui verranno applicati tali valori a un'area di interesse simulando un evento reale che ha colpito la città di Torino. Dai dati di pioggia SWMM è in grado di restituire risultati in termini di portata di deflusso dal bacino interessato. Confrontando i risultati con gli effetti reali generati nel momento dell'evento sarà possibile verificare se i coefficienti assegnati risultano corretti. Qualora i risultati discostino notevolmente dalla realtà sarà necessaria una ricalibrazione dei coefficienti fino a raggiungere il valore desiderato.

6-Calibrazione Del Modello

6.1-Eventi Di Pioggia

Per calibrare il modello vengono presi in esame due eventi di pioggia che si sono abbattuti sul territorio torinese e che hanno generato gravi danni alle infrastrutture e forti deflussi e allagamenti superficiali nell'abitato urbano. Vengono di seguito riportati i rapporti di evento stilati da ARPA nelle fasi successive all'evento temporalesco. Vengono in particolare evidenziate le cause climatiche che hanno portato alla formazione dei nubifragio nonché i dati di pioggia risultanti.

6.1.1-Evento Del 28-29 Luglio 2014 (Descrizione dai rapporti di evento ARPA)

Nella giornata del 28 Luglio 2014 e nella successiva notte una circolazione depressionaria chiusa proveniente dal Nord della Francia, ha raggiunto il Piemonte, causando temporali violenti con forti precipitazioni, raffiche di vento e grandine. Il Canavese ed il Torinese sono le zone più colpite nel pomeriggio del 28 luglio, l'alessandrino e la pianura del cuneese nella successiva notte e nella giornata del 29 luglio.

Descrizione dell'evento

Dopo il transito, sull'Italia settentrionale, di un primo minimo in quota nei giorni 25-26 Luglio/2014 (fig.1), senza un corrispettivo centro di bassa pressione al suolo, che ha causato qualche temporale anche localmente forte sul Piemonte, l'assenza di una permanente rimonta anticiclonica fa sì che si instauri un canale di bassa pressione dal nord Europa all'Italia che favorisce l'ingresso delle perturbazioni dal nord Atlantico

Dopo una prima parte di giornata soleggiata, il Piemonte si trova quindi nel pomeriggio del 28 Luglio ai margini della circolazione depressionaria, ed il profilo verticale dell'atmosfera subisce una rapida quanto molto intensa destabilizzazione in poche ore a causa dell'ingresso di aria fredda e della circolazione sudoccidentale che apporta umidità a tutti i livelli

La conseguenza è stata quindi una rapida formazione di cumuli e cumulonembi, con lo sviluppo di temporali a partire dalle ore centrali sui rilievi alpini occidentali, in rapida estensione nelle ore pomeridiane alle pianure piemontesi, distribuiti secondo una evidente linea di instabilità

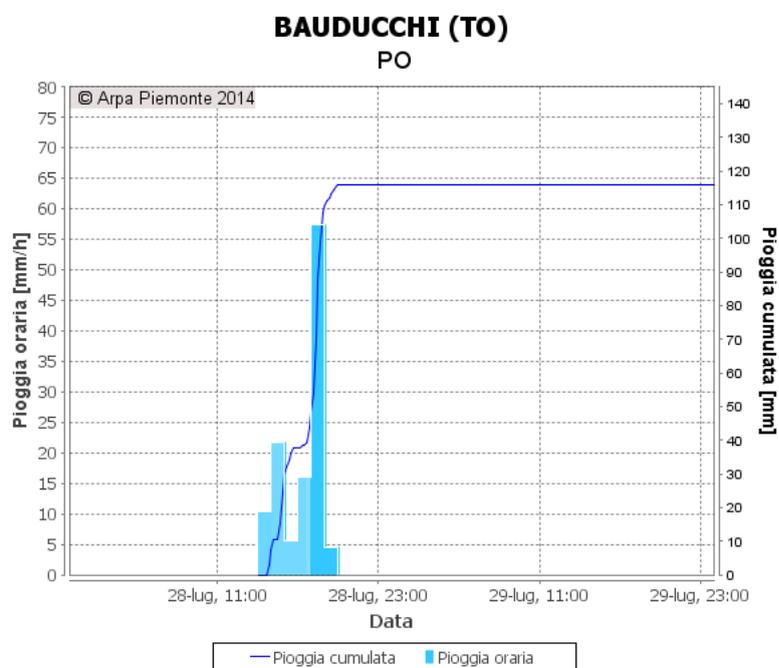


Figura 17- Ietogramma evento 28/07/2014, registrato al pluviometro "Bauducchi" di Torino

6.1.2-Evento Del 29 Agosto 2016

Il temporale si è caratterizzato inoltre per la notevole quantità d'acqua scaricata al suolo in brevissimo tempo, in particolare su Torino e cintura. Si può notare il nucleo di massima precipitazione localizzato su Druento, dove si rileva un accumulo di oltre 50 mm in mezz'ora. In generale, l'intensità istantanea di precipitazione ha raggiunto valori di circa 200 mm/h in corrispondenza degli scrosci più violenti. L'insistenza del temporale sulla stessa località durante 15-20 minuti ha portato così ad accumuli di precipitazione sull'area urbana e sub-urbana dell'ordine di 50-70 mm, come riportato ad esempio dai pluviometri di Torino via della Consolata e Santena

TORINO VIA DELLA CONSOLATA (TO) PO

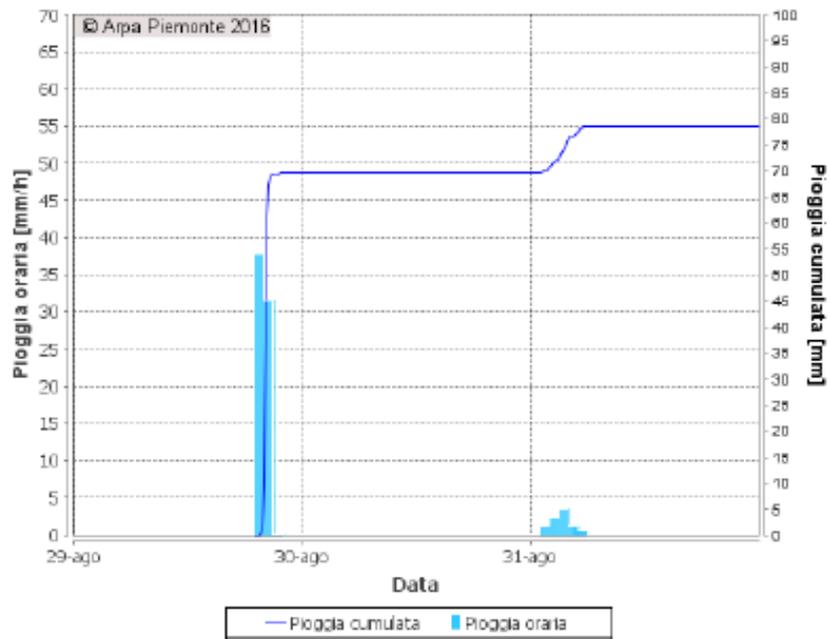


Figura 18- Ietogramma evento 30/08/2016, registrato al pluviometro "Via della consolata" di Torino

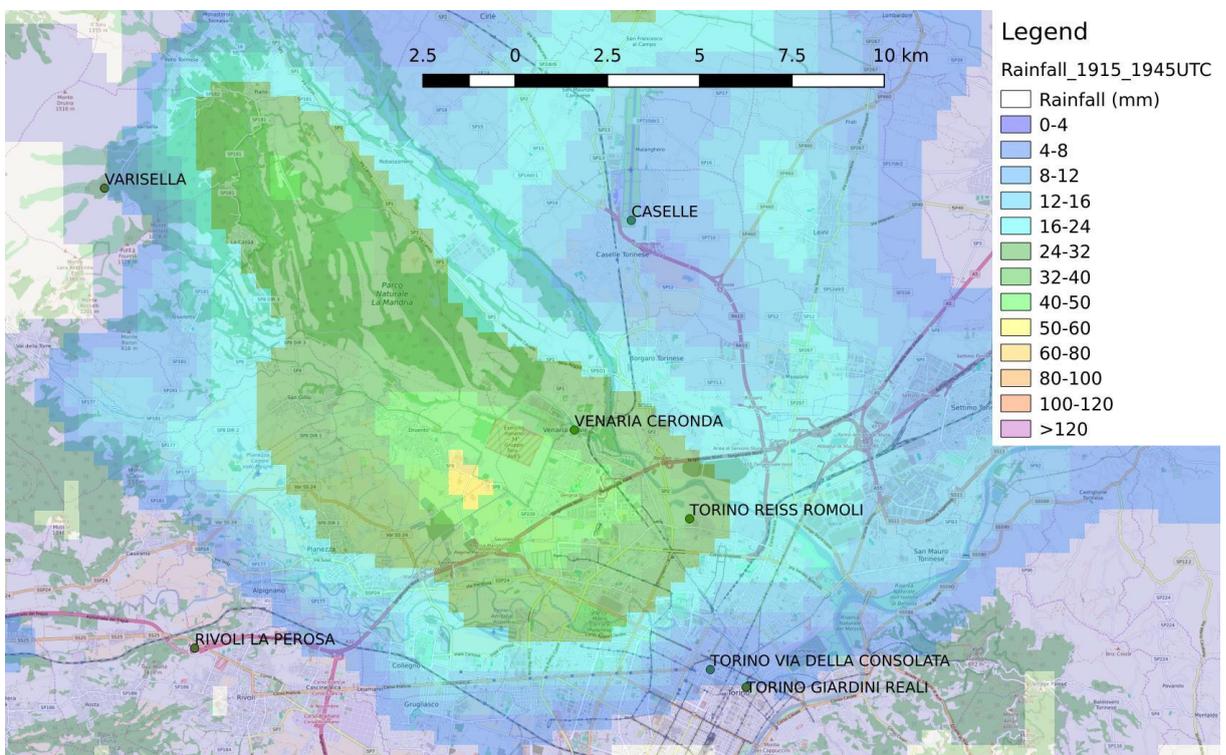


Figura 19- Cumulata di precipitazione su 30 minuti (dalle 19:15 alle 19:45 UTC del 29 agosto 2016) stimata dal sistema radar meteorologico di Bric della Croce (TO). Il picco di colore giallo nei pressi di Druento indica un accumulo di circa 50 mm in mezz'ora.

Questi eventi sono in seguito stati simulati sia attraverso la formula razionale dopo aver assegnato i valori di coefficienti di deflusso su un'area colpita dalla precipitazione, sia su SWMM tramite il Curve Number per verificare le condizioni in cui si trova l'area e l'entità della portata in uscita. Quello che ci aspettiamo sono valori di portata che mandano in crisi il sistema fognario e che quindi rendano necessari interventi di invarianza.

E' stato a questo punto creato prima un modello su Qgis sul quale sono stati assegnati i valori di permeabilità dell'area e in seguito queste informazioni sono state riportate su un modello su SWMM su cui sono state fatte le calibrazioni.

6.2-Modelli Qgis

Il modello utilizzato per lo studio è quello di Corso Romania precisamente dove sorge l'attuale centro commerciale Auchan. Sono state riscontrate in più occasioni criticità sulla sull'area in termini di deflusso in fognatura. Più volte infatti si sono presentati situazioni di allagamento delle strade che hanno creato danni alla viabilità e alla sicurezza della zona. Inoltre sulla zona è previsto un lavoro di costruzione e di trasformazione del suolo per un area di estensione di circa 10 ettari

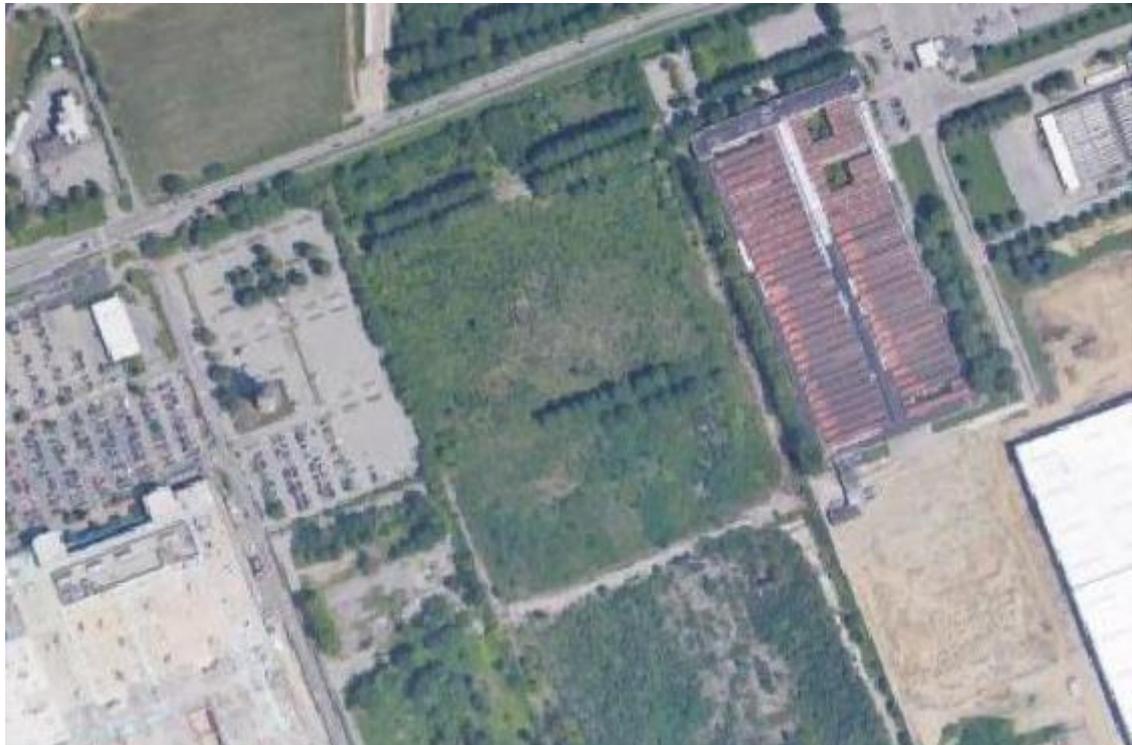


Figura 20- Area di intervento situata in Corso Romania

La condizione dell'area ante-operam è stata innanzitutto ricostruita su Qgis attraverso la creazione di poligoni che rappresentassero i diversi elementi presenti all'interno della superficie di intervento.

Qgis ci permette di definire in maniera precisa le caratteristiche geometriche delle diverse aree permettendoci poi di trasportarle in SWMM per effettuare la simulazione.



Figura 21- Ricostruzione dell'area su QGis attraverso poligoni

0,2	prato
0,4	Spartitraffico alberato
0,6	Strada sterrata
0,7	Zona pedonale (mattonelle)
0,85	Asfalto
0,9	edificio

Tabella 7-Coefficienti di deflusso che caratterizzano l'area

	Coeff def	AREA_MQ	LU	Imperv	Area ha	CN
1	0.4	14.98798450170	area verde (P-NA)	40.000000000	0.0014988	0
2	0.2	184.890929504...	area verde (P-A)	20.000000000	0.01848909	0
3	0.4	14.11036099930	area verde (P-NA)	40.000000000	0.00141104	0
4	0.2	1142.99878552...	area verde (P-NA)	20.000000000	0.11429988	0
5	0.4	27.61571349900	area verde (P-A)	40.000000000	0.00276157	0
6	0.2	91.53059749990	area verde (P-NA)	20.000000000	0.00915306	0
7	0.4	22.76446699940	area verde (P-A)	40.000000000	0.00227645	0
8	0.4	121.359748004...	area verde (P-NA)	40.000000000	0.01213597	0
9	0.2	151.944495238...	area verde (P-A)	20.000000000	0.01519445	0
10	0.2	60223.3567425...	area verde (P-A)	20.000000000	6.02233567	0

Figura 22- Tabella attributi poligoni QGIS

Su Qgis sono state impostate le caratteristiche dei vari poligoni creati. In particolare vengono assegnati i valori di coefficienti di deflusso riprendendo la tabella che è stata stilata in precedenza.

Noti quindi i valori delle varie aree e dei corrispondenti coefficienti di deflusso è stato possibile calcolare un valore di coefficiente di deflusso medio ponderale dell'intera area. Questo è necessario per la stima della portata di picco generata dai vari eventi attraverso la formula razionale.

6.3-Il metodo cinematico o razionale

Il metodo razionale è un procedimento particolarmente semplice ed efficace per il calcolo della portata di picco con assegnato tempo di ritorno, valido per bacini di estensione modesta (< 100-200km²). Il metodo si basa sull'uso delle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica applicando inoltre le seguenti ipotesi:

- Le piogge con tempo di ritorno T generano picchi di portata con lo stesso tempo di ritorno;
- Isofrequenza: piogge di tempo di ritorno T generano portate al picco di identico tempo di ritorno T;
- A parità di tempo di ritorno la portata maggiore è quella determinata dall'evento di pioggia di durata pari al tempo di corrivazione;
- La portata al colmo Q determinata da una pioggia di intensità costante e durata t_c è proporzionale al prodotto dell'intensità di pioggia ragguagliata all'area e dell'area del bacino attraverso il coefficiente di deflusso che comprende l'effetto delle perdite per infiltrazione.

La formula con cui si esprime il deflusso è data dunque da:

$$Q = 0,00278 \cdot S \cdot \varphi \cdot i$$

Dove:

- S è la superficie del bacino espressa in ettari;
- i è l'intensità di pioggia espressa in mm/h;
- φ è il coefficiente di deflusso medio del bacino;
- 0,00278 è un coefficiente che serve a far concordare le unità di misura;

La stima della portata dunque risulta dipendente da due grandezze particolari (φ e i) in quanto queste non risultano note a priori ma devono essere calcolate in maniera specifica.

6.3.1-Coefficiente di deflusso

Come già accennato il coefficiente di deflusso è tabulato con specifici valori che sono stati ottenuti analizzando tutti i valori riportati in letteratura. Di caso in caso è possibile analizzare l'area di interesse e verificare quali siano gli elementi presenti all'interno ed assegnare ad ognuno l'opportuno coefficiente.

Tuttavia esistono sul Geoportale della Regione Piemonte i file BDTRE che classificano il territorio su QGis tramite l'utilizzo di shapefile. Assegnando ad ognuno dei poligoni il valore del coefficiente di deflusso è possibile quindi di avere una mappa completa dell'ambito urbano che può essere utilizzata dal progettista per ricavare in maniera rapida il coefficiente di deflusso medio su l'area di intervento.

Ritagliando infatti la zona desiderata è possibile ricavare immediatamente tutte le informazioni necessarie al calcolo delle condizioni ante-operam.



Figura 23- Mappa della Città Metropolitana di Torino

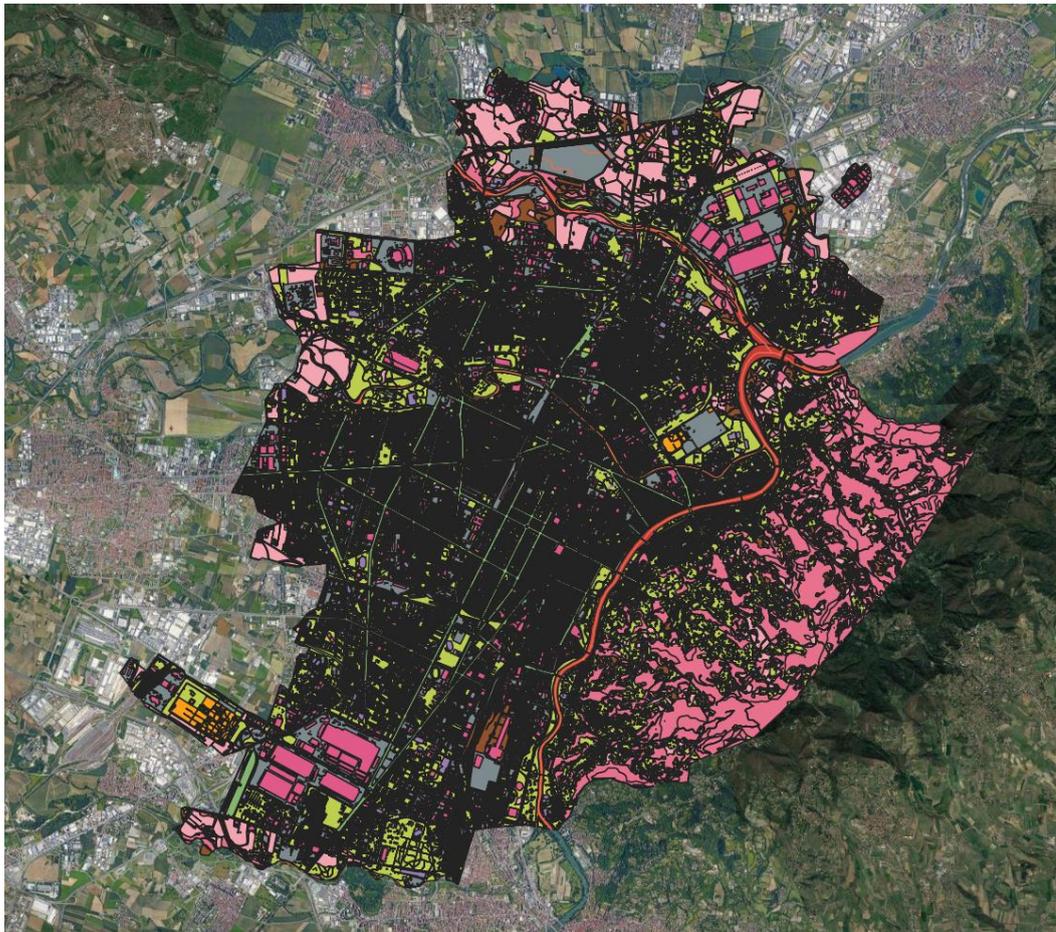


Figura 24- Mappatura degli elementi presenti sul territorio (Geoportale della regione Piemonte)

Il dettaglio mostra la forma dei poligoni e i diversi colori rappresentano diverse categorie di elementi presenti all'interno. Tuttavia qualora fossero presenti studi di maggior dettaglio per una specifica area, come nel modello che stiamo analizzando, è possibile ottenere risultati più dettagliati.

6.3.2-Intensità di pioggia

L'intensità di pioggia che è stata considerata per il calcolo della portata di picco è quella relativa all'intensità massima registrata durante gli eventi presi in esame. Vengono di seguito riportati gli ietogrammi di pioggia caduta nei periodi di interesse.

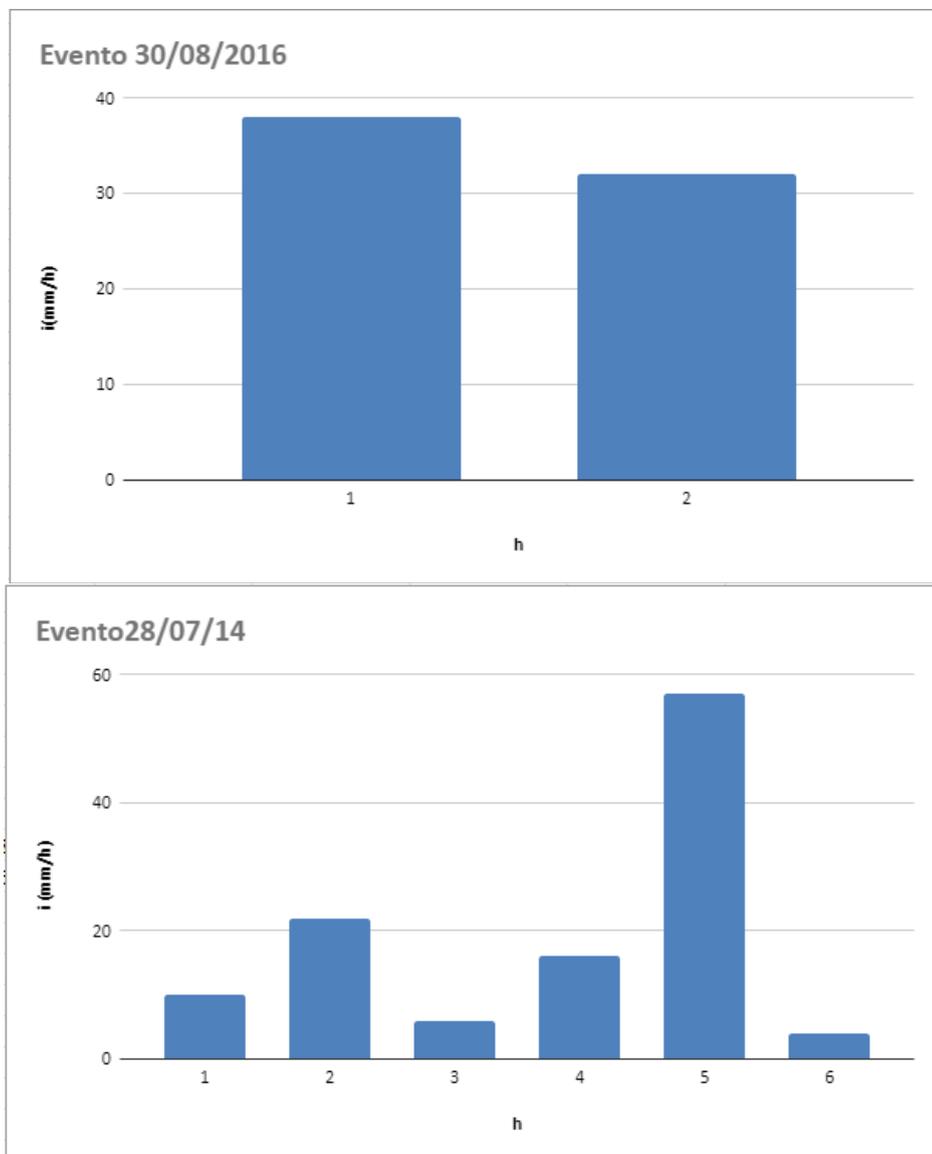


Figura 25- Ietogrammi di pioggia degli eventi analizzati

Applicando quindi il metodo razionale è possibile calcolare i valori di portata massimi generati dagli eventi:

Evento del 30/08/2016

Stot (ha)	9,33506	1	38	mm/h
a	30,77	2	32	mm/h
n	0,26			
Phi ante	0,3780596342	Q (formula razionale)	0,3728256778	m3/s
			372,8256778	l/s
		Q per ettaro	39,93821976	l/s*ha

Evento del 28/07/2014

28/07/14		1	10	mm/h
Stot (ha)	9,33506	2	22	mm/h
a	30,77	3	6	mm/h
n	0,26	4	16	mm/h
Phi ante	0,3780596342	5	57	mm/h
		6	4	mm/h
		Q(razionale)	0,5592385166	m3/s
			559,2385166	l/s
		Q per ettaro	59,90732964	l/s*ha

Tabella 8- Calcolo delle portate generate dagli eventi attraverso il metodo razionale

Per una corretta e rigorosa calibrazione del modello sarebbe necessaria la conoscenza delle stesse grandezze calcolate in merito all'evento reale. Purtroppo nonostante la ricerca di informazioni da ogni possibile fonte non è stato possibile ricavare tali grandezze. Per entrambi gli eventi sono stati riscontrati disagi e allagamenti per tutto il territorio torinese, ma tuttavia tali valori non sono quantificabili in quanto non esistono strumenti in grado di reperire informazioni come il deflusso generato da una certa superficie urbana. Tuttavia il

valori calcolati tramite le formule hanno messo in mostra come le portate generate siano eccessive per un sistema di fognature urbane e quindi è stato ritenuto che il modello, vista la grande quantità di informazioni in letteratura in merito al coefficiente di deflusso, rispecchiasse il fenomeno reale. Per un ulteriore riscontro di informazioni si è deciso di verificare le portate generate dagli eventi anche tramite il software SWMM, descrivendo il terreno attraverso il metodo del Curve Number che, al contrario del coefficiente di deflusso, tiene conto della perdita di capacità di infiltrazione del terreno al proseguire dell'evento di pioggia.

6.4-II metodo SCS Curve Number

Il Soil Conservation Service ha messo a punto un metodo che utilizza il Curve Number (CN) che consente il calcolo della pioggia netta che origina il deflusso superficiale a partire dalla pioggia caduta in una certa zona depurandola in seguito delle perdite dovute a infiltrazione nel terreno e intercettazione prodotta dalla morfologia del terreno. Il parametro ha un valore compreso fra 0 e 100 anche se in letteratura i terreni con alto tasso di infiltrazione hanno un valore minimo di CN di circa 30. Infatti il valore 0 rappresenta un elemento assimilabile a una "spugna". I terreni con CN prossimo a 100 rappresentano invece superfici totalmente impermeabili ed infatti tali valori vengono assegnati a pavimentazioni stradali non drenanti o a edifici.

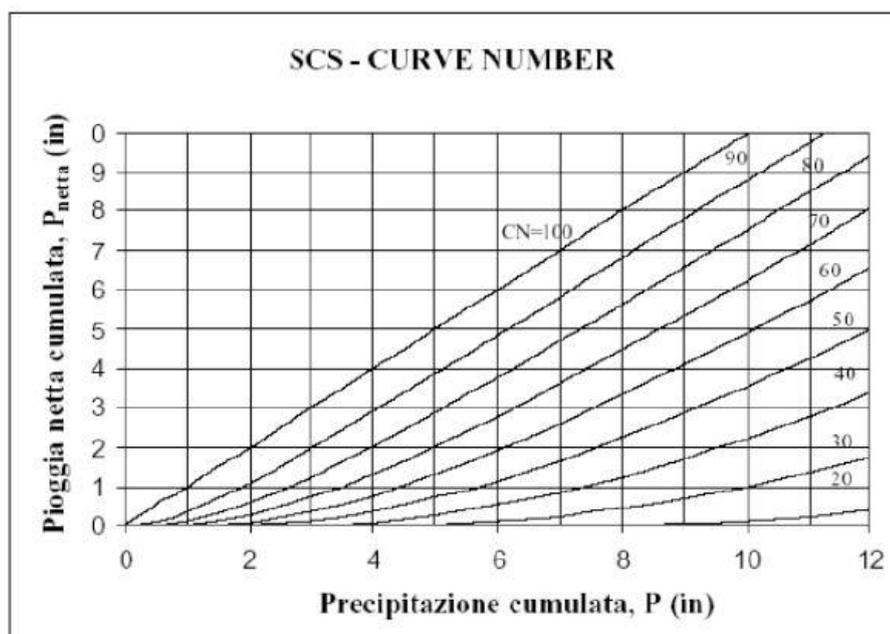


Figura 26- Abaco della pioggia netta in funzione della precipitazione e del CN

Viene anche tenuta in conto dal metodo la condizione antecedente all'evento preso in esame in quanto, le condizioni di saturazione del terreno rappresentano un vincolo importante al processo di trasformazione afflussi-deflussi. Il metodo descrive lo stato di saturazione attraverso le **condizioni di umidità del terreno antecedenti l'inizio dell'evento (AMC, AntecedentMoistureCondition)**. L'SCS individua tre classi, AMC I, AMC II e AMC III, in relazione al valore assunto dall'altezza di pioggia caduta nei **5 giorni precedenti l'evento meteorico**.

Classe AMC	Stagione di riposo	Stagione di crescita
I	< 12.7 mm	<35.5 mm
II	12.7-28.0 mm	35.5-53.3 mm
III	>28.0 mm	>53.3 mm

I valori di CN relativi alle diverse classi possono essere ricavate tramite:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0,13CN(II)}$$

L'equazione a cui si fa riferimento per la stima della pioggia netta è:

$$P_n = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

In cui:

- P_n è il valore di pioggia netta in millimetri;
- P è la pioggia totale in millimetri;
- I_a sono le perdite iniziali, date dall'intercettazione della vegetazione, solitamente assunte a 0,20 S;
- S è la capacità massima di ritenzione del suolo.

La pioggia P è stimata a partire dalle curve di possibilità pluviometrica(CPP) a due parametri secondo l'espressione

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

dove:

- h rappresenta la pioggia P espressa in millimetri;
- t è la durata dell'evento di pioggia espresso in ore;
- a e n sono i parametri della curva di possibilità pluviometrica;

Questi ultimi possono essere ricavati analizzando gli annali di pioggia relativi ad una certa zona e tramite inferenza statistica con il metodo GEV o di Gumbell è possibile andare a ricavare i loro valori. Tuttavia per quanto riguarda la regione Piemonte è stato redatto l'Atlante Piogge Intense da Arpa grazie al quale selezionando la zona di interesse è possibile ottenere informazioni sia sui valori dei parametri che sulle altezze di pioggia ricavate dalla CPP per diverse durate e diversi tempi di ritorno.



Atlante piogge intense in Piemonte (GEV)

Comune di **TORINO** (lat: 4991459.95493 , lon: 395405.454713)

Parametri della curva di probabilità pluviometrica. a: **31.02** n: **0.25**



CSV Excel

Fattore di crescita KT

K2	K5	K10	K20	K50	K100	K200
0.9	1.3	1.5	1.7	2	2.2	2.5

Piogge di assegnato tempo di ritorno per durate da 10 minuti a 24 ore (mm)

CSV Excel

Durata	Tempo di ritorno in anni						
	2	5	10	20	50	100	200
10 minuti	18	24.3	28.6	32.9	38.7	43.2	47.7
20 minuti	21.7	29.3	34.6	39.8	46.7	52.1	57.6
30 minuti	24.2	32.6	38.5	44.2	52	58	64.1
1 ora	28.9	39	46	52.9	62.1	69.2	76.6
3 ore	38.2	51.6	60.8	69.9	82.1	91.6	101.3
6 ore	45.5	61.5	72.5	83.4	97.9	109.2	120.8
12 ore	54.3	73.4	86.5	99.4	116.8	130.3	144.1
24 ore	64.8	87.5	103.2	118.6	139.4	155.4	171.9

Linee segnalatrici di probabilità pluviometrica

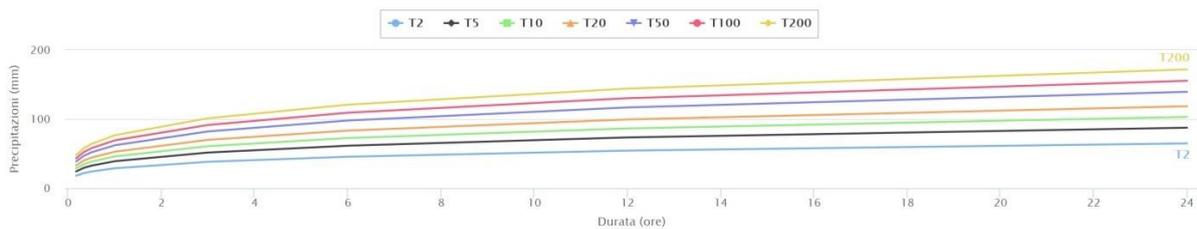


Figura 27- Curve di Possibilità Pluviometrica ricavate dall'Atlante Piogge Intense ARPA
(http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante_pioggia_webapp)

Il parametro S dipende dalla tipologia del suolo e dal suo stato di saturazione al momento dell'analisi .Tale valore, espresso in millimetri è legato al parametro CN secondo l'equazione:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

	CN=98
	CN=61



Figura 28- Classificazione dei poligoni SWMM attraverso il CN

Tipo di copertura		Classe del suolo			
		A	B	C	D
Aree residenziali⁽¹⁾					
Area media dei lotti	Area impermeabile (%)				
1/8 acro o meno	65	77	85	90	92
1/4 acro	38	61	75	83	87
1/3 acro	30	57	72	81	86
1/2 acro	25	54	70	80	85
1 acro	20	51	68	79	84
Parcheggi pavimentati, tetti, viali d'accesso⁽²⁾		98	98	98	98
Strade urbane ed extraurbane					
pavimentate, a dorso di mulo e con fognatura ⁽³⁾		98	98	98	98
in ghiaia		76	85	89	91
sterrate		72	82	87	89
Aree commerciali e professionali (impermeabili per l'85%)		89	92	94	95
Distretti industriali (impermeabili per il 72%)		81	88	91	93
Spazi aperti, prati, parchi, campi da golf, cimiteri etc.					
in buone condizioni: copertura erbosa sul 75% o più		39	61	74	80
in discrete condizioni: copertura erbosa sul 50+75%		49	69	79	84

A	Bassa capacità di deflusso – suoli con elevata infiltrabilità anche se completamente saturi – sabbie o ghiaie profonde ben drenate – notevole conducibilità idrica
B	Suoli con moderata infiltrabilità se saturi – discretamente drenati e profondi – tessitura medio-grossolana – conducibilità idrica media
C	Suoli con bassa infiltrabilità se saturi – uno strato impedisce la percolazione verticale – suoli con tessitura medio-fine e bassa infiltrabilità – conducibilità idrica bassa
D	Capacità di deflusso elevata – suoli con infiltrabilità ridottissima in condizioni di saturazione – suoli ricchi di argilla rigonfianti – suoli con strato argilloso superficiale – suoli poco profondi su substrato impermeabile – conducibilità idrica estremamente bassa

Figura 29- Tabelle di classificazione del terreno in base al CN e alla tipologia del terreno

Come fatto in precedenza per il Coefficiente di deflusso, allo stesso modo sono stati assegnati ai vari poligoni su QGis valori del Curve Number relativi ai tipi di suoli presenti. Tuttavia la creazione del modello con questo metodo prevede un livello di differenziazione minore e quindi è stato deciso di ridurre il numero di elementi categorizzati da 5 a 2 definendo le superfici verdi e quelle impermeabili.

E' stato a questo punto utilizzato un software, di nome Inp.PINS che permette di trasformare gli shapefile dei poligoni creati su Gis in formato .inp che può essere utilizzato su SWMM.

Vengono assegnati nella tabella attributi dello shapefile i valori che dovranno poi essere riportati su SWMM. Il programma permette quindi di definire da quali colonne prendere i valori che riguardano estensione dell'area, valori di permeabilità delle superfici nonché definire , qualora presente una rete di condotte fognarie da importate direttamente in SWMM.

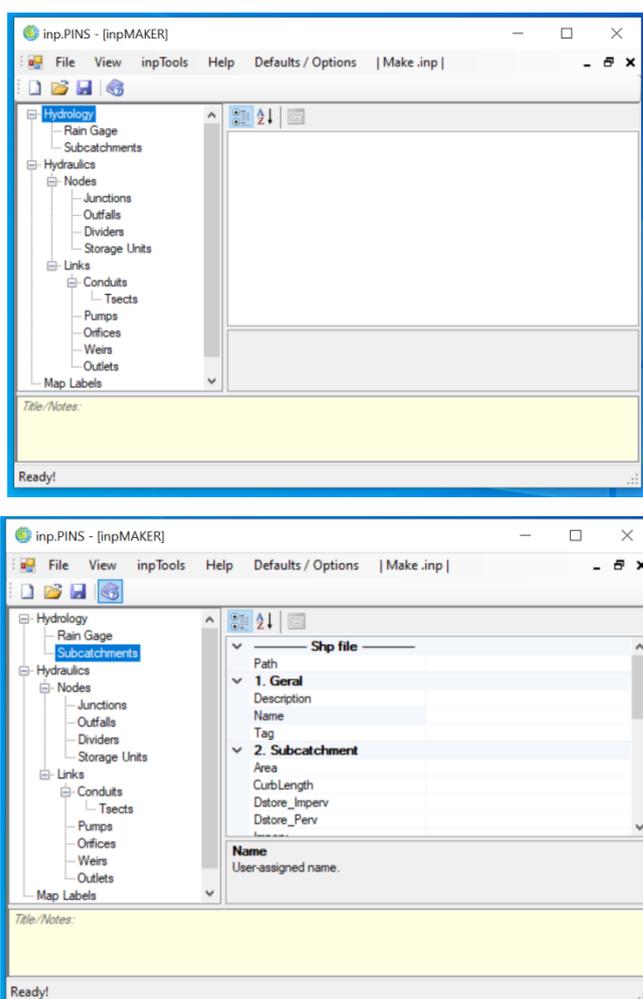


Figura 30- Schermata del software Inp.PINS

Una volta inserite tutte le informazioni necessarie il programma genera un file .inp che può essere importato su SWMM e utilizzato come modello di simulazione.

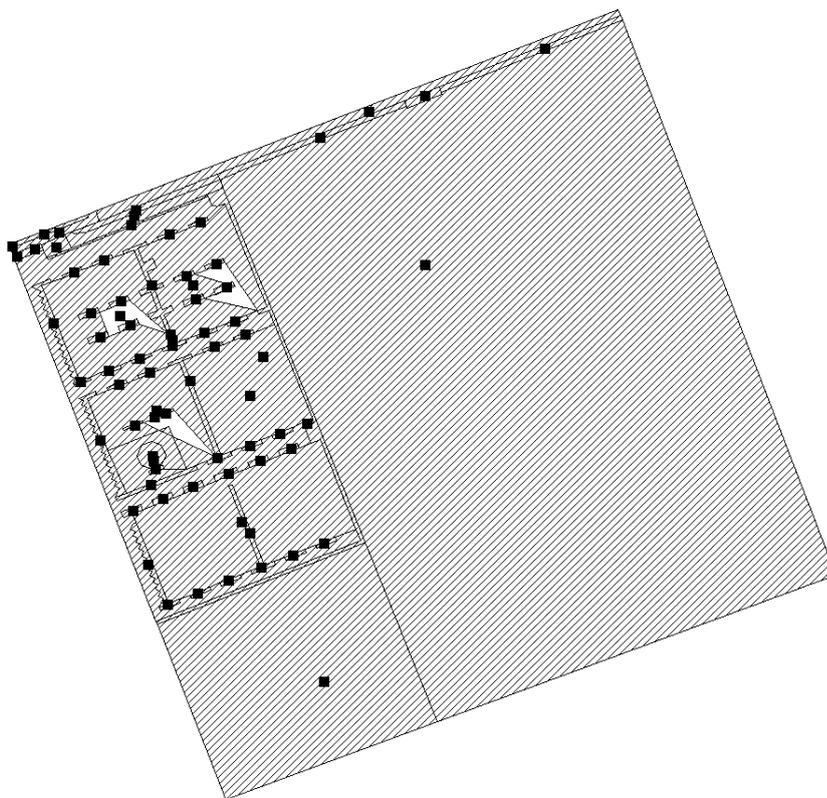


Figura 31- Modello di Corso Romania allo stato attuale ricostruito su SWMM

Le diverse sotto-aree presenti all'interno del modello vengono descritte dalle caratteristiche riportate nell'editor seguente.

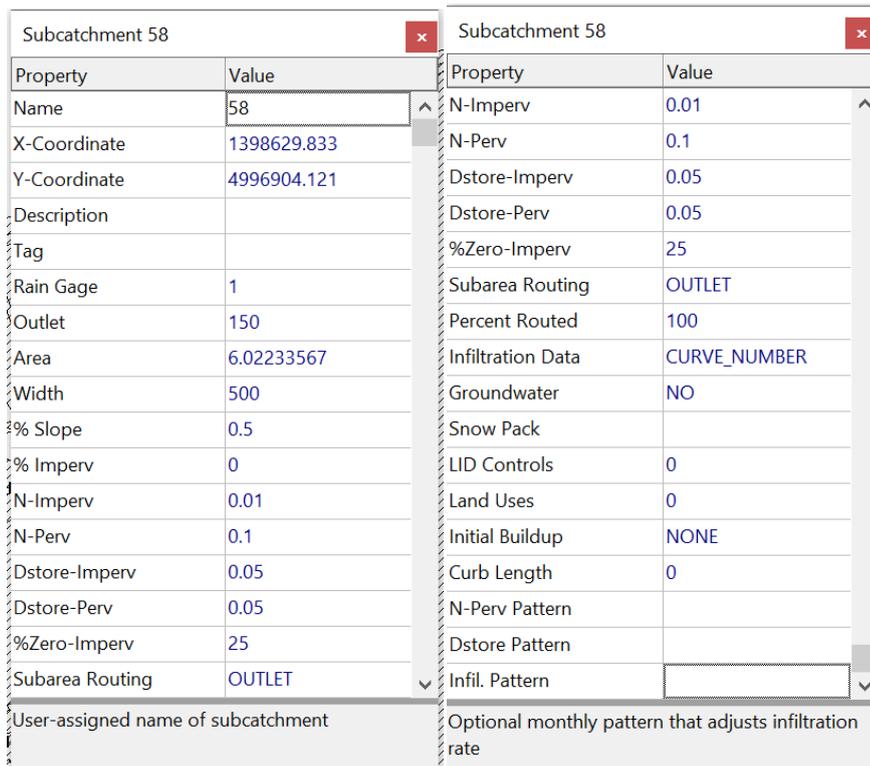


Figura 31- Editor dei Subcatchments su SWMM

Una volta definita l'area di interesse devono essere impostati tutti gli elementi che servono a impostare la simulazione. Questi sono:

-Time series, ossia la definizione della durata e dell'intensità dell' evento preso in esame;

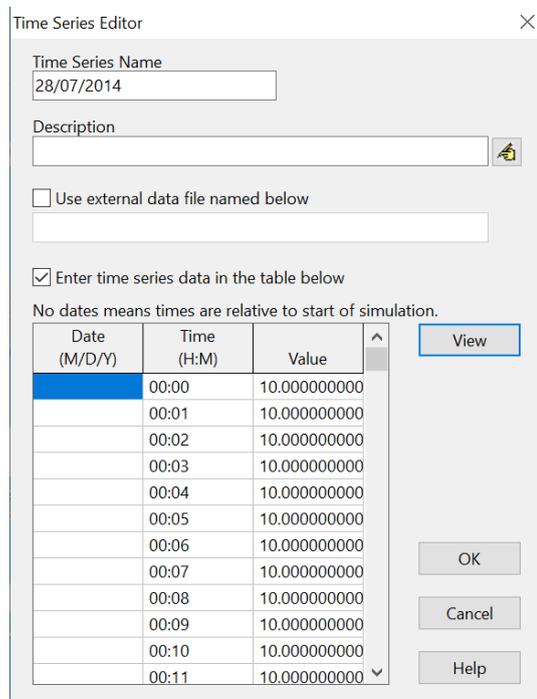


Figura 32- Editor delle Time Series su SWMM

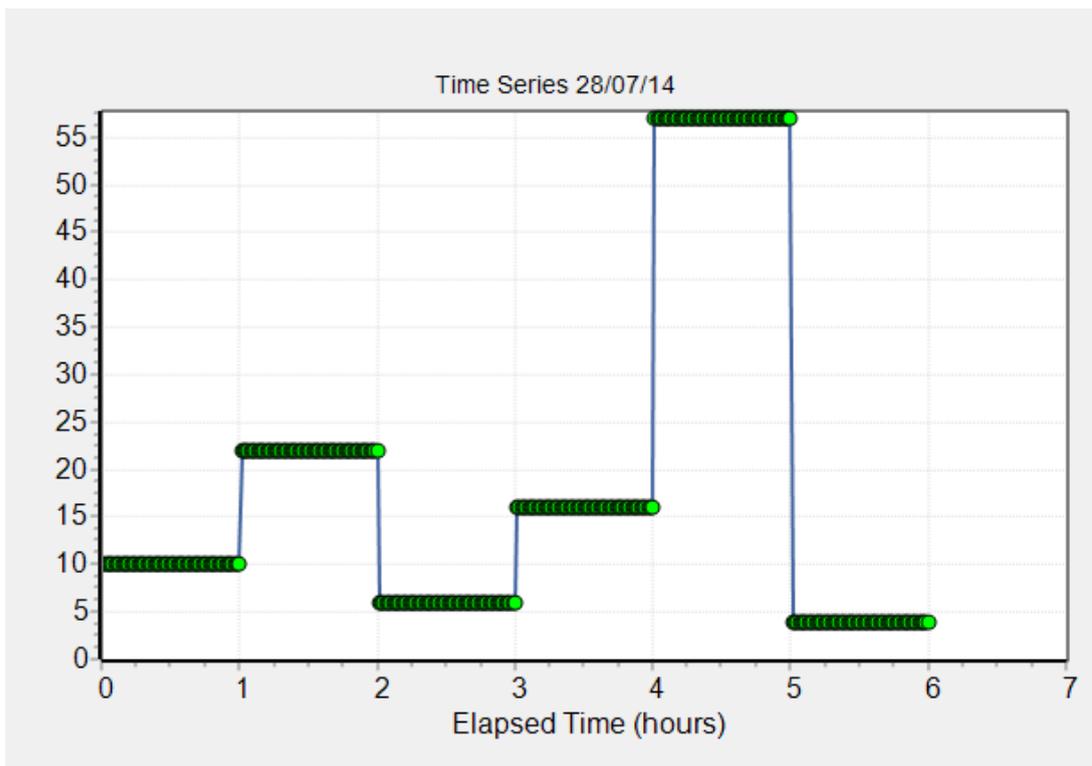
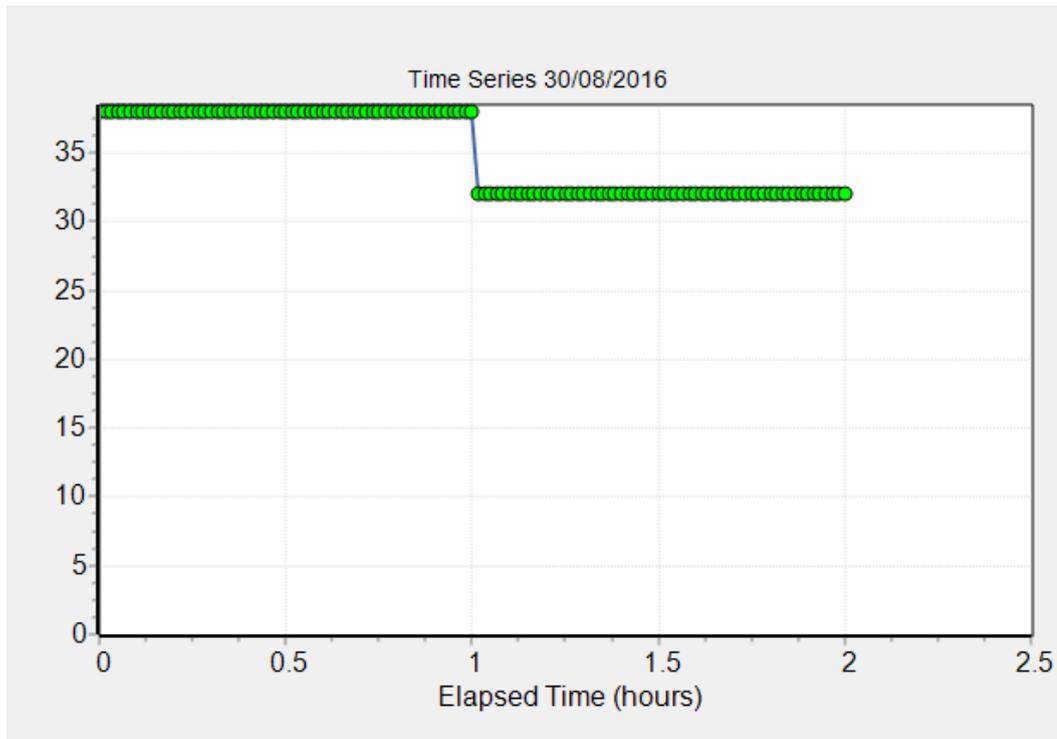


Figura 33- Ietogrammi degli eventi analizzati riportati in SWMM

-Rain gage, in cui vengono inseriti i dati di pioggia dell'evento che si vuole simulare. Questo elemento dovrà poi essere associato alle aree interessate, facendo si che i valori di pioggia ricadano all'interno delle zone in cui poi verrà simulato il deflusso;

Property	Value
Name	1
X-Coordinate	1398280.890
Y-Coordinate	4996975.118
Description	
Tag	
Rain Format	INTENSITY
Time Interval	0:01
Snow Catch Factor	1.0
Data Source	TIMESERIES
TIME SERIES:	
- Series Name	28/07/14
DATA FILE:	
- File Name	*
- Station ID	*
- Rain Units	IN
User-assigned name of rain gage	

Formato dei dati di pioggia

Intervallo di registrazione dati del rain gage

Figura 34- Editor dei Rain Gage su SWMM

Gli eventi di pioggia simulati restituiscono gli idrogrammi in uscita dal bacino:

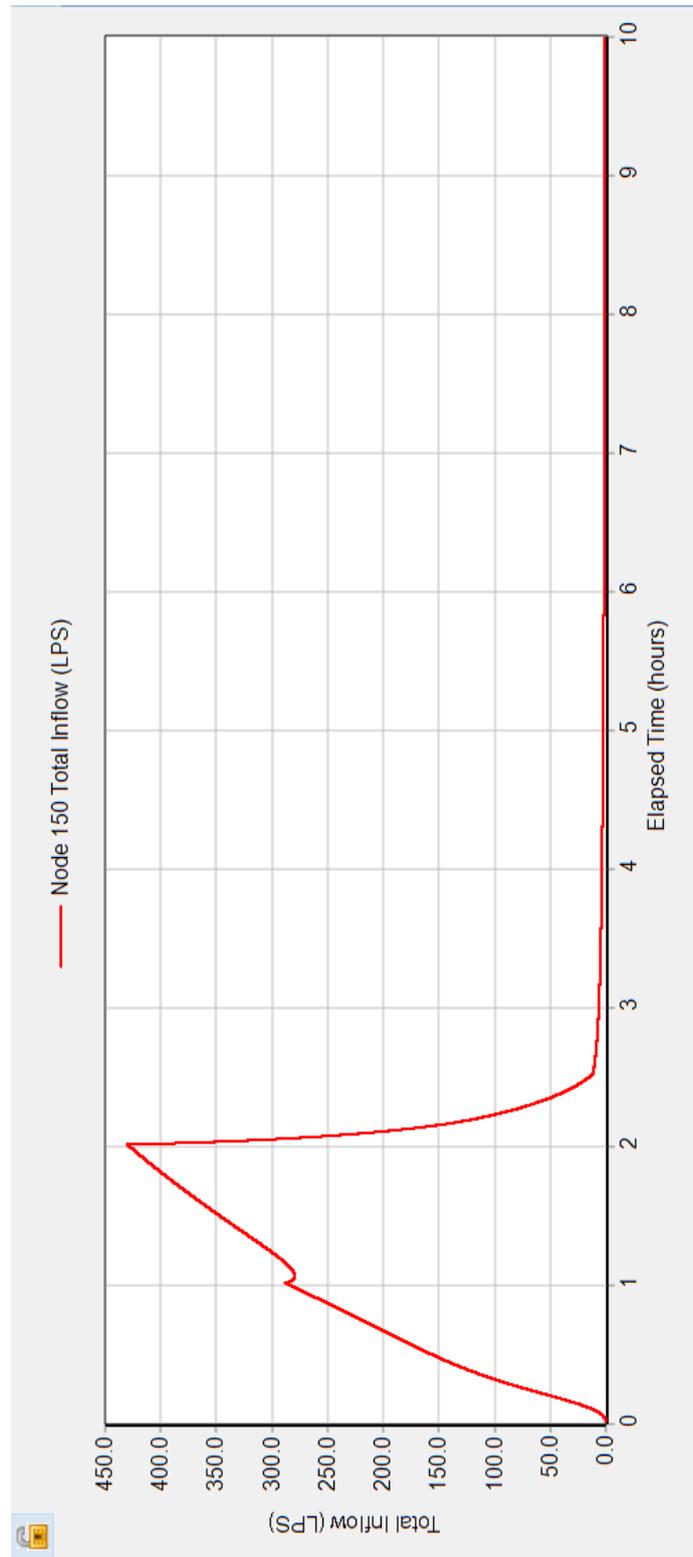


Figura 35- Idrogramma in uscita a seguito della simulazione dell'evento del 30/08/2016

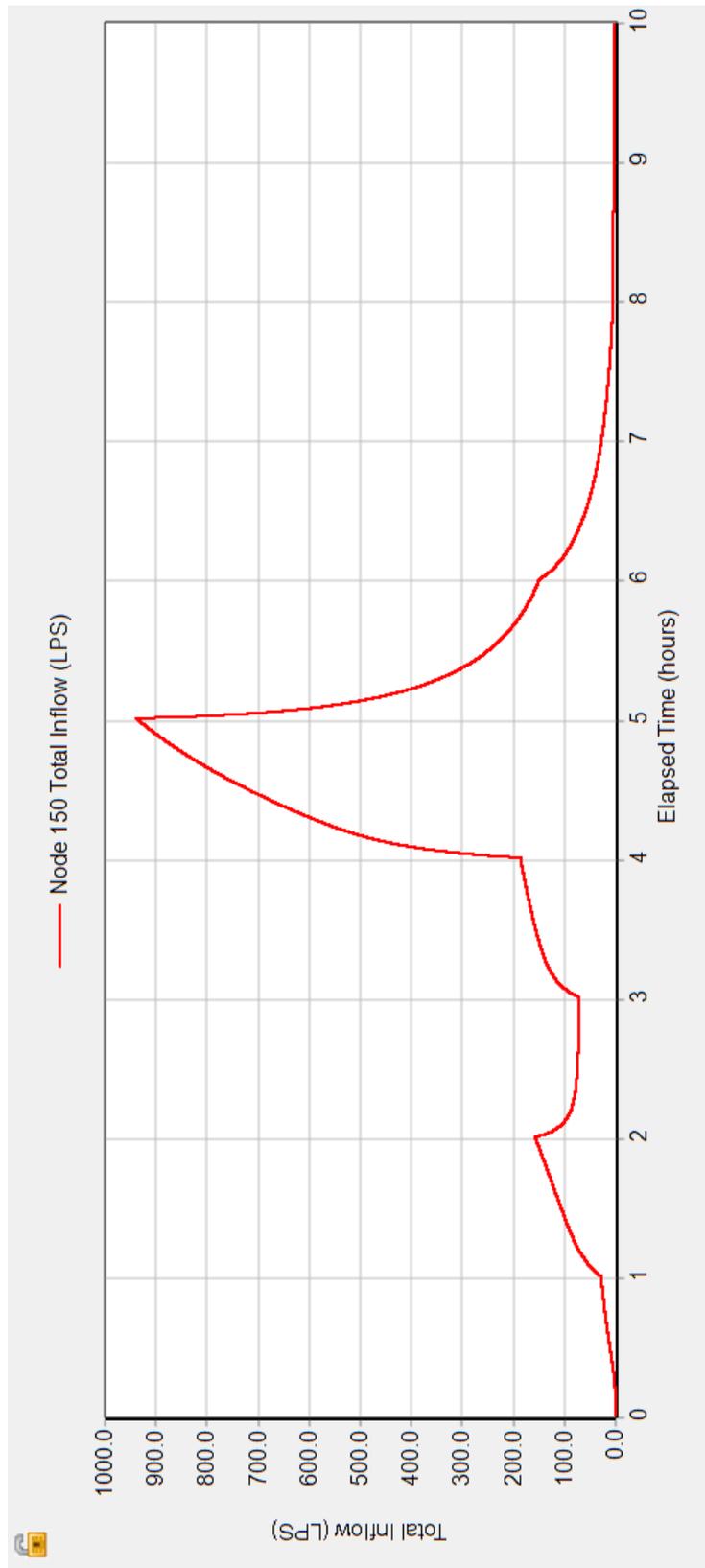


Figura 36- Idrogramma in uscita a seguito della simulazione dell'evento del 28/07/2014

Per quanto riguarda l'evento del 30/08/2016 il deflusso generato è quello riportato nel primo grafico. Il picco di portata in uscita è 430,29 l/s. Questo è un aumento del 15.5 % rispetto alla formula razionale.

Per quanto riguarda invece l'evento del 28/07/2014 il deflusso generato è quello riportato nel secondo grafico. Il picco di portata in uscita è 930 l/s. Questo è un aumento del 65% rispetto alla formula razionale.

L'aumento considerevole nel secondo caso è dovuto alla forma dello ietogramma. Infatti quando si arriva alla pioggia di 57 mm/h sono già passate 4 ore e il terreno si torva già in condizioni molto sature. L'intensità alta che giunge dopo molto tempo genera un deflusso enorme quasi come se la superficie non fosse più in grado di assorbire acqua.

Se infatti si prova a inserire nel programma uno ietogramma di un ora con intensità costante a 57 mm/h si ottiene:

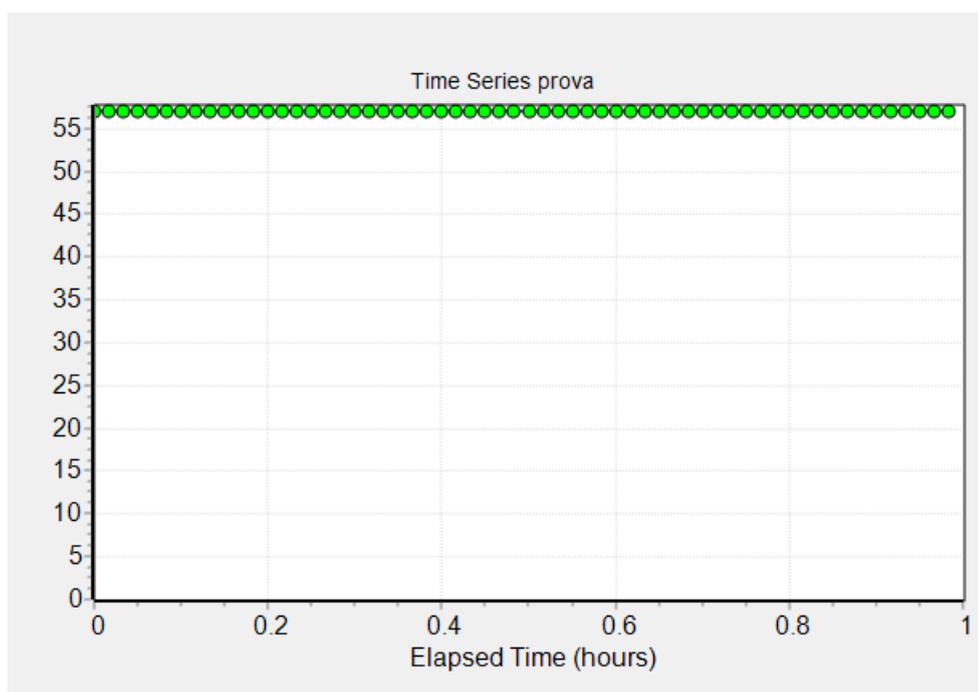


Figura 37- Ietogramma di verifica dell'evento del 28/07/2014

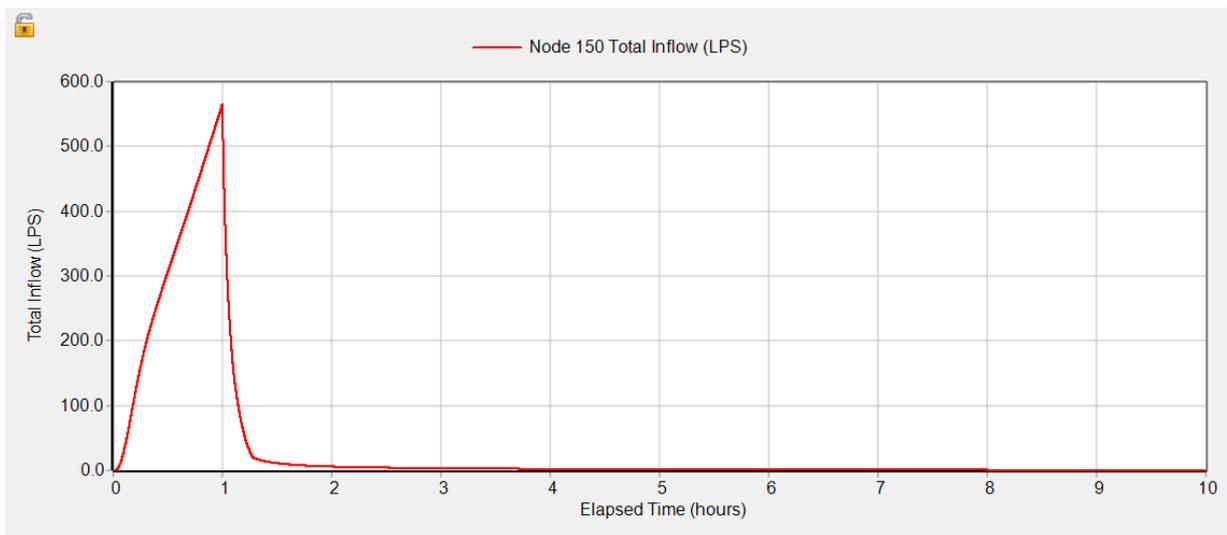


Figura 38- idrogramma in uscita di verifica dell'evento del 28/07/2014

I valori di portata massima assomigliano a quelli della formula razionale.

La differenza nei valori di picco fra il metodo razionale e il metodo del Curve Number è data dalla natura stessa dei due metodi. Il metodo razionale di fatto non tiene conto della perdita di capacità di infiltrazione del terreno, ma consente un flusso costante in uscita in qualunque momento dell'evento. Il metodo CN invece tiene conto della saturazione del terreno e che quindi dopo un certo periodo si giunga a una condizione in cui tutta la precipitazione si trasforma in deflusso in quanto il terreno non è più in grado di assorbire. E' stato quindi ritenuto che il modello fosse tarato correttamente rispetto ai valori di CN.

Già nelle condizioni attuali è emerso come la zona in questione necessiterebbe di un intervento di invarianza.

7-Proposta metodologica

Una volta dunque che il modello è stato calibrato e si è dunque riusciti ad avere conferma che i coefficienti di deflusso e i Curve Number da noi utilizzati sono quelli che descrivono in maniera accurata il fenomeno, si passa quindi a definire i passaggi precisi che permettono il calcolo dei volumi generati dagli eventi di pioggia di progetto che portano quindi alla definizione dei volumi di invaso necessari per garantire il rispetto dei principi di invarianza. Queste considerazioni tuttavia vengono adesso fatte facendo riferimento ad eventi di pioggia di progetto con un tempo di ritorno di 50 anni.

Si procede innanzitutto dall'analisi delle condizioni ante-operam in cui verte l'area in analisi. Lo stato attuale gioca infatti un ruolo fondamentale nella stima dei volumi da immagazzinare. I metodi proposti dalle altre regioni, come ad esempio Lombardia, assegnano valori già prestabiliti di portata senza considerare il deflusso che si genera prima dell'intervento. Questo in generale può portare ad un'analisi più approssimata con valori dei volumi da immagazzinare diversi da quelli reali e che potrebbero portare a costi maggiori.

Nel corso del lavoro si è quindi deciso di ricercare una metodologia che permettesse di avere un quadro chiaro della situazione ante-operam in modo da dimensionare in maniera più precisa i valori da immagazzinare.

Seguendo ciò che è riportato nel PTCP2 si è deciso di utilizzare come valore di portata per il dimensionamento delle opere quello presente nelle condizioni precedenti all'intervento. Tale valore viene ricavato considerando eventi di pioggia di progetto con tempi di ritorno di 50 anni. Vengono quindi creati gli ietogrammi rettangolari per la stima dei volumi.

Per stimare le portate di deflusso nelle condizioni attuali, si ricorre nuovamente al metodo razionale, o cinematico, che si basa sulla conoscenza dell'area, dell'intensità di pioggia di progetto e del coefficiente di deflusso. In questo caso tuttavia mentre il processo per ricavare il coefficiente di deflusso rimane lo stesso ricavato in precedenza tramite il modello QGis, l'intensità deve essere ricavata a partire dalle Curve di Possibilità Pluviometrica facendo riferimento a un tempo di pioggia pari al tempo di corruzione dell'area in esame.

7.1-Intensità di pioggia

L'intensità di pioggia di un dato evento può essere calcolata ancora tramite le Curve di Possibilità Pluviometrica; ricordando infatti che l'altezza di pioggia per un dato evento di durata t è data da:

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

L'intensità corrispondente è data da:

$$i(t) = at^{n-1}$$

Il problema sorge nel momento della scelta della durata di pioggia, da cui dipende l'intensità. Numerosi studi hanno portato alla conclusione che il deflusso massimo generato da un bacino è quello relativo a un evento di pioggia di durata pari al tempo di corrivazione del bacino;

Il tempo di corrivazione, relativo ad un punto assegnato del bacino, è il tempo che impiega la particella d'acqua caduta per raggiungere la sezione di chiusura del bacino. Ad ogni punto del bacino corrisponde un particolare valore del tempo di corrivazione. Un punto particolare è quello idraulicamente più lontano dalla sezione di chiusura, cioè il punto dello spartiacque da cui ha origine l'asta principale della rete idrografica. Il tempo corrispondente a tale punto è il tempo di corrivazione più lungo, e prende nome di tempo di corrivazione del bacino.

In letteratura esistono diverse formulazioni per la stima del tempo di corrivazione per bacini di grande estensione. Per quanto riguarda invece i bacini urbani gli studi condotti sono pochi e l'unico che ha portato a dei risultati soddisfacenti è quello proposto da Paoletti e Mambretti nel 1996.

Il tempo di corrivazione in un bacino urbano può essere stimato come la somma di un tempo di accesso alla rete e un tempo di percorrenza della rete stessa:

$$T_c = T_a + T_p$$

Lo studio di Paoletti e Mambretti ha portato alla stima del tempo di accesso in rete per bacini con estensione non superiore ai 10 ha. La formula proposta è la seguente:

$$t_{ai} = \left[\frac{3600^{\frac{n-1}{4}} \cdot 120 \cdot S_i^{0.30}}{s_i^{0.375} (\alpha\varphi)^{0.25}} \right]^{\frac{4}{n+3}}$$

Dove:

- t_{ai} è il tempo di accesso dell' i -esimo sottobacino espresso in s;
- a, n sono i coefficienti della curva di possibilità pluviometrica espressi in mm/hⁿ e adimensionale;
- S_i è la superficie dell' i -esimo sottobacino espressa in ha;
- s_i è la pendenza media dell' i -esimo sottobacino;
- φ_i è il coefficiente di deflusso medio dell' i -esimo sottobacino

Qualora l' i -esimo sottobacino avesse una pendenza media $s_i < 0.003$ nella formula deve comunque essere inserito il valore minimodi 0.003

Per quanto riguarda il tempo di percorrenza della rete questo risulta di più difficile stima, in quanto devono essere note la lunghezza del percorso e la velocità della corrente all'interno delle tubature:

$$t_{pi} = \frac{\sum L_i}{v_i}$$

In letteratura è proposta una formula per la stima della lunghezza della condotta in base all'estensione dell'area del bacino:

$$Li = 19,1 \cdot (100 \cdot Si)^{0,548}$$

Risulta comunque impossibile, senza conoscere dettagliatamente la velocità in tubazione, calcolare il tempo di percorrenza. Per questo si è deciso di affidarsi ai valori di letteratura e di stimare arbitrariamente un valore fisso di percorrenza della rete in ambito urbano che corrisponde a 5 minuti per ettaro di superficie interessata. Questo è stato fatto per non dover dipendere di volta in volta da un ente esterno per il reperimento di informazioni dettagliate su un sito specifico della rete.

Una volta ricavato dunque il tempo di corrivazione totale dell'area di interesse è dunque possibile stimare l'intensità di pioggia relativa ad un evento di durata pari a t_c .

Ricavate quindi tutte le grandezze necessarie è possibile a questo punto calcolare la portata Q in uscita dal bacino con il metodo razionale.

La seconda parte del metodo prevede il dimensionamento della vasca di laminazione facendo riferimento a questa come portata in uscita dalla vasca e trasferita in fognatura. Qualora tale portata risulti tuttavia non adatta ad essere accolta dal sistema è possibile, come previsto dal PTCP2 per zone a rischio, diminuirla di almeno il 50% per garantire il buon funzionamento della rete.

7.2-Metodo delle sole Piogge

Una volta ricavata la portata scaricabile si procede dunque al dimensionamento della vasca utilizzando il metodo delle sole piogge. Ci troviamo adesso in una condizione in cui è avvenuta la trasformazione del terreno e quindi ne è cambiata la permeabilità. Proprio per questo il coefficiente di deflusso presente nelle formule è quello relativo alla condizione post-opera.

Riprendendo le formule già descritte per la regione Lombardia:

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

$$V_{in} = S \cdot \varphi \cdot h(t) = S \cdot \varphi \cdot a \cdot t^n$$

Il volume in uscita dall'opera può essere stimato

$$V_{out} = Q_{out} \cdot t = S \cdot u_{out} \cdot t$$

Dove:

Il volume invasato al generico tempo t sarà quindi dato dalla differenza:

$$V = V_{in} - V_{out} = S \cdot \varphi \cdot a \cdot t^n - Q_{out} \cdot t$$

Derivando l'espressione e ponendola uguale a zero è possibile ricavare il valore t_{cr} :

$$\frac{dV}{dt} = t_{cr} = \frac{d(S \cdot \varphi \cdot a \cdot t^n - Q_{out} \cdot t)}{dt}$$

Da cui:

$$t_{cr} = \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

E quindi il volume di invaso sarà dato da:

$$V_{max} = S \cdot \varphi \cdot a \cdot \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{n}{n-1}} - Q_{out} \cdot \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

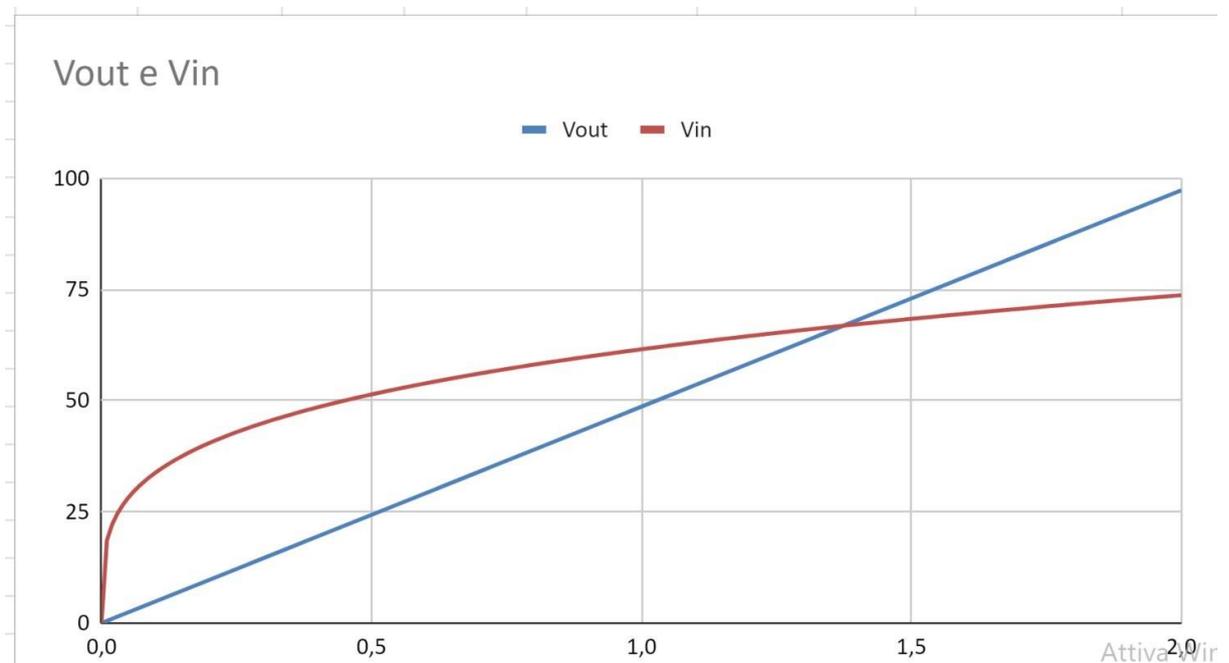


Figura 39- Grafico dei volumi entranti ed uscenti calcolati con il metodo delle sole piogge

L'andamento dei volumi in ingresso e in uscita è quello riportato nel grafico che cambia a seconda delle caratteristiche della zona e della portata uscente dalla vasca. Il metodo delle sole piogge è cautelativo in quanto non vengono presi in conto fenomeni differiti o la capacità di infiltrazione del terreno che viene considerata costante per tutta la durata dell'evento.

Il tempo critico rappresenta dunque il punto di massima differenza fra le due curve e quindi identifica il momento all'interno dell'evento in cui il volume di invaso è massimo.

Il metodo consente quindi di dimensionare le opere caso per caso, a monte di una conoscenza dettagliata della zona di intervento. Il dimensionamento in questo caso, che viene fatto non con un valore unico univoco, ma tenendo conto della reale condizione ante-operam risulta più preciso e meno dispendioso. Tuttavia è comunque necessaria una verifica di compatibilità con la rete fognaria per la portata scaricata in tubatura dalle opere

di invarianza.

In definitiva la stima dei volumi da laminare per una generica area è data dai seguenti passaggi:

Condizione Ante-Operam

1. Individuazione dell'area che necessita la trasformazione
2. Assegnazione del valore del coefficiente di deflusso ad ogni elemento presente all'interno dell'area
3. Calcolo del coefficiente di deflusso medio ponderale sulla superficie
4. Calcolo del tempo di corrivazione del bacino, somma del contributo di accesso calcolato con la formula di Paoletti e del contributo di percorrenza della rete con un valore fisso per ettaro
5. Calcolo del picco di portata uscente dall'area con il metodo razionale.

Condizione Post Operam

1. Assegnazione del valore del coefficiente di deflusso a tutti gli elementi previsti all'interno dell'area dopo la trasformazione
2. Calcolo del coefficiente di deflusso medio ponderale sulla superficie dopo la trasformazione
3. Assegnazione della portata in uscita della vasca di laminazione; se la zona non risulta in condizioni critiche pre intervento tale valore è uguale alla portata calcolata tramite il metodo razionale, altrimenti è prevista una riduzione di tale valore di almeno il 50%
4. Calcolo del tempo critico di evento che massimizza il volume di invaso derivando l'equazione del metodo sole piogge
5. Calcolo dei volumi entranti e uscenti al tempo critico
6. Calcolo della differenza dei volumi e quindi il valore minimo del volume di invaso

7.3-Applicazione del modello al caso di studio

Una volta messo a punto il modello di calcolo tenendo conto di tutte le grandezze sopra elencate è stato necessario eseguire una prima analisi sui risultati ottenuti, applicando questo a casi di studio reali che sono stati affrontati durante i mesi di tirocinio e che possono servire come base di verifica per trarre le conclusioni desiderate.

Le aree interrogate variano in grandezza e composizione e grazie alle relazioni tecniche disponibili per ciascun progetto è stato possibile confrontare i risultati in termini di volume. Successivamente sono state condotte delle simulazioni anche con il software SWMM per verificare la congruenza con un modello di afflussi deflussi diverso.

7.3.1-Corso Romania

Il progetto di Corso Romania prevede la trasformazione dell'area attuale in una con un coefficiente di deflusso medio maggiore, per questo deve essere prevista la realizzazione di una vasca di laminazione in grado di ospitare il deflusso in eccesso. L'area ha un'estensione di quasi 10 ha

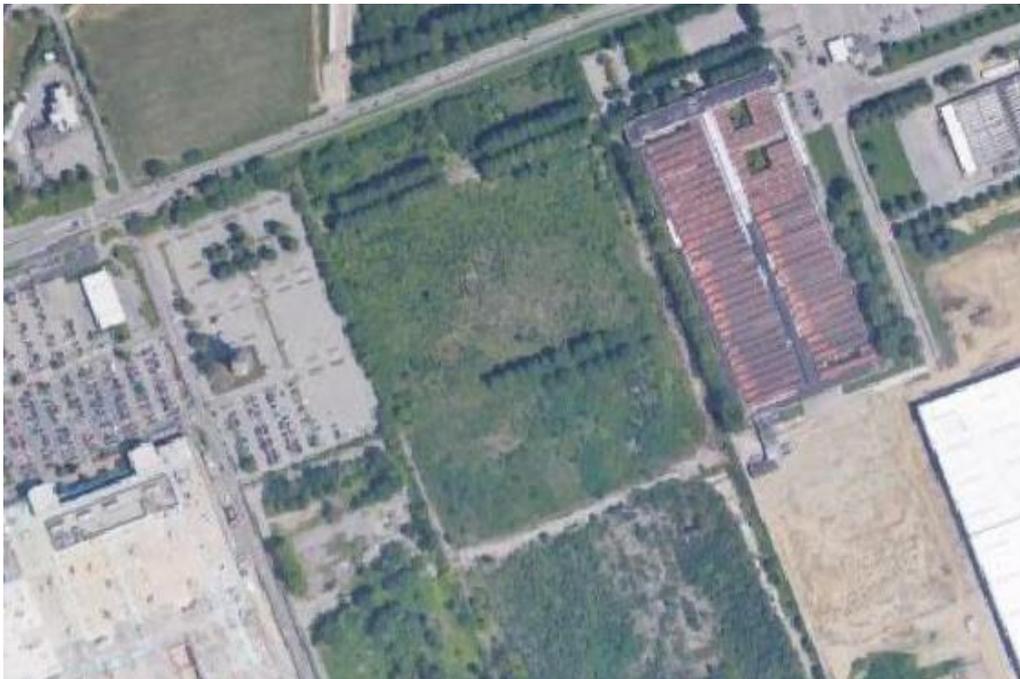


Figura 40- Stato attuale dell'area di progetto in Corso Romania

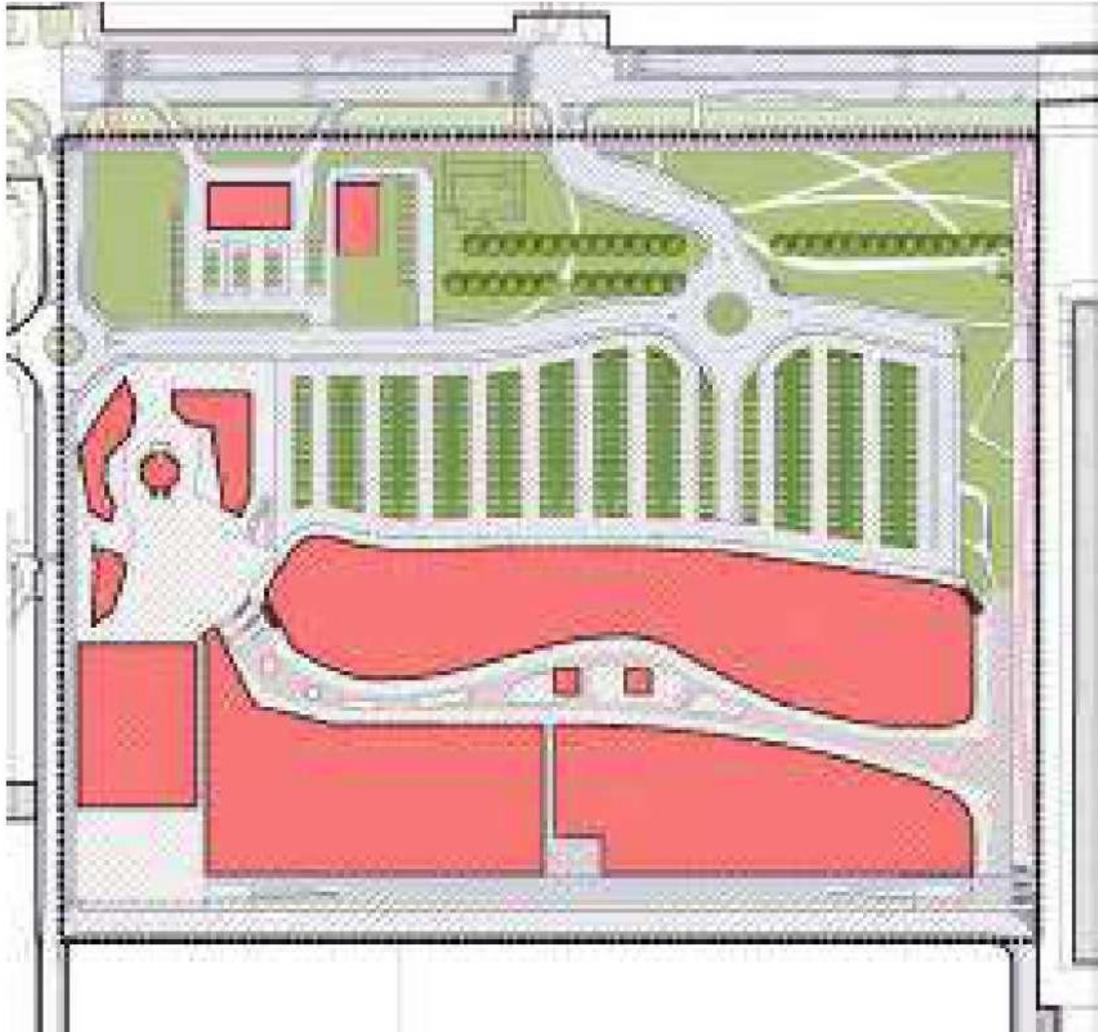


Figura 41- Schema finale dell'intervento previsto sulla zona

La vasca di laminazione in progetto riceve le acque provenienti dalle aree interne all'ambito di intervento (strade interne, parcheggi, pista ciclabile, aree verdi, tetti e aree pedonali impermeabili del centro commerciale).

Il dimensionamento della vasca viene fatto tramite le formule riportate nella parte precedente relativa alla metodologia da applicare.

I dati di partenza risultano:

Stot	9,33506
a	30,77
n	0,26

ϕ ante	0,3780596342
s	0,008



Figura 42- Ricostruzione dello stato attuale su QGis

Da questi valori è stato possibile ricavare il tempo di corrvazione del bacino e quindi costruire lo ietogramma di progetto nota l'intensità di pioggia. Da considerare inoltre che affinché la pioggia venga considerata con un tempo di ritorno di 50 anni il coefficiente a deve essere

$$Tc = Ta + Tp$$

$$t_{ai} = \left[\frac{3600^{\frac{n-1}{4}} \cdot 120 \cdot S_i^{0.30}}{S_i^{0.375} (a\phi)^{0.25}} \right]^{\frac{4}{n+3}}$$

Si ottiene :

Tc(h)	0,9301927376
--------------	--------------

L'intensità viene calcolata tramite la formula

$$i(t) = at^{n-1}$$

i(mm/h)	64,92429202
----------------	-------------

E quindi attraverso la formula razionale possiamo ricavare il valore della portata generata:

$$Q = 0,00278 \cdot \varphi \cdot S \cdot i$$

Q uscita (l/s)	636,9853467
Q uscita per ettaro (l/s*ha)	68,23580638

Si nota già come il valore di portata in uscita sia troppo elevato per essere sopportato dai sistemi fognari presenti in città . Questo suggerisce che sarebbe necessario inserire un opera di regolazione già allo stato attuale. Per fare questo viene applicato il metodo delle sole piogge allo stato attuale andando a diminuire la portata scaricata nelle fognature.

Il valore target che può essere accolto dalla fognatura corrisponde a circa 40 l/s*ha e quindi da tale considerazione si calcola l'opera che sarebbe necessaria allo stato attuale.

Riprendendo le formule del metodo delle sole piogge otteniamo:

$$t_{cr} = \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

E quindi :

tcr (h)	0,3100658898
----------------	--------------

$$V_{in} = S \cdot \varphi \cdot h(t) = S \cdot \varphi \cdot a \cdot t^n$$

Con t = tcr

Vin (m³)	1601,817202
-----------------	-------------

$$V_{out} = Q_{out} \cdot t = S \cdot u_{out} \cdot t$$

Con $Q_{out}=40 \text{ l/s*ha}$ e $t=tc_r$

Vout (m³)	416,8056506
-----------------------------	-------------

La dimensione minima della vasca da adottare per assicurare l'invarianza è quindi dato da:

$$V_{min} = V_{in} - V_{out}$$

Vmin (m³)	1185,011552
-----------------------------	-------------

Le dimensioni calcolate evidenziano che anche se non si parla di volumi elevati si ha comunque una forte quantità di deflusso che genera, come già accaduto, disagio nella zona.

Adesso viene invece calcolato il volume di invaso necessario dopo la trasformazione della superficie secondo quanto previsto da progetto.

La condizione post opera si presenta così:



Figura 43- Classificazione dell'area post intervento in base ai coefficienti di deflusso

0,2	prato
0,4	Spartitraffico alberato
0,7	Zona pedonale (mattonelle)
0,85	Asfalto
0,9	edificio

Tabella 9- Coefficienti di deflusso che descrivo l'area dopo l'intervento

Grazie alle osservazioni sul Gis è stato possibile calcolare il coefficiente medio ante e post operam. Dopo l'intervento il coefficiente risulta $\varphi=0,6723076205$

Da qui tramite il metodo delle sole piogge è possibile ricavare il valore del tempo critico di pioggia e quindi del volume d'invaso:

$$t_{cr} = \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

E quindi :

tcr (h)	0,6749976614
----------------	--------------

$$V_{in} = S \cdot \varphi \cdot h(t) = S \cdot \varphi \cdot a \cdot t^n$$

Con $t = t_{cr}$

Vin (m³)	3487,074526
----------------------------	-------------

$$V_{out} = Q_{out} \cdot t = S \cdot u_{out} \cdot t$$

Con $Q_{out}=40 \text{ l/s*ha}$ e $t=t_{cr}$

Vout (m³)	907,3646883
-----------------------------	-------------

La dimensione minima della vasca da adottare per assicurare l'invarianza è quindi dato da:

$$V_{min} = V_{in} - V_{out}$$

Vmin (m³)	2579,709838
-----------------------------	-------------

Le dimensioni calcolate sono considerevoli ed evidenziano bene la criticità a cui verrà sottoposta la zona una volta eseguito l'intervento.

Le differenze di volume che si generano sono frutto della differenza di portata in uscita con cui viene dimensionata la vasca. Inoltre proprio per questo variano anche le durate critiche dell'evento. Come si può vedere la differenza di volume è importante e considerando i costi di costruzione che si aggirano attorno ai 300 euro al mc si ha un risparmio considerevole.

Il metodo Lombardo nell'indicare 20 l/s*ha considera la superficie ante operam come completamente permeabile (situazione di verde assoluto $\varphi=0.1$) e questo genera volumi

considerevoli da immagazzinare. L'analisi del caso reale porta alla luce invece il fatto che essendo in condizioni di coefficiente di deflusso maggiori rispetto a quelli ipotizzati si ha un deflusso ante operam maggiore e che quindi il dimensionamento risulta sovrastimato nei volumi.

Tuttavia il metodo proposto si basa sull'assunzione che la portata in uscita risulti essere costante e sempre pari al valore ricavato dalla formula razionale (con valore massimo di 40 l/s*ha). Questo aspetto è tuttavia in contraddizione con il fenomeno reale in quanto negli istanti in cui le portate in entrata alla vasca risultino essere minori la vasca scaricherà a valle l'effettiva portata ricevuta dal deflusso.

Non potendo simulare questo fenomeno con la formula proposta si è deciso di eseguire un'analisi più dettagliata grazie al software SWMM per verificare che i volumi calcolati siano rappresentativi del fenomeno reale.

Il modello riportato su SWMM si basa non più sul coefficiente di deflusso ma, come visto in precedenza sul CN.

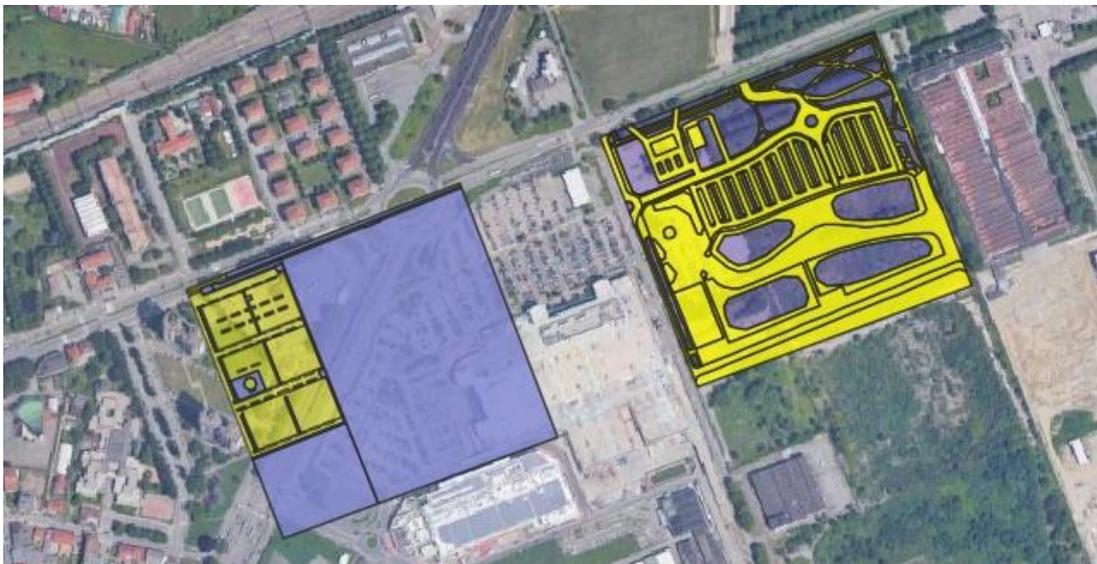


Figura 44- Ricostruzione dell'area classificata in base ai CN

Per la condizione post opera si ha questa conformazione dell'area.

Il dimensionamento della vasca viene fatto riportando i dati inseriti su QGis nel modello SWMM.

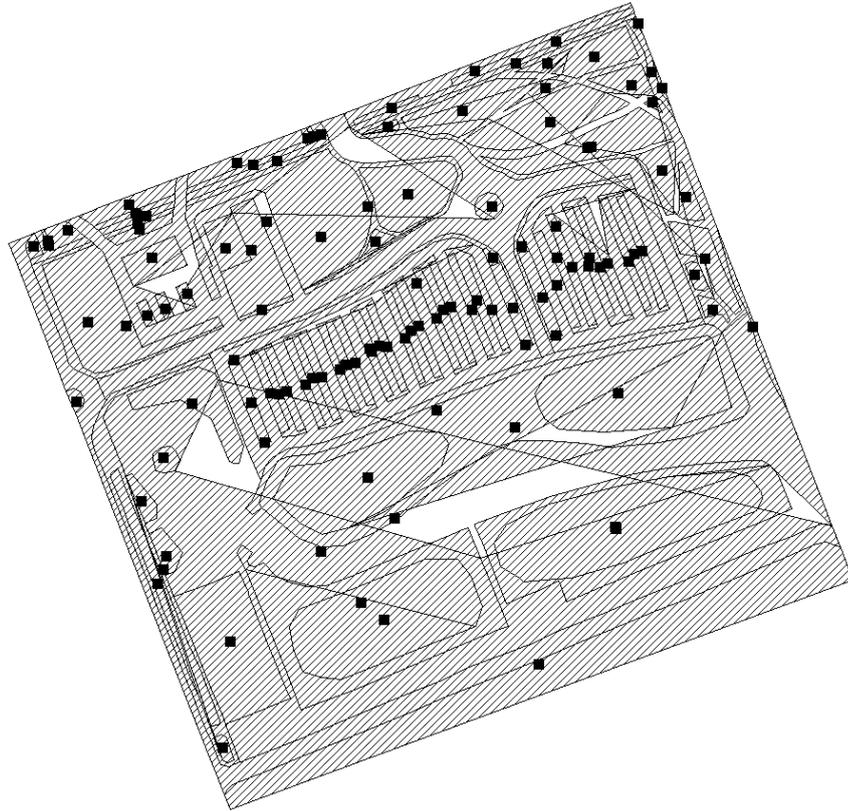


Figura 45-Ricostruzione del modello su SWMM

Si procede anche in questo caso alla calibrazione del modello nella condizione post intervento. Si fa ancora riferimento agli eventi di pioggia sopra citati per vedere se le differenze fra il modello con il coefficiente di deflusso e quello su SWMM basato sul CN. Si riportano di nuovo gli ietogrammi di pioggia degli eventi registrati:

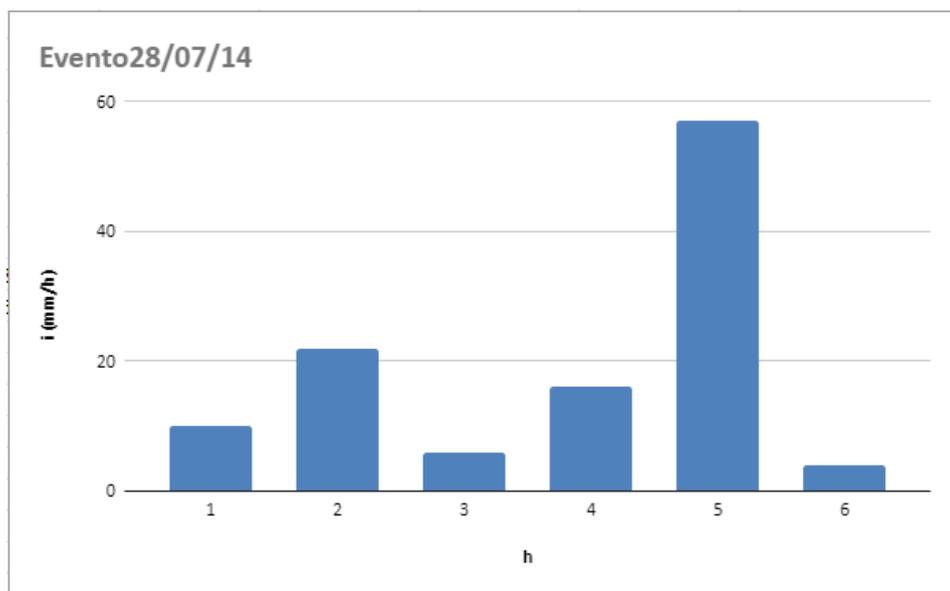
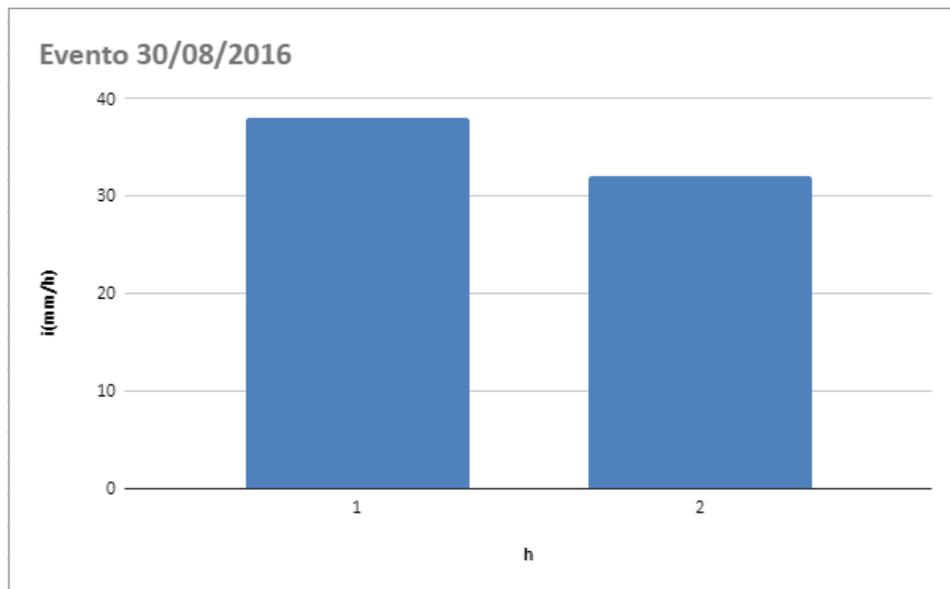


Figura 46- Ietogrammi di pioggia degli eventi simulati per la calibrazione

EVENTO DEL 30/08/2016

Stot (ha)	9,33506		1	38	
a	30,77		2	32	
n	0,26				
Phi ante	0,6723076205		Q (razionale)	0,663000018	m3/s
Tc	0,9669546722			663,000018	l/s
			Q per ettaro	71,02257703	l/s*ha

Tabella 10- Calcolo della portata in uscita con il metodo razionale per l'evento del 30/08/2016

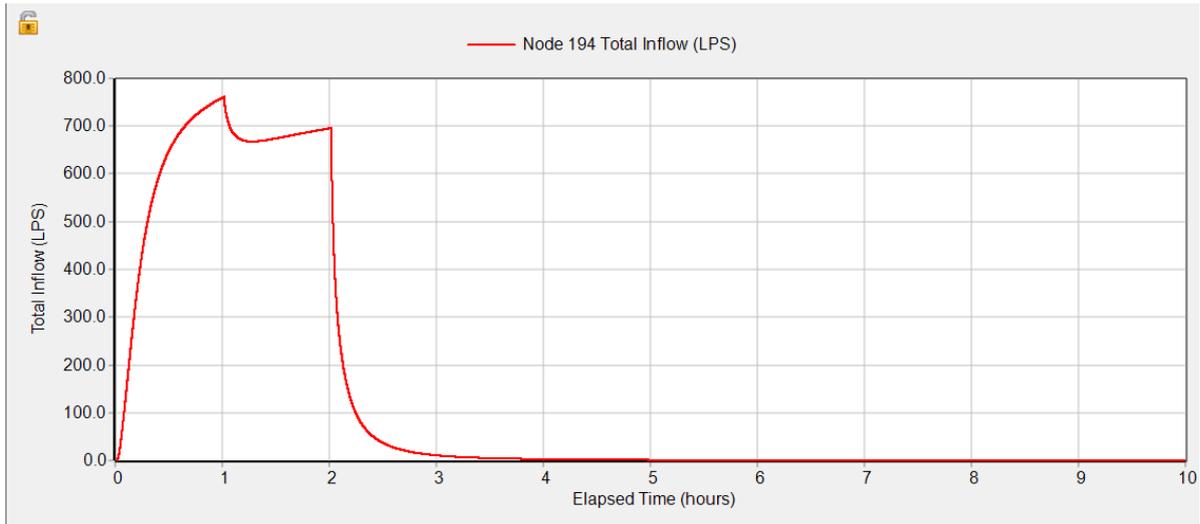


Figura 47- Idrogramma in uscita a seguito della simulazione dell'evento del 30/08/2016

Il valore massimo è di circa 750 l/s* che corrispondono a 80 l/s*ha

In questo caso la differenza fra SWMM e la formula razionale è del 13,7% quindi il modello è calibrato bene.

EVENTO DEL 28/07/2014

Stot (ha)	9,33506	1	10
a	30,77	2	22
n	0,26	3	6
Phi ante	0,6723076205	4	16
Tc	0,9669546722	5	57
		6	4
		Q(razionale)	0,994500027 m3/s
			994,500027 l/s
		Q per ettaro	106,5338656 l/s*ha

Tabella 10- Calcolo della portata in uscita con il metodo razionale per l'evento del 28/07/2014

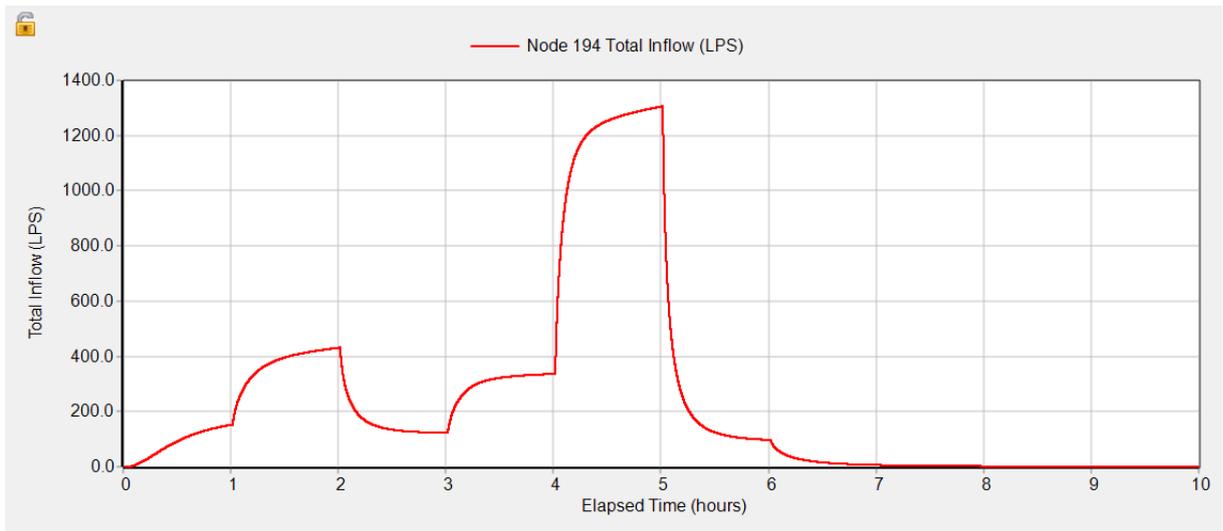


Figura 47- Idrogramma in uscita a seguito della simulazione dell'evento del 28/07/2014

Il valore massimo è di circa 1300 l/s* che corrispondono a 139 l/s*ha

In questo caso la differenza fra SWMM e la formula razionale è del 36,8 % quindi il modello, tenendo conto delle osservazioni già fatte in merito al particolare evento di pioggia, è calibrato bene.

7.4-Dimensionamento Vasca

I calcoli con il metodo delle sole piogge definiscono un tempo critico per il massimo valore di volume immagazzinato in vasca. Le grandezze riportate fanno tutte riferimento a piogge di progetto con tempo di ritorno di 50 anni. Il tempo critico vale:

$$t_{cr} = \left(\frac{Q_{out}}{S \cdot a \cdot \varphi \cdot n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

Dove Q_{out} è il valore della portata di scarico dalla vasca, impostata con valore massimo a 40 l/s*ha, e φ è il valore del coefficiente di deflusso post trasformazione (nel nostro caso 0,67).

Inserendo i valori all'interno $T_{cr} = 0,6749976614$ h

Viene calcolata l'intensità di pioggia relativa a un evento di durata pari al tempo critico:

$$i(t) = at^{n-1}$$

Con $t = T_{cr}$

I (mm/h)	82,314
----------	--------

Verrà inserito quindi in SWMM questo valore di pioggia e verificato il volume da adottare.

Dalla simulazione di SWMM con questo ietogramma otteniamo:

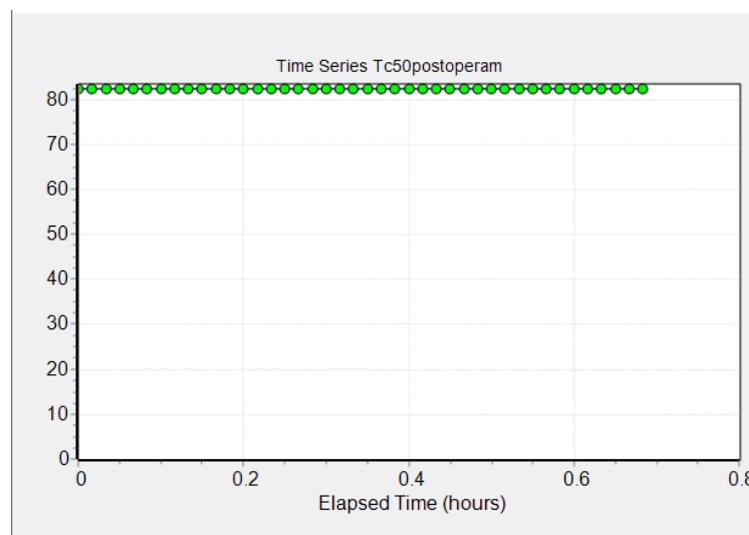


Figura 48- Ietogramma di progetto per tempo di ritorno 50 anni e scarico della vasca di 40 l/s*ha

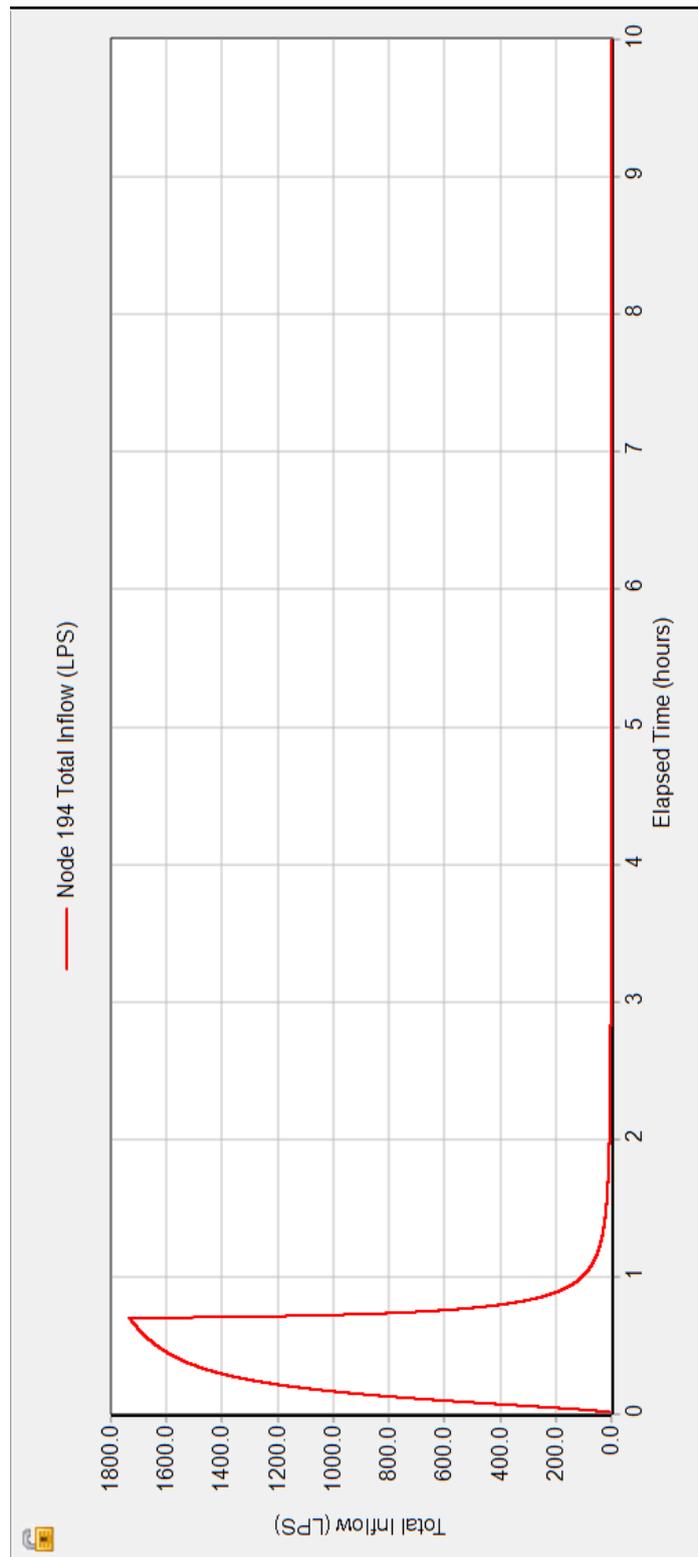


Figura 49- Idrogramma di progetto per tempo di ritorno 50 anni e scarico della vasca di 40 l/s*ha

Con un picco di circa 1750 l/s corrispondente a 188 l/s*ha.

Adesso viene riportato il grafico dell'andamento del volume all'interno della vasca di laminazione.

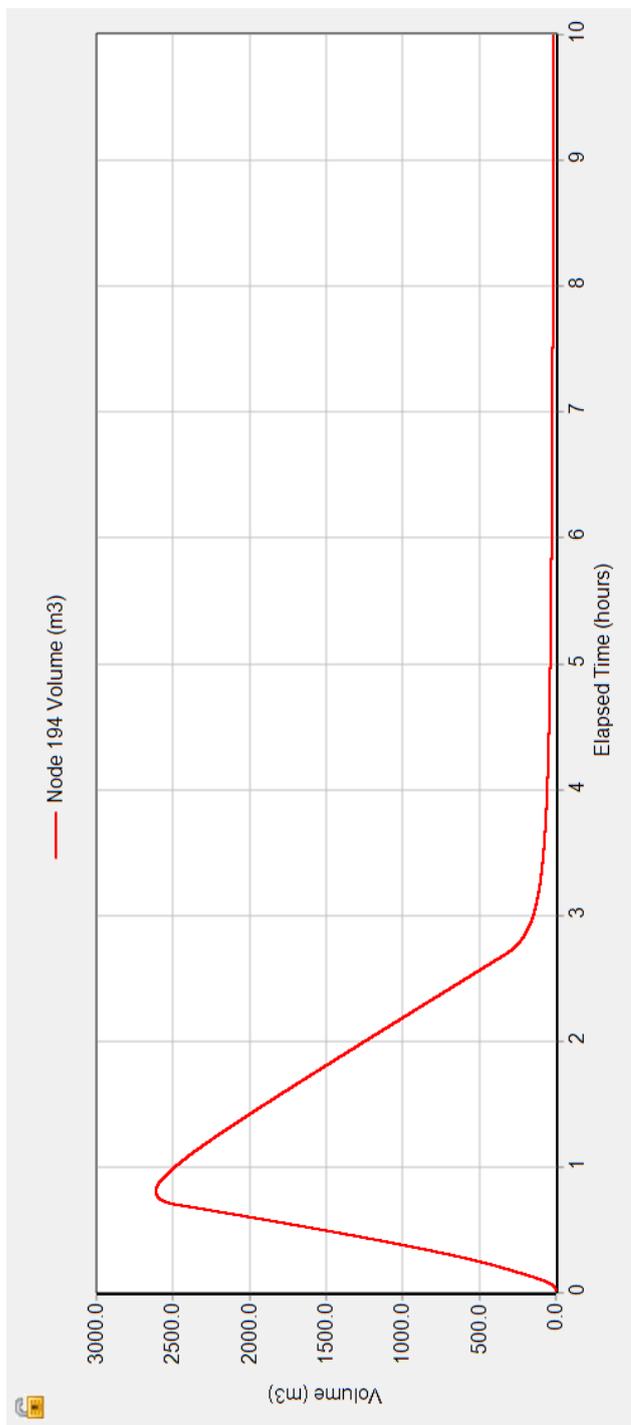


Figura 50- Volume della vasca per tempo di ritorno 50 anni e scarico della vasca di 40 l/s*ha

Il volume della vasca secondo il modello SWMM è di 2612,204 mc. Il valore è leggermente più alto rispetto a quello calcolato con il metodo sole piogge in quanto in tal caso la portata in uscita è costante pari a 40 l/s*ha. Su SWMM invece quando la portata in entrata nella vasca è minore di tale valore allo stesso modo lo sarà quella in uscita. Per questo la differenza è piccola ma presente.

Si vede infine come la presenza dell'opera di invarianza generi un effetto positivo su ciò che accade a valle della stessa, andando a diminuire il picco di portata in uscita prolungando tuttavia l'evento.

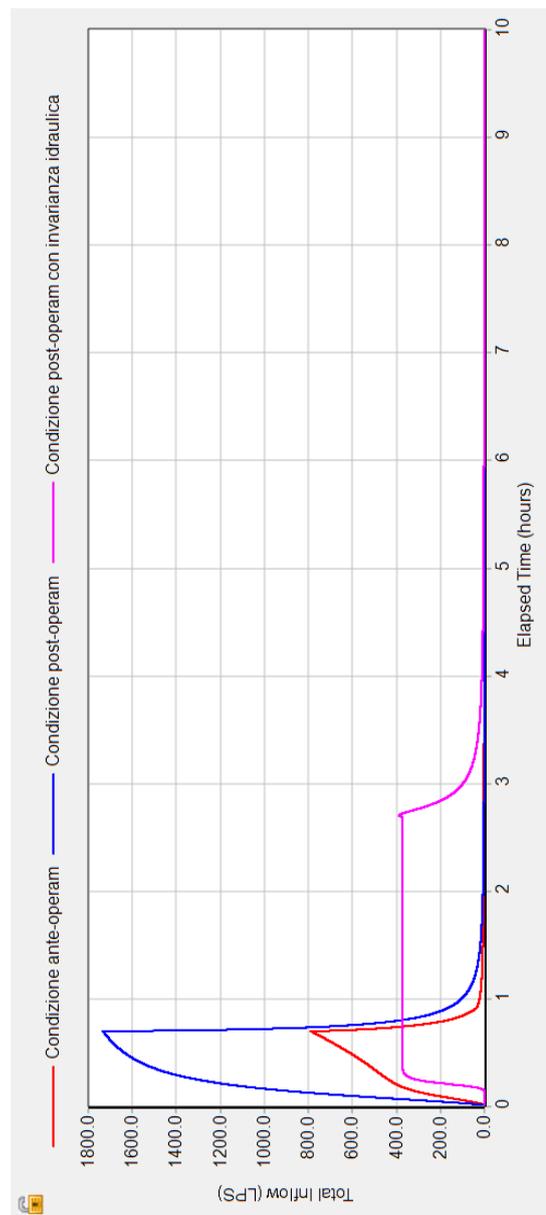


Figura 51- Variazione dell'idrogramma in uscita nelle condizione pre e post intervento e con l'introduzione di un'opera di invarianza

Se si eseguono invece i calcoli con il metodo Lombardo che prevede una portata di scarico di 20 l/s*ha a otteniamo quanto segue:

PORTATA IN USCITA 20 L/S*HA

Si devono ricalcolare il tempo critico di evento che massimizza il volume della vasca e quindi l'intensità di pioggia relativa.

Tcr (h)	1,72
i (mm/h)	41,1616

Su SWMM viene quindi riportato il seguente ietogramma:

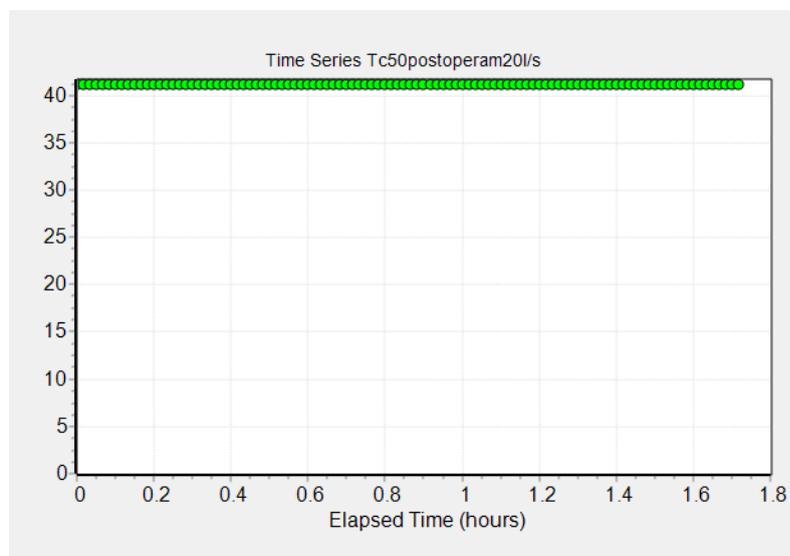


Figura 52- Ietogramma di progetto per tempo di ritorno 50 anni e scarico della vasca di 20 l/s*ha

Che genera come risposta il seguente idrogramma in uscita:

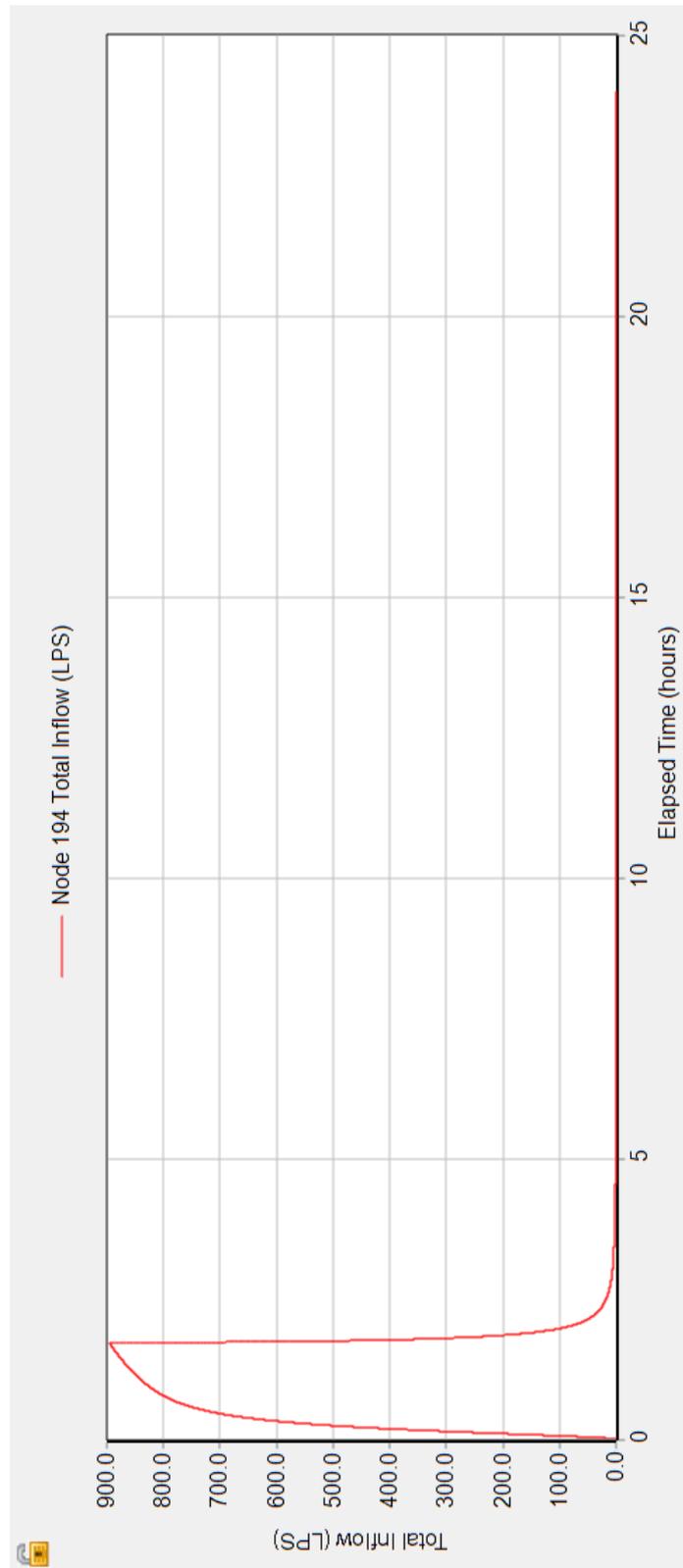


Figura 53- Idrogramma di progetto per tempo di ritorno 50 anni e scarico della vasca di 20 l/s*ha

Con un picco di portata di 900 l/s che corrispondono a 96,41 l/s*ha.

Il volume immagazzinato nella vasca è il seguente:

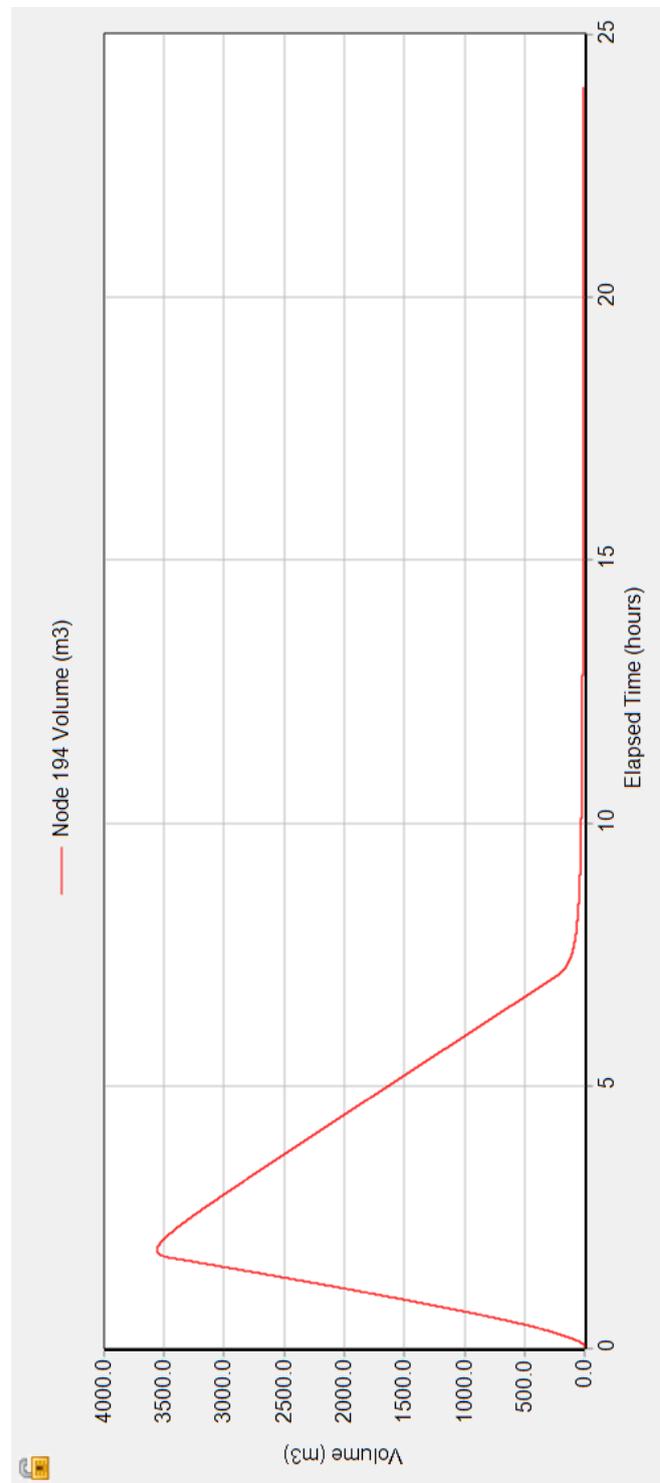


Figura 54- Volume della vasca per tempo di ritorno 50 anni e scarico della vasca di 20 l/s*ha

Il valore della vasca secondo il modello SWMM è di 3559,699 mc. Infine si nota la variazione dell'idrogramma in uscita nelle condizioni ante e post operam e dopo l'applicazione della vasca per l'invarianza.

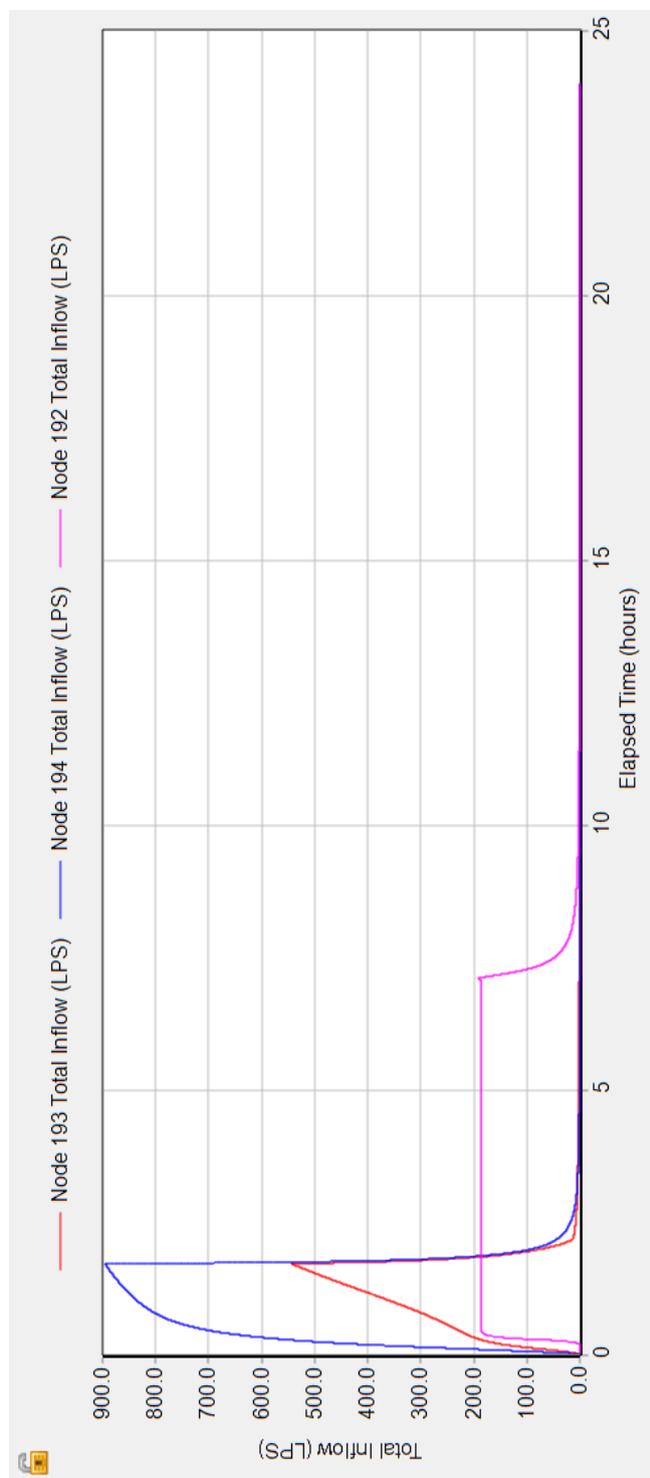


Figura 55- Variazione dell'idrogramma in uscita nelle condizione pre e post intervento e con l'introduzione di un'opera di invarianza

Come riportato infine dal PTCP2 deve essere garantito lo svuotamento dei sistemi di invarianza idraulica nelle 48 ore successive alla fine dell'evento, dato che di fatto è verificato nelle situazioni analizzate.

Riassumendo quindi i risultati ottenuti con le diverse procedure di calcolo possiamo evidenziare le differenze che si generano e da cosa dipendono:

ANTE-OPERA	Qout=40l/s*ha	Qout=40l/s*ha	Qout=20l/s*ha (LOMBARDIA)	Qout=20l/s*ha (LOMBARDIA)
	METODO DELLE SOLE PIOGGE (COEFF.DEF.)	MODELLO SWMM (CURVE NUMBER)	METODO DELLE SOLE PIOGGE (COEFF.DEF.)	MODELLO SWMM (CURVE NUMBER)
Volume da immagazzinare (mc)	1185,011552	751,258	1511,78447	980,113

POST-OPERA	Qout=40l/s*ha	Qout=40l/s*ha	Qout=20l/s*ha (LOMBARDIA)	Qout=20l/s*ha (LOMBARDIA)
	METODO DELLE SOLE PIOGGE (COEFF.DEF.)	MODELLO SWMM (CURVE NUMBER)	METODO DELLE SOLE PIOGGE (COEFF.DEF.)	MODELLO SWMM (CURVE NUMBER)
Volume da immagazzinare (mc)	2579,709838	2612.204	3291,07785	3559,699

Le differenze che si generano nelle due condizioni sono frutto delle diverse permeabilità del terreno. Nella condizione di pre intervento il terreno ha una capacità di infiltrazione molto alta e quindi la natura del metodo C N fa sì che il deflusso avvenga dopo un certo tempo e con valori minori di quelli registrati con il metodo proposto che invece genera deflusso istantaneo senza trattenere acqua. Questo vale sia che lo scarico sia dimensionato con 20 l/s*ha che con 40 l/s*ha .

Nella situazione post intervento invece la natura del CN non riesce a sopperire allo scarso grado di infiltrazione del terreno. Di fatto il deflusso pur partendo in ritardo raggiunge comunque valori maggiori rispetto a quelli calcolati con il metodo.

8-Conclusioni

La differenza che si genera nelle diverse condizioni di simulazione è evidente, questo perché variano oltre che alla portata in uscita anche i tempi critici di evento. Il valore da noi assegnato di 40 l/s*ha è frutto dell'analisi effettuata sulla zona in esame ma tuttavia non deve essere preso come valore assoluto. Il metodo vuole proprio evidenziare come la singolarità dei casi renda inadeguata l'assegnazione di un valore univoco in quanto si rischia di sovradimensionare di molto opere che invece potrebbero richiedere costi minori.

Proprio per questo analizzare la condizione ante operam tramite la formula razionale ci permette di avere un quadro di quello che sta succedendo e di come il territorio si evolverà. Come sottolineato in precedenza infatti qualora le zone prese in esame non presentassero criticità per eventi eccezionali, frutto di un adeguato sistema fognario per la raccolta delle acque, sarebbe possibile adottare valori di portata allo scarico della vasca anche maggiori dei 40 proposti nel lavoro. Questo porterebbe a costi ancora minori di costruzione delle opere e quindi a un maggior rendimento dal punto di vista ingegneristico.

Si è quindi giunti ad evidenziare quanto il rispetto dei principi di invarianza idraulica risultino fondamentali e di come una giusta conoscenza del territorio risulti cruciale per il buon funzionamento dei sistemi idraulici soprattutto in ambito urbano. Fra le più grandi problematiche nella stesura di questo, ma anche di qualunque altro metodo, vi è indubbiamente la conoscenza dettagliata dello stato attuale delle aree in cui sono previsti gli interventi. La costruzione di modelli dettagliati e calibrati risulta quindi sempre di difficile ottenimento. Proprio per questo si è cercato, pur validando quanto fatto anche sui software di calcolo, di creare una metodologia che permettesse una semplice attribuzione dei coefficienti di deflusso in modo da evitare una corposa modellazione a livello di programmi.

